

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE CIVIL  
N° : ...../2025



DOMAINE : SCIENCES TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENIE CIVIL  
SPECIALITE: MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention  
du diplôme de Master Académique**

**Par : AICHE BORHAN EDDINE & BAKOUR ACHREF**

**Intitulé**

**Comportement d'un béton ordinaire à sable recyclé  
de type céramique sanitaire dans un milieu acide**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>RAHMOUNI Zine El Abidine</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Chikouche Mohamed Aziz</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>AMRIOU Abderrachid</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Examineur</b>

**Année Universitaire : 2024 /2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout Puissant, de nous  
Avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité ce  
modeste travail.*

*Nous tenons également à exprimer nos sincères  
remerciements à notre encadreur,*

***Mr Mohamed Aziz Chikouche***

*Pour avoir proposé ce thème, et lui exprime notre  
Gratitude, pour la disponibilité et la patience dont il a fait  
Preuve et dont les précieux conseils et les remarques  
Pertinentes et pour son suivi continuel tout le long de la  
Réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au :*

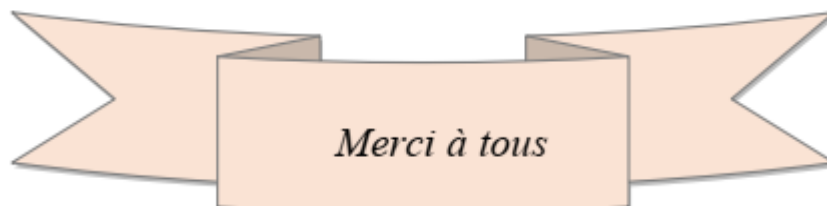
***Dr, Ibrahim Slimani*** pour nous avoir reçus dans son bureau,

***Dr, Wahiba,*** le responsable du laboratoire,

*Enfin, Nous exprimons notre profonde gratitude à nos Parents,  
frères, sœurs et à toute la famille pour leurs*

*Encouragements et leurs prières, à nos amis et à nos enseignants*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la fin et au  
Développement de ce travail.*



# DEDICACE

À ma chère mère, que Dieu t'accorde Sa miséricorde infinie.

Tu es partie trop tôt, mais ton amour, ton éducation et tes prières  
restent à jamais gravés dans mon cœur.

Ce mémoire est le fruit de ton sacrifice, de ton courage, et de ton amour  
inconditionnel. Je te le dédie avec tout mon amour, ma gratitude et une profonde  
nostalgie.

À mon père bien-aimé, source de sagesse, de patience et de soutien indéfectible,  
merci pour ta présence constante et tes encouragements inestimables.

À mes chers frères et sœurs, Abbas et Abrar, merci pour votre amour, votre  
compréhension et vos prières silencieuses.

À mes fidèles amis Abdelhak, Bahaa et Ahmed, Larbi, Abdelrachid pour les  
moments partagés, le soutien inlassable et l'amitié sincère tout au long de ce  
parcours.

À mes camarades de promotion, en particulier Nour elhouda ou Iman ou Soulef  
ou siham avec qui j'ai partagé les joies, les défis, les veilles d'examen et les  
réussites... Cette réussite est aussi la vôtre.

À mes enseignants du primaire, du collège et du lycée, qui ont allumé en moi la  
flamme du savoir, À mes professeurs d'université,

En particulier Monsieur Sillini et Monsieur Nasri, dont les conseils et la  
bienveillance ont profondément marqué mon chemin académique.

À vous tous, je dédie humblement ce travail, en témoignage d'amour, de respect  
et de profonde reconnaissance

**Aiche Borhan Eddine**

# DEDICACE

À ceux qui ont été ma lumière et mon guide tout au long de ce chemin, A mes chers parents, À mon père bien-aimé mon pilier mon modèle,

Et à ma tendre mère, source d'amour, de tendresse et de prières...

Je vous dédie le fruit de mes efforts et de mes années d'étude.

À mes frères et sœur : Dounia, Ayoub et Abdelhamid,

Merci pour votre soutien inconditionnel, votre présence précieuse et vos encouragements constants.

À mes amis fidèles : Ahmed, Baha, Abdelhaq et Larbi, Abdelrachid

Merci pour votre amitié sincère, vos conseils et vos encouragements tout au long de ce parcours.

À mes camarades de promotion, en particulier Nour elhouda ou Iman ou Soulef ou siham avec qui j'ai partagé les joies, les défis, les veilles d'examen et les réussites... Cette réussite est aussi la vôtre.

À mes enseignants du primaire, du moyen et du secondaire,

Vous avez été les premiers à semer en moi la graine du savoir. Recevez toute ma reconnaissance.

À mes professeurs à l'université, en particulier M. Silini et M. Nasri,

Merci pour votre accompagnement, vos conseils avisés et votre confiance.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce chemin...

Je vous dédie cette modeste œuvre, en témoignage de mon profond respect et de ma gratitude sincère.

**Bakour Achref**

# SOMMAIRE

Remerciements.....	I
DEDICACE.....	II
DEDICACE.....	III
SOMMAIRE .....	IV
المُلخَص .....	V
Résumé.....	VI
Abstract .....	VII
Introduction Générale.....	1

## *CHAPITRE I*

### *Le Béton Et Ses Constituants*

I.1. Historique .....	4
I.2. Définition .....	4
I.3. Les constituants du béton.....	5
I.3.1 Le ciment.....	5
I.3.1.1. Fabrication des ciments .....	6
I.3.1.2. Classification des ciments .....	7
I.3.1.3. Principales caractéristiques.....	7
I.3.2. Les granulats .....	8
I.3.2.1. Classification des granulats .....	8
I.3.2.1. Caractéristiques des granulats .....	10
I.3.3. L'eau de gâchage.....	11
I.3.3.1. La qualité de l'eau de gâchage .....	12
I.3.4. Les adjuvants.....	12
I.3.4.1. Les entraîneurs d'air.....	13
I.3.4.2. Les réducteurs d'eau .....	14
I.3.4.3. Les retardateurs .....	15
I.3.4.3. Les adjuvants de contrôle de l'hydratation.....	15
I.4. Propriétés du béton.....	16
I.4.1. Le béton à l'état frais .....	16
I.4.2 Le béton durci .....	18
I.5. Différents types de béton .....	19
I.5.1. Le béton léger .....	19
I.5.2. Le béton à haute résistance .....	20

I.5.3. Le béton réfractaire .....	21
I.5.4. Le béton à haute densité .....	22
I.5.5. Le béton à granulats recyclé .....	22

## **CHAPITRE II**

### *Causes et effets de dégradation des bétons*

Introduction .....	27
II.1. Mécanismes de transport à travers le béton .....	27
II.2. La dégradation du béton.....	29
II.2.1. Attaque par les sulfates .....	29
II.2.2. Attaque par l'eau de mer .....	30
II.2.3. Réaction alcali-granulat et alcali-silice.....	32
II.2.4. Attaque par les acides .....	34
II.2.5. Attaque par le gel-dégel .....	36
II.2.6. La résistance au feu.....	39
II.3. Les outils de l'approche performancielle .....	42
II.3.1 Les indicateurs de durabilité .....	43
II.3.2. Les essais de performance et de caractérisation.....	45

## *Chapitre III*

### *Essais, résultats et discussion*

III-1 Introduction .....	
III-2-Les matériaux utilisés .....	49
III-3- Caractérisation des matériaux utilisés .....	50
III-3-1-Les sables .....	50
III-3-1-1-La masse volumique, porosité et indices des vides (NF P 18-555).....	50
III-3-1-2-Equivalent de sable (NF P 18-598) .....	55
III-3-1-4-Analyse granulométrique (NF P 18-560) .....	57
III-3-2-Le gravier.....	60
III-3-2-1- La masse volumique absolue.....	60
III-3-2-2-La masse volumique apparente .....	60
III-3-2-3-Porosité, Compacité et Indice des vides des graviers : .....	61
III-3-2-4-Analyse granulométrique .....	62
III-3-3- Caractéristiques du ciment utilisé.....	63
III-3-4- Eau de gâchage.....	63
III-4-Formulation du béton .....	63
III-4-1-Malaxage des bétons .....	64

<b>III-4-2-Confection des éprouvettes .....</b>	<b>65</b>
<b>III-4-3-Moulage et démoulage .....</b>	<b>65</b>
<b>III-5-Essai Sur béton frais .....</b>	<b>65</b>
<b>III-5-1-Affaissement au cône d'Abrams (NF P18-451) .....</b>	<b>65</b>
<b>III-6-Essais sur béton durci .....</b>	<b>67</b>
<b>III-6-1- La perte de masse.....</b>	<b>67</b>
<b>III-6-2- La perte de volume .....</b>	<b>69</b>
<b>III-6-3- La perte de résistance .....</b>	<b>70</b>
<b><i>Conclusion Generale</i> .....</b>	<b>73</b>

**Listes des figures**

<b>Figure I.1. Production mondiale du ciment en 2022</b>	<b>5</b>
<b>Figure I.2. Processus de fabrication du ciment.</b>	<b>6</b>
<b>Figure I.3. Granulats pour béton.</b>	<b>9</b>
<b>Figure I.4. Forme des granulats.</b>	<b>10</b>
<b>Figure I.5. Vibration des éprouvettes de béton.</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.6. Béton élaboré avec un adjuvant entraîneur d'air.</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.7. Mécanisme de travail d'un réducteur d'eau dans le béton.</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.8. Transport d'un béton avec adjuvant retardateur de prise.</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.9. Mesure de masse volumique du béton frais.</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.10. Mesure de de la teneur en air du béton frais.</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.11.Éprouvette de béton mise à compression.</b>	<b>19</b>
<b>Figure I.12. Diagramme contrainte-déformation pour le béton sous compression uniaxiale.</b>	<b>19</b>
<b>Figure I.13. Relation entre la masse volumique cuite et la conductivité thermique des bétons réfractaires.</b>	<b>21</b>
<b>Figure I.14. Affaissement des bétons à céramique sanitaire selon Rashid et coll.</b>	<b>23</b>
<b>Figure I.15. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Rashid et coll.</b>	<b>24</b>
<b>Figure I.16. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Alves et coll.</b>	<b>25</b>
<b>Figure I.17. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Pacheco-Torgal &amp; Jalali.</b>	<b>25</b>
<b>Figure II.1. Dégradation des pieux par attaque sulfatique.</b>	<b>28</b>
<b>Figure II.2. Résistance à la compression des bétons élaboré par Ambrose et coll.</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.3. Représentation schématique de l'attaque du béton par l'eau de mer</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.4. a) Gel de silicate à l'intérieur</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.5. Gel alcalin-silice dans un pore d'un d'un fragment de verre de bouteille (flèches ).</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.6. Perte de résistance à la compression des bétons élaborés par Asaad et coll.</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.7. Détérioration d'un revêtement de pont par attaque de gel.</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.8. Masse écaillée en fonction du cycle de gel-dégel élaborés par Medina et coll.</b>	<b>40</b>

<b>Figure II.9. Changement de couleur d'un bâtiment sous effet d'un incendie.</b>	<b>42</b>
<b>Figure II.10. Valeurs de résistance à la compression des pâtes de ciments élaborés par El-Gamal et coll. a) refroidissement progressif b) refroidissement brutal.</b>	<b>43</b>
<b>Figure II.11. Montage pour la mesure de la porosité accessible à l'eau.</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.12. Outils de test pour l'essai de diffusion des ions chlorures.</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.13. Dispositif de mesure de la résistivité électrique du béton.</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.14. Description schématique pour l'essai d'absorption capillaire du béton.</b>	<b>47</b>
<b>Figure II.15. Progression du front de carbonatation.</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.1. Eprouvtes graduées</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.2. Entonnoir à sable.</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.3. Agitateur pour équivalent de sable</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.4. Equivalent des céramique visuel et piston. able pour sable</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.5. Analyse granulométrique par tamisage</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.6. Courbe Dreux Goriss du béton B0.</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.7. Malaxage du béton ordinaire</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.8. Confection des bétons étudiés</b>	<b>68</b>
<b>Figure III.9. Essai d'affaissement au cône d'Abrams</b>	<b>68</b>
<b>Figure.III.10. Affaissement des différents bétons.</b>	<b>68</b>
<b>Figure.III.11. Perte de masse des éprouvettes de bétons.</b>	<b>70</b>
<b>Figure.III.12. Forme des éprouvettes de bétons Après 45 jours d'immersion.</b>	<b>72</b>
<b>Figure III.13. Résistance à la compression des différents bétons [Mpa]</b>	<b>73</b>

**Listes des tableaux**

<b>Tableau I.1. Classement des ciments selon les principaux 42constituants</b>	<b>7</b>
<b>Tableau I.2. Valeurs limites des résistances à la compression43</b>	<b>7</b>
<b>Tableau I.3. Différentes classes de consistance du béton frais 45</b>	<b>16</b>
<b>Tableau I.4. Affaissement et masse volumique des bétons fabriqués par Medina et coll.</b>	<b>24</b>
<b>Tableau III.1. Les différents matériaux utilisés pour la confection des béton</b>	<b>51</b>
<b>Tableau III.2. Masse volumique absolue du sable de dune</b>	<b>53</b>
<b>Tableau.III.3 Masse volumique absolue du sable de céramique</b>	<b>53</b>
<b>Tableau III.4. Masse volumique apparente du sable de dune à l'état lâche</b>	<b>54</b>
<b>Tableau III.5. Masse volumique apparente du sable de céramique à l'état lâche</b>	<b>54</b>
<b>Tableau III.6.Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact</b>	<b>54</b>
<b>Tableau III.7. Masse volumique apparente du sable de céramique à l'état compact</b>	<b>55</b>
<b>Tableau III.8. Porosité, compacité et indice des vides pour le sable de dune</b>	<b>55</b>
<b>Tableau III.9. Porosité, compacité et indice des vides pour le sable céramique</b>	<b>56</b>
<b>Tableau III.10. Equivalent de sable pour sable de dune</b>	<b>56</b>
<b>Tableau III.11. Equivalent de sable pour sable céramique visuel et piston</b>	<b>58</b>
<b>Tableau III.12. Teneur en eau du sable de dune</b>	<b>59</b>
<b>Tableau III.13. Teneur en eau du sable céramique</b>	<b>59</b>
<b>Tableau III.14. Analyse granulométrique du sable de dune</b>	<b>61</b>
<b>Tableau III.15. Analyse granulométrique du sable céramique</b>	<b>61</b>
<b>Tableau III.16. La masse volumique absolue des graviers</b>	<b>62</b>
<b>Tableau III.17. La masse volumique apparente des différents granulats</b>	<b>62</b>
<b>Tableau III.18. La porosité, compacité et indices des vides des graviers</b>	<b>63</b>
<b>Tableau III.19. L'analyse granulométrique du gravier 3/8</b>	<b>63</b>
<b>Tableau III.20. L'analyse granulométrique du gravier 8/16</b>	<b>64</b>
<b>Tableau III.21. L'analyse granulométrique du gravier 16/25</b>	<b>64</b>
<b>Tableau III.22. Quelque élément chimique du ciment utilisé.</b>	<b>65</b>
<b>Tableau.III.23. Formulation du béton pour 1m<sup>3</sup></b>	<b>65</b>

## المخلص

ترتبط التركيبة السكانية ارتباطاً وثيقاً بالطلب على مواد البناء. فالنمو السكاني يؤدي مباشرةً إلى زيادة الطلب على السكنات، وبالتالي زيادة استهلاكها. ومن بين هذه المواد، تُعدّ الخرسانة حالياً الأكثر طلباً في قطاع البناء.

لا شك أن هذه المادة الأساسية للبناء، لها تأثيراً بيئياً كبيراً بسبب الإفراط في إنتاج الأسمت والحصى، مما يؤدي إلى استهلاك كبير للموارد الطبيعية غير المتجددة وتدمير النظام البيئي.

ولتقليل التأثير البيئي، يُعدّ استخدام الحصى المُعاد تدويره في إنتاج الخرسانة بديلاً شائعاً بشكل متزايد. ويمكن دمج العديد من أنواع الحصى مع الحصى الطبيعي، مثل الخرسانة المُعاد تدويرها والإطارات والطوب.

في دراستنا، بحثنا في تأثير التفاعل الكيميائي لمحاليل  $H_2SO_4$  و  $HCl$  على الخرسانة العادية المُصنّعة عن طريق استبدال 10 و 20 و 30% من وزن رمل الكثبان الرملية برمال السيراميك الصحي. بعد نضج العينات، رُصدت قوة الضغط والكتلة والحجم. بفعل تأثير هذه المحاليل، انخفضت هذه الخصائص المدروسة نتيجة تفاعل الوسط الحمضي مع مركبات الكالسيوم في الخرسانة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة، إعادة التدوير، الرمل، السيراميك الصحي، الوسط الحمضي.

## Résumé

La démographie est étroitement liée à la demande de matériaux de construction. La croissance démographique entraîne directement une augmentation de la demande de logements et, par conséquent, une consommation accrue de matériaux de construction. Parmi ces matériaux, le béton est actuellement le plus recherché dans le secteur de la construction.

Ce matériau de construction est certes essentiel, mais il a un impact environnemental important en raison de la production excessive de ciment et des granulats, entraînant une forte consommation de ressources naturelles non renouvelables et un écosystème dévasté.

Pour réduire l'impact environnemental, l'utilisation de granulats recyclés dans la production de béton est une alternative de plus en plus appréciée. Plusieurs granulats peuvent être incorporés aux granulats naturels, tels que le béton, les pneus et les briques recyclés.

Dans notre étude, nous avons étudié l'effet de l'attaque chimique par des solutions de  $H_2SO_4$  et de  $HCl$  sur du béton ordinaire fabriqué en remplaçant 10, 20 et 30 % en poids de sable de dune par du sable céramique sanitaire. La résistance à la compression, la masse et le volume ont été mesurés après maturation des échantillons. Sous l'influence de ces solutions, les propriétés étudiées ont diminué en raison de la réaction du milieu acide avec les composés calciques du béton.

**Mots clés :** Béton, recyclage, sable, céramique sanitaire, milieu acide.

## Abstract

Demographics are closely linked to the demand for building materials. Population growth directly leads to an increase in housing demand and, consequently, increased consumption of building materials. Among these materials, concrete is currently the most sought-after in the construction sector.

This building material is certainly essential, but it has a significant environmental impact due to the excessive production of cement and aggregates, leading to a high consumption of non-renewable natural resources and a devastated ecosystem.

To reduce environmental impact, an increasingly popular alternative is the use of recycled aggregates in concrete production. Several aggregates can be incorporated alongside natural aggregates such as recycled concrete, tires, and bricks.

In our study, we investigated the effect of chemical attack by  $H_2SO_4$  and  $HCl$  solutions on ordinary concrete made by substituting 10, 20, and 30% by weight of dune sand with sanitary ceramic sand. Compressive strength, mass, and volume were monitored after the specimens matured. Under the influence of these solutions, the studied properties decreased due to the reaction of the acidic medium with the calcium compounds in the concrete.

**Keywords:** Concrete, recycling, sand, sanitary ceramics, acidic medium.

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

### **Introduction Générale**

Un mélange de béton typique comprend du ciment, du sable, du gravier et de l'eau. Ce mélange omniprésent et essentiel, a des impacts environnementaux importants tout au long de son cycle de vie. Ces impacts découlent de la production du ciment, un ingrédient clé, et de son utilisation dans la construction. Les principales préoccupations concernent les émissions de gaz à effet de serre et l'épuisement des ressources naturelles. L'utilisation intensive de granulats en quantités importantes, a un impact significatif sur l'environnement. La dépendance du secteur de la construction aux granulats naturels est insoutenable en raison de leur nature non renouvelable.

