

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**LAVALEF**

Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Laboratoire Matériaux de Génie Civil & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

**L'effet de l'addition de poudre de coquilles d'œuf et de blanc d'œuf sur les propriétés et la durabilité du béton**

Aicha BELKAID      Mounir Abdelkader BRIKI

Sous la direction de

Mr. Abderrahim BALI      &      Mr. El-Hadi BENYOUSSEF

Présenté et soutenu publiquement le (14/10/2020)

Composition du jury :

Présidente	Mme Faroudja MOHELLEBI	Professeure	ENP
Promoteurs	Mr. Abderrahim BALI	Professeur	ENP
	Mr. El-Hadi BENYOUSSEF	Professeur	ENP
Examineurs	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
	Mme Messaouda CHERRAK	MCB	ENP

**ENP 2020**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**LAVALEF**

Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Laboratoire Matériaux de Génie Civil & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

**L'effet de l'addition de poudre de coquilles d'œuf et de blanc d'œuf sur les propriétés et la durabilité du béton**

Aicha BELKAID      Mounir Abdelkader BRIKI

Sous la direction de

Mr. Abderrahim BALI      &      Mr. El-Hadi BENYOUSSEF

Présenté et soutenu publiquement le (14/10/2020)

Composition du jury :

Présidente	Mme Faroudja MOHELLEBI	Professeure	ENP
Promoteurs	Mr. Abderrahim BALI	Professeur	ENP
	Mr. El-Hadi BENYOUSSEF	Professeur	ENP
Examineurs	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
	Mme Messaouda CHERRAK	MCB	ENP

**ENP 2020**

### **المخلص: تأثير إضافة مسحوق قشر البيض وبياض البيض على خصائص ومتانة الخرسانة**

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير مسحوق مخلفات قشر بيض الدجاج المطحون والذي يحتوي بشكل أساسي على كربونات الكالسيوم كبديل محتمل للإسمنت، وبياض البيض كمادة عضوية كبديل جزئي للماء في الخرسانة من حيث الخصائص الميكانيكية وخصائص النقل. تمت استبدال 5% و0.5% من وزن الاسمنت البورتلاندي والماء على التوالي. تم إجراء اختبارات الترهل، المقاومة (مقاومة الانضغاط وقوة الشد عن طريق الانقسام)، والنفاذية. أظهرت نتائج اختبار القوة أن مسحوق قشر البيض غير مناسب كبديل جزئي للإسمنت، في حين أن بياض البيض أعطانا نتائج مقبولة. ومع ذلك، فإنهم حسنوا خصائص النقل للخرسانة، عن طريق من التقليل مساميتها.

**الكلمات المفتاحية: متانة الخرسانة، مسحوق قشر البيض، بياض البيض، الإضافات الطبيعية.**

### **Abstract: The effect of the addition of eggshell powder and egg white on the properties and durability of concrete**

This work aims to study the performance of chicken eggshell waste powder which mainly contains calcium carbonates as a potential substitute for cement, and egg white as an organic material as a partial substitute for water in concrete in terms of mechanical properties and transport properties. Amounts of 5% and 0.5% by weight were added to replace Portland cement and water, respectively. Slump, strength (compressive strength and split tensile strength), water permeability tests were performed. The strength test results have shown that eggshell powder is not suitable as a partial substitute of cement, while egg white has given us acceptable results. However, they improve the transport properties of concrete, reducing its porosity.

**Keywords: durability of concrete, eggshell powder, egg white, natural additions.**

### **Résumé : L'effet de l'addition de poudre de coquilles d'œuf et de blanc d'œuf sur les propriétés et la durabilité du béton**

Ce travail vise à étudier les performances de la poudre de déchets de coquille d'œuf de poule broyée qui contient principalement des carbonates de calcium comme substitut potentiel du ciment, et du blanc d'œuf en tant qu'une matière organique comme substitut partiel de l'eau dans le béton en termes de propriétés mécaniques et propriétés de transport. Des quantités de 5% et 0,5% en poids ont été ajoutées pour remplacer respectivement le ciment Portland et l'eau. Des tests d'affaissement, de résistance (résistance à la compression et à la traction fendue), de perméabilité et d'absorption par immersion à l'eau ont été effectués. Les résultats de tests de résistances ont montré que la poudre de coquille d'œuf ne convient pas à être utilisée comme remplaçant partiel du ciment, tandis que le blanc d'œuf nous ait donné des résultats acceptables. Cependant, ils améliorent les propriétés de transport du béton, en réduisant sa porosité.

**Mots clés : durabilité du béton, poudre de coquilles d'œuf, blanc d'œuf , ajouts naturels.**

# *Remerciements*

*Tout d'abord, gratitude à Allah le tout puissant de nous avoir donné la foi, le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

*Nous souhaitons avant tout remercier nos encadrateurs Pr E. BENYOUSSEF et Pr A. BALI, pour le temps qu'ils ont consacré à nous 'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de ce projet de fin d'études. Nous les remercions également pour leur aide précieuse, leur patience et leur disponibilité permanente malgré les conditions sanitaires.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux à Mme M. CHERRAK ; Enseignante au département de Génie Civil, qui nous a aidé et guidé soit en répondant à nos questions soit en nous envoyant des documents. Ainsi qu'à nos camarades du Génie Civil qui ont travaillé à nos coté.*

*Notre gratitude va aux collègues du Génie Miniers qui ont mis à notre disposition le broyeur à boulé.*

*Nous désirons aussi remercier Melle R. BENGHOULIS, Ingénieur au laboratoire de Génie Chimique, Mme S. SEKHRI, Ingénieur au laboratoire de Génie Civil et Mr G. AHMED, Technicien au laboratoire de Génie Civil pour leur aide et soutien indéfectibles.*

*Nos remerciements s'adressent également à Mme F. MOHELLEBI, Mme M. CHERRAK et Mr A. SELATNIA, honorables membres de notre jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier vivement les professeurs de département de Génie Chimique, qui nous 'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.*

*Enfin Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre projet de fin d'étude.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail ;*

*A vous, mes chers parents, pour tous vos sacrifices,  
amour, tendresse et soutien tout au long de mes études*

*A toi, mon frère aîné 'Bachir', mon ami, et ma source  
d'encouragement et de motivation*

*A vous, mes chers frères et ma chère sœur, source du  
bonheur et de la joie*

*A ma nièce, mon ange 'Ritaj', je te souhaite une vie  
pleine de bonheur et de réussite*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*A mon binôme Mounir*

*Aicha*

# Dédicace

*En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce modeste travail à :  
Ma chère mère qui, moralement et financièrement, était toujours présente à  
mes côtés.*

*Ma chère grand-mère, mes chères tantes et mon grand-père et toute ma  
famille maternelle qui sont ma source d'affection, de motivation et d'espoir.  
Mes amis et frères et sœurs, chacun en son nom, pour leurs encouragements,  
leur disponibilité et leurs précieux conseils.*

*Toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce  
travail.*

*Ma camarade dans ce travail Aicha.*

*Mounir Abdelkader BRZO*

## Table des matières

Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Liste des éléments chimiques	
Liste des unités	
Introduction Générale .....	14
Partie 1 : Synthèse Bibliographique .....	16
Chapitre 1 : Généralités sur le béton.....	18
1.1 Introduction.....	18
1.2 Historique.....	18
1.3 Définition du béton .....	19
1.4 Constituants du béton.....	19
1.4.1 Ciments .....	19
1.4.2 Granulats .....	23
1.4.3 Eau de gâchage.....	24
1.4.4 Adjuvants .....	24
1.5 Propriétés du béton.....	25
1.5.1 Propriétés du béton frais .....	25
1.5.2 Propriétés du béton durci .....	26
1.6 Durabilité du béton.....	28
1.6.1 Concept de la durabilité .....	28
1.6.2 Causes de détérioration du béton .....	29
1.7 Conclusion .....	29
Chapitre 2 : L'œuf : composition et utilisation dans la construction .....	31
2.1 Introduction.....	31
2.2 Composition de l'œuf.....	31
2.2.1 Coquilles d'œuf.....	32
2.2.2 Blanc d'œuf (Albumen) .....	35
2.2.3 Jaune d'œuf.....	37
2.3 Historique de l'utilisation de l'œuf dans les matériaux de construction .....	37
2.4 Conclusion .....	42
Chapitre 3 : Transport de fluide dans le béton.....	44
3.1 Introduction.....	44

3.2	Diffusion .....	44
3.2.1	Loi de Fick .....	45
3.2.2	Diffusion en milieu poreux .....	46
3.3	Perméabilité .....	47
3.3.1	Model de Kozeny-Carman .....	48
3.4	Les mécanismes de transport des fluides dans le béton .....	50
3.4.1	Transport d'eau dans le béton : .....	50
3.4.2	Séchage à humidité relative élevée .....	52
3.4.3	Séchage à humidité relative intermédiaire .....	52
3.4.4	Séchage à humidité relative faible .....	52
3.4.5	Transport des ions dans le béton .....	53
3.4.6	Transport du gaz dans le béton .....	54
3.5	Conclusion .....	55
Partie 2 : Partie Expérimentale .....		56
Chapitre 4 : Matériaux .....		58
4.1	Introduction.....	58
4.2	Ciment.....	58
4.3	Granulats .....	58
4.3.1	Analyse granulométrique (NF P18-560).....	59
4.3.2	Module de finesse du sable (NF P 18- 540).....	60
4.3.3	Masse volumique (NF P 18-554, NF P 18-555) .....	60
4.4	Eau de gâchage .....	61
4.5	Coquilles d'œuf.....	61
4.5.1	Surface Blaine .....	63
4.6	Blanc d'œuf.....	64
Chapitre 5 : Formulation du béton .....		66
5.1	Introduction.....	66
5.2	Détermination de la composition du béton .....	66
5.3	Dosage en eau .....	66
5.4	Courbe granulaire de référence et lignes de partages.....	66
5.5	Dosage des Granulats pour 1 m <sup>3</sup> du béton .....	67
5.5.1	Coefficient de compacité .....	67
5.5.2	Dosage des différents granulats .....	68
5.6	Préparation des éprouvettes .....	69
Chapitre 6 : Essais.....		72