A l'inverse de la solidité du béton, les céramiques sanitaires sont fabriquées à partir de diverses matières premières, dont l'argile, le feldspath, le quartz et d'autres minéraux, mais de nature très fragile. Ces matériaux sont mélangés pour créer une pâte d'argile qui est ensuite façonnée à la forme souhaitée grâce à diverses techniques, telles que le moulage, le pressage ou l'extrusion. La pâte d'argile est ensuite cuite à haute température dans un four pour obtenir le produit fini.

Les déchets de céramique sanitaire, souvent issus de produits défectueux ou cassés, sont des déchets industriels non biodégradables. Ces déchets comprennent les produits défectueux rejetés lors du contrôle qualité, les matières premières excédentaires et les moules obsolètes. En plus de ces imperfections, le transport, le dépôt et la pose de ces produits dans leurs places produisent plus de déchets.

Il est possible de réutiliser les déchets dans le béton pour produire du béton neuf, un procédé appelé recyclage. Ce recyclage consiste à trier et broyer les déchets pour créer des granulats recyclés, qui peuvent ensuite remplacer les granulats naturels dans les mélanges de béton frais. Le recyclage réduit la dépendance aux matériaux naturels et minimise les déchets envoyés en décharge. Des matériaux de récupération, tels que les pneus usagés, des cendres volantes, des déchets de verre et de plastique, peuvent être incorporés au béton afin de réduire les déchets et d'améliorer ses propriétés. Ces matériaux peuvent remplacer partiellement ou totalement les composants traditionnels du béton, comme les granulats et le ciment.

### **Objectif du mémoire**

Dans l'esprit de recyclage des matériaux encombrants, on propose dans ce travail, la réutilisation des déchets de types céramiques sanitaire dans le béton ordinaire. Le déchet sera introduit comme granulats fins à des proportions variées. Après maturité, les éprouvettes subiront une agression chimique où la résistance à la compression, la masse et le volume seront mesurés.

### **Structure du mémoire**

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons divisé notre thèse en trois chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

\*Le premier chapitre est dédié à la connaissance des constituants du béton, ces différents types, ainsi que ces propriétés à l'état frais et durci.

\*Le deuxième chapitre traite les différentes causes de dégradation du béton, la façon de les détecter et les remèdes possibles.

\*Le troisième chapitre déroule les essais effectués sur les différents composants du béton et les résultats des essais d'agressions chimiques.

# ***CHAPITRE I***

## ***Le Béton Et Ses Constituants***

### **I.1. Historique**

Le béton est le matériau artificiel le plus utilisé au monde, jusqu'à ce jour il ne peut être remplacé dans la construction d'infrastructures, en raison de ces qualités (solidité et longévité) et sa capacité de prendre de multiples formes.

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles.

En revanche, la propriété d'hydraulicité du mélange est restée totalement inexploitée jusqu'en 1817 où Louis Vicat annonça la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Dans ces travaux, il donne des précisions sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires à la constitution d'un mélange cimentaire. Ce mélange après cuisson à une température convenable et son broyage, sera un véritable liant hydraulique. Ainsi, le ciment artificiel était né.

Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait les performances de la pierre de cette région. En 1846, Grâce au développement des fours rotatif, Dupont et Demarle ont créé la première usine de ciment à Boulogne-sur-Mer.

En 1848, Joseph Lambot inventa le béton armé, et construisit une barque en « ciment armé ». Joseph Monier, réalisa des bacs à fleurs en 1849 en utilisant la même méthode.

Le béton est employé dès 1850 dans le bâtiment par François Coignet. Il connaît ensuite un essor véritable dans la dernière décennie du XX siècle avec l'introduction d'armatures métalliques destinées à lui conférer une meilleure résistance à la traction [1].

### **I.2. Définition**

Le béton est défini comme un mélange de plusieurs composants très différents, certains actifs et d'autres inertes [2]. Le béton ordinaire est matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier) réunis par un liant. Ce liant peut être « hydraulique » comme le ciment ou un béton bitumineux si le liant est un hydrocarbure.

Le béton est constitué de granulats comme le sable, le gravier, le laitier ou du béton recyclé, etc. Ce mélange de grains varie de 0 à 125 mm et représente plus de 70 % de la

composition. Le ciment mélangé à ces granulats fins produit du mortier pour la maçonnerie. Lorsqu'il est mélangé à des graviers il produit du béton.

L'eau est essentielle à la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange pour humidifier le ciment et permettre la liaison des composants du béton. L'eau rend également le mélange beaucoup plus maniable, facilitant ainsi sa mise en œuvre.

### I.3. Les constituants du béton

#### I.3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit au contact de l'eau et acquiert résistance et stabilité même sous l'eau. A travers des réactions complexes, les silicates et les aluminates se développent pour former un gel cristallin qui marque la naissance de la pâte cimentaire.

La production mondiale de ciment en 2022 est estimée à environ 4,1 milliards de tonnes. La Chine représentait plus de 50 % de la production mondiale de ciment, l'UE-27 représentant 4,3 %. Outre les pays du G20, cinq pays émergents du continent eurasien ont produit près de 7 % du volume mondial en 2022, soit près de deux fois le volume de l'UE-27 ; le Vietnam (85 Mt) et la Thaïlande (29 Mt) en Extrême-Orient, et l'Iran (63 Mt), l'Égypte (54 Mt) et le Pakistan (46 Mt) au Moyen-Orient. Le Vietnam et l'Égypte ont particulièrement connu une croissance de 2021 à 2022 (Fig.I.1) [3].

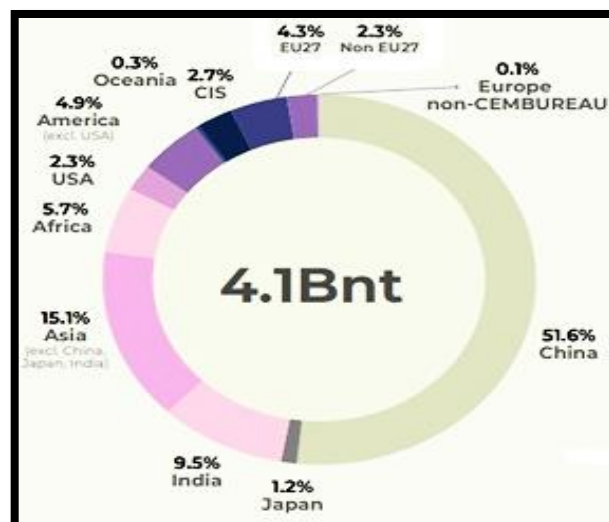
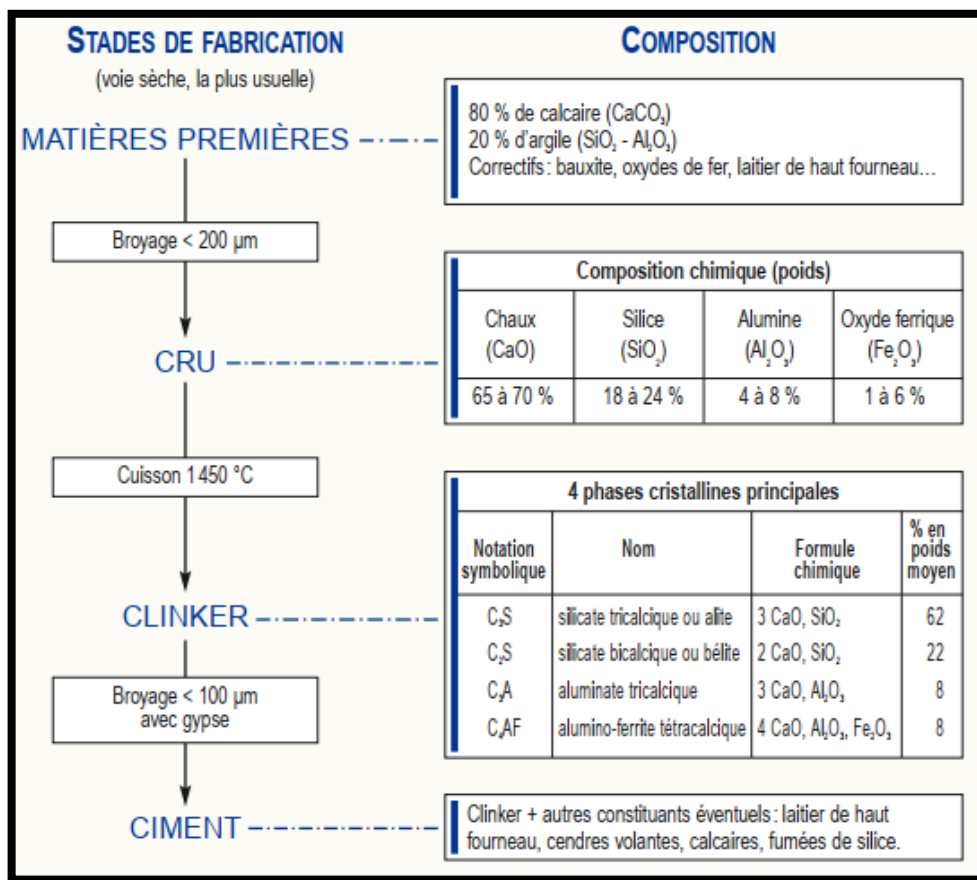


Figure I.1. Production mondiale du ciment en 2022 [3].

**I.3.1.1. Fabrication des ciments**

Avant d’arriver à un produit fini, le mélange de départ passe successivement par différentes phases durant lesquelles la matière première subit une transformation chimique et cristalline importante.

Les matières premières utilisées sont généralement du calcaire et de l'argile dans des proportions proches de 80 et 20% (Fig.I.2) [4]. Le calcaire fournit du calcium et l'argile apporte du silice, de l'alumine et de l'oxyde ferrique indispensables au processus de formation du clinker.



**Figure I.2. Processus de fabrication du ciment.**

La préparation du cru peut être réalisée suivant différents procédés. La plus utilisée des procédés est la voie sèche, parce que c’est la plus économique en termes de consommation d’énergie. Elle comprend en premier une pré-homogénéisation, ensuite, un broyage-séchage est appliqué pour réduire en poudre les grains. Après cette opération, l’homogénéisation des matières obtenues permet l’obtention uniforme des caractéristiques chimiques, grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux. Pratiquement abandonné, le procédé humid est

## CHAPITRE I :Le béton et ses constituants

grandement consommatrice d'énergie. Le procédé consiste à préparer une pâte dans des délayeurs, ensuite homogénéisée et stockée. Ce procédé s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé. La voie semi-sèche ou semi-humide, la poudre est humidifiée après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules/

### I.3.1.2. Classification des ciments

Ils sont aussi subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants, comme démontre sur le Tableau I.2 :

Tableau I.1. Classement des ciments selon les principaux constituants

Ciments Portland	CEM I
Ciments Portland composés <sup>(1)</sup>	CEM II / A ou B <sup>(2)</sup>
Ciments de haut-fourneau	CEM III / A, B ou C <sup>(2)</sup>
Ciments pouzzolaniques	CEM IV / A ou B <sup>(2)</sup>
Ciments composés	CEM V / A ou B <sup>(2)</sup>

Selon la résistance à la compression mesurée à 28 jours, les ciments sont répartis en trois classes (Tableau I.1). Elle est encadrée par la norme la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm<sup>2</sup> ou en Mpa [5].

Tableau I.2. Valeurs limites des résistances à la compression

Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 N	-	14	30
32,5 R	8	-	30
42,5 N	8	-	40
42,5 R	18	-	40
52,5 N	18	-	50
52,5 R	28	-	50

### I.3.1.3. Principales caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle.

*a. La surface spécifique :* Cette caractéristique permet la mesure de la finesse de mouture d'un ciment. C'est la surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de

ciment (norme NF EN 196-6). Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm<sup>2</sup>/g

**b. La masse volumique apparente :** Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m<sup>3</sup> (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

**c. La masse volumique absolue :** Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m<sup>3</sup> suivant le type de ciment.

### I.3.2. Les granulats

Les granulats sont utilisés comme charge dans la production des mortiers et des bétons. Ils sont dérivés de roches ignées, sédimentaires et métamorphiques, etc. Ils forment la masse du béton, et occupent 70 à 80 % du volume et ont une influence considérable sur les propriétés du béton.

Il est crucial d'obtenir des granulats de type et de qualité appropriés. Ils doivent être propres, durs, résistants, durables et granulométriquement adaptés pour optimiser l'économie du produit cimentaire. Auparavant, les granulats étaient considérés comme chimiquement inertes, mais des recherches récentes ont révélé que certains d'entre eux sont chimiquement actifs et que certains types présentent des liaisons chimiques à l'interface des granulats et de la pâte de ciment [6].

Pour augmenter la masse volumique apparente du béton, on utilise deux granulats de granulométrie très différente : les plus gros, connus sous le nom de granulats grossiers (gravier), et les plus petits, les granulats fins (sable). Les granulats grossiers constituent la matrice principale du béton, tandis que les granulats fins forme la continuité granulaire entre le liant et les granulats grossiers.

#### I.3.2.1. Classification des granulats

Selon l'origine géologique, les granulats peuvent être classés en granulats naturels et granulats artificiels.

\*Les granulats naturels (Fig.I.3) sont obtenus par concassage dans des carrières de roches ignées, sédimentaires ou métamorphiques. Les granulats les plus utilisés sont d'origine ignée.

Les granulats extraits de fosses ou dragués dans des rivières, des ruisseaux ou des mers ne sont généralement pas suffisamment propres ou granulométriques pour répondre aux exigences de qualité. Ils nécessitent un tamisage et un lavage avant de pouvoir être utilisés dans le béton.



**Figure I.3. Granulats pour béton.**

\*Les granulats artificiels sont des briques concassées, les laitiers de haut fourneau et les granulats synthétiques, etc. Les briques concassées conviennent au bétonnage en masse, par exemple pour les fondations. Les granulats de laitier de haut fourneau sont obtenus par refroidissement lent du laitier suivi d'un concassage. Les particules denses et résistantes sont utilisées pour la fabrication de produits préfabriqués en béton. Les granulats de laitier de haut fourneau présentent de bonnes propriétés de résistance au feu, mais sont responsables de la corrosion des armatures en raison de leur teneur en soufre. Les granulats synthétiques sont produits à partir de matériaux traités thermiquement, tels que l'argile expansée et le schiste, utilisés pour la fabrication de béton léger.

Selon leur forme, les granulats sont classés comme arrondis, irréguliers, anguleux et aplatis.

\*Les granulats arrondis sont généralement obtenus en rivière ou en bord de mer et produisent un minimum de vides (environ 32 %) dans le béton. Leur rapport surface/volume est minimal, et la pâte de ciment requise est minimale. Leur faible adhérence les rend inadaptés à la fabrication de bétons à haute résistance et de chaussées.

\*Les granulats irréguliers présentent environ 36 % de vides et nécessitent davantage de pâte de ciment que les granulats arrondis. En raison de leur irrégularité de forme, ils développent une bonne adhérence et conviennent à la fabrication de béton ordinaire (Fig.I.4).

\*Les granulats anguleux présentent des particules pointues, anguleuses et rugueuses, présentant un maximum de vides (environ 40 %). Les granulats angulaires offrent une très bonne adhérence que les deux précédents et sont particulièrement adaptés à la fabrication de bétons à haute résistance et de chaussées ; la pâte de ciment requise est relativement plus importante.

\*Les granulats aplatis sont parfois appelés à tort granulats allongés. Cependant, ces granulats ont un impact négatif sur les propriétés du béton. La plus petite dimension latérale des granulats (épaisseur) doit être inférieure à 0,6 fois leur dimension moyenne. Ils s'orientent généralement dans un plan, avec des vides d'eau et d'air en dessous. Ils nuisent à la durabilité et sont limités à un maximum de 15 %.

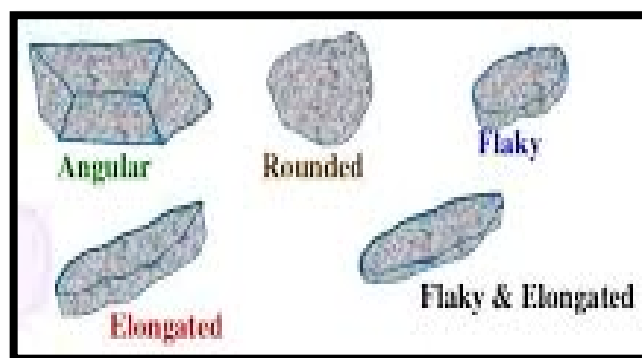


Figure I.4. Forme des granulats.

### I.3.2.1. Caractéristiques des granulats

Lors du choix des granulats pour le béton des caractéristiques importantes doivent être prises en compte. La résistance, la forme des particules, la densité, la masse volumique apparente, les vides, la porosité, la teneur en humidité et le gonflement sont les plus primordiales.

**a. La résistance :** Elle doit être au moins égale à celle du béton. Les roches couramment utilisées comme granulats ont une résistance à la compression bien supérieure à la plage habituelle de résistance du béton. Les essais réalisés pour évaluer la résistance sont l'essai d'écrasement, l'essai d'impact et l'essai de fines à 10 %. En général, les spécifications prescrivent une limite d'écrasement de 45 % pour les granulats utilisés pour le béton autre que les surfaces d'usure et de 30 % pour le béton destiné aux surfaces d'usure, telles que les pistes d'atterrissage, les routes, etc. La valeur d'impact ne doit pas dépasser 30 % pour les surfaces

d'usure et 45 % pour les autres bétons. La valeur d'abrasion est limitée à 30 % pour les surfaces d'usure et à 50 % pour le béton destiné à d'autres usages.

**b. *Forme et texture*** : la forme influence davantage les propriétés du béton frais que celles du béton durci. Les granulats arrondis sont très maniables, mais produisent un béton à faible résistance. Les granulats aplatis nécessitent davantage de pâte de ciment, produisent un maximum de vides et ne sont pas souhaitables. Les granulats concassés et non concassés offrent généralement une résistance sensiblement identique pour une même teneur en ciment. La forme et la texture de surface des granulats fins déterminent leur indice de vide et influencent significativement les besoins en eau.

**c. *La densité*** : La plupart des granulats naturels ont une densité qui se situe entre 2,6 et 2,7. La densité et la porosité des granulats influencent grandement la résistance et l'absorption du béton. La densité est généralement un indicateur de leur qualité. Une densité faible peut indiquer une porosité élevée et donc une faible durabilité et une faible résistance. La masse volumique du béton dépendra fortement de la densité.

**d. *La porosité*** : Les bulles d'air emprisonnées dans les roches lors de leur formation forment de minuscules trous ou cavités appelés pores. La porosité des roches est généralement inférieure à 20 % ; le béton devient perméable affectant la liaison entre les granulats et la pâte de ciment, la résistance au gel et au dégel du béton et la résistance à l'abrasion des granulats. Les granulats poreux absorbent davantage d'humidité, ce qui entraîne une perte de maniabilité du béton beaucoup plus rapide.

### **I.3.3. L'eau de gâchage**

L'utilisation d'eau avec le ciment a pour but de provoquer son hydratation (Fig.I.5). Une quantité adéquate d'eau agit comme un lubrifiant entre les granulats grossiers et fins et produit un béton maniable et économique. En cas d'excès d'eau, le ciment et l'eau remontent à la surface par capillarité et forment une fine couche appelée laitance. Cela fragilise l'adhérence entre les couches du béton. En revanche, une quantité d'eau moindre rend le béton difficile à travailler et, en raison d'un mélange non uniforme, sa résistance est moindre. La quantité d'eau doit donc être limitée pour obtenir un béton de la qualité requise pour un chantier. L'eau est également utilisée pour le lavage des granulats et le durcissement.

### I.3.3.1. La qualité de l'eau de gâchage

Presque toute eau potable naturelle sans goût ni odeur, prononcés, est acceptable pour le mélange de béton. De nombreuses sources d'eau non potable peuvent également être utilisées. En cas de doute, des échantillons d'eau doivent être analysés pour vérifier leur compatibilité.

Un excès d'impuretés peut affecter le temps de prise, la résistance et la durabilité, et peut provoquer des efflorescences, une décoloration de la surface et la corrosion de l'acier. Les temps de prise initiale des mélanges avec de l'eau impure et avec de l'eau pure sont obtenus. Une différence de temps de prise initiale de  $\pm 30$  minutes, avec un temps de prise initial d'au moins 30 minutes, est considérée comme acceptable. Les résistances à la compression à 7 et 28 jours des éprouvettes cubiques/cylindriques préparées avec de l'eau impure ne doivent pas différer de 10 % de celles des éprouvettes cubiques/cylindriques préparées avec de l'eau pure.



**Figure I.5. Vibration des éprouvettes de béton.**

### I.3.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des ingrédients autres que le ciment Portland, l'eau et les granulats, qui peuvent être ajoutés au béton pour conférer une qualité spécifique au mélange plastique (frais) ou au béton durci. Certains adjuvants sont ajoutés au mélange sous forme de solutions. Dans ce cas, le liquide doit être considéré comme faisant partie de l'eau de gâchage. Si les adjuvants ne peuvent pas être ajoutés en solution, ils sont pesés ou mesurés en volume, conformément aux recommandations du fabricant. Tous les adjuvants font l'objet de la norme de définition et des exigences EN 934-2+A1.

Les adjuvants sont classés selon les caractéristiques chimiques et physiques fonctionnelles suivantes [7] :

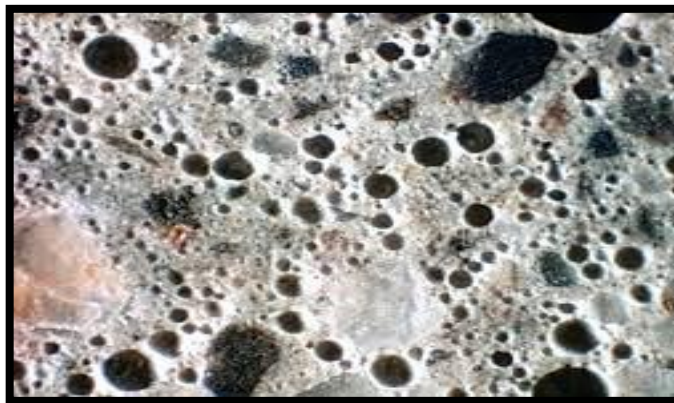
- \* Entraîneurs d'air
- \* Réducteurs d'eau
- \* Retardateurs
- \* Adjuvants régulateurs d'hydratation
- \* Accélérateurs
- \* Adjuvants spéciaux

Les raisons principales d'utiliser les adjuvants sont :

- \* La réduction du coût de la construction en béton.
- \* L'obtention de certaines propriétés du béton.
- \* L'assurance d'une qualité adéquate pendant les étapes de malaxage, de transport, de mise en place et de cure dans des conditions défavorables.

#### **I.3.4.1. Les entraîneurs d'air**

Les entraîneurs d'air produisent de minuscules bulles d'air dans le béton durci afin de permettre à l'eau de se dilater lors du gel (Fig.I.6). Les contraintes internes réduisent la durabilité du béton durci, en particulier lorsque les cycles de gel et de dégel se répètent à plusieurs reprises. L'impact de chacun de ces mécanismes est atténué par la création d'un réseau de minuscules bulles d'air dans le béton durci à l'aide d'entraîneurs d'air.



**Figure I.6. Béton élaboré avec un adjuvant entraîneur d'air.**

À la fin des années 1930, l'introduction de l'entraînement d'air dans le béton a représenté une avancée majeure dans la technologie du béton. L'entraînement d'air est recommandé pour tout béton exposé au gel.

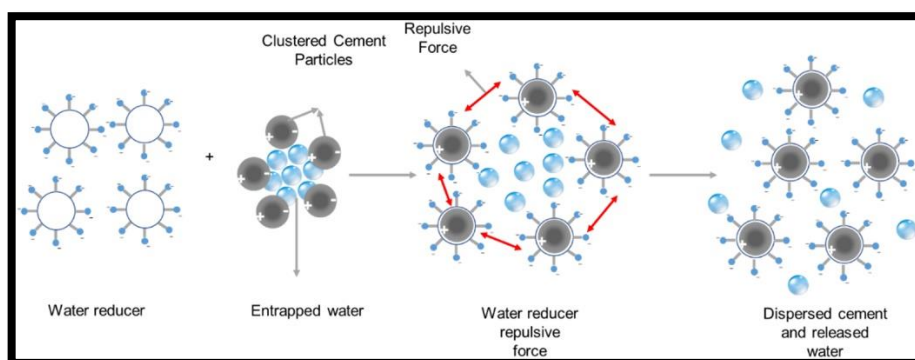
Un béton préparé pour des conditions de gel sévère doit contenir environ 14 milliards de bulles par mètre cube. La résistance au gel s'améliore avec la diminution de la taille des vides, et les petits vides réduisent moins la résistance que les grands. La finesse des vides d'air est mesurée par l'indice de surface spécifique, égal à la totale des vides dans une unité de volume de pâte.

Outre l'amélioration de la durabilité, l'entraînement d'air offre d'autres avantages importants, tant au béton frais qu'au béton durci. Il améliore la résistance du béton à plusieurs facteurs destructeurs, notamment les cycles de gel-dégel, les produits de déglacage et les sels, les sulfates et la réactivité alcali-silice.

### I.3.4.2. Les réducteurs d'eau

L'ouvrabilité du béton frais nécessite plus d'eau que nécessaire à son hydratation. L'excès d'eau, au-delà des besoins d'hydratation, nuit à toutes les propriétés souhaitables du béton durci. C'est pourquoi des adjuvants réducteurs d'eau ont été développés pour améliorer l'ouvrabilité tout en préservant la qualité.

Les réducteurs d'eau augmentent la mobilité des particules de ciment dans le mélange plastique, permettant ainsi d'obtenir une ouvrabilité à faible teneur en eau (Fig.I.7).



**Figure I.7. Mécanisme de travail d'un réducteur d'eau dans le béton.**

L'ajout d'un réducteur d'eau sans modifier les autres quantités du mélange augmente l'affaissement, permet l'augmentation la résistance du mélange en diminuant la quantité d'eau

et en maintenant constante la teneur en ciment. Le coût du mélange, principalement déterminé par la quantité de ciment, peut être réduit. Dans ce cas, le réducteur d'eau permet de diminuer la quantité d'eau. La quantité de ciment est ensuite réduite pour maintenir le rapport eau-ciment égal au mélange initial.

### **I.3.4.3. Les retardateurs**

Certaines conditions de construction nécessitent un allongement du délai entre le malaxage et la mise en place ou la finition du béton. Dans ce cas, des retardateurs peuvent être utilisés pour retarder la prise initiale du béton.

Les retardateurs sont utilisés pour plusieurs raisons. On peut citer la compensation de l'effet de la chaleur, la permission d'une mise en place inhabituelle ou de longs trajets (Fig. I.8). De plus, certains retardateurs entraînent l'air et améliorent l'ouvrabilité. D'autres augmentent le temps de prise initiale, mais réduisent le délai entre la prise initiale et la prise finale. Les propriétés des retardateurs varient selon les matériaux utilisés dans le mélange et les conditions de chantier. Par conséquent, leur utilisation et leur effet doivent être évalués expérimentalement lors de la conception du mélange.



**Figure I.8. Transport d'un béton avec adjuvant retardateur de prise.**

### **I.3.4.3. Les adjuvants de contrôle de l'hydratation**

Ces adjuvants ont la capacité d'arrêter et de réactiver le processus d'hydratation du béton. Ils sont composés de deux éléments : un stabilisant et un activateur. L'ajout du stabilisant arrête complètement l'hydratation des matériaux cimentaires pendant 72 heures, tandis que l'ajout de l'activateur au béton stabilisé rétablit une hydratation et une prise normales. Ces adjuvants sont très utiles pour prolonger la durée d'utilisation du béton prêt à l'emploi lorsque les travaux sur

le chantier sont interrompus pour diverses raisons. Ils sont également utiles lorsque le béton est transporté pendant une longue période.

### I.4. Propriétés du béton

#### I.4.1. Le béton à l'état frais

Le béton frais est un matériau transitoire dont les propriétés changent constamment. Il est essentiel qu'il puissent être manipulées, transportées, mises en place, compactées et finies pour former une masse solide homogène.

La technologie du béton frais a progressé à un rythme similaire à celui de nombreux autres aspects de la technologie du béton. Par exemple, la disponibilité des superplastifiants a permis de produire du béton maniable avec des rapports eau/liant plus faibles, augmentant ainsi sa résistance in situ [8].

Quatre essais sont effectués pour connaître la consistance du béton à l'état frais

- L'affaissement au cône d'Abrams selon la norme EN 12350-2.
- L'essai Vébé selon la norme EN 12350-3.
- L'indice de serrage selon la norme EN 12350-4.
- L'étalement à la table à chocs selon la norme EN 12350-5.

La norme EN 206-1 définit cinq classes de consistance (Tableau I.3):

**Tableau I.3. Différentes classes de consistance du béton frais**

Étalement	Affaissement	Consistance
		Raide
F1 < 340 mm	S1 - 10 à 40 mm	Ferme
F2 - 350 à 410 mm	S2 - 50 à 90 mm	Plastique
F3 - 420 à 480 mm	S3 - 100 à 150 mm	Molle / Très plastique
F4 - 490 à 550 mm	S4 - 160 à 210 mm	Très molle
F5 - 560 à 620 mm	S5 > 220 mm	Fluide
F6 > 630 mm		Très fluide

La comparaison de la masse volumique du béton frais théorique et celle mesurée permet d'obtenir des renseignements sur le degré de compactage et la composition du béton. La méthode de mesure de la masse volumique du béton frais est définie dans la norme EN 12350-6.

La masse volumique du béton frais est déterminée en plaçant le béton dans un récipient étanche et rigide, puis en le vibrant avec une aiguille, une table ou un serrage manuel. Après un arasement, le récipient et son contenu sont pesés, et la masse volumique est calculée (Fig.I.9).



**Figure I.9. Mesure de masse volumique du béton frais.**

Pour du béton compacté et confectionné avec des granulats courants ou relativement denses, jusqu'à un diamètre maximal de 63 mm, la méthode de mesure de la teneur en air est décrite dans la norme EN 12350-7 (Fig.I.10). Pour les bétons avec un granulat léger, on doit choisir une autre méthode de mesure.



**Figure I.10. Mesure de la teneur en air du béton frais.**

### I.4.2 Le béton durci

Le béton durci est un matériau solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité se développent suite à des réactions physico-chimiques qui se produisent sur une période allant de quelques jours à quelques semaines. Une fois durci, le béton conserve sa forme initiale mais ses caractéristiques peuvent encore évoluer sur une longue période, allant de plusieurs mois à des années.

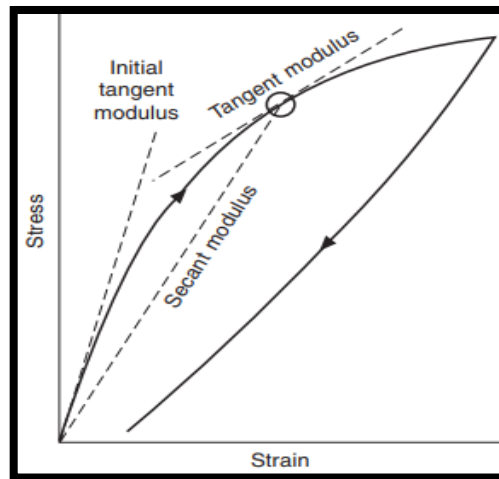
La résistance du béton en compression uni-axiale est l'une des caractéristiques les plus étudiées, car elle offre une image générale de la qualité du béton, étant étroitement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. Cette résistance est cruciale dans la conception des structures en béton et l'établissement des normes de conformité.

La résistance caractéristique à la compression à 28 jours, est un indicateur de la qualité du béton. Cette mesure est effectuée en écrasant une éprouvette qui a un diamètre et hauteur jusqu'à rupture dans une machine d'essai de compression. La charge maximale atteinte est enregistrée, et la résistance en compression est calculée selon la norme EN 12390-3.



**Figure I.11.Éprouvette de béton mise à compression.**

selon la norme NF EN 12390-13, le module d'élasticité « E » d'un matériau correspond au rapport contrainte/déformation unitaire. Cependant, la relation contrainte-déformation du béton est non linéaire et le matériau n'est pas strictement élastique. Pour la conception et l'évaluation des structures, trois types de valeurs E sont utilisés : le module sécant, le module tangent et le module tangent initial (Fig.I.12).



**Figure I.12. Diagramme contrainte-déformation pour le béton sous compression uniaxiale.**

la méthode décrite dans la norme ASTM C267-20 permet la détermination de la résistance chimique du béton à la diffusion des chlorures.

La diffusion est le transport d'une substance dissoute dans un fluide sous l'effet de gradients de concentration. Une concentration d'une substance maintenue par une source tend à se propager jusqu'à atteindre l'équilibre. C'est ce qu'on appelle la diffusion. La résistance à ce processus de transport est créée par la densité du système poreux, la taille des pores et la tortuosité des pores et des fissures. Les substances dissoutes nécessitent des voies d'écoulement continues pour pouvoir diffuser à travers le béton.

## I.5. Différents types de béton

### I.5.1. Le béton léger

Les bétons légers peuvent être produits avec une masse volumique après séchage comprise entre environ 300 et 2000 kg/m<sup>3</sup>, avec des résistances cubiques correspondantes comprises entre environ 1 et plus de 60 MPa et des conductivités thermiques comprises entre 0,2 et 1,0 W/m<sup>3</sup> [9].

Les principales techniques utilisées sont :

\*La suppression de la fraction la plus fine des granulats de masse volumique normale afin de créer des vides remplis d'air,

\*L'incorporation de bulles de gaz dans la pâte de ciment pour former une structure à 30 ou 50 % de vides.

\*Le remplacement, total ou partiel, des granulats naturels dans un mélange de béton par des granulats contenant une forte proportion de vides (bétons légers).

Les propriétés du béton léger peuvent être exploitées de multiples façons, depuis son utilisation comme matériau de structure jusqu'à son intégration dans des structures pour améliorer l'isolation thermique.

### **I.5.2. Le béton à haute résistance**

Ce béton est rendu possible par l'introduction d'adjuvants réducteurs d'eau efficaces et de matériaux cimentaires à haute résistance. Il convient de noter que l'on tend de plus en plus à considérer les termes « haute résistance » et « haute performance » comme synonymes. Cependant, le béton à haute résistance n'est qu'un des nombreux bétons à haute performance (qui peuvent inclure les bétons à haute maniabilité, les bétons légers ou même les bétons à durabilité accrue) et ces deux termes doivent être séparés.

Au Royaume-Uni, un béton à haute résistance, inclut le béton dont la résistance caractéristique à la compression est égale ou supérieure à 60 MPa, mais en Norvège, le code de conception inclut déjà le béton dont la résistance caractéristique au cube atteint 105 Mpa, tout comme l'Eurocode. De ce fait, même cette définition simple n'est pas vraiment adéquate.

Le béton dont la résistance caractéristique au cube est supérieure à 80 MPa sera considéré comme « haute résistance ». Pour obtenir cette résistance élevée, il est important de comprendre:

\*Les propriétés de la pâte de ciment

\*Les propriétés de la zone de transition entre la pâte et les granulats

\*Les propriétés des granulats

\*Les proportions des matériaux constitutifs.

Tous ces facteurs doivent être optimisés afin d'obtenir des augmentations significatives de la résistance à la compression.

### I.5.3. Le béton réfractaire

Ce béton est utilisé à haute température. Il est composé de ciment hydraulique (ciment d'aluminates de calcium) comme liant, associé à des granulats et/ou des charges réfractaires. Il existe une gamme plus ou moins continue de bétons réfractaires à haute température, allant d'environ 300-400 °C (limite des bétons liés aux ciments Portland) à 2 000 °C ou plus, utilisant des ciments d'aluminates de calcium (CAC) à haute teneur en alumine.

Les bétons utilisables jusqu'à environ 1 000 °C sont considérés comme « résistants à la chaleur ». Cependant, cette température n'est pas une limite immuable, mais un repère pratique.

De nombreux bétons réfractaires sont utilisés à des températures bien inférieures à 1 000 °C et parfois supérieures. L'important est que le choix du ciment et des granulats soit adapté à l'application.

Cependant, d'autres paramètres importants doivent également être pris en compte pour que le béton fonctionne correctement. Normalement, le CAC gris (39 % d'alumine) présente une résistance thermique suffisante pour la plupart des applications thermorésistantes jusqu'à 1 000 °C. En effet, pour certains granulats, ce sont les propriétés du granulats, plutôt que celles du ciment, qui limitent la température de service du béton, car celles-ci peuvent être inférieures à celles du CAC lui-même. Par exemple, la vermiculite, la perlite, le basalte et certains granulats traités thermiquement sont moins réfractaires que le CAC gris (Fig.I.13).

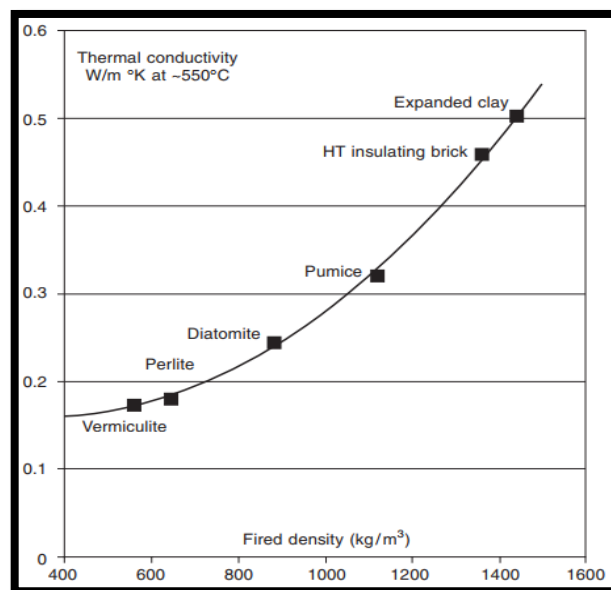


Figure I.13. Relation entre la masse volumique cuite et la conductivité thermique des bétons réfractaires.