6.1	Affaissement au cône d'Abrams (NF P 98 -248 -2) .....	72
6.1.1	Appareillage .....	72
6.1.2	Mode opératoire .....	73
6.2	Résistance mécanique .....	74
6.2.1	Appareillage .....	74
6.2.2	Mode opératoire .....	74
6.3	Test de porosité .....	75
6.4	Test de perméabilité .....	76
6.4.1	Perméabilité à l'eau .....	76
Chapitre 7 :	Résultats et discussions .....	78
7.1	Résultats .....	78
7.1.1	Affaissement au cône d'Abrams .....	78
7.1.2	Résistances mécaniques .....	79
7.1.3	Test de perméabilité à l'eau et porosité .....	80
7.2	Discussion .....	83
Conclusion générale	.....	85
Annexes	.....	87
Références bibliographiques	.....	91

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant (10) ....	19
Tableau 1.2: Constituants principaux de différents types des ciments courants (11).....	20
Tableau 1.3: Proportions des principaux composants chimiques du ciment Portland (15).....	21
Tableau 1.4: Principaux composés du ciment portland (11).....	22
Tableau 1.5: Classes des granulats selon la norme française XP P 18-540 (11) .....	24
Tableau 1.6: Différents types des adjuvants (13).....	25
Tableau 1.7: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Asrams –Norme NF EN 206-1 (10) .....	26
Tableau 1.8 : Répartition des tailles des pores et des fissures (8, 33) dans (32).....	28
Tableau 2.1: Proportions des différentes parties de l'œuf de poule (42) dans (39).....	32
Tableau 2.2: Composition approximative de l'œuf entier, la coquille, le blanc et le jaune(43, 44)(43–45) dans (46).....	32
Tableau 2.3: Caractéristiques physiques et chimiques des coquilles d'œufs (49). .....	35
Tableau 2.4: Résistance à la flexion du mortier de chaux avec différents pourcentages de blanc d'oeuf.....	40
Tableau 3.1: Équations pour prédire la propriété de transport de l'eau du béton perméable (avec m et n des constantes empiriques) (88).....	50
Tableau 4.1: Propriétés chimiques et minéralogiques du ciment utilisé.....	58
Tableau 4.2: Masses volumiques apparentes et absolues des granulats .....	61
Tableau 5.1: Proportions des constituants de 1 m <sup>3</sup> de chaque type du béton .....	69
Tableau 7.1: Valeurs d'affaissements des différents types de béton fabriqués .....	78
Tableau 7.2: Résistances des différents types de béton .....	79
Tableau 7.3: Perméabilité et Porosité des bétons fabriqués.....	80

## Liste des figures

Figure 1.1: Représentation schématique d'un solide poreux (30).....	27
Figure 2.1: Coupe d'un œuf de poule domestique (41) .....	31
Figure 2.2 : Coupe transversale de la coquille observée au microscope électronique à balayage (a)(47), sa représentation schématique montrant les membranes coquillières, la couche des noyaux mamillaires, la couche palissadique et la cuticule (b)(39) .....	33
Figure 2.3: Absorption d'eau d'un mortier de chaux avec différents pourcentages de blanc d'œuf .....	40
Figure 2.4: Résistance à la traction du béton à différents âges et différentes substitutions d'eau(79).....	41
Figure 2.5: Résistance à la traction par fendage du béton avec différentes substitutions(79) .	42
Figure 3.1: Transport macroscopique de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration ce qui tend à homogénéiser les concentrations de particules dans le fluide (30) .....	45
Figure 3.2 : Schéma représentatif de Diffusion unidirectionnelle (83) .....	45
Figure 3.3:Schéma de transport par perméation(30).....	47
Figure 3.4: Mode de pores simplifié montrant le phénomène d'adsorption d'eau(28).....	51
Figure 3.5: Mode de pores simplifié montrant le phénomène de condensation capillaire d'eau (28).....	51
Figure 3.6: Relation entre l'humidité relative de l'air ambiant et du béton, par rapport à la saturation (28) .....	52
Figure 4.1: Ciment utilisé .....	58
Figure 4.2: Types de Granulats utilisés .....	59
Figure 4.3: Série des tamis installés dans une tamiseuse électrique .....	59
Figure 4.4: courbe granulométrique.....	60
Figure 4.5:Coquilles d'œufs blanches et brunes .....	61
Figure 4.6:Lavage des coquilles d'œufs .....	62
Figure 4.7:Séchage à l'air des coquilles d'œufs .....	62
Figure 4.8: Broyeur à boulets.....	63
Figure 4.9: œufs utilisés .....	64
Figure 4.10: Peser du blanc d'œuf.....	64
Figure 5.1: Courbes granulométriques, courbe de référence et lignes de partages.....	67
Figure 5.2:Malaxage de matière première pour obtenir un béton.....	69
Figure 5.3: Moules coulés par le béton.....	70
Figure 6.1: Organigramme présentant notre programme expérimental.....	72
Figure 6.2: Mesure de l'affaissement à l'aide du portique de mesure.....	73
Figure 6.3: Machine d'essai de compression.....	74
Figure 6.4: Essai de compression.....	75
Figure 6.5: Test de perméabilité à l'eau .....	76
Figure 7.1: Affaissement des bétons fabriqués .....	78
Figure 7.2: Résistances à la compression et à la traction par fendage des différents types de béton fabriqués.....	79
Figure 7.3: Profils des échantillons de fendage, BPCO à gauche et BBO à droite .....	80
Figure 7.4: Rejet de la poudre de coquilles d'œuf.....	81
Figure 7.5: Perméabilité de bétons fabriqués.....	81
Figure 7.6: Profils des échantillons de perméabilité ; BPCO à gauche et BBO à droite.....	82
Figure 7.7: Porosité des bétons fabriqués .....	82

### Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
ANCA	Association nationale des commerçants et artisans
BAP	Bétons autoplaçants
BBO	Bétons de blanc d'œuf
BFC	Béton fabriqué sur chantier
BFUHP	Béton fibré à ultra-hautes performances
BFUP	Béton fibré à ultra-hautes performances
BHP	Bétons hautes performances
BPCO	Béton de la poudre des coquilles d'œuf
BPE	Béton témoin
BUHP	Béton ultra-hautes performances
CEC	Capacité d'échange cationique
E	Eau
EN	Norme européenne
IEP	Point isoélectrique
JC	Jesus Christ
M <sub>f</sub>	Module de finesse
NA	Norme algérienne
NF	Norme française
ONS	Office nationale des statistiques
OPC	Ciment portland ordinaire
pH	Potentiel hydrogène
PR	Porosité relative
BCSD	Conseil mondial des entreprises pour le développement durable
ZIT	Zone de transition interfaciale

### Liste des éléments chimiques

<b>Élément chimique</b>	<b>Signification</b>
<b>A</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>C</b>	CaO
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicates bicalciques
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminate tricalcique
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicate tricalcique
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Alumino-ferrite tétracalcique
<b>C<sub>6</sub>A<sup>3</sup>H<sub>32</sub></b>	Sulfoaluminate de calcium
<b>F</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>H</b>	H <sub>2</sub> O
<b>S</b>	SiO <sub>2</sub>
<b>Ŝ</b>	CaSO <sub>4</sub>

### Liste des unités

<b>Unité</b>	<b>Signification</b>
<b>cm</b>	Centimètre
<b>g</b>	Gramme
<b>h</b>	Heure
<b>kDa</b>	Kilo Dalton,
<b>kg</b>	Kilogramme
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>L</b>	Litre
<b>m</b>	Mètre
<b>mm</b>	Millimètre
<b>MPa</b>	Mégapascal
<b>s</b>	Seconde
<b>°C</b>	Degré Celcius
<b>µm</b>	Micromètre

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction Générale

Les déchets agricoles sont tous les déchets générés par différents processus agricoles en concentration cumulative. Une utilisation adéquate des déchets agricoles réduit les problèmes environnementaux causés par l'élimination irresponsable des déchets. La gestion des déchets agricoles est indispensable et une stratégie cruciale dans la gestion globale des déchets. Les déchets de toute nature dans l'environnement lorsque leur concentration est en excès peuvent devenir un facteur critique pour l'homme, les animaux et la végétation. La nature, la quantité et le type de déchets agricoles générés varient d'un pays à l'autre. La recherche d'un moyen efficace de gérer correctement les déchets agricoles contribuera à protéger l'environnement et la qualité sanitaire.

Pour le développement durable, les déchets doivent être recyclés, réutilisés et canalisés vers la production de produits à valeur ajoutée. Il s'agit de protéger l'environnement d'un côté et de l'autre pour obtenir des produits à valeur ajoutée tout en établissant une norme zéro déchet. L'utilisation des déchets est aujourd'hui une priorité pour parvenir à un développement durable.

Aussi partout dans le monde, le béton est largement utilisé pour la construction de la plupart des bâtiments, des ponts, etc. Par conséquent, il a été correctement étiqueté comme l'épine dorsale du développement des infrastructures d'une nation. La construction durable est devenue un intérêt dans la communauté des ingénieurs et plusieurs normes ont été élaborées pour évaluer l'impact environnemental des nouveaux projets de construction.

Donc, un moyen qui permet de diminuer l'impact environnemental est l'incorporation de ces déchets dans la confection de matériaux de construction en s'inspirant des techniques ancestrales et en l'introduisant avec un esprit scientifique objectif.

En effet, des recherches ont montré qu'il est possible d'utiliser des matériaux recyclés pour remplacer certains des composants traditionnels du mélange dans les produits en béton et produire un matériau de construction plus durable. Un matériau commun qui peut être recyclé et qui peut être utilisé dans des applications concrètes est la coquille d'œuf utilisée. Les déchets de coquilles d'œufs entrent dans la catégorie des déchets alimentaires, qui sont des matériaux provenant de la préparation des aliments et des boissons, s'ils sont soumis à un examen adéquat (lavage, séparation de membrane coquillère...), et ils pourraient constituer un matériau de remplacement approprié pour la construction.

D'ailleurs, les coquilles d'œufs sont l'un des déchets solides dans le monde et sont considérées comme dangereuses selon les réglementations de la commission européenne. Leurs principaux impacts environnementaux sont le risque de propagation d'agents pathogènes, l'émission d'odeurs désagréables et la production de lixiviats dans les décharges. L'utilisation de déchets solides, comme les coquilles d'œufs, aidera à créer un environnement durable en minimisant les déchets solides qui sont rejetés dans l'environnement. L'utilisation de poudre de coquille d'œuf dans le ciment contribue également à réduire les émissions de dioxyde de carbone des cimenteries en réduisant la production de clinker.

En plus des coquilles d'œufs, le blanc d'œuf qui serait écarté lors de la production de jaune d'œuf séché serait un ajout intéressant de part sa composition en albumen riche en protéine. Ceci s'inspire des techniques ancestrales qui sont toujours utilisées à ce jour lors de rénovations notamment de la rénovation des palais de la Casbah.

C'est dans ce contexte que nous nous intéressons dans cette étude à l'introduction des coquilles d'œufs et du blanc d'œuf dans la formulation d'un béton plus durable et plus respectueux de l'environnement.

Nous avons planifié un plan d'expérience pour confirmer les études précédentes et les enrichir avec l'étude de l'effet conjugué des deux ajouts des ovoproduits auxquels nous nous intéressons. Le plan d'expérience permettrait aussi de trouver les optimums de nos ajouts. Enfin, afin d'avoir une idée sur leur effet sur la durabilité du béton, nous comptons faire nos essais sur un béton d'âge de 90 jours.

La pandémie de COVID-19 nous a empêché de mettre en œuvre nos plans préliminaires. C'est ainsi que notre objectif a basculé vers une quelques expériences indicatives qui pourraient guider les prochains étudiants qui auront le courage de braver ce sujet.

Dans ce mémoire, vous trouverez ainsi une base théorique riche, des explications simples et des indications sur les techniques utilisées pour les manipulations.

# PARTIE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE BETON

## Chapitre 1 : Généralités sur le béton

### 1.1 Introduction

Le béton est largement utilisé dans le domaine de la construction. Il a connu un essor considérable depuis son invention et son développement se poursuit à ce jour. On estime qu'environ 25 milliards de tonnes de béton sont fabriqués dans le monde chaque année. C'est l'équivalent de plus de 3,8 tonnes par personne(1).

Le béton est un matériau artificiel obtenu en mélangeant en proportions convenables et de manière homogène, un liant (Ciment), des granulats, avec l'eau et éventuellement des adjuvants destinés à modifier ses propriétés. Ces dernières varient selon la composition du béton, son âge et son environnement.

Ce chapitre a pour objectif de définir le concept du béton, de donner un bref aperçu de son historique, de présenter ses principaux composants du béton moderne, et ses propriétés physiques et mécaniques.

### 1.2 Historique

Le béton existe depuis l'Antiquité. L'homme au néolithique utilisait certains « protocoles en béton » à une époque où les êtres humains vivaient essentiellement dans des grottes naturelles creusées dans des falaises de calcaire (2). 4000 ans avant JC, les Égyptiens connaissaient déjà le plâtre (gypse naturel cuit, broyé, mélangé à de l'eau puis moulé en enduit), mais son usage était limité uniquement à la partie intérieure des bâtiments (3). Bien plus tard, les Assyriens et les Babyloniens utilisaient de l'argile et du bitume pour lier les pierres et les briques. Les Grecs connaissaient l'art de calciner la chaux, et les romains ont utilisé un mélange primaire pour leur béton. Il s'agissait de petits morceaux de gravier et de sable grossier mélangés à de la chaux vive et de l'eau, et parfois ils ont utilisé du sang animal, la pouzzolane, la graisse animale, le lait, les œufs et le sang comme adjuvants pour donner au mélange des propriétés hydrauliques, et le crin de cheval pour réduire le retrait (3–5).

De nombreux monuments sont encore sur pied à ce jour pour témoigner de cette utilisation ancestrale. On peut citer le Nevali Çore en Turquie, les pyramides en Égypte, le Panthéon à Rome, le Pont du Gard en France, l'Aqueduc de Cologne en Allemagne et le Mur d'Hadrien en Angleterre (2, 5).

Au Moyen Âge, la technologie du béton a reculé après la chute de l'Empire romain en 476 après JC. Le béton au sens où nous l'entendons aujourd'hui n'apparaît qu'en 1756, il est attribué à l'ingénieur britannique John Smeaton qui a fabriqué le premier béton moderne (ciment hydraulique) en ajoutant des cailloux comme granulats grossiers et en mélangeant de la brique alimentée au ciment(6), ainsi que les développements apportés par Joseph Aspdin, qui a déposé en 1824 un brevet sur la fabrication du « ciment de Portland » (7). Après cette date le monde du béton a connu un développement rapide, avec l'apparition de ce qu'on appelle « le béton armé » en 1848, suivi par l'invention du béton précontraint par Freyssinet entre les années 1930 et 1950. Vers la fin des années 70, l'apparition des bétons hautes performances (BHP) a révolutionné le monde de la construction. Par la suite, de nouvelles grandes innovations ont connu le jour à la fin des années 80 notamment les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) (3).

### 1.3 Définition du béton

Le béton est un matériau de construction composite qui ressemble à de la pierre, il est défini dans la terminologie ASTM relative au béton et aux granulats de béton comme « un matériau composite qui consiste essentiellement en un milieu de liaison à l'intérieur duquel sont incorporées des particules ou des fragments d'agrégats ; en béton hydraulique, le liant est formé d'un mélange de ciment hydraulique et d'eau » (8).

Tout simplement, le béton est un mélange composé d'agrégats de différentes formes et tailles, d'eau, et d'un liant hydraulique (le plus souvent, le ciment). Ses caractéristiques de mise en œuvre ou finales peuvent être améliorées en utilisant des adjuvants, des additions ou des additifs selon le besoin (9).

Le tableau ci-dessous montre les intervalles des proportions des constituants essentiels de béton courant :

**Tableau 1.1: Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant**  
(10)

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	/	9-18	65-85

Des nombreux types bétons sont disponibles, les plus importants sont :

- Le BFC (béton fabriqué sur chantier)
- Le BPE (béton prêt à l'emploi)
- Les bétons soignés en usine (préfabrication)
- Les bétons hautes performances (BHP)
- Les bétons ultra-hautes performances (BUHP)
- Les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUHP) (9).

### 1.4 Constituants du béton

#### 1.4.1 Ciments

Le ciment est un matériau sec issu du clinker finement broyé qui se présente sous forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche. La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui est de l'ordre de 3500 à 4500 cm<sup>2</sup> /g. Le ciment n'est pas en soi un liant mais développe la propriété de liaison en raison de l'hydratation (la réaction entre les minéraux du ciment et l'eau), pour devenir une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps (7, 11, 12).

Le ciment est obtenu par la combinaison chimique à très haute température de calcaire (80%) et d'argile (20%) pour former le clinker qui est par la suite broyé avec des ajouts (du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinées et des fumées de silice) dans des proportions très précises selon le type et pour atteindre les propriétés souhaitées.

Les ciments sont classés sous la dénomination « CEM » suivi d'un chiffre romain allant de I à V suivi d'une lettre majuscule en fonction de leur teneur en clinker et d'autres composants (chaux, fumées de silice, pouzzolane, laitier de hauts fourneaux, etc.), ce qui les divise en plusieurs catégories (11):

- Le CEM I (ciment Portland) : est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) : sont utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) : sont adaptés à des environnements difficiles
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) : sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) : ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III. (13)

**Tableau 1.2: Constituants principaux de différents types des ciments courants (11)**

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : (laitier – pouzzolanes – cendres – calcaires – schistes – fumés de silice)
<b>CEM I</b>	Ciment Portland	95 à 100%	
<b>CEM II /A</b>	Ciment Portland Composé	80 à 94%	De 6 à 20% de l'un quelconque des constituants (la proportion est limitée à 10% si le constituant est des fumés de silice) ;
<b>CEM II /B</b>		65 à 79%	De 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.
<b>CEM III /A</b>	Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	36 à 65 % de laitier de haut fourneau
<b>CEM III /B</b>		20 à 34%	66 à 80 % de laitier de haut fourneau
<b>CEM III /C</b>		5 à 19%	81 à 95 % de laitier de haut fourneau
<b>CEM IV/A</b>	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumés de silice, ces dernières étant limitées à 10%
<b>CEM IV /B</b>		45 à 64%	36 à 55% comme ci-dessus
<b>CEM V /A</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	18 à 30% de laitier à haut fourneau, 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes
<b>CEM V /B</b>		20 à 39%	31 à 51% de chacun de deux constituants comme ci-dessus

#### 1.4.1.1 Fabrication du ciment Portland

Le principe de la fabrication du ciment consiste en un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%) qui sont extraits des carrières. Ils sont ensuite concassés, homogénéisés et portés à haute température (1450 °C) dans un four pour obtenir un produit très dur appelé « CLINKER » qui sera finement broyé pour donner le ciment.