### **I.5.4. Le béton à haute densité**

Le béton à forte densité, représente une part relativement faible de la production de béton dans le secteur de la construction, ses applications spécialisées étant traditionnellement liées à l'industrie nucléaire. Cette utilisation restreinte signifie que la disponibilité et les propriétés des granulats peuvent être fondamentalement différentes de celles des matériaux conventionnels. Cela pose des défis supplémentaires aux techniciens du béton lors de leur utilisation pour la production de béton ou de coulis. De plus, les propriétés des produits frais et durcis peuvent différer de celles du béton normal et nécessitent donc une évaluation minutieuse avant utilisation.

### **I.5.5. Le béton à granulats recyclé**

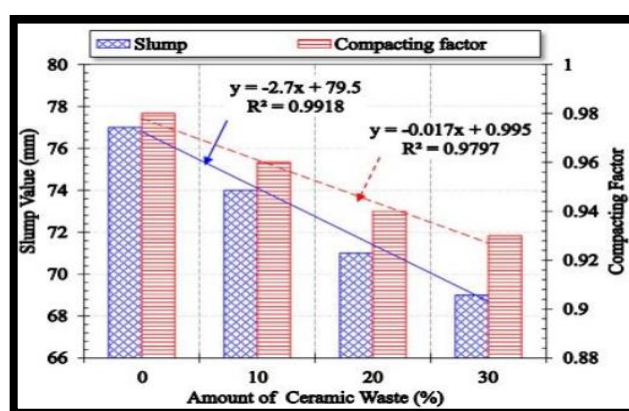
La préoccupation croissante pour la protection de l'environnement et la promotion des principes de développement durable a conduit certains gouvernements à légiférer pour encourager l'utilisation de granulats recyclés. Une méthode privilégiée consiste à baisser le prix de vente des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, ce qui se traduit en grande partie par une augmentation des coûts de mise en décharge. Cette politique est particulièrement bien développée aux Pays-Bas et au Danemark, qui recyclent désormais plus de 80 % des déchets de démolition.

De nombreux pays disposent d'une expérience considérable dans l'utilisation du béton concassé comme matériau de base et comme couche de fondation pour la construction d'autoroutes, mais des contraintes telles que la contamination par d'autres débris de démolition et le coût du transport des matériaux impliquent qu'une grande partie des matériaux potentiellement utilisables est mise en décharge. L'utilisation réussie de béton concassé comme granulats dans le béton a été constatée dans plusieurs pays, souvent dans le cadre de projets d'envergure.

Pour un béton de bonne qualité, il est essentiel de séparer les différents types de matériaux avant leur entrée dans le broyeur. Si le temps le permet, le meilleur endroit pour commencer la séparation est le site de démolition lui-même. Les éléments tels que le bois, la plomberie et le câblage peuvent être retirés. Il est particulièrement important d'exclure les matériaux potentiellement contaminés, par exemple pour la démolition d'anciennes usines dont les cheminées, les fours et le béton sont contaminés par des traitements chimiques.

Chaque site doit être inspecté afin d'éviter que des matériaux contaminés ne soient livrés au recyclage. Les exigences légales relatives à l'inspection des structures avant démolition et au dépôt de plans indiquant comment chaque élément de la construction doit être recyclé ou éliminé, comme cela est pratiqué aux Pays-Bas et au Danemark, faciliteraient grandement ce processus.

Dans le cas où les granulats sont de type céramique sanitaire, Rashid et coll. [10] ont constaté que l'ouvrabilité des bétons avec des granulats de céramique sanitaire recyclé diminue. Ils ont remplacé 10, 20 et 30% de granulats naturels arrondie par des granulats de céramique sanitaire recyclé (Fig.I.14).



**Figure I.14. Affaissement des bétons à céramique sanitaire selon Rashid et coll.**

Quant à la résistance mécanique une amélioration est observée suite à la forme rugueuse des granulats de déchets céramiques (Fig.I.15) et donc une plus grande surface de liaison avec la pâte de ciment. De plus, une absorption d'eau plus élevée des déchets céramiques par rapport au granulats naturels fournit un environnement approprié pour une hydratation supplémentaire du béton et une augmentation de la résistance mécanique.

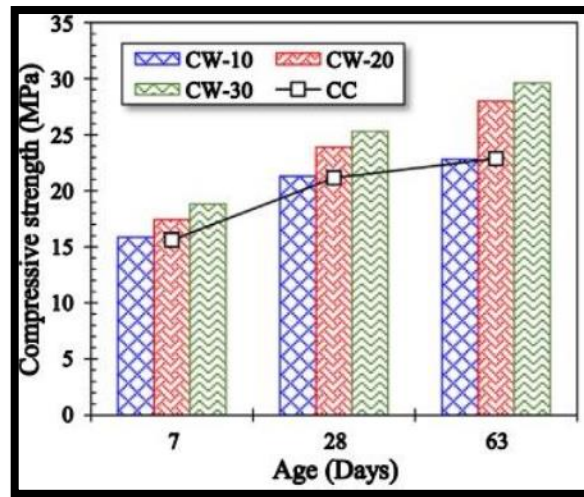


Figure I.15. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Rashid et coll.

Medina et coll. [11] ont aussi remarqué la même observation concernant l'affaissement. A mesure que le taux de remplacement augmentait, l'affaissement diminue (Tableau I.4) suite aux propriétés physiques des granulats céramiques recyclés comme l'indice d'aplatissement, la porosité total et l'absorption d'eau.

La masse volumique, à son tour, diminuait avec l'augmentation des proportions des granulats recyclés en raison de la densité plus faible de ce produit par rapport au matériau naturel

Tableau I.4. Affaissement et masse volumique des bétons fabriqués par Medina et coll.

Concrete	Slump (mm)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
RC	75 ± 0.64 <sup>a</sup>	2390 ± 10.2
CC-20	72 ± 0.58	2370 ± 9.7
CC-25	71 ± 0.61	2360 ± 6.8

Alves et coll. [12] ont remplacés les granulats fins (20, 50 et 100 %) par leurs équivalents en granulats de céramique recyclés (SWC). Ils constaté que la résistance à la compression a diminué considérablement avec l'augmentation du taux de remplacement (Fig. I.16). Ceci est due l'excès d'eau dans le mélange (plus que celui strictement nécessaire pour les réactions d'hydratation).

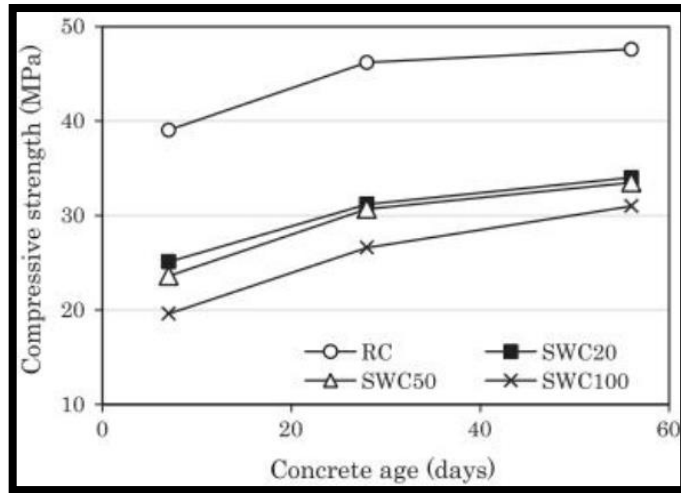


Figure I.16. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Alves et coll.

A l'inverse, Pacheco-Torgal & Jalali [13] avec un remplacement total des granulats fins par des sables d'origine céramique sanitaire pré-saturés, ont constaté une résistance plus élevée (Fig.I.17) pour le béton avec du sable céramique (MCS). L'explication tient du fait que les sables céramiques sont utilisés à l'état pré-saturé, ce qui fournit plus d'eau pour l'hydratation du ciment.

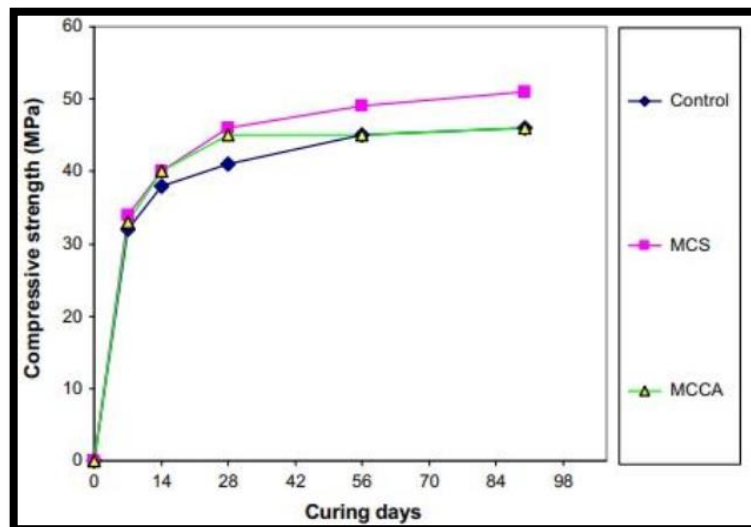


Figure I.17. Résistance à la compression des bétons à céramique sanitaire selon Pacheco-Torgal & Jalali.

# ***CHAPITRE II***

## ***Causes et effets de dégradation des bétons***

### Introduction

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou tout en conservant son esthétique (Fig. II.1). Il doit satisfaire aux besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service. La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu et à maintenir son niveau de fiabilité, avec bien sur des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux, la qualité des dispositions constructives, ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.



Figure II.1. Dégradation des pieux par attaque sulfatique.

### II.1. Mécanismes de transport à travers le béton

De nombreux processus conduisant à la détérioration du béton impliquent la pénétration de fluides agressifs provenant du milieu environnant, suivie de processus physiques ou chimiques attaquant la structure du béton ou les armatures, entraînant fréquemment l'accumulation de forces d'expansion et des ruptures [14].

La pâte de ciment durcie et le béton contiennent des pores de types et de tailles variés. Le transport de matériaux à travers le béton peut être considéré comme un cas particulier du phénomène plus général d'écoulement à travers un milieu poreux. La vitesse d'écoulement ne

## **CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons**

---

dépend pas simplement de la porosité, mais du degré de continuité des pores et de leur taille. L'écoulement peut se produire par l'un des trois processus suivants :

- La perméabilité : C'est la propriété d'écoulement du béton qui caractérise quantitativement la facilité avec laquelle un fluide le traverse sous l'effet d'une différence de pression. Cette propriété dépend du gradient de pression ainsi que de la taille et de l'interconnexion des pores capillaires du béton.

- La diffusion : C'est le processus par lequel une vapeur, un gaz ou des ions peuvent pénétrer dans le béton sous l'action d'un gradient de concentration. La diffusivité définit la vitesse de déplacement de l'agent et est influencée par le gradient de concentration à la surface du béton, le type d'agent pénétrant, toute réaction avec la pâte de ciment hydratante, ainsi que la taille et l'interconnexion des pores capillaires du béton.

- L'absorption : Est un processus par lequel le béton absorbe un liquide, par exemple de l'eau ou une solution aqueuse, par capillarité. La vitesse d'absorption de l'eau est appelée « capacité d'absorption (ou sorptivité) » et dépend de la taille et de l'interconnexion des pores capillaires du béton, ainsi que du gradient d'humidité existant à la surface.

Chacune de ces processus est associée à une « constante d'écoulement », définie comme suit :

\*Lors de l'écoulement ou du mouvement d'un fluide sous une différence de pression, les débits à travers les pores du béton sont suffisamment faibles pour que l'écoulement d'un liquide ou d'un gaz soit laminaire. Il est donc décrit par la loi de Darcy :

$$u_x = -K \partial h / \partial x$$

Où, pour un écoulement dans la direction  $x$ ,  $u_x$  = vitesse moyenne d'écoulement,  $\partial h / \partial x$  = taux d'augmentation de la charge dans la direction  $x$ , et  $K$  est une constante appelée coefficient de perméabilité [m/sec]. La valeur de  $K$  dépend à la fois de la structure des pores du béton et des propriétés du fluide qui le traverse.

\*Le mouvement des ions, atomes ou molécules sous un gradient de concentration est décrit par la loi de Fick :

$$J = -D \partial C / \partial x$$

Où, pour la direction  $x$ ,  $J$  = taux de transfert de la substance par unité de surface normale à la direction  $x$ ,  $\partial C/\partial x$  = gradient de concentration et  $D$  est une constante appelée diffusivité [ $m^2/sec$ ].

\*L'adsorption et l'absorption d'un liquide dans des pores vides ou partiellement vides se produisent par capillarité. Une constante appelée sorptivité ( $S$ ) peut être définie comme suit :

$$x = S.t^{0.5} \quad (24.4).$$

«  $S$  » a comme dimension [ $mm/sec^{0.5}$ ].

### II.2. La dégradation du béton

Les agents de dégradation qui affectent le béton peuvent être divisés en deux grands groupes [15]:

- Ceux dont l'action est d'abord chimique, avant d'entraîner une perte d'intégrité physique. Il s'agit notamment des sulfates, de l'eau de mer, des acides et des réactions alcali-granulats.
- Ceux qui entraînent directement une détérioration physique, tels que le gel-dégel et le feu.

#### II.2.1. Attaque par les sulfates

Les sources de sulfates susceptibles de pénétrer dans le béton durci comprennent les eaux souterraines de certains sols argileux, les engrais et les effluents industriels. On constate que les problèmes surviennent principalement dans le béton en contact avec le sol, par exemple dans les fondations, les dalles de plancher et les murs de soutènement. Les sulfates de sodium, de potassium, de calcium et de magnésium sont courants et, en solution, réagissent avec les composants de la pâte de ciment durcie. L'attaque ne se produit que lorsque la quantité de sulfate présente dépasse un certain seuil. De plus, la vitesse d'attaque sera plus rapide si le sulfate est réapprovisionné, par exemple si le béton est exposé à des eaux souterraines.

Le béton attaqué présente une apparence blanchâtre. Les dommages commencent généralement par les bords et les angles, puis se fissurent et s'effritent progressivement, pour finalement aboutir à une dégradation complète.

## CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons

La plupart des solutions de sulfate réagissent avec l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca(OH)}_2$ , et l'aluminate de calcium,  $\text{C}_3\text{A}$ , pour former du sulfate de calcium (gypse) et des composés de sulfoaluminate de calcium (ettringite). Grâce à leur capacité intrinsèque à fixer le  $\text{Ca(OH)}_2$  libéré par l'hydratation des ciments Portland, les pouzzolanes telles que les cendres volantes et le laitier de hauts fourneaux peuvent être utilisées pour améliorer la résistance du béton à l'attaque des sulfates.

Pour les structures en béton implantées dans des sols sulfatés, des revêtements protecteurs tels que les diverses membranes auto-adhésives ou des revêtements protecteurs tels que Les bitumes, goudrons et résines époxy peuvent également être appliqués sur les surfaces extérieures.

Comme exemple, Ambrose et coll. [16] ont étudié la résistance à l'attaque par le sulfate de sodium à 5 % pendant 180 jours après une cure sous eau de 28 jours d'un béton incorporant des carreaux de céramique recyclés (RCT) comme granulats fins. Le RCT a été utilisé en remplacement partiel du sable de rivière à quatre niveaux (0 %, 33 %, 66 %, 100 %).

La figure II.2 illustre la perte de résistance à la compression causée par l'attaque de sulfate de sodium des produits d'hydratation à base de calcium. Les sulfates décomposent les produits d'hydratation et affaiblissent progressivement la liaison granulats-pâte de ciment et réduisent ainsi la résistance du béton.

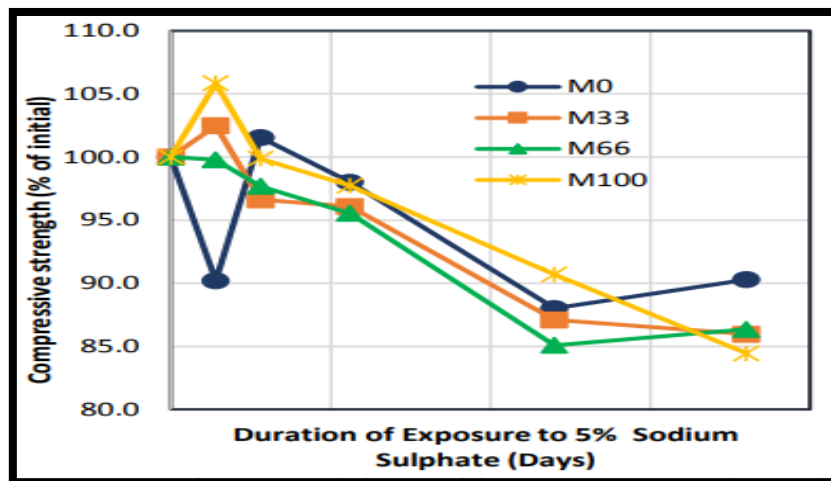


Figure II.2. Résistance à la compression des bétons élaboré par Ambrose et coll.

### II.2.2. Attaque par l'eau de mer

## CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons

Le béton en eau de mer est exposé simultanément à plusieurs processus de dégradation possibles, notamment l'action chimique des sels marins, l'humidification et le séchage dans les zones de marée, l'abrasion due aux vagues et aux sédiments transportés par l'eau et, sous certains climats, le gel et le dégel. En termes d'attaque chimique, les sulfates et les chlorures sont présents. Cependant, en cas de combinaison, les réactions expansives des sulfates ont tendance à être réduites et les dommages aux armatures dus à la corrosion constituent le principal facteur de durabilité (Fig. II.3).

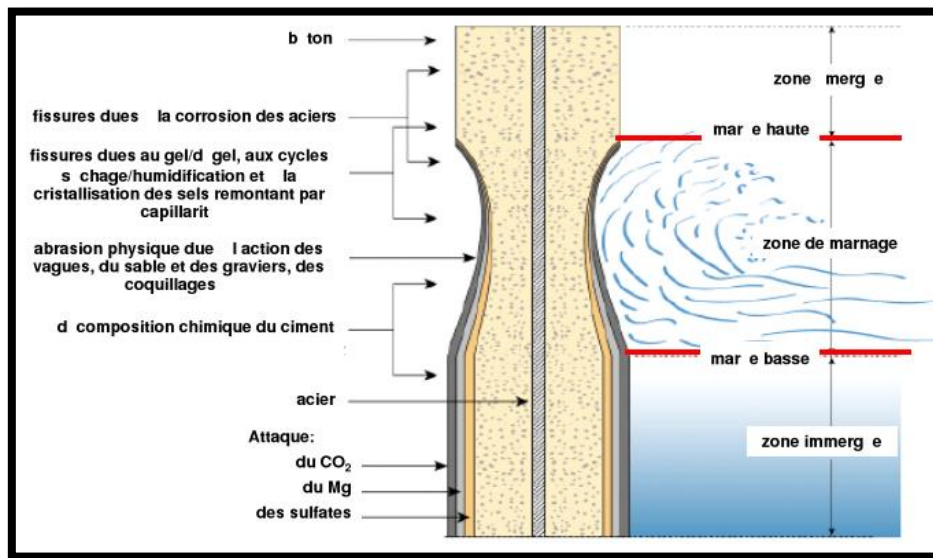


Figure II.3. Représentation schématique de l'attaque du béton par l'eau de mer

La teneur totale en sels solubles de l'eau de mer est généralement d'environ 3,5 % en poids. Le béton endommagé par l'eau de mer se caractérise par la présence de dépôts blancs de  $Mg(OH)_2$ , souvent appelés brucite. On découvre aussi dans du béton saturé en permanence d'eau de mer une forme de carbonate de calcium appelée aragonite, issue de la réaction du dioxyde de carbone dissous avec l'hydroxyde de calcium. La brucite et l'aragonite peuvent avoir un effet obturateur de pores, réduisant ainsi efficacement la perméabilité du béton près de la surface.