Le clinker qui constitue le composé de base des ciments consiste en un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par le calcaire, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par l'argile. (11, 14)

Il est parfois nécessaire d'inclure des proportions mineures d'un ou plusieurs constituants correctifs pour corriger sa composition, tels que le minerai de fer (riche en oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),

la bauxite (riche en alumine  $Al_2O_3$ ) ou le sable pour corriger la composition en silice (14). La présence de l'alumine et de l'oxyde de fer dans le mélange en quantité suffisante sert à faciliter la formation du silicate de calcium à des températures considérablement plus basses (12).

La fabrication du ciment consiste globalement en trois opérations qui sont les suivantes :

- Préparation du cru,
- Cuisson,
- Broyage et conditionnement.

Il existe 2 principales méthodes de fabrication du ciment :

- Fabrication par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication par voie sèche (la plus utilisée). (11)

En Algérie c'est la voie sèche qui est utilisée.

L'opération finale du processus de fabrication du ciment portland consiste à broyer le clinker avec environ 5 pourcents de gypse ou de sulfate de calcium en une poudre. L'ajout de gypse ou de sulfate de calcium est afin de contrôler le comportement de prise et de durcissement précoces du ciment(12).

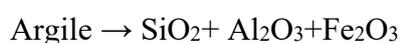
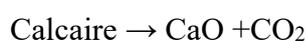
#### 1.4.1.2 Chimie du ciment portland

Le ciment Portland se compose principalement de chaux ( $CaO$ ), de silice ( $SiO_2$ ), d'alumine ( $Al_2O_3$ ) et d'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ). La teneur combinée des quatre oxydes représente environ 90% du poids du ciment et ils sont appelés « oxydes majeurs ». Les 10% restants sont constitués de magnésie ( $MgO$ ), d'oxydes alcalins ( $Na_2O$  et  $K_2O$ ), Trioxyde de soufre ( $SO_3$ ) et de gypse. Ceux-ci sont appelés «constituants mineurs» (15).

**Tableau 1.3: Proportions des principaux composants chimiques du ciment Portland (15)**

Composant	Proportion (en %)
Chaux ( $CaO$ )	59 à 67%
Silice ( $SiO_2$ )	17 à 25%
Alumine ( $Al_2O_3$ )	3 à 9%
Oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ )	0,5 à 6%
Magnésie ( $MgO$ )	0,1 à 4%
Trioxyde de soufre ( $SO_3$ )	1 à 3%
Soude et / ou potasse ( $Na_2O + K_2O$ )	0,5 à 1,3%

Ces matériaux sont combinés en divers composés chimiques, dont les quatre les plus importants sont obtenus selon les réactions suivantes :



**Tableau 1.4: Principaux composés du ciment portland (11)**

Nom du composé	Oxyde composition	Abréviation	Quantité (%)
<b>Silicate tricalcique</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	50 à 70 %
<b>Silicate bicalcique</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	5 à 25 %
<b>Aluminate tricalcique</b>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	2 à 12 %
<b>Alumino-ferrite tétracalcique</b>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	0 à 15%

Les Silicates (C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S) qui forment ensemble 70 à 80 pourcents de l'ensemble contrôlent les caractéristiques de résistance du ciment. De sorte que, le C<sub>3</sub>S qui libère une grande quantité de chaleur au cours de l'hydratation donne au ciment une grande résistance à court terme. Alors que, le C<sub>2</sub>S permet au ciment d'atteindre une résistance élevée à moyen et à long terme avec une faible quantité de chaleur dégagée au cours du processus d'hydratation (15).

Le C<sub>3</sub>A s'hydrate rapidement et produit une grande quantité de chaleur au début de processus d'hydratation, il contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment. Mais un ciment avec un faible pourcentage de C<sub>3</sub>A développera une résistance ultime élevée, générera moins de chaleur d'hydratation, présentera une plus grande stabilité volumétrique, aura moins tendance à se fissurer et sera plus résistant à l'attaque acide et sulfate, qu'un ciment avec un teneur élevée en C<sub>3</sub>A (11, 15).

#### **1.4.1.3 Hydratation du ciment Portland**

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte du ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte du ciment hydraté. En chimie du ciment, l'hydratation est la réaction du ciment qui est considéré un composé anhydre ou d'un de ses constituants avec l'eau, donnant un hydrate, associé à des changements chimiques et physico-mécaniques du système, en particulier à la prise et au durcissement.

Lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau, une pâte est formée, appelée « pâte de ciment fraîche ». Cette pâte durcit au fur et à mesure que l'hydratation progresse et se transforme en une « pâte de ciment durcie ».(16).

##### **1.4.1.3.1 Mécanismes d'hydratation**

Deux mécanismes d'hydratation du ciment Portland ont été proposés à la fin du 19ème siècle, le premier est le mécanisme Topochimique de Michaelis (1907), Selon ce mécanisme, les réactions ont lieu immédiatement à la surface des composés de ciment anhydre sans que les composés se dissolvent pour produire une masse gélatineuse colloïdale précipitée. Ce gel durcit en perdant de l'eau, soit par séchage externe, soit par aspiration interne par hydratation des noyaux internes non hydratés des grains de ciment. Le deuxième mécanisme est le mécanisme de dissolution-précipitation qui s'opère selon la théorie de Le Chatelier (1905), il est presque similaire à celui de Michaelis, mais la différence essentielle réside dans la manière dont les composés anhydres du ciment réagissent. Selon ce mécanisme, les composés anhydres se dissolvent dans leurs constituants ioniques, ce qui provoque la formation d'hydrates qui vont précipiter par la suite dans la solution sous forme de microcristaux à cause de leur faible solubilité, ce qui rend la solution sursaturée (17, 18) dans (12, 19).

##### **1.4.1.3.2 Hydratation des principaux constituants du ciment portland**

Pour une approche simplifiée, l'hydratation du ciment portland peut se résumer à l'hydratation des quatre phases anhydres composant le ciment Portland selon Le Chatelier qui a été le

premier qui a observé que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement les mêmes que les produits d'hydratation des composés individuels dans des conditions similaires (20).

#### **1.4.1.3.2.1 Hydratation des silicates de calcium**

Les silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$  sont parmi les principales phases constituant le ciment Portland, qui contrôlent dans une large mesure sa prise et son durcissement (16).

Les mécanismes d'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  sont relativement similaires ; dès qu'ils sont en contact avec l'eau, ils produisent une famille d'hydrates de silicate de calcium qui ont la même structure mais varient largement dans le rapport calcium / silice et la teneur en eau chimiquement combinée (12).

La réaction d'hydratation des silicates tricalciques ( $C_3S$ ) a une cinétique plus rapide que celle de silicate bicalcique ( $C_2S$ ) et dégage plus de chaleur.

#### **1.4.1.3.2.2 Hydratation des aluminates de calcium**

Dans les ciments Portland, le composant autre que les silicates de calcium qui affecte le plus la cinétique d'hydratation au cours des premiers jours sont les aluminates tricalciques.

L'hydratation des aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) est très rapide et très exothermique. En absence de gypse, l'hydratation de  $C_3A$  pur avec l'eau est très violente et conduit à un raidissement de la pâte, dit 'flash set' c'est-à-dire un développement rapide de la rigidité de la pâte du ciment fraîchement mélangé ce qui implique une prise et un durcissement précoces de la pâte du ciment (16).

Pour éviter cela, une petite quantité de sulfates de calcium (gypse) est ajoutée afin de réguler la prise du ciment et ralentir la vitesse de la réaction d'hydratation de  $C_3A$ . Dans ce cas, le gypse et le  $C_3A$  réagissent pour former du sulfoaluminate de calcium insoluble ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ), appelé aussi 'l'ettringite'  $C_6A\hat{S}_3H_{32}$  ou  $A\hat{F}t^1$ :

Pour ce qui est de l'hydratation de ( $C_4AF$ ), elle est similaire à celle des aluminates tricalciques ( $C_3A$ ), mais avec une réaction plus lente et moins exothermique, l'hydratation du  $C_4AF$  produit soit du  $C_6A$  (F)  $S_3H_{32}$  ou du  $C_4A$  (F)  $SH_{18}$  (12).

### **1.4.2 Granulats**

Le granulats est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125mm, constitue un élément essentiel dans la composition des matériaux destinés à la construction. Les granulats sont très importants car ils constituent le squelette du béton et ils représentent environ 80 % du poids total du béton. Les granulats sont indispensables, pour la fabrication des bétons, et jouent deux rôles essentiels :

- D'abord, du point de vue économique : ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est le constituant le plus cher dans la fabrication du béton ;
- Puis, du point de vue technique : ils garantissent une bonne stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment.

---

<sup>1</sup> Le terme  $A\hat{F}t$  est utilisé pour désigner les produits qui peuvent avoir des compositions chimiques variables mais qui sont structurellement similaires à l'ettringite.

La classification des granulats est obtenue en fonction de leurs dimensions mais elle est également obtenue en fonction de leur origine (naturelle, artificielle ou recyclée).

La dimension des granulats est obtenue par tamisage au moyen de tamis (mailles carrées) et on désigne une classe de granulats par deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum  $d$ , des grains et le deuxième le diamètre maximum  $D$ .

On peut dire qu'un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe  $d/D$ . Par ailleurs lorsque  $d$  est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné par  $0/D$ .