Dans les zones soumises à des cycles d'humidification et de séchage, les sels cristallisent avec l'évaporation de l'eau, ce qui peut entraîner une forte concentration de sels à la surface du béton et une perturbation potentielle due à la pression exercée par les cristaux lors de leur réhydratation et de leur croissance lors des cycles d'humidification et de séchage ultérieurs – un processus appelé altération saline. Ce phénomène peut être aggravé par les dommages causés

par les cycles de gel-dégel ou l'action des vagues, selon l'environnement. Ces zones sont donc généralement les plus vulnérables.

### **II.2.3. Réaction alcali-granulat et alcali-silice**

Parmi de nombreux autres constituants, les granulats peuvent contenir de la silice, des silicates et des carbonates qui, peuvent réagir avec les hydroxydes alcalins présents dans l'eau interstitielle, dérivés des oxydes de sodium et de potassium du ciment. On parle généralement de réaction alcali-granulat, mais la réaction la plus courante et la plus importante implique la silice active et est connue sous le nom de réaction alcali-silice. Le produit est un gel capable de détruire la liaison entre les granulats et la pâte de ciment durcie, qui absorbe l'eau et gonfle suffisamment pour provoquer des fissures et une rupture du béton. Comparée à la plupart des autres formes de dégradation, elle est particulièrement insidieuse, car elle débute à l'intérieur du béton par des réactions entre les matériaux constitutifs initiaux. Pour que la réaction se produise, la silice active et les alcalis doivent être présents.

Les réactions entre la silice réactive et les alcalis présents dans la solution interstitielle du béton, pour former le gel alcali-silicate, se produisent d'abord à l'interface granulat-pâte de ciment. Ce gel est complexe, mais il est clair qu'il s'agit d'un mélange d'alcali-silicates de sodium, de potassium et de calcium. Il est mou, mais absorbe une grande quantité d'eau et les silicates de sodium et de potassium gonflent considérablement. La pression hydraulique ainsi créée entraîne une expansion générale du béton et peut suffire à provoquer la fissuration des particules de granulat, de la pâte de ciment et de la zone de transition entre les deux.

La présence continue d'eau provoque l'élargissement et l'extension des fissures, qui finissent par atteindre la surface extérieure du béton, formant soit des « débords » si le granulat affecté est proche de la surface, soit des craquelures plus étendues, ou « fissurations en relief », à la surface du béton. En général, la fissuration nuit à l'apparence et à la fonctionnalité d'une structure avant de réduire sa capacité de charge. Le processus est souvent très lent, et la fissuration peut prendre des années à se développer dans le béton structural.

La mesure préventive la plus simple contre ce type de détérioration consiste à ne pas utiliser de granulats alcalins réactifs avec des ciments à forte teneur en alcalis. Les effets néfastes de la réaction alcali-silice peuvent être minimisés en utilisant des proportions appropriées de cendres volantes ou de laitier de hauts fourneaux dans le mélange de béton.

## *CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons*

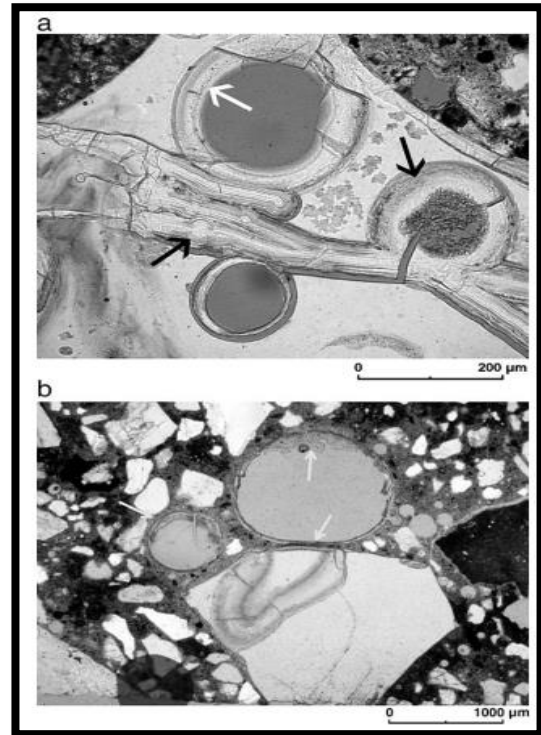
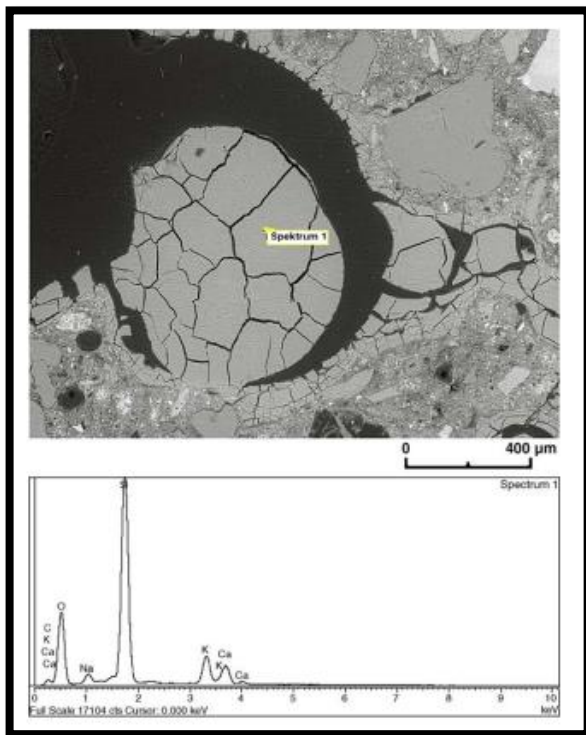
---

Le deuxième type de réaction expansive alcali-granulats est connu sous le nom de réaction alcali-carbonate, qui se produit avec certains calcaires argileux dolomitiques ou magnésiens, bien que ces roches réactives ne produisent pas toutes nécessairement des expansions néfastes. Les facteurs environnementaux affectant la réaction alcali-carbonate et les mesures préventives sont essentiellement les mêmes que pour la réaction alcali-silice.

Müller & Rübner [17], ont élaborés des bétons avec du ciment Portland ordinaire, du sable et du gravier naturels, ainsi que des cendres résiduelles d'incinération des ordures ménagères (MSWI) dont la granulométrie variait de 2 à 8 mm ou de 2 à 32 mm (au lieu de gravier). Le MSWI était composé à 80 % de composants minéraux, tels que des silicates vitreux et cristallins, des aluminates et des oxydes, et à 15 % de verre pour bouteilles, ainsi que de métaux, de céramiques (porcelaine, briques, etc.) et de résidus organiques, chacun représentant environ 2 %.

Une réaction alcali-silice s'est produite dans les échantillons de laboratoire stockés en chambre humide pendant 9 mois, ainsi que dans les bétons de chantier vieux de 8 ans. Cette réaction était clairement liée aux fragments de verre de bouteille et aux silicates vitreux. La formation de gel apparaissait souvent à l'intérieur des fragments de verre, entraînant leur désintégration partielle (Fig. II.4). Cette formation de gel interne était accompagnée de nombreuses fissures, générées dans les fragments de verre après refroidissement des cendres. La composition élémentaire du gel était toujours riche en silice, calcium, potassium et sodium (Fig. II.5).

Les échantillons de béton prélevés sur le terrain n'ont montré aucune preuve évidente de l'effet néfaste de l'expansion du gel. La quasi-totalité du gel de silice présent dans les bétons n'apparaissait pas dans les fissures, mais dans de larges vides. Aucune fissuration des granulats par le gel n'a été observée.



**Figure II.4. a) Gel de silicate à l'intérieur**

**Figure II.5. Gel alcalin-silice dans un pore d'un d'un fragment de verre de bouteille (flèches).**

échantillon de béton de chantier.

Béton de huit ans. b) Gel de silicate à l'intérieur

et à l'extérieur (flèches) d'un fragment de verre.

Échantillon de laboratoire après 9 mois

en chambre humide.

#### **II.2.4. Attaque par les acides**

La pâte de ciment durcie du béton est un environnement alcalin, donc aucun béton de ciment Portland ne peut être considéré comme résistant aux acides. Dans ces circonstances, l'attaque n'est considérée comme significative que si le pH du milieu agressif est inférieur à environ

## *CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons*

---

Comme pour les sulfates, des conditions acides peuvent être présentes dans les sols et les eaux souterraines. Celles-ci peuvent être de nature organique et résulter de la décomposition des végétaux ou de la dissolution du dioxyde de carbone, ou encore être dues aux effluents industriels ou agricoles. L'exposition du béton à ces conditions est susceptible d'entraîner des dommages. Cependant, contrairement à l'attaque par les sulfates, qui entraîne la formation de produits expansifs, la désintégration et la destruction de la pâte de ciment hydratée sont probables.

Parmi les acides qui entrent fréquemment en contact avec le béton, on peut citer les solutions diluées de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) présentes dans les eaux de pluie des zones industrielles, ainsi que les eaux souterraines contenant du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Les acides attaquent l'hydroxyde de calcium présent dans la pâte de ciment et le transforment, dans le cas du  $\text{CO}_2$ , en carbonate et bicarbonate de calcium. Ce dernier est relativement soluble et se lixivie hors du béton, le déstabilisant. Le processus est ainsi contrôlé par diffusion et progresse à une vitesse approximativement proportionnelle à la racine carrée du temps. Le C-S-H peut également être attaqué, tout comme les granulats calcaires tels que le calcaire. La vitesse d'attaque augmente avec la baisse du pH.

La qualité du béton est le facteur le plus important pour obtenir une résistance aux acides. Les bétons bien durcis contenant des ajouts présentent une résistance supérieure grâce à leur faible teneur en hydroxyde de calcium résultant de la réaction pouzzolanique. Lorsqu'une résistance accrue aux acides est requise, comme pour les sols des usines chimiques, la surface peut être traitée avec du silicate de sodium dilué, qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium et obstruer les pores. Dans des conditions plus agressives, la seule option consiste à séparer l'acide du béton, par exemple en appliquant une couche de résine époxy ou un autre système de peinture approprié.

Asaad et coll. [18] comme exemple de réaction pouzzolanique bénéfique, ont étudié la durabilité du béton exposé à l'acide sulfurique incorporant 30 % de poudre de déchets céramiques en remplacement des granulats fins. Ils ont suivi les résultats de résistance à la compression des bétons témoin et céramique après 90 jours d'exposition à 5 % de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Au fil de la période de cure, les éprouvettes témoins ont perdu davantage de résistance à la compression que le béton céramique. Ainsi, à la fin de la période d'exposition (90 jours), la perte de résistance à la compression du béton témoin a été mesurée à 34,3 MPa, soit environ

18,53 % de plus que celle enregistrée pour le béton céramique, qui était de 46,3 MPa avec une perte de résistance à la compression de 3,87 % (Fig. II.6).

Cette différence de perte de résistance peut être attribuée à la réaction pouzzolanique qui s'est produite entre l'oxyde de silicium réactif ( $\text{SiO}_2$ ), contenant un pourcentage élevé de poudre céramique, et les produits d'hydratation du ciment Portland, par exemple l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). La réaction pouzzolanique  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , entraîne la formation de gels C-S-H supplémentaires dans la matrice du béton céramique, réduisant ainsi la porosité et la perte de résistance à la compression sur des périodes de durcissement prolongées. Ils déclarent que l'utilisation de particules céramiques usagées comme granulats fins partiels améliore considérablement la résistance à la compression du béton exposé à un environnement hostile.

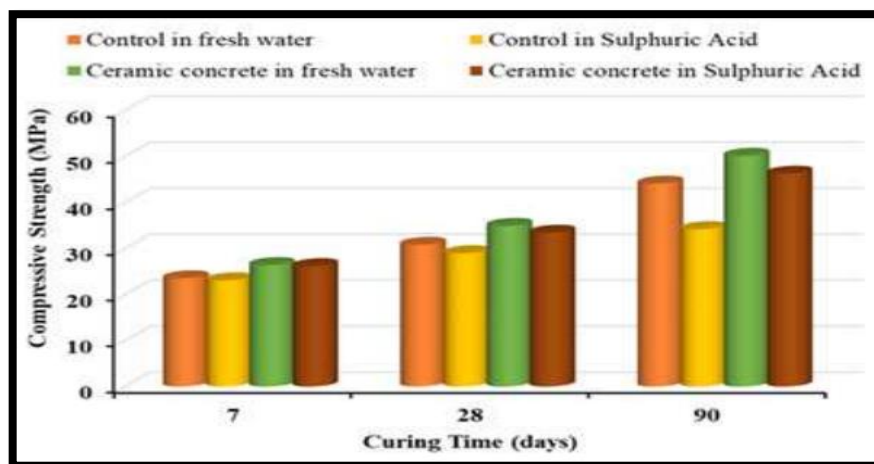


Figure II.6. Perte de résistance à la compression des bétons élaborés par Asaad et coll.

### II.2.5. Attaque par le gel-dégel

Dans les climats froids, l'attaque par le gel est une cause majeure de dommages au béton (Fig. II.7). Lorsque l'eau libre dans les pores les plus larges du béton gèle, elle se dilate d'environ 9 % et, si l'espace dans le béton est insuffisant pour absorber cette expansion, des pressions internes potentiellement perturbatrices se produisent.



**Figure II.7. Détérioration d'un revêtement de pont par attaque de gel.**

La détérioration du béton due au gel peut être provoquée par l'action perturbatrice du gel dans un béton relativement jeune, ou par l'alternance du gel et du dégel de l'eau libre dans un béton mature. Dans un béton qui n'a pas pris mais qui a été exposé à de basses températures, l'eau du mélange gèle, ce qui entraîne une augmentation de volume. L'eau n'est alors plus disponible pour l'hydratation du ciment et la prise est retardée. Lors du dégel, l'hydratation du ciment peut commencer et, à condition que le béton soit rebrûlé, il devrait prendre et durcir sans perte de résistance. Si le béton a pris avant le gel, la dilatation de l'eau lors du gel perturbe la pâte fragile, le béton ne peut pas être vibré, ce qui entraîne une diminution de sa résistance. Avec l'augmentation de la maturité du béton et du degré d'hydratation du ciment, la sensibilité aux dommages causés par le gel précoce diminue. Ces effets nécessitent une attention particulière lors du bétonnage par temps froid.

Les cycles successifs de gel-dégel peuvent provoquer des dommages progressifs et cumulatifs, qui se manifestent par des fissurations et des éclats, initialement à la surface du béton.

C'est l'eau présente dans les pores capillaires les plus larges et les vides d'air emprisonnés qui a l'effet critique. Une fois l'eau capillaire gelée, son énergie thermodynamique est inférieure à celle de l'eau gélifiée encore liquide. Elle a donc tendance à migrer pour compléter l'eau capillaire, augmentant ainsi la perturbation.

La porosité capillaire d'une pâte de ciment ou d'un béton, et donc sa sensibilité au gel, peut être réduite en diminuant le rapport eau/ciment et en veillant à ce que, grâce à une cure

appropriée du béton, l'hydratation soit aussi complète que possible. Le ressuage, qui entraîne des zones locales de forte porosité, doit également être minimisé.

Certains granulats sont eux-mêmes sensibles aux dommages causés par le gel-dégel et leur utilisation doit être évitée pour obtenir un béton durable. Le premier signe de dommage causé par la rupture des granulats est généralement l'apparition de saillies à la surface du béton. Parmi les granulats vulnérables, on trouve certains calcaires et grès poreux ; ceux-ci ont généralement une forte absorption d'eau, tandis que d'autres roches à forte absorption ne sont pas vulnérables. Les mêmes considérations concernant la taille et la distribution des pores que pour la pâte de ciment s'appliquent aux granulats ; par exemple, des pores d'environ 4 à 5 mm sont critiques, car ils sont suffisamment grands pour permettre la pénétration de l'eau, mais pas suffisamment pour permettre la dissipation de la pression de rupture. La taille des granulats est également un facteur, les particules plus petites provoquant moins de rupture, probablement parce que la distance moyenne jusqu'à la limite de fuite à la surface des granulats est plus faible.

La résistance du béton au gel et au dégel peut être améliorée par la production d'un béton présentant des caractéristiques de perméabilité adaptées. Ceci peut être obtenu par l'utilisation d'un mélange présentant le rapport eau/ciment le plus faible compatible avec une maniabilité suffisante pour la mise en place et le compactage en une masse homogène.

La durabilité peut être encore améliorée par l'entraînement d'air, une teneur en air comprise entre 3 et 6 % du volume du béton étant suffisante pour la plupart des applications. L'utilisation du béton à air occlus est particulièrement adaptée aux routes où l'on utilise du sel de déverglaçage. Il est également important, dans la mesure du possible, de prévoir un drainage adéquat des surfaces de béton exposées au gel. Le type de ciment utilisé a peu d'influence sur le processus, bien que, pendant les tout premiers stades de l'hydratation, l'utilisation d'un ciment à haute résistance initiale puisse être bénéfique. Les dommages causés à une structure par la dilatation et la contraction du béton doivent être minimisés en prévoyant des joints permettant un mouvement sans contrainte.

Medina et coll. [19] ont étudié la durabilité d'un béton fabriqué avec des granulats contenant 20 à 25 % de déchets de l'industrie sanitaire en céramique, en analysant la surface écaillée après 56 cycles de gel-dégel.

Les variations de la masse des particules écaillées en fonction du nombre de cycles de gel-dégel (Fig. II.8), montrent que le degré d'écaillage était similaire pour les trois types de

béton pendant les 14 premiers cycles. Au-delà, l'écaillage était moins intense pour les bétons recyclés et diminuait avec l'augmentation du pourcentage de granulats céramiques. La résistance était plus faible pour le béton témoin après 26 et 42 cycles. Après 56 cycles, cependant, les trois bétons présentaient le même degré de résistance, bien que l'écaillage soit respectivement inférieur de 2,1 et 3,68 % pour les bétons CC-20 et CC25 à celui du béton témoin. La différence observée aux premiers stades était due à la structure poreuse plus fine du béton recyclé, qui présentait davantage de pores capillaires. Une proportion plus élevée de pores dans cette fraction élève le point de congélation, retardant ainsi les dommages.

Outre les valeurs de masse d'écaillage obtenues pour les trois bétons après 56 cycles de gel-dégel, inférieures à  $0,1 \text{ kg m}^2$ , les bétons recyclés étudiés seraient classés comme matériaux hautement résistants à l'écaillage, selon la classification de la norme suédoise SS 13 72 44. Ces résultats prouvent que l'inclusion de granulats recyclés améliore la résistance aux variations brusques de température.

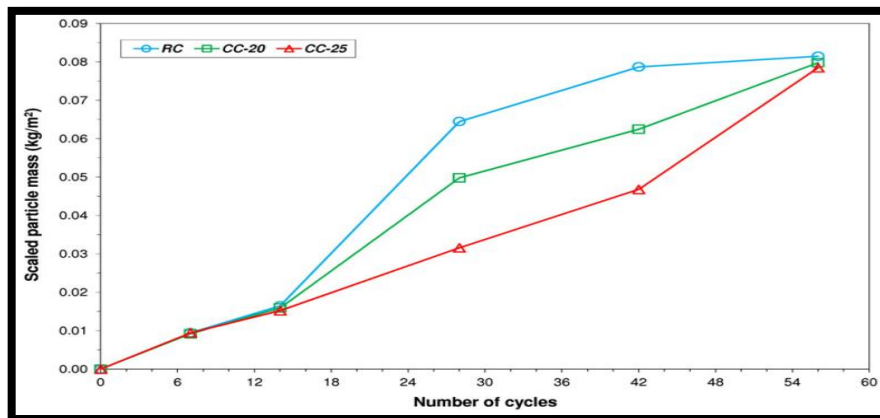


Figure II.8. Masse écaillée en fonction du cycle de gel-dégel élaborés par Medina et coll.

### II.2.6. La résistance au feu

Le béton est incombustible et n'émet pas de fumées toxiques lorsqu'il est exposé à des températures élevées. Cependant, bien qu'il puisse conserver une certaine résistance pendant une durée raisonnable à haute température, il finit par se dégrader. La vitesse et l'ampleur de la dégradation dépendent de la température maximale atteinte, de la durée d'exposition, des gradients de température induits, des constituants du béton, de sa teneur en humidité et de la taille de l'échantillon.

## *CHAPITRE II : Causes et effets de dégradation des bétons*

---

L'étendue des dommages tend à varier avec la profondeur du béton et est plus importante à la surface. Outre le béton, les effets d'une exposition à des températures élevées peuvent également endommager les armatures. De plus, la couleur du béton peut changer suite à une exposition à la chaleur. Ce phénomène coïncide généralement avec une perte de résistance significative et est dû à la présence de sels ferreux dans les granulats ou le sable, et est plus marqué dans les bétons contenant des granulats siliceux. Les dommages causés par les températures élevées se manifestent généralement par un écaillage. Celui-ci peut se produire de manière explosive, peu après l'exposition à la chaleur, ou sur des périodes plus longues et moins violentes.

Trois facteurs principaux contribuent à la dégradation :

\*L'évaporation de l'eau dans le béton, qui commence à 100 °C et se poursuit avec l'évacuation progressive de l'eau retenue. Si le béton est initialement saturé et peu perméable, la vapeur d'eau ne peut se disperser rapidement et l'accumulation de pression peut entraîner des fissures et un écaillage. Ce problème est donc particulièrement présent dans le béton à haute résistance et à faible porosité. Même si le volume total d'eau dans le béton est faible, les pressions induites sont très élevées et un écaillage explosif progressif des couches superficielles peut se produire en quelques minutes après l'exposition au feu.

\*Dilatation différentielle entre le béton à haute résistance et les granulats, entraînant des contraintes thermiques et des fissures, initiées dans la zone de transition. Ceci est principalement responsable de la perte de résistance plus rapide au-dessus d'environ 500 °C et explique également les performances supérieures du béton calcaire et des granulats légers. Les granulats légers présentent l'avantage supplémentaire de diminuer la conductivité thermique du béton, retardant ainsi l'élévation de température à l'intérieur d'un élément de structure (Fig. II.9).

\*Décomposition des hydrates de la pâte de ciment, qui n'est complète que lorsque la température approche 1 000 °C, mais entraîne une perte totale de résistance à ce stade.



**Figure II.9. Changement de couleur d'un bâtiment sous effet d'un incendie.**

El-Gamal et coll. [20] ont préparé différents liants en remplaçant partiellement le ciment par 5, 10 et 20 % de déchets céramiques CW (en masse). La résistance thermique de différents composites durcis a été évaluée. Les éprouvettes hydratées pendant 28 jours sous l'eau du robinet ont été cuites à 300, 600 et 800 °C pendant 3 h. Le refroidissement des éprouvettes cuites a ensuite été effectué par des méthodes de refroidissement progressif et rapide.

Ils ont constaté que tous les mélanges présentent une nette augmentation des valeurs de résistance à la compression lors d'un chauffage jusqu'à 300 °C par rapport aux valeurs enregistrées après 28 jours d'hydratation, suivie d'une diminution notable lors d'un chauffage à 600 et 800 °C (Fig.II.10) . L'augmentation marquée des valeurs de résistance résiduelle après cuisson à 300 °C et refroidissement progressif à l'air de tous les échantillons testés est principalement attribuée au processus d'autoclavage interne, qui entraîne le remplissage des pores par des produits d'hydratation supplémentaires (principalement sous forme de CSH microcristallin), ce qui conduit à une structure plus compacte avec une faible porosité et des propriétés mécaniques élevées. Le remplacement du ciment par 20 % de CW n'entraîne aucune amélioration de la résistance résiduelle du liant lors de la cuisson à différentes températures. Ces résultats ont été attribués à la formation de quantités excessives de CSH quasi amorphe résultant de la réaction pouzzolanique entre le CH libre issu de l'hydratation des OPC et la silice présente dans le CW. De plus, la consommation de CH libre diminue la conversion de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en chaux et en vapeur d'eau pendant le chauffage, ce qui peut entraîner de graves dommages dus à l'expansion de la chaux lors du refroidissement. La diminution observée des valeurs de résistance résiduelle à la compression pour tous les échantillons testés lors d'un chauffage à 600

et 800 °C est principalement due aux effets thermiques, qui provoquent la décomposition des produits d'hydratation formés.

Les valeurs de résistance à la compression des éprouvettes durcies constituées de A0, B0, C0 et D0, chauffées à 300, 600 et 800 °C puis refroidies brusquement dans l'eau sont présentées à la figure 10. De toute évidence, les valeurs de résistance à la compression des éprouvettes refroidies brusquement sont inférieures à celles des éprouvettes refroidies progressivement. De toute évidence, tous les composites présentent une diminution continue de leur résistance à la compression lorsque la température de chauffage passe de 300 à 600 °C, pour atteindre zéro à 800 °C.

La forte perte de résistance à la compression observée lors du refroidissement brutal des éprouvettes est principalement due aux effets des températures très élevées, outre le choc thermique provoqué par le refroidissement brutal (à l'eau froide) des éprouvettes cuites, qui produit de nombreuses nouvelles fissures ainsi qu'un élargissement des microfissures déjà présentes dans la matrice durcie des éprouvettes cuites. L'augmentation de la température de chauffage augmente l'effet du choc thermique, ce qui explique la perte importante de résistance de tous les échantillons à 600 et 800 °C.

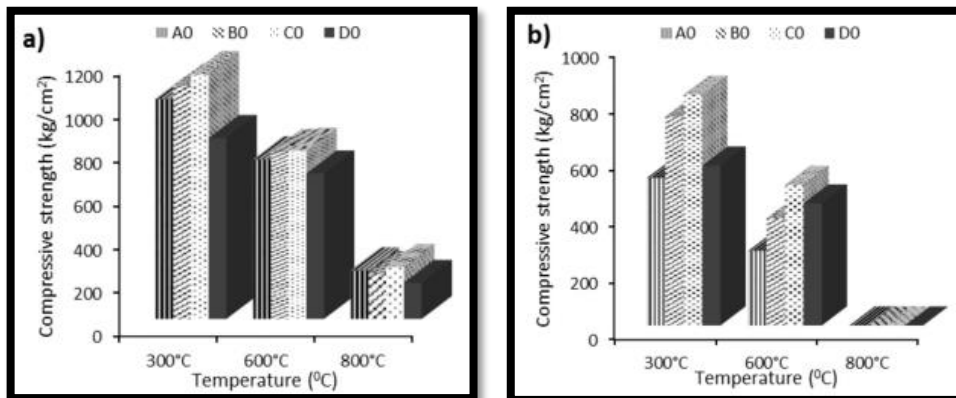


Figure II.10. Valeurs de résistance à la compression des pâtes de ciments élaborés par El-Gamal et coll. a) refroidissement progressif b) refroidissement brutal.

### II.3. Les outils de l'approche performancielle

Différents outils existent pour appréhender la durabilité du béton selon une approche performancielle [21].

### II.3.1 Les indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité et de la structure. Deux catégories d'indicateurs de durabilité sont distinguées :

- Les indicateurs de durabilité généraux (valables pour la plupart des dégradations).
- Les indicateurs de durabilité spécifiques à un processus de dégradation

Les indicateurs de durabilité généraux sont des paramètres déterminants pour la durabilité des bétons. Ces indicateurs généraux sont les suivants :

- la porosité accessible à l'eau (Fig.II.11).
- le coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure (Fig. II.12).
- la perméabilité aux gaz.
- la perméabilité à l'eau liquide.
- la teneur en portlandite.

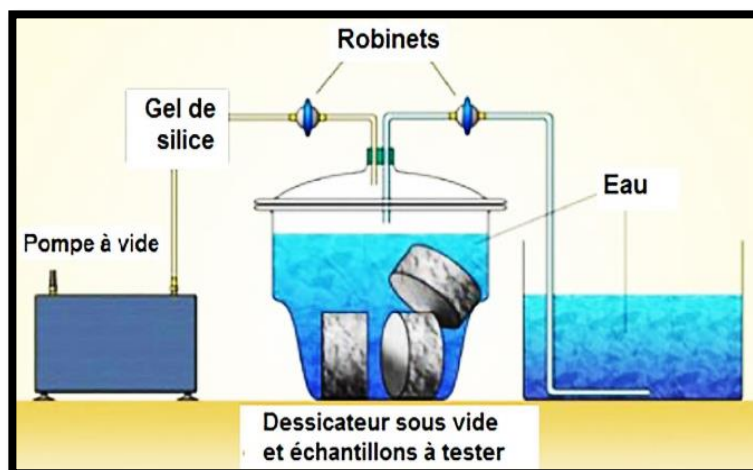


Figure II.11. Montage pour la mesure de la porosité accessible à l'eau.



**Figure II.12. Outils de test pour l'essai de diffusion des ions chlorures.**

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter l'indicateur général par un ou des indicateurs spécifiques à ce processus. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus peuvent être classés en deux catégories :

–Les indicateurs chimiques, tels que la quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps.

–Les indicateurs globaux et macroscopiques, tel que les variations dimensionnelles des éprouvettes de béton.

On peut aussi appliquer des indicateurs de substitution. Il peut être envisagé de remplacer la détermination directe de certains des indicateurs de durabilité généraux par celle de paramètres de substitution. C'est des méthodes d'essai pratiquées plus couramment ou plus facilement dans certains laboratoires, pour des paramètres plus adaptés au problème posé ou aux modèles mis en œuvre, ou lorsque des méthodes fournissant des données plus complètes sont requises.

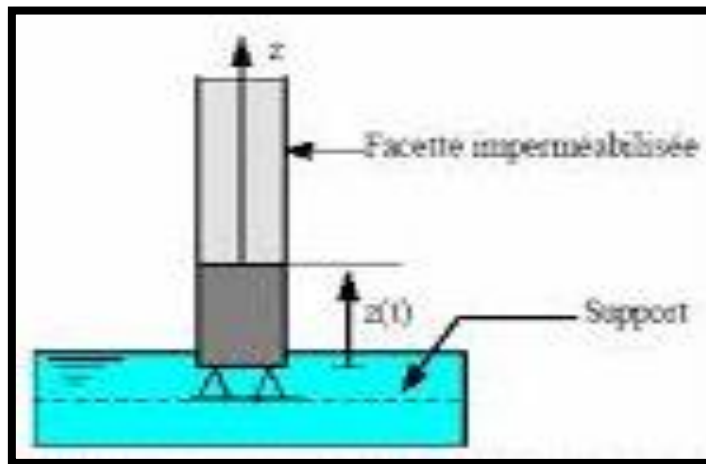
On trouve parmi les indicateurs de substitution :

- la porosité accessible au mercure
- la résistivité électrique (Fig. II.13)
- la quantité d'électricité

- le coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$
- le coefficient d'absorption capillaire (Fig. II.14).



**Figure II.13. Dispositif de mesure de la résistivité électrique du béton.**



**Figure II.14. Description schématique pour l'essai d'absorption capillaire du béton.**

### **II.3.2. Les essais de performance et de caractérisation**

Les essais de performance permettent d'évaluer le comportement d'un béton soumis à des sollicitations physico-chimiques du même type que celles auxquelles l'ouvrage sera exposé, mais souvent amplifiées. Ces essais ont pour vocation première de permettre un classement pertinent des bétons vis-à-vis de leur résistance à une agression particulière.

Les essais sont conçus pour accroître l'intensité de la sollicitation, qu'elle soit physique ou chimique. Les essais reposent sur la répétition de cycles pour lesquels les conditions varient de manière importante : cycle de gel-dégel, cycles d'humidification/séchage, etc. D'autres consistent à disposer les échantillons de béton dans un milieu tel que la quantité de béton qui réagit par unité de temps est importante : carbonatation accélérée, essai de performance pour l'alcali-réaction, essai de lixiviation à pH constant. Certains essais utilisent les deux principes.

De nombreux essais de performance et de caractérisation existent comme exemple :

- les essais destinés à appréhender la durabilité du béton au gel.
- Performance des formulations du béton vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction.
- l'essai de carbonatation (Fig. II.15).
- l'essai de lixiviation à pH constant.
- attaque sulfatique externe ;
- attaque par l'eau de mer ;
- action des sels de déverglaçage en cas de gel modéré.

Il va de soi que les essais de performance doivent être robustes. Les modes opératoires sont élaborés pour atteindre une répétabilité et une reproductibilité optimales. La représentativité et la sévérité des essais de performance sont deux autres aspects importants. La représentativité d'un essai de performance dépend, d'une part, de la fidélité avec laquelle les mécanismes qui opèrent *in situ* sont reproduits et, d'autre part, des conditions aux limites retenues qui ne doivent pas trop s'éloigner de la réalité.



Figure II.15. Progression du front de carbonatation.

# *Chapitre III*

*Essais, résultats et discussion*

### **III-1 Introduction**

Le béton ordinaire est le matériau de choix pour la construction. Ces principaux constituants sont : Le ciment, l'eau, le gravier, le sable. Dans ce chapitre, un béton ordinaire est formulé par la méthode Dreux-Gorisse. Mais, la fraction sableuse est substituée par un sable issu des déchets céramique. Afin de comprendre l'effet de la substitution, trois (03) pourcentages sont Un béton ordinaire (B0) plus trois bétons B10, B20, B30 avec 10, 20 et 30% de sable de déchets céramique respectivement.

### **III-2-Les matériaux utilisés**

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de M'sila. Les matériaux utilisés sont :

\*Le sable (0/3) de la région de BOUSAADA.




\*Le gravier (3/8) , (8/15) , (15/25) concassé.

\*Un ciment de type CEM I 42.5N fournie par le groupe Holcim.

\*L'eau potable du laboratoire de génie civil.

\*Un sable de type céramique sanitaire concassé au laboratoire pédagogique du département de génie civil (0/3).

**Tableau III.1. Les différents matériaux utilisés pour la confection des béton**

Le ciment	Le sable naturel	Le sable céramique
		
Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
		

### **III-3- Caractérisation des matériaux utilisés**

#### **III-3-1-Les sables**

##### **III-3-1-1-La masse volumique, porosité et indices des vides (NF P 18-555)**

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume absolu du corps (tableaux III.2 et III.3), c'est-à-dire que la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides. On détermine la masse volumique absolue des sables (Fig. III.1) à l'aide du récipient de capacité 1000 ml.

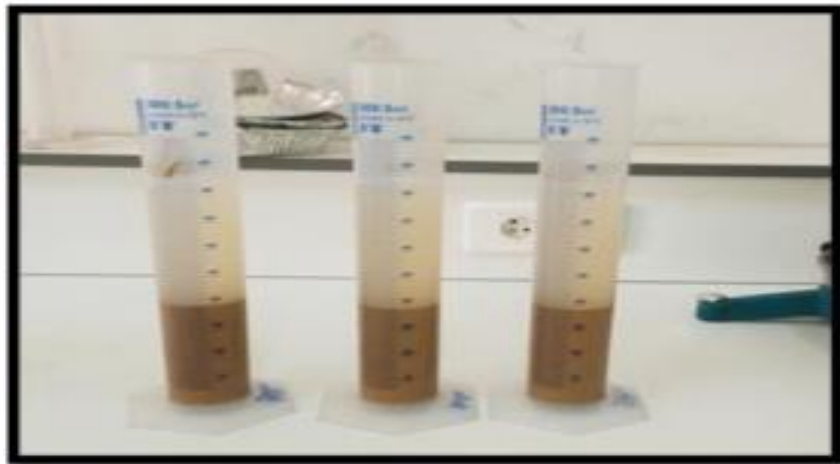
\*On prend 03 échantillons de masse 300g.

\*On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse « V =150 ml » d'eau préparé préalablement dans 2ème récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe.

\*Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable — eau. Soit ( $V_m$ ) ce volume.

\*Le volume du sable est :  $V_s = V_m - V_e$

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :  $\rho = \frac{M}{V_s}$



**Figure III.1. Eprouvettes graduées**

**Tableau III.2. Masse volumique absolue du sable de dune**

N° d'essai	M [g]	V <sub>e</sub> [cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m</sub> [cm <sup>3</sup> ]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	300	150	270	2,5	<b>2,5</b>
02	300	150	270	2,5	
03	300	150	270	2,5	

**Tableau.III.3 Masse volumique absolue du sable de céramique**

N° d'essai	M [g]	V <sub>e</sub> [cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m</sub> [cm <sup>3</sup> ]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	300	150	280	2,31	<b>2,34</b>
02	300	150	280	2,31	
03	300	150	275	2,40	

Les masses volumiques apparentes des granulats sont calculés d'après la norme française NF P18-555. C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient. On détermine la masse volumique apparente du sable (Tableaux III.4 et III.5) à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres (Fig. III.2).

\*On remplit l'entonnoir avec du sable sec.

\*On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit.

\*On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M<sub>2</sub> ce poids.

\* Connaissant le volume de récipient V<sub>r</sub> = 1000 cm<sup>3</sup>

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

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



**Figure III.2. Entonnoir à sable.**

**Tableau III.4. Masse volumique apparente du sable de dune à l'état lâche**

N° d'essai	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	218	1747	1,52	<b>1,52</b>
02	218	1745,2	1,52	
03	218	1746,2	1,52	

**Tableau III.5. Masse volumique apparente du sable de céramique à l'état lâche**

N° d'essai	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	218	1564	1,35	<b>1,35</b>
02	218	1562	1,34	
03	218	1565	1,35	

La masse volumique à l'état compact (Tableaux III.6 et III.7), est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient ( $V_r = 1000 \text{ cm}^3$ ) et le compacter par tassement à 30 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit  $M_2$  la masse de l'ensemble (sable +récipient)  $M_1$  la masse du récipient.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :  $\rho_c = (M_2 - M_1)/V_r$

**Tableau III.6. Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact**

N° d'essai	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	218	1760,1	1,54	<b>1,54</b>
02	218	1761,2	1,55	
03	218	1760.1	1,54	

**Tableau III.7. Masse volumique apparente du sable de céramique à l'état compact**

N° d'essai	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	ρ [g /cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g /cm <sup>3</sup> ]
01	218	1570	1,35	<b>1,35</b>
02	218	1572.2	1,35	
03	218	1573	1,35	

Selon la même norme on peut calculer la porosité, la compacité et l'indice de vides.