Les normes en vigueur spécifient cinq classes granulaires principales (Tableau 1.5) caractérisées par les dimensions  $d$  et  $D$  des granulats (Norme XP P 18-540) :

**Tableau 1.5:Classes des granulats selon la norme française XP P 18-540 (11)**

<b>Filler 0/D</b>	Pour « D » < 2 mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0.063 mm
<b>Sablon 0/D</b>	Pour « D » < 1 mm et avec au moins de 70 % de grains passant au tamis de 0.63 mm ;
<b>Sable 0/D</b>	Lorsque « D » est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6.3 \text{ mm}$ ;
<b>Graves 0/D</b>	Lorsque « D » > 6.3 mm ;
<b>Gravillons d/D</b>	Lorsque « d » $\geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$ ;
<b>Ballast d/D</b>	Lorsque « d » $\geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$

Les granulats ont une influence considérable sur la résistance et la durabilité du béton, leur liaison avec le ciment contrôle la résistance du béton. Ils jouent également un rôle majeur dans la détermination du coût et de l'ouvrabilité des mélanges de béton (12, 15).

### 1.4.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est un composant indispensable dans le béton, sa réaction avec le ciment permet de l'hydrater et de libérer ses capacités de liant. C'est un fluide lubrifiant qui permet de placer le béton comme semi-fluide ce qui facilite sa mise en œuvre et son compactage au début et ce qui est nécessaire pour son durcissement (21).

La qualité de l'eau de gâchage a un effet fondamental dans la qualité du béton fabriqué, pour cela, elle doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). Le gâchage à l'eau qui contient des sels solubles comme l'eau de mer est à éviter. En général, l'eau potable est la plus utilisée et recommandée pour confectionner des bétons (10, 15, 21).

### 1.4.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés au béton en petite quantité avant, pendant ou après le malaxage afin d'améliorer certaines de ses propriétés (15). Selon l'effet d'adjuvant, on peut distinguer plusieurs types :

**Tableau 1.6: Différents types des adjuvants (13)**

Nature	Effets
<b>Prise et durcissement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accélérateur de prise : diminue le temps de prise du béton</li> <li>▪ Accélérateur de durcissement : accélère le temps de durcissement du béton</li> <li>▪ Retardateur de prise : ralentit le temps de prise du béton sans l'altérer</li> </ul>
<b>Ouvrabilité du béton</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plastifiant : Améliore la maniabilité du béton sans l'altérer.</li> <li>▪ Plastifiant réducteur d'eau : réduit la teneur en eau dans le but d'augmenter la résistance du mélange, tout en ayant une bonne maniabilité</li> <li>▪ Superplastifiant :</li> <li>▪ Fonction fluidifiante : (dosage en eau normal) améliore la maniabilité mais diminue la résistance</li> <li>▪ Fonction réductrice : (très faible dosage en eau) entraîne une forte réduction en eau dans le mélange tout en conservant une bonne maniabilité</li> </ul>
<b>Modification de certaines propriétés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entraîneur d'air : permet la formation des petites bulles d'air réparties de manière homogène. Ce qui augmente la maniabilité et la résistance au gel du béton à l'état solide</li> <li>▪ Hydrofuge : améliore l'imperméabilité du béton en obturant les pores</li> <li>▪ Les pigments : offrent la possibilité de modifier la couleur du béton</li> </ul>

## 1.5 Propriétés du béton

Le béton est un matériau de construction qui consiste essentiellement en un liant et une charge minérale. Il présente deux comportements : à l'état frais et à l'état durci. Pour l'utiliser au mieux, il faut bien connaître ses propriétés :

### 1.5.1 Propriétés du béton frais

Le béton est dit frais lorsqu'il n'a pas entamé son processus de prise et de durcissement et il a encore la capacité de se déformer et de s'écouler ; ce qui permet de le transporter ou de le pomper et de remplir les moules ou les coffrages (22).

#### 1.5.1.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le Comité ACI définit l'ouvrabilité comme « Cette propriété du béton ou du mortier fraîchement mélangé qui détermine la facilité et l'homogénéité avec lesquelles il peut être placé, compacté et fini dans un état homogène » (23). En d'autres termes, l'ouvrabilité est la facilité de la manipulation, de la mise en œuvre du béton et de son placement dans les coffrages. Elle est considérée comme un critère essentiel pour caractériser la performance du béton.

Généralement, l'ouvrabilité est caractérisée par la grandeur de la consistance; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier en utilisant le cône d'Abrams, c'est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique (10).

On peut classer les bétons selon la valeur d'affaissement comme suit :

**Tableau 1.7: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – Norme NF EN 206-1 (10)**

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S <sub>1</sub>	Ferme	10-40
S <sub>2</sub>	Plastique	50-90
S <sub>3</sub>	Très plastique	100-150
S <sub>4</sub>	Fluide	160-210
S <sub>5</sub>	Très fluide	≥220

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : le plus important est le rapport ciment/eau, il y'a aussi la forme des granulats, la granulométrie, et l'emploi d'adjuvants(10).

### 1.5.2 Propriétés du béton durci

Le béton passera d'un état frais liquide à un état durci solide au fur et à mesure que se développe l'hydratation du ciment avec l'eau aboutissant à la formation d'une matrice solide de ciment hydraté. Parallèlement, des réactions chimiques se développent entre l'eau, le ciment, ses produits d'hydratation et les granulats à l'interface matrice-granulats qui donnent naissance à une auréole de transition ou la zone de transition interfaciale ZIT où se crée la liaison entre la matrice et les granulats grossiers et fins et forment une masse solide (7). En cet état, le béton devient prêt à supporter des charges externes en tant que matériau de structure. Pour cette raison, l'étude des propriétés du béton à l'état durci est très importante, pour définir son comportement à long terme.

#### 1.5.2.1 Résistance mécanique

La résistance peut être considérée comme le critère de qualité du béton, elle mesure la capacité de ce dernier à résister une contrainte générée par une force externe qui peut provoquer des ruptures classées en quatre genres selon le type de la contrainte appliquée : rupture de cohésion ( la contrainte de traction ), rupture par glissement (la contrainte de cisaillement), rupture par écrasement ( la contrainte de compression) ou rupture par flexion (la combinaison entre la contrainte de compression et celle de traction) (23).

La résistance du béton dépend fortement de l'adhérence entre les granulats et la pâte du ciment qui est due à la force d'attraction de van der Waals. Elle est affectée par la présence de défauts, de discontinuités, de pores et en particulier les microfissures trouvées dans la ZIT entre l'interface des granulats grossiers et de la pâte du ciment (12, 24). Ces microfissures sont dues à la différence de propriétés mécaniques et de l'apparition du retrait ou de contraintes thermiques. Pour cette raison, lorsqu'une charge externe est appliquée, les microfissures existantes sont stables jusqu'à environ 30% de la charge ultime pour la contrainte de traction et de flexion, alors qu'elles peuvent atteindre 40 % à 50% de la charge ultime pour la contrainte de compression, au-delà, les fissures interfaciales commencent à augmenter en longueur, largeur et quantité jusqu'à atteindre la rupture. Par ailleurs, les résistances à la traction et à la flexion du béton sont de l'ordre de 10 et 15 pour cent, respectivement, de la résistance à la compression (5, 8, 12, 25).

La résistance du béton est affectées par plusieurs facteurs ; les plus importants sont le rapport eau / ciment et le degré d'hydratation des matériaux cimentaires, car ces derniers affectent la

porosité de la pâte de ciment et la ZIT entre l'agrégat grossier et la pâte de ciment (26); si la quantité d'eau augmente au-dessus de celle nécessaire à l'hydratation complète du ciment, elle produit une structure plus poreuse et entraîne une diminution de la résistance (15).. Elle est aussi affectée par l'efficacité du mélange, de la mise en place, du compactage et du durcissement du béton (15).

## 1.5.2.2 Porosité

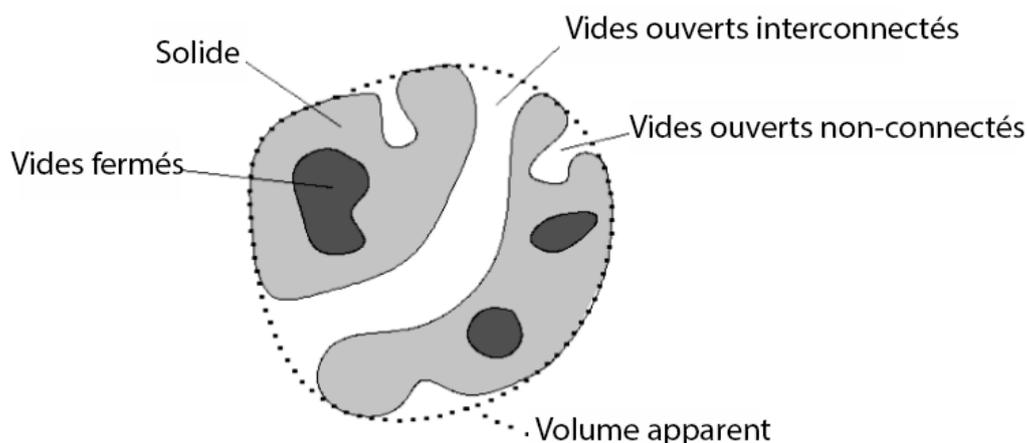
### 1.5.2.2.1 Concept de porosité

La porosité est une caractéristique essentielle du béton, elle donne un aperçu de sa qualité, car elle a une grande influence sur toutes ses propriétés, notamment la durabilité et la résistance. Son augmentation peut être considérée comme une source de faiblesse du béton.

La porosité est définie comme la mesure de la proportion du volume total du béton occupé par les pores sous toutes ses formes et est généralement exprimée en pourcentage. Elle peut être mesurée par intrusion de mercure ou d'autres fluides. Des indications de la porosité peuvent être obtenues à partir de la mesure de l'absorption du béton (20). Il convient également de mentionner que la porosité du mélange d'une pâte de ciment et des granulats est plus faible que la pâte de ciment d'origine (8).

### 1.5.2.2.2 Structure des pores

Les propriétés des matériaux poreux, en particulier le béton, sont fortement affectées par les caractéristiques de leur système de pores, telles que la quantité, la structure, la taille et la distribution des pores. Par conséquent, les propriétés du béton doivent être étudiées en relation étroite avec la structure des pores(25, 27), qui sont classés selon plusieurs ordres de grandeur ; si leur taille est prise en considération, ils sont classés en micropores, mésopores et macropores, et les scientifiques du béton choisissent généralement les limites de 2,5 nm et 100 nm. Selon leur origine, les pores se distinguent en termes de pores de gel, de pores capillaires, de pores d'air et selon leur structure. Il semble opportun de les classer en pores fermés, pores ouverts interconnectés, et pores ouverts non interconnectés (27–29).



**Figure 1.1: Représentation schématique d'un solide poreux (30)**

En ce qui concerne les pores d'air, ils sont généralement sphériques, représentent de 1% à 10% du volume de béton. Ils sont dus à plusieurs facteurs, notamment le compactage incomplet, les mauvaises pratiques de mise en place, la quantité d'air emprisonné lors du malaxage et l'utilisation d'agent d'entraînement d'air, et ont un rôle important dans la perméabilité du béton

(8, 12, 19, 31). Alors que les vides capillaires sont de forme irrégulière (12). Ils affectent beaucoup le béton en termes de durabilité. La résistance du béton aux attaques chimiques et physiques diminue considérablement avec l'augmentation de la quantité de pores capillaires (28).

Les pores de gel sont des espaces interstitiels interconnectés entre les particules de gel, qui sont en forme d'aiguille et de plaque. Ils sont dus à l'évaporation d'eau contenue dans le gel. Du fait que le gel peut contenir de grandes quantités d'eau évaporable, il s'ensuit qu'il peut contenir au moins 28% des pores qui ne jouent aucun rôle significatif dans le transport des fluides à travers le béton car il a un rayon inférieur à 0.5  $\mu\text{m}$  (20, 32).

**Tableau 1.8 : Répartition des tailles des pores et des fissures (8, 33) dans (32)**

Type de pore	Dimension typique des pores ( $\mu\text{m}$ )
Pores capillaires	0.01 à 50
Pores d'air entraîné	1 à 50
Pores d'air emprisonné	1000 à 3000
Microfissures	1 à 60
Pores de gel	0.0005 à 0.0025

Ces pores sont répartis sur toutes les parties du béton. La pâte de ciment durcie contient ainsi une quantité considérable de pores de différentes tailles. Le plus souvent, elle contient des pores de gel extrêmement fins et des espaces capillaires plus grossiers mais submicroscopiques (8, 34). Par ailleurs, les granulats peuvent contenir jusqu'à 20% (le plus souvent 5%) des pores de différentes tailles. Le plus gros étant suffisamment grand peut être vu au microscope ou même à l'œil nu, mais même les plus petits pores d'agrégat sont plus grands que les pores de gel dans la pâte de ciment (19, 20, 35). Malgré ça, la structure des pores des granulats dans le béton est généralement ignorée (36). Il faut aussi tenir compte de la ZIT entre la pâte du ciment et les granulats qui a une grande valeur locale du rapport E/C. En conséquence un film d'eau se forme autour des granulats dans le béton frais compacté, en plus d'une orientation préférentielle des produits d'hydratation du ciment à savoir des gros cristaux de l'hydroxyde de calcium et de l'ettringite, rend le béton plus poreux près des agrégats qu'ailleurs, avec des vides capillaires de plus grande taille qui affectent considérablement la perméabilité de béton (32).

## 1.6 Durabilité du béton

### 1.6.1 Concept de la durabilité

Le Comité ACI définit la durabilité comme «la capacité d'un matériau à résister aux intempéries, aux attaques chimiques, à l'abrasion et à d'autres conditions de service » (23).

À proprement parler, On dit que le béton est durable, lorsqu'il peut résister aux processus de détérioration auxquels il peut s'exposer durant sa vie, c'est-à-dire il conservera sa forme, sa qualité et sa facilité d'utilisation d'origine lorsqu'il est exposé à son environnement de service prévu. Le réservoir de stockage d'eau sur l'île de Rodos en Grèce et de plusieurs aqueducs construits en Europe par les Romains qui ont plus de 2000 ans, représentent un témoignage vivant de la durabilité à long terme du béton dans des environnements humides (12).

La durabilité du béton dépend fortement des conditions d'exposition et de service, de sa porosité, de la structure des pores, et des détails structurels du béton (8, 37).

### **1.6.2 Causes de détérioration du béton**

Une durabilité inadéquate se manifeste sous forme de détériorations qui peuvent être dues à des causes externes ou internes dans le béton lui-même, ces causes peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques. Les causes mécaniques des détériorations comprennent l'abrasion, l'érosion et la cavitation (20).

Les mécanismes chimiques par lesquels le béton peut être attaqué sont relativement limités mais complexes. Ils résultent généralement d'une sensibilité entre l'un des composés du béton avec un autre composé de son environnement. L'action dommageable peut être de différentes natures et peut être directe ou indirecte :

- Les composés à base de calcium ont tendance à être solubles dans les acides et dans l'eau douce et réagissent avec le dioxyde de carbone.
- Les composés d'alumine calcique réagissent avec les sulfates pour former des sous-produits expansifs qui perturbent la matrice.
- Les agrégats calcaires sont exposés aux attaques acides.
- Les agrégats siliceux peuvent réagir avec les alcalins
- L'acier d'armature peut se corroder si le pH de la solution interstitielle du béton baisse suffisamment ou si des chlorures sont présents (20, 38).

Typiquement, une attaque acide entraîne une perte de liant et de résistance dans le béton et éventuellement une perte de section. Alors que, l'attaque au sulfate implique généralement des réactions expansives qui fracturent le béton conduisant à une dégradation continue et une perte de résistance (36).

En ce qui concerne les causes physiques on peut inclure l'usure de la surface, la fissuration due à la cristallisation des sels dans les pores, les effets des températures élevées ou les différences de dilatation thermique du granulats et de la pâte de ciment durci (12, 20).

### **1.7 Conclusion**

En tant que matériau principal dans le domaine de la construction ; l'étude des propriétés physiques et mécaniques du béton est très importante dans ses différents états. Ces propriétés dépendent fortement de la qualité et la quantité des matières premières et des conditions de mise en œuvre au début, et de l'environnement auquel il est exposé, pour le reste de sa vie.

CHAPITRE 2 :  
L'ŒUF : COMPOSITION ET  
UTILISATION DANS LA  
CONSTRUCTION

## Chapitre 2 : L'œuf : composition et utilisation dans la construction

### 2.1 Introduction

Les œufs sont composés de trois parties principales ; la coquille d'œuf avec la membrane de coquille d'œuf, l'albumine ou blanc et le jaune. Le jaune est entouré d'albumen, qui à son tour est enveloppé par des membranes de coquille d'œuf et enfin d'une coquille d'œuf dure. Cette dernière, aux propriétés biomécaniques remarquables permet les échanges de l'embryon avec le milieu extérieur tout en le protégeant ainsi que les réserves nutritionnelles des agents microbiens.

### 2.2 Composition de l'œuf

Nous nous intéressons dans cette étude aux œufs infertiles de poules domestiques. Le poids moyen des œufs produits par des souches de poules élevées sélectivement est de l'ordre de 60 g plus ou moins 5 g. Les œufs en coquille sont constitués d'environ 10% de coquille, 60% de blanc (d'albumen) et 30% de jaune (vitellus) (39). La teneur totale en solides de l'albumine, du jaune et de l'œuf entier est d'environ 12%, 52% et 24%, respectivement ; le reste étant majoritairement de l'eau (40).

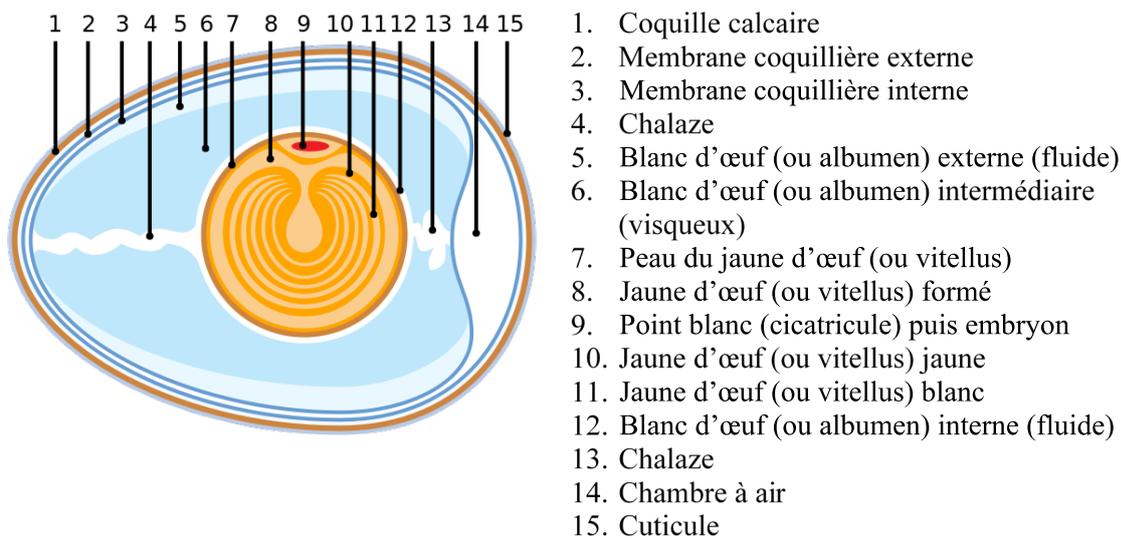


Figure 2.1: Coupe d'un œuf de poule domestique (41)

**Tableau 2.1: Proportions des différentes parties de l'œuf de poule (42) dans (39)**

	<b>Poids(g)</b>	<b>En % de l'œuf total</b>	
	Moyenne	Moyenne	Extrêmes*
<b>Coquilles</b>	5.5	9.1	8.5-10.5
<b>Membranes coquillières</b>	0.25	0.4	-
<b>Blanc</b>	37	61.5	57-65
<b>Jaune</b>	17.3	29	25-33
<b>Total</b>	60	100	-

**\*à poids d'œuf variable**

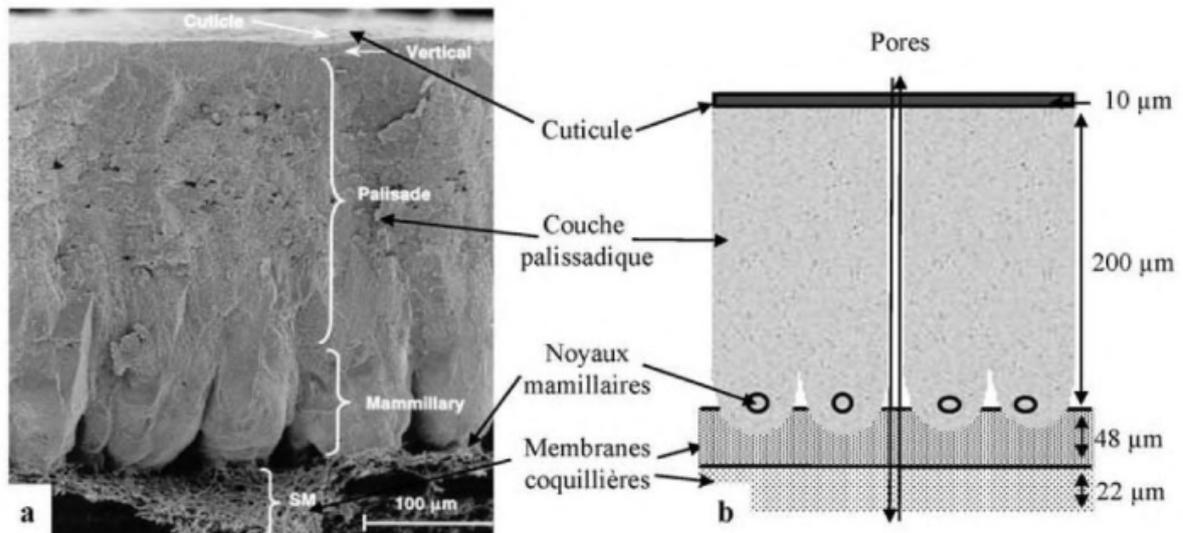
**Tableau 2.2: Composition approximative de l'œuf entier, la coquille, le blanc et le jaune(43, 44)(43–45) dans (46)**

<b>Composants de l'œuf (% du total)</b>	<b>Composition approximative (%poids)</b>				
	Humidité	Protéine	Lipide	Carbohydate	Minéral
<b>Œuf entier (100%)</b>	66.1	12.8-13.4	10.5- 11.8	0.3-1.0	0.8-1.0
<b>Coquille (9-11%)</b>	1.6	6.2-6.4	0.03	Trace	91-92
<b>Blanc (60-63%)</b>	87.6	9.7-10.6	0.03	0.4-0.9	0.5-0.6
<b>Jaune (28-29%)</b>	48.7	15.7-16.6	31.8- 35.5	0.2-1.0	1.1

### **2.2.1 Coquilles d'œuf**

La coquille est une enveloppe minéralisée permettant les échanges gazeux de par sa porosité (avec 7 000 à 17 000 canaux de pores en forme d'entonnoir répartis inégalement sur la surface de la coquille (46)). C'est une combinaison d'une couche mousseuse de cuticule, d'une couche de calcite ou de carbonate de calcium et de deux membranes de coquille. Elle est composée de 1,6% d'eau, 95,1% de minéraux et 3,3% de matière organique (39).

Le minéral de la coquille de l'œuf est très majoritairement constitué de carbonate de calcium à hauteur de 98,4 % des minéraux de la coquille. Les 1,6 % restant sont constitués de carbonate de magnésium et de phosphate de calcium. Le carbonate de calcium contenu dans la coquille est uniquement sous la forme polymorphique cristalline : la calcite. Il est formé à partir des ions calcium et carbonate sécrétés par l'utérus dans le fluide utérin (39).



**Figure 2.2 : Coupe transversale de la coquille observée au microscope électronique à balayage (a)(47), sa représentation schématique montrant les membranes coquillières, la couche des noyaux mamillaires, la couche palissadique et la cuticule (b)(39)**

- La cuticule insoluble dans l'eau est la couche d'œuf la plus externe. Elle mesure environ 10 à 30 μm d'épaisseur et recouvre les canaux poreux. Elle aide à protéger l'œuf de l'humidité et des invasions microbiennes. La cuticule est composée d'une couche minéralisée interne et d'une couche externe constituée uniquement de matrice organique. La couche adjacente à la coque a un aspect mousseux, tandis que la couche externe est plus compacte. La matière solide de la cuticule est composée d'environ 3% de cendres, 5% de glucides et près de 90% de protéines (principalement sous forme de protéines insolubles) et de glycoprotéines. La cuticule contient également une grande partie des pigments (protoporphyrine, biliverdine IXa et son chélate de zinc) dans les œufs colorés et les cristaux d'hydroxyapatite (46).
- La matrice de coquille d'œuf se compose de la couche de cristal verticale, de la couche de palissadique (couche d'éponge) et de la couche des noyaux mamillaire. Le carbonate de calcium est le principal composant des substances inorganiques. Cette calcite (la forme la plus stable de carbonate de calcium) forme des structures allongées appelées colonnes, palissades ou cristallites. La calcification de la coquille d'œuf est l'un des processus de biominéralisation les plus rapides connus, se produisant dans l'oviducte de la poule, sur une période prédéterminée 5 à 22 h après l'ovulation. La taille, la forme et l'orientation du cristal de calcite dans la coquille d'œuf de poule sont affectées par l'interaction des minéraux de carbonate de calcium avec les molécules de la matrice organique (46).
- La couche mamillaire, de 70 μm environ, est la partie la plus interne de la couche calcifiée. Sa base est constituée des noyaux mamillaires qui sont des amas organiques déposés en surface de la membrane coquillière externe et à partir desquels la minéralisation est initiée. La minéralisation se poursuit vers l'extérieur en formant initialement une structure en forme de cônes ou mamelons (39).
- Deux membranes de fibres protéiques résident entre l'albumine et la surface intérieure de la coquille. L'épaisseur totale de ces deux membranes a été estimée à environ 70 μm, avec des épaisseurs de membrane externe et interne d'environ 50 μm et 20 μm, respectivement. La membrane externe de la coque est fixée fermement à la coque par

de nombreux cônes sur la surface interne de la coque s'étendant dans la membrane et par des associations de fibres (48).

#### **2.2.1.1 Caractéristiques physicochimiques des coquilles d'œufs**

La coquille d'œuf, parfois appelée « biocéramique composite naturelle », est un fabuleux biomatériau protecteur ayant une structure cristalline parfaitement bien définie. Outre ses propriétés protectrices, la coquille a aussi des propriétés mécaniques étonnantes : une coquille d'œuf de poule d'une épaisseur de 0,3 millimètre confère à l'œuf entier une résistance à la compression de plus de trois kilogrammes. Un œuf d'autruche, qui a une coquille de trois millimètres d'épaisseur, résiste à plus de 70 kg (47).

**Tableau 2.3: Caractéristiques physiques et chimiques des coquilles d'œufs (49).**

Propriétés	Références			
	Zulfikar et al., 2012	Hassan, Salih-Hassan, 2013	Schaafsma et al., 2000	Yeddou, Bensmaili, 2007
<b>Masse volumique réelle</b>	2,47 (g/cm <sup>3</sup> )	/	/	2,640
<b>pH</b>	8,30	/	8,3	/
<b>CEC</b>	9,52 (mg/100g)	/	/	/
<b>Volume poreux Total</b>	0,6510 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	0,6210 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	/	/
<b>Surface spécifique</b>	3,23 (m <sup>2</sup> /g)	1,20 (m <sup>2</sup> /g)	/	1,990 (m <sup>2</sup> /g)
<b>Porosité</b>	1,6210 <sup>-2</sup>	/	/	0,180
<b>K</b>	12,00 (%)	/	/	(K <sub>2</sub> O) 0,050 (%)
<b>Ca</b>	50,20 (%)	61,50 (%)	386,0-415,0 (mg/g)	(CaCO <sub>3</sub> ) 86,400 (%)
<b>Mg</b>	12,00 (%)	1,94 (%)	3,5-5,5 (mg/g)	(MgO) 0,845 (%)
<b>Na</b>	21,00 (%)	/		(Na <sub>2</sub> O) 0,890 (%)
<b>P</b>	/	28,34 (%)	0,6-1,4 (mg/g)	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 0,481 (%)
<b>S</b>	/	8,20 (%)	/	
<b>Fe</b>	/	/	0,02-0,025 (mg/g)	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 0,029 (%)
<b>Cu</b>	/	/	0,005-0,010 (mg/g)	/
<b>Zn</b>	/	/	0,004-0,006 (mg/g)	/
<b>Matière organique</b>	5,36 (%)	/	6,30 (%)	/
<b>Carbone organique</b>	3,11 (%)	/	/	/

### 2.2.2 Blanc d'œuf (Albumen)

L'albumine ou le blanc d'œuf est composé de quatre couches distinctes :

- Blanc liquide externe en contact direct avec les membranes coquillières ;
- Blanc épais présentant l'aspect d'un gel ;
- Blanc liquide interne localisé entre le blanc épais et le jaune ;
- Chalazes, sorte de filaments spiralés allant du jaune vers les deux extrémités de l'œuf, en traversant le blanc épais, et permettant de maintenir le jaune en suspension au milieu de l'œuf (39).

Le contenu de chaque couche est d'environ 23,2 %, 57,3%, 16,8% et 2,7%, respectivement. Les proportions peuvent toutefois varier en fonction de la race de la poule, des conditions environnementales, de la taille de l'œuf et du taux de production (46).

### **2.2.2.1 Albumine épaisse et mince**

Dans les œufs frais, un albumen épais recouvre l'albumen mince intérieur et la couche chalazifère, en maintenant le jaune d'œuf au centre de l'œuf. La viscosité de l'albumen épais est beaucoup plus élevée que celle de l'albumen mince en raison de sa teneur élevée en ovomucine (46).

### **2.2.2.2 Couches Chalazifères et Cordes Chalazes**

La couche chalazifère est une couche gélatineuse qui recouvre directement tout le jaune d'œuf. Dans le grand axe de l'œuf, la couche chalazifère est tordue des deux côtés de la membrane vitelline, formant une structure épaisse semblable à une corde appelée corde de chalaze. Ce cordon est tordu dans le sens horaire à l'extrémité pointue de l'œuf et dans le sens antihoraire à l'extrémité opposée. Le cordon de chalaze s'étend dans la couche d'albumine épaisse des deux côtés ; ainsi le jaune d'œuf est suspendu au centre de l'œuf. Les chalazes sont légèrement élastiques et permettent une rotation limitée du jaune (46).

### **2.2.2.3 Constituants du blanc d'œuf**

L'eau est le principal constituant de l'albumine d'œuf, allant de 84% à 89% des couches les plus externes aux couches les plus internes. Les protéines sont la principale composante des solides de l'albumine, représentant environ 10 à 11% du poids de l'albumine, tandis que les glucides (principalement le glucose), les lipides et les minéraux sont des composants mineurs (46).

Pour donner un bref aperçu de la composition des protéines et de ses caractéristiques importantes, la section suivante traite des principaux composés du blanc d'œuf :

#### **2.2.2.3.1 Ovalbumine**

L'ovalbumine est la protéine prédominante dans l'albumine et représente 54% à 58% de la protéine de blanc d'œuf en poids. Il s'agit d'une phosphoglycoprotéine monomère avec un poids moléculaire de 44,5 kDa et un point isoélectrique (IEP) de 4,5. L'ovalbumine est la seule protéine de blanc d'œuf à contenir des groupes sulfhydrile libres et elle présente un fort caractère hydrophobe (54–56).

#### **2.2.2.3.2 Ovotransferrine**

L'ovotransferrine (anciennement Conalbumine) représente 12% de la teneur totale en protéines du blanc d'œuf. C'est une glycoprotéine et responsable du transfert des ions ferriques de l'oviducte de la poule vers l'embryon en développement (57). Cela a été démontré par (58) que l'ovotransferrine a la capacité de se lier à deux ions  $Fe^{3+}$  par molécule avec une affinité élevée. Le point isoélectrique de l'ovotransferrine dépend de la quantité d'ions  $Fe^{3+}$  fixes et varie entre pH 7,2, pH 6,6 et pH 6,1 pour aucun, un et deux ions ferriques liés, respectivement (56).

#### **2.2.2.3.3 Ovomucoïde**

L'ovomucoïde, une glycoprotéine, représente 11% de la teneur totale en protéines du blanc d'œuf et présente une activité inhibitrice de la trypsine. En raison de cette fonction d'inhibition enzymatique (l'ovomucoïde a neuf ponts disulfures dans sa structure), l'ovomucoïde est très stable contre les enzymes digestives et les températures élevées. Elle peut être chauffée à 100

° C dans des conditions acides pendant de longues périodes sans aucun changement significatif dans ses propriétés physiques ou chimiques (56).

#### **2.2.2.3.4 Ovomucine**

L'ovomucine est une glycoprotéine de blanc d'œuf sulfatée avec une structure très visqueuse et semblable à un gel. L'ovomucine représente environ 3,5% des protéines totale d'albumine d'œuf et sa teneur est quatre fois plus élevée dans l'albumine épaisse qu'en albumine mince (Ternes, 2008). Elle se caractérise par un poids moléculaire élevé et une structure de sous-unités de formes  $\alpha$  et  $\beta$  (56).

#### **2.2.3 Jaune d'œuf**

Le jaune d'œuf contient environ 50% de solides ; les principaux constituants de la matière solide sont les lipides (~ 65 - 70% sur base sèche) et les protéines (~ 30% sur base sèche). La composition de la matière solide dans la membrane vitelline diffère du jaune lui-même ; il est plus riche en protéines (87%) et en glucides (10%) qu'en lipides (3%).

### **2.3 Historique de l'utilisation de l'œuf dans les matériaux de construction**

L'utilisation de matières organiques dans les matériaux de construction n'est pas récente. Depuis des siècles, différentes cultures utilisent les œufs, le sang d'animaux, poils et autres matières dans les mortiers destinés à la construction. Ces derniers diffèrent de région en région selon les matériaux disponibles allant d'argiles à la chaux en passant par le calcaire et la pouzzolane.

Les coquilles d'œufs ont été largement utilisées comme matériau de construction dans le passé. Au fil du temps, ils ont été remplacés par d'autres agrégats de construction. Cependant, en raison de l'avantage écologique, les coquilles d'œufs peuvent être réintroduites dans construction. En Inde, l'œuf a été utilisé comme reliure, renforcement ainsi que matériaux de finition. Le mortier de chaux poli est généralement composé de chaux et eau avec additifs et agrégats. Les blancs d'œufs ont été utilisés comme additifs et les coquilles d'œufs ont été utilisées comme agrégats. L'ensemble de ce mélange est calciné et utilisé pour de multiples travaux tels que : peinture, reliure, renforcement et finition. Afin de diminuer l'impact environnemental, il est intéressant de valoriser les coquilles d'œufs dans la construction comme une alternative à des matériaux usuels.

Par ailleurs, lors de la rénovation de différents palais de la ville d'Alger notamment la casbah, des œufs ont été utilisés pour répliquer les anciennes méthodes de construction. Il existe aussi des constructions où le mélange utilisé ne consiste que de blanc d'œuf et de sable (mosquée Alwi, Malaisie)(59)(60). Aux Philippines, les églises sont construites avec des matériaux contenant du blanc d'œuf. La raison est que l'ingrédient prédominant dans leur régime est le jaune d'œuf. C'est donc une manière de valoriser le blanc d'œuf (61).

Pour mettre en évidence le potentiel dans notre pays, la production nationale d'œufs s'élève à 3 838 300 000 d'unités (62). Durant l'année 2017, plus de 5 milliards d'œufs ont été consommés en Algérie, selon l'Association nationale des commerçants et artisans (ANCA)(63). Nous pouvons conclure que la quantité de coquilles produites est d'environ 27 500 tonnes annuelles qui sont en très grande partie envoyées aux centres d'enfouissement technique.

Le défi que les déchets de coquilles d'œufs présentent est qu'ils contiennent toujours des membranes et des restes de blanc et de jaune d'œuf. Leurs principaux impacts environnementaux sont le risque de propagation d'agents pathogènes (comme la Salmonella), l'émission d'odeurs désagréables et la production de lixiviats dans les décharges. Néanmoins sa teneur élevée en carbonate de calcium et un faible pourcentage de matière organique offre la possibilité de l'utiliser dans le domaine de la construction.

Quina et ses collègues de l'université de Coimbra ont étudié le potentiel de valorisation des déchets industriels de coquille d'œuf résultant de la casse de ces derniers. En effet, malgré les restrictions légales, des pays comme le Royaume-Uni, l'Espagne et le Portugal ont pu trouver une application pratique pour les coquilles d'œuf, évitant la mise en décharge. Parmi ces applications, l'utilisation de coquilles comme matière première. Les options dans ce cas sont l'additif alimentaire, l'amendement du sol (correction du pH des sols acides), le carbonate de calcium purifié (agent moussant pour la production des mousses de verre (64)), les cosmétiques et le composite de biomatériaux (thérapie dentaire. Ils ont alors conclu que le profit économique doit être évalué dans chaque cas, l'avantage environnemental de ces applications potentielles est généralement élevé (65).

Les coquilles d'œuf étant majoritairement constituées de carbonates de calcium, elles peuvent être utilisées afin de générer l'oxyde de calcium calciné. Ce dernier agit comme catalyseur utilisé dans le processus de transestérification des huiles de cuisson usagées lors de la production de biodiesel (66). De plus, plusieurs chercheurs ont montré que la poudre de coquille d'œuf peut être utilisée comme adsorbant efficace et peu coûteux notamment pour éliminer le fluorure des solutions aqueuses ainsi que des eaux souterraines (67).

L'utilisation comme composite de biomatériaux est très prometteuse surtout dans le domaine médical. Par exemple, une recherche montre que lorsque des particules de coquille d'œuf - qui sont principalement constituées de carbonate de calcium - sont incorporées dans un mélange d'hydrogel, elles augmentent la capacité des cellules osseuses à se développer et à durcir, ce qui pourrait potentiellement entraîner une guérison plus rapide (68).

La fabrication du ciment est extrêmement énergivore et représente environ 7% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (69). Le carbonate de calcium présent dans les coquilles d'œuf pourrait être utilisé dans le secteur de la construction, comme matériau cimentaire dans la construction en tant que remplaçant partiel du ciment dans le béton et le mortier (70).

En effet, Amu et ses collègues ont réalisé l'expérience pratique