**\*La porosité :**

C'est le volume des vides entre les grains du sable, la porosité peut être déterminée par la formule :  $P (\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) / 100$

On distingue quatre cas :

**A l'état lâche :**

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

-Pour le sable de dune :  $PLSD = 39,2 \%$

-Pour le sable céramique :  $PLSC = 42,30\%$

**A l'état compacte**

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

-Pour le sable de dune :  $PCSD = 38,4\%$

-Pour le sable céramique :  $PCSC = 42,30\%$

**\*La compacité**

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.  $C = (\rho_{app}/\rho_{abs}) = 100 - P$

On distingue quatre cas :

-Pour le sable de dune :

Etat lâche : CLSD = 60.8%

Etat compacte : CCSD = 61.6%

-Pour le sable céramique :

Etat lâche : CLSC = 57.60%

Etat compacte : CCSC = 57,60%

**\*L'indice des vides :**

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide. Avec « P » en pourcent (%).  $E = P/C$

-Pour le sable de dune :

Etat lâche : ELSD = 0,64 %

Etat compacte : ECSD= 0,62 %

-Pour le sable céramique :

Etat lâche : ELSC= 0.73 %

Etat compacte : ECSC = 0,73 %

Les résultats sont représenté dans les tableaux suivants (tableau III.8 et III.9):

**Tableau III.8. Porosité, compacité et indice des vides pour le sable de dune**

Porosité P (%)		Compacité C (%)		Indice des vides E	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
39,20	38,4	60,80	61,6	0,64	0,62

**Tableau III.9. Porosité, compacité et indice des vides pour le sable céramique**

Porosité P (%)		Compacité C (%)		Indice des vides E	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
42.30	42.30	57.60	57.60	0,73	0,73

**III-3-1-2-Equivalent de sable (NF P 18-598)**

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons et provoque des gonflements et des retraits.

Les différentes étapes de l'essai sont les suivantes :

\*Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g).

\*Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère.

\*A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de chasser les bulles d'air.

\*Laisser reposer pendant 10 minutes.

\*Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90cycles de 20cm de course horizontale en 30 secondes à l'aide d'un agitateur mécanique (Fig. III.3).

\*Retirer le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de cette dernière.

\*Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps eu tube un léger piquage,

\*Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2ème repère, laisser ensuite reposer pendant 20minutes.

Pour savoir l'équivalent de sable visuel (E.S.V tableaux III.10 et III.11) :

\*Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

\*Mesurer également avec la règle la hauteur  $h_2$  comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.  $ESV = (h_2 / h_1) \times 100$  (%)

Pour savoir l'équivalent de sable piston (E.S.P tableaux III.10 et III.11):

### *CHAPITRE III : Essais, résultats et discussion*

\*Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

\*Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit  $h'$  la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.  $ESP=(h'_2/h_1) \times 100(\%)$ .



**Figure III.3. Agitateur pour équivalent de sable  
céramique visuel et piston**



**Figure III.4. Equivalent des  
.able pour sable**

**Tableau III.10. Equivalent de sable pour sable de dune**

N° d'essai	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	ESV [%]	Moy [%]	$h'_2$ [cm]	ESP [%]	Moy [%]
01	8,9	13,4	66,41	<b>68,96</b>	8,7	64,92	<b>65,52</b>
02	8,9	13,3	66,91		8,5	63,90	
03	8,8	12,4	70,96		8,4	67,74	

**Tableau III.11. Equivalent de sable pour sable céramique visuel et piston**

N° d'essai	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	ESV [%]	Moy [%]	$h'_2$ [cm]	ESP [%]	Moy [%]
01	9,8	10,8	90,74	<b>88,92</b>	10	92,60	<b>92,92</b>
02	9,6	10,8	88,88		10,2	94,44	
03	9,5	10,9	87,15		10	91,74	

**III-3-1-3-La teneur en eau (NF P 18-555)**

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau  $W$  (tableaux III.12 et III.13) contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = (M_h - M_s) / M_s \times 100 (\%)$$

Où :  $M_h$  : Masse du matériau humide ;  $M_s$  : Masse du matériau sec.

Pour avoir cette teneur il faut :

\*Peser un échantillon de sable humide, soit «  $M_h$  » son poids (500g) et le laisser dans une étuve à une température dans l'intervalle de 105°C à 110°C pendant 24 heures ;

\*Peser l'échantillon de nouveau, soit «  $M_s$  » son poids.

**Tableau III.12. Teneur en eau du sable de dune**

N° d'essai	$M_h$ [g]	$M_s$ [g]	W [%]	$W_{moy}$ [%]
01	500	499	0,20	<b>0,33</b>
02	500	497	0,60	
03	500	499	0,20	

**Tableau III.13. Teneur en eau du sable céramique**

N° d'essai	$M_h$ [g]	$M_s$ [g]	W [%]	$W_{moy}$ [%]
01	500	497	0,60	<b>0,47</b>
02	500	498	0,40	
03	500	498	0,40	

**III-3-1-4-Analyse granulométrique (NF P 18-560)**

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéreux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulat suivant leurs dimensions permet de déterminer ses continuités.

**Pour arriver à notre fin, il faut :**

\*Prélever une masse de 2kg de matériau (Sable sec). \*Peser chaque tamis à vide, soit «  $m_i$  » la masse du tamis.

\*Constituer une colonne de tamis (Fig. III.4) propres et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimée en mm) [5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.125, 0.08]

\*Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5 minutes.

\*Peser chacun des tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.

A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g. Soit  $M_i$  = la masse de tamis (i) + le sable

\*Calculer la différence entre  $M_i$  et  $m_i$  (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel  $R_1$  de tamis 1).

\*Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.

\*Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à  $R_1$ , soit  $R_2$  la masse de refus m du tamis 2 ( $R_2 = R_1$  + refus partiel sur tamis 2)

\*Poursuivre la même opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses de différents refus cumulés  $R_3, R_4, \dots, R_n$  le tamisât est calculé par la relation :  $T = 100 - R_c$

$R_c$  : refus cumulé en %,  $T$  : tamisât en %



**Figure III.5. Analyse granulométrique par tamisage**

### CHAPITRE III : Essais, résultats et discussion

Les résultats de ces opérations, sont transcrites aux tableaux III.14 et III.15 :

**Tableau III.14. Analyse granulométrique du sable de dune**

Tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulés		Tamisât [%]
		[g]	(%)	
5	0	0	0.00	100
2,5	35	35	1.75	98,25
1,25	38	73	3,65	95,35
0,63	81	154	7,7	92,3
0,315	295	449	22,45	77,55
0,16	1206	1655	82,75	17,25
0,08	309	1964	98,2	1,8
Fond	36	2000	100	0,00

**Tableau III.15. Analyse granulométrique du sable céramique**

Tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulés		Tamisât [%]
		[g]	(%)	
5	1	1	0.05	99.95
2,5	285	286	14.3	85.70
1,25	212	498	24.9	75.10
0,63	509	1007	50.35	49.65
0,315	638	1645	82.25	17.75
0,16	240	1885	94.25	5.75
0,08	96	1981	99.05	0.95
Fond	15	1996	99.80	0.20

On remarque que le module de finesse du sable de dune est 1.38 ce qui veut dire que c'est un sable fin. Le module de finesse du sable céramique est 2.6 ce qui est l'équivalent d'un sable grossier.

**III-3-2-Le gravier**

**III-3-2-1- La masse volumique absolue**

Idem que la norme utilisé pour le sable. Les résultats pour les trois fractions sont résumés au tableau III.16.

**Tableau III.16. La masse volumique absolue des graviers**

Fraction	N° d'essai	M [g]	V <sub>e</sub> [cm <sup>3</sup> ]	V <sub>1</sub> [cm <sup>3</sup> ]	ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>moy</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]
3/8	01	400	400	550	2,67	<b>2,67</b>
	02			550	2,67	
	03			550	2,67	
8/15	01	400	400	548	2,70	<b>2,65</b>
	02			550	2,67	
	03			555	2,58	
15/25	01	300	300	415	2,60	<b>2,56</b>
	02			415	2,60	
	03			420	2,50	

**III-3-2-2-La masse volumique apparente**

Pour avoir cette caractéristique, il faut :

\*Sécher le matériau jusqu'à un poids constant ;

\*Peser le récipient à l'état vide « M<sub>1</sub> », puis le poser sur une table. A l'aide d'une pelle remplir le gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient. La distance séparant le récipient de la pelle doit être à l'environ de 10 cm ;

\*Peser de nouveau le récipient plein de gravier. Soit « M<sub>2</sub> » ce poids.

La masse volumique apparente (tableau III.17) est déterminée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{M_2}$$

**Tableau III.17. La masse volumique apparente des différents granulats**

Fraction	N° d'essai	M <sub>1</sub> [kg]	M <sub>2</sub> [kg]	V [L]	ρ [kg/L]	ρ <sub>moy</sub> [kg/L]
3/8	01	2,934	12,845	7	1,41	<b>1,39</b>
	02		12,633		1,38	
	03		12,671		1,39	
8/15	01	3,460	17,611	10	1,41	<b>1,40</b>
	02		17,538		1,40	
	03		17,623		1,41	
15/25	01	7,284	34,79	20	1,38	<b>1,41</b>
	02		35,485		1,41	
	03		36,29		1,45	

**III-3-2-3-Porosité, Compacité et Indice des vides des graviers :**

La même norme (NF P18-555) est suivie pour avoir ces caractéristiques (tableau III.18).

**Tableau III.18. La porosité, compacité et indices des vides des graviers**

Fraction	Porosité [%]	Compacité [%]	indice des vides [%]
3/8	47,94	52,05	0,92
8 /15	47,16	52,80	0,89
15/25	44,92	55,07	0,81

### III-3-2-4-Analyse granulométrique

Les résultats de chaque fraction, sont présentés dans Les tableaux III.19, III.20 et III.21 :

**Tableau III.19. L'analyse granulométrique du gravier 3/8**

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamisât [%]
		[g]	[%]	
8	14	14	0,875	99,125
6,3	627	641	40,062	95,938
5	423	1064	66,50	33,50
2.5	527	1591	99,437	0,563
1.25	5	1596	99,75	0,25
Fond	4	1600	100,00	0,00

**Tableau III.20. L'analyse granulométrique du gravier 8/16**

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamis [%]
		[g]	[%]	
16	145	145	4,53	95,47
12,5	739	884	27,62	72,38
10	1185	2069	64,65	35,35
8	694	2763	86,34	13,66
Fond	438	3200	100,00	0.00

**Tableau III.21. L'analyse granulométrique du gravier 16/25**

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamis [%]
		[g]	[%]	
25	284	284	5,68	91,32
22,4	455	739	14,78	85,22
20	1674	2413	48,26	51,74
18	1490	3903	78,06	21,94

16 k	774	4677	93,54	6,46
Fond	323	5000	100	0

**III-3-3- Caractéristiques du ciment utilisé**

Le ciment utilisé dans notre étude est un CEM I 42,5N, de la cimenterie Holcim Groupe M'sila. C'est un ciment gris résistant aux sulfates, contenant un faible taux d'aluminates de calcium et une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé. Quelques-unes de ces caractéristiques sont résumées au tableau III.22.

**Tableau III.22. Quelque élément chimique du ciment utilisé.**

Elément	Perte au feu	SO3	MgO	Chlorures
%	0,5 à 3 %	1,8 à 3 %	1,2 à 3 %	0,01 à 0,05%

**III-3-4- Eau de gâchage**

L'eau de gâchage utilisée pour la confection est l'eau potable du robinet. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

**III-4-Formulation du béton**

Avec l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse (Fig. III.6) quatre (04) bétons ont été confectionnés

-Béton témoin B0 : est un mélange ordinaire formulé à partir de trois classes granulaires : sable, gravillon (3/8) gravillon (8/15) et gravillon (15/25).

-Bétons modifiés B10, B20 et B30 : C'est des bétons ordinaires mais, la fraction sableuse (le sable de dune) est substituée par 10, 20 et 30% d'un sable d'origine céramique sanitaire.

La courbe de référence nous a permis de fixer la quantité (Tableau III. 23) de chaque élément de notre béton.

**Tableau.III.23. Formulation du béton pour 1m<sup>3</sup>**

Constituents	Formulation pour 1m <sup>3</sup>
Sable de dune	609,5
Gravier 3/8	287,2
Gravier 8 /15	589,1
Gravier 15/25	367,2
Ciment	350,0
Eau	175,0

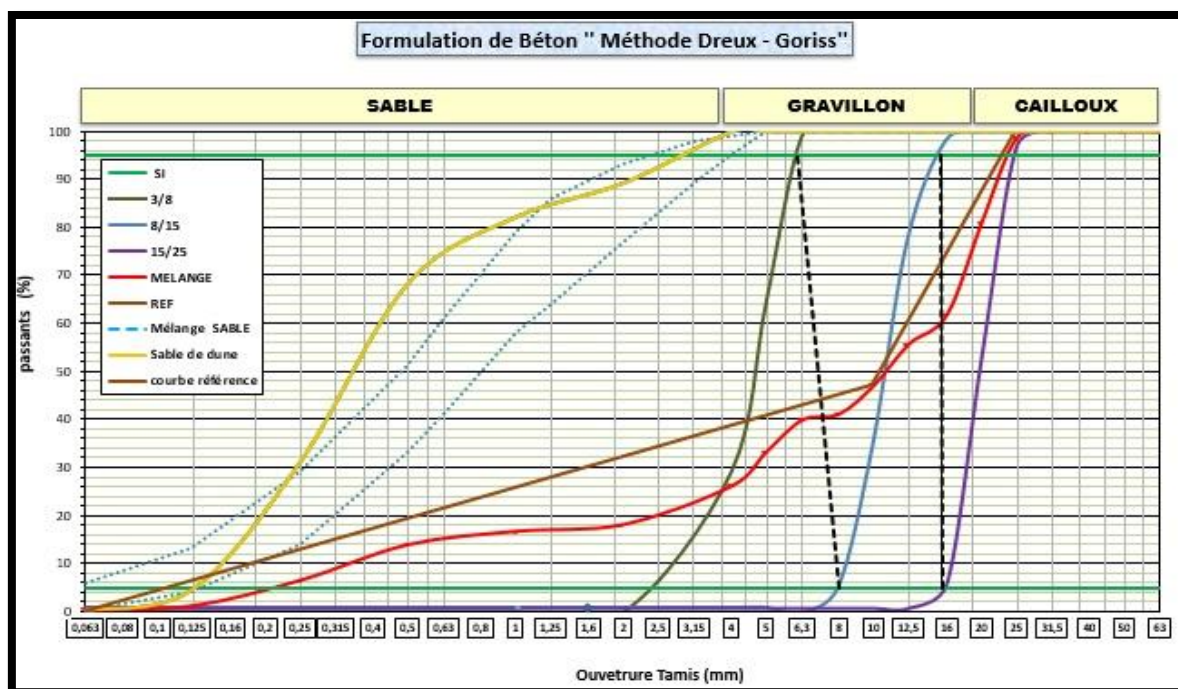


Figure III.6. Courbe Dreux Goriss du béton B0.

#### III-4-1-Malaxage des bétons

La préparation du mélange a été faite en respectant soigneusement les démarches normalisées. L'introduction des composants se fait par ordre décroissant de la finesse pour les graviers et le sable. Après un malaxage primaire des granulats, un deuxième malaxage, est effectué après l'introduction du ciment afin de répartir toute la quantité dans le malaxeur. A la fin, on ajoute de l'eau progressivement (Fig. III.7).

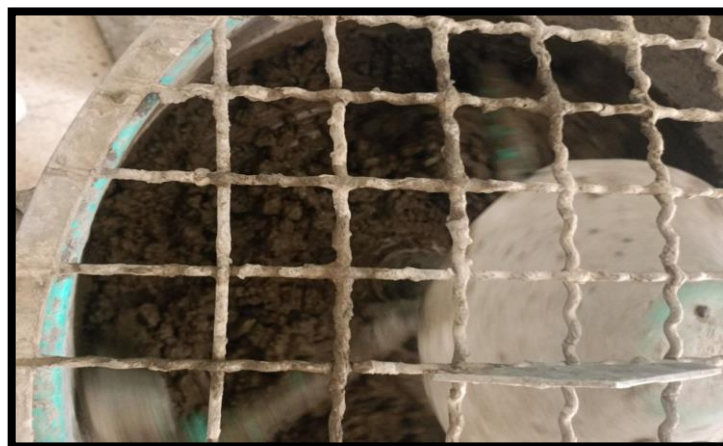


Figure III.7. Malaxage du béton ordinaire

### III-4-2-Confection des éprouvettes

Pour les besoins de notre étude et selon la nature des essais réalisés, on a utilisé des moules cubiques (10×10×10) cm<sup>3</sup>, pour la confection des différents bétons. Le nombre d'échantillons pour chaque essai est de trois (03) afin d'avoir une moyenne représentative (Fig. III.8).



Figure III.8. Confection des bétons étudiés

### III-4-3-Moulage et démoulage

Après le malaxage, le béton est prêt à l'emploi. Il est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage. Le coulage est exécuté en deux couches vibrées jusqu'à la stabilisation de niveau du béton. Le but de la vibration est le remplissage parfait du moule.

A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. Ils sont ensuite soumis, jusqu'à la date de l'essai à une cure humide.

### III-5-Essai Sur béton frais

#### III-5-1-Affaissement au cône d'Abrams (NF P18-451)

L'essai au cône d'Abrams, appelé aussi « Slump test » est l'essai le plus simple et le plus fréquemment utilisés pour déterminer la consistance du béton. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement est grand et plus le béton est réputé fluide.

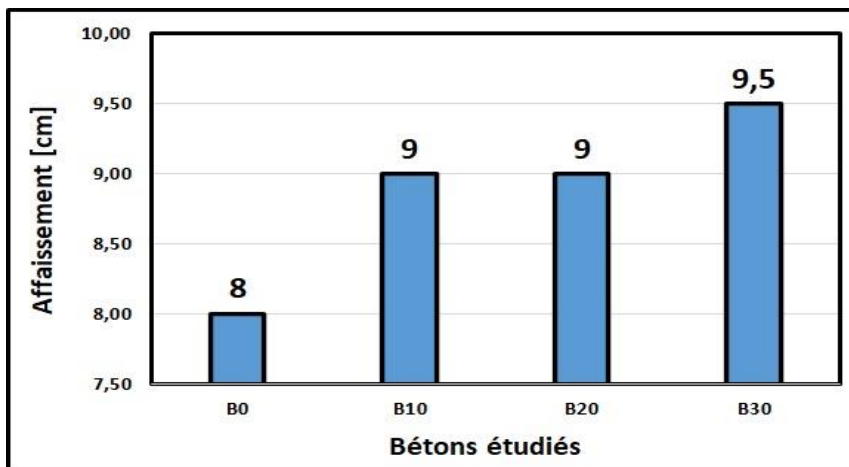
Pour mesurer l'affaissement on introduit le béton frais dès la fin de sa confection en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage. Après l'arasage et le démoulage en soulevant le moule, on mesure la hauteur par laquelle le béton s'est enfoncé (Fig. III.9).



**Figure III.9. Essai d'affaissement au cône d'Abrams**

Après la fin des mesures, le béton est aussitôt remis au malaxeur. Les différents affaissements enregistrés sont illustrés à la figure III.10.

Sachant que le rapport E/C est constant pour tous les types de béton étudiés, on remarque d'après la figure III.10 une augmentation de cette caractéristique du béton frais. Cette augmentation de l'affaissement est proportionnelle à l'introduction et l'accroissement du pourcentage de substitution du sable dunaire par le sable d'origine céramique.



**Figure.III.10. Affaissement des différents bétons.**

Cette augmentation de l'affaissement est due à l'incorporation des sables d'origine céramique dans le squelette granulaire du béton. La glaçure appliquée au céramique sanitaire leur donne une brillance mais aussi une imperméabilité. Cette dernière a pour effet immédiat de l'écoulement de l'eau.

### **III-6-Essais sur béton durci**

Des essais d'attaque acide ont été effectués afin d'étudier le comportement des bétons face aux agressions chimiques similaires à celles que l'on trouve dans les bassins des stations d'épuration par exemple c'est-à-dire une forte agressivité chimique associée aux eaux usées. Les éprouvettes de béton ont été immergées dans un bain de solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à 8% de concentration et un autre à 8% HCl. Le choix de ces pourcentages est l'accélération du processus de dégradation pour se rapprocher des conditions réelles où la dégradation peut prendre plusieurs années pour se produire.

#### **III-6-1- La perte de masse**

La masse des éprouvettes cubiques a été mesurée à différentes périodes. Avant la prise de masse, les éprouvettes ont été nettoyées en enlevant la croûte surfacique provoquée par l'action de l'agression acide. Cette action a donné lieu à un écoulement blanc. Après avoir été égouttés, des pesées évaluant la masse ont été effectuées.

Selon la Figure III.11, on constate que l'immersion des bétons dans les solutions acides, diminue la masse de tous les bétons. Cette perte de masse est plus prononcée dans le béton témoin que dans les bétons à granulats recyclés. Avec l'incorporation du sable issu des déchets de la céramique sanitaire, la masse des éprouvettes B10, B20 et B30, certes diminue mais avec un comportement meilleur que le béton témoin « B0 ». Les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par la solution (Figure III.12). Les granulats et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de « béton lavé ».

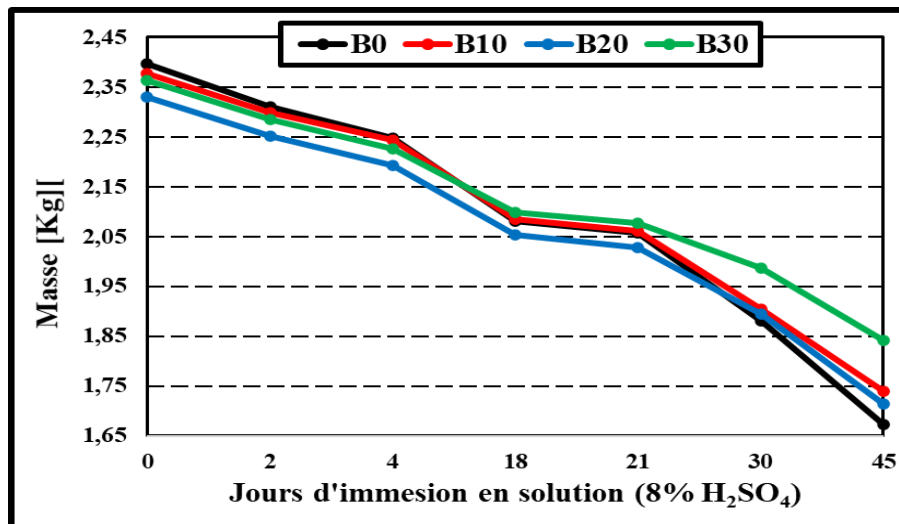
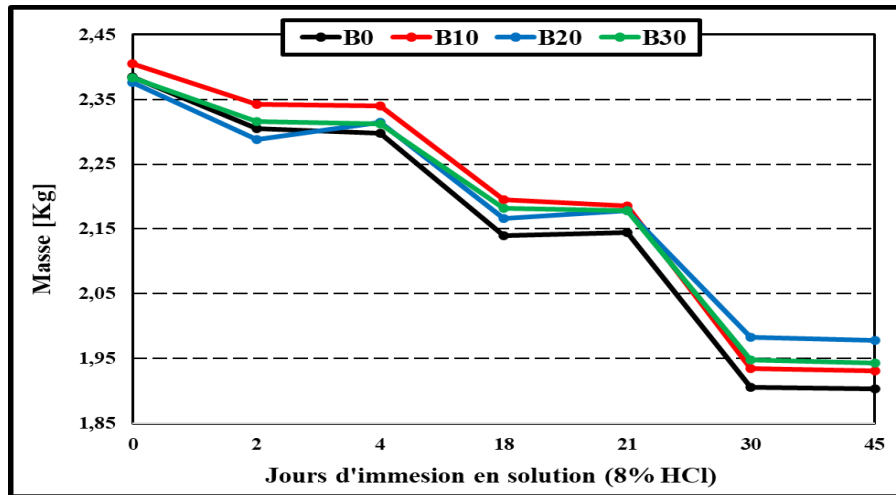
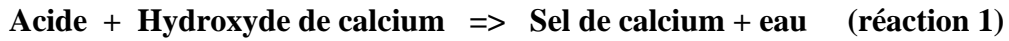


Figure.III.11. Perte de masse des éprouvettes de bétons.



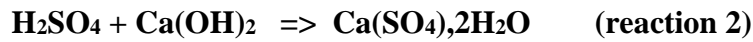
Figure.III.12. Forme des éprouvettes de bétons Après 45 jours d'immersion.

La dégradation des bétons par l'acide est provoquée par la réaction de ce dernier et l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la pâte de ciment. Cette réaction produit le sel de calcium fortement soluble. Ce sel de calcium solubles est facilement détachable, ce qui affaiblie la structure de la pâte (réaction 1).

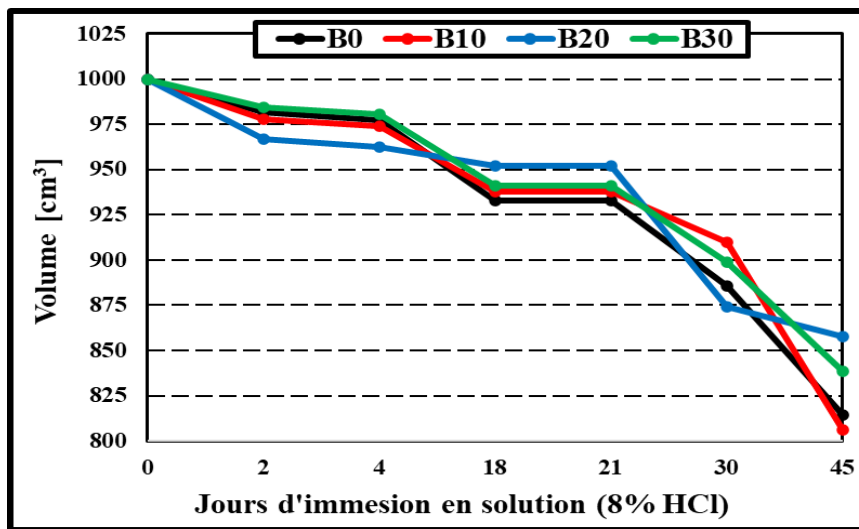


### III-6-2- La perte de volume

Dès la première journée dans les solutions acide (Figure III.12 et III.13), on observe une érosion des arrêtes des éprouvettes. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue (réaction 2).



L'acide attaque la pâte de ciment est forme des chlorures de calcium et des sulfates de calcium, qui rendent la pâte moins cohésive. Lorsque on observe l'aspect extérieur des éprouvettes, on voit qu'il existe un dommage considérable et une déformation de tous les échantillons. Cette dégradation est plus visible dans les solutions à 8%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  que dans les solutions à 8%  $\text{HCl}$ .



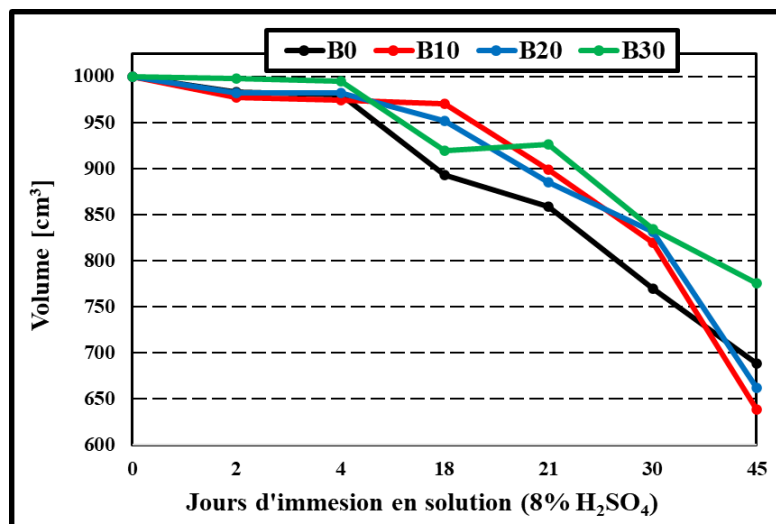


Figure.III.11. Perte de volume des éprouvettes de bétons.

### III-6-3- La perte de résistance

L'essai de résistance à la compression (Essai d'écrasement) a été effectué par l'application d'un effort de chargement sur une éprouvette cubique (10×10×10) cm, jusqu'à rupture. La presse utilisée est une machine de type CONTROLS ayant une capacité maximale de 3000KN (Fig. III.12).



Figure III.12. Machine d'essai de résistance à la compression

Après 28 jours de cure (avant immersion) dans des bains à 95% HR et 20°C, les éprouvettes sont attaquées par les différentes solutions acides. Chaque 15 jours des éprouvettes sont soumises à compression. Les résultats de cet essai sont illustrés dans la figure III.13. D'après

les résultats obtenus on remarque que les résistances à la compression des quatre formulations diminuent avec le temps de cure. On remarque également le bon comportement des bétons à granulats recyclés. Ceci est due peut-être à l'absorption d'eau plus élevée des sables céramiques recyclés utilisés. Cette eau est libérée avec l'avancement de la cure ce qui augmente la résistance à la compression.

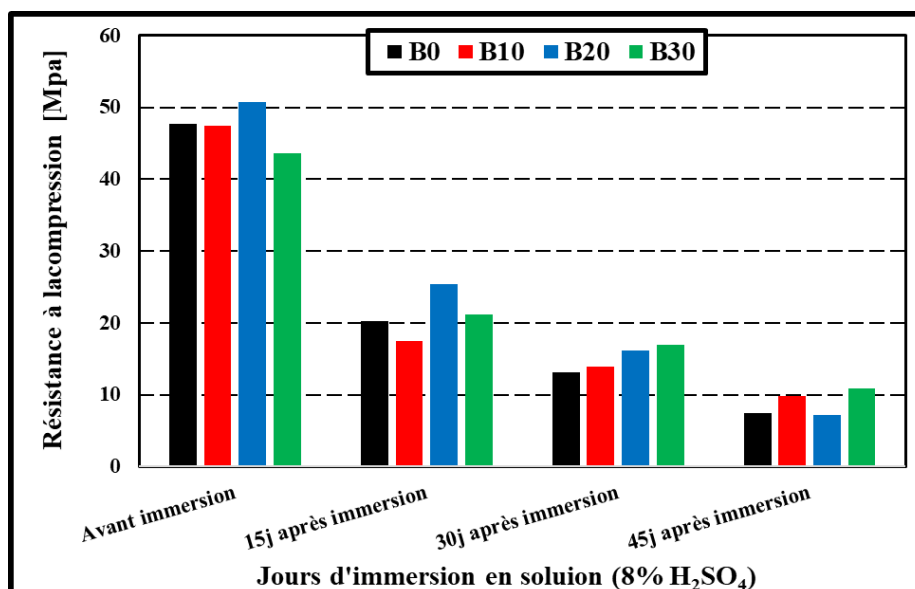
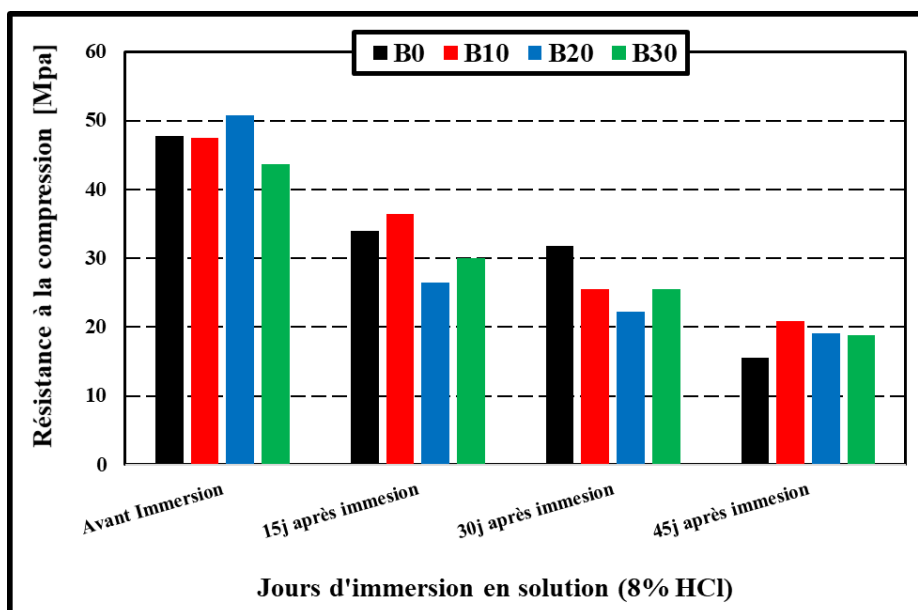


Figure III.13. Résistance à la compression des différents bétons [Mpa]

***CONCLUSION***  
***GENERALE***

### *CONCLUSION GENERALE*

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Ces caractéristiques lui permettent d'être utilisé dans de nombreuses applications, des gratte-ciels aux fondations de nos maisons. Le béton est unique car il est souple et malléable lorsqu'il est fraîchement mélangé, et extrêmement dur et robuste une fois durci.

Dans sa forme la plus simple, le béton est composé de trois éléments fondamentaux : l'eau, le ciment et les granulats. Ces dernières, représentent généralement 60 à 75 % du volume d'un mélange de béton. Les variations de granulométrie, de taille, de poids unitaire et de teneur en humidité des granulats peuvent altérer les caractéristiques et les performances du béton.

La production des granulats naturels implique des impacts environnementaux importants, tels que la perturbation de l'habitat due à l'exploitation en carrière, une consommation d'énergie élevée et des émissions de gaz à effet de serre. L'utilisation des granulats recyclés offre de nombreux avantages, principalement liés à leur respect de l'environnement et à leur rentabilité. Elle réduit le recours aux granulats naturels, minimise les déchets mis en décharge, préserve les ressources naturelles et diminue la consommation d'énergie lors de la production.

Les déchets sanitaires en céramique sont générés par la production d'articles en céramique tels que les toilettes, les lavabos et les baignoires. Ils sont classés comme déchets industriels non biodégradables. Une part importante de ces déchets provient de pièces défectueuses ou cassées lors de la production, ils sont pleins de fissures, d'entailles et de dommages à l'émail. Le chargement, le transport et le dépôt sur chantiers, accentuent la quantité de déchets.

Dans ce travail, on a inclus différentes proportions de déchets de type céramique sanitaire comme granulats fin dans un béton ordinaire. On a remplacé 10, 20 et 30% de sable fin et soumis ces différents types de bétons à des dégradations chimiques par des solutions de HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Lors des essais on a remarqué les points suivants :

\*Dans le cas de l'acide chlorhydrique, la réaction chimique avec l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca(OH)}_2$ , produisant du chlorure de calcium soluble ( $\text{CaCl}_2$ ).

\*Cette réaction entraîne une perte de masse progressive due au détachement du sel de la surface des granulats et l'érosion de la pâte de ciment et formation de vides.

\*Ce dernier point provoque la désintégration de la structure adhérente est nuis au volume de l'éprouvette de béton.

\*Dans le cas de l'acide sulfurique, il réagit avec le  $\text{Ca(OH)}_2$  pour former du sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ), appelé le gypse, d'où la couleur blanche toujours visible sur la surface des bétons.

\*Suite à ce dernier point Le béton perd sa cohésion interne et la masse commence à diminuer en raison de l'érosion de surface et de la perte de fragments de béton.

\*Néanmoins, la surface rugueuse et angulaire des granulats recyclé de céramique sanitaire améliore l'accroche entre la pâte de ciment et les granulats. Le comportement des bétons à granulats recyclés est meilleur que le béton avec du sable de dune.

Bien sûr d'autres campagnes d'essais sont à prescrire, comme l'étude de ces bétons face au solution basique ou le comportement dans les climats froid.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

### **Références bibliographique**

- [1]Techniques de l'ingénieur, les principes du béton armé. Consulté le 04/05/2025
- [2]Dreux, G., & Festa, J. (2007). Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième.
- [3]Association Européen de ciment, rapport d'activité, 2023, consulté le 04/05/2025.
- [4]Collection technique Cimbeton,(2005), Ciments et bétons.
- [5]Collection technique Cimbeton,(2005), Les constituants des bétons et des mortiers.
- [6]Duggal, S. K. (2017). Building materials. Routledge.
- [7]Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2006). Materials for civil and construction engineers. Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson Prentice Hall.
- [8]Choo, B. S., & Newman, J. B. (Eds.). (2003). Advanced concrete technology: concrete properties. Butterworth-Heinemann.
- [9]Newman, J., & Choo, B. S. (Eds.). (2003). Advanced concrete technology 3: processes. Elsevier.
- [10]Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T., & Tariq, S. (2017). Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. Construction and Building Materials, 154, 829-840.
- [11]Medina, C., De Rojas, M. S., & Frías, M. (2013). Properties of recycled ceramic aggregate concretes: water resistance. Cement and Concrete Composites, 40, 21-29.
- [12]Alves, A. V., Vieira, T. F., De Brito, J., & Correia, J. R. (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. Construction and Building Materials, 64, 103-113.
- [13]Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. Construction and building materials, 24(5), 832-838.

- [14] Illston, J. M., & Domone, P. (2010). *Construction materials: their nature and behaviour*. 4th Ed, Spon press.
- [15] Jackson, N., & Dhir, R. K. (Eds.). (1996). *Structural Engineering Materials*. 5th Ed. Palgrave Edition.
- [16] Ambrose, E. E., Ogirigbo, O. R., & Ekop, I. E. (2023). Compressive strength and resistance to sodium sulphate attack of concrete incorporated with fine aggregate recycled ceramic tiles. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 27(3), 465-472.
- [17] Müller, U., & Rübner, K. (2006). The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1434-1443.
- [18] Asaad, M. A., Jasim, A. M., SaadMahdi, F., Hussain, M. A., & Habeeb, A. A. (2020). Performance of Green Concrete Comprising Waste Ceramic as a Fine Aggregate Replacement: Effect of Sulfuric Acid on Degradation Process. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 6, 31-37.
- [19] Medina, C., de Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2013). Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 40, 151-160.
- [20] El-Gamal, S. M. A., El-Hosiny, F. I., Amin, M. S., & Sayed, D. G. (2017). Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 154, 1062-1078.
- [21] Baroghel-Bouney V., Cussigh F., Rougeau P., « Approche performantielle de la durabilité des bétons », Gagné, R., & Linger, L. (2008). *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. pp 281-302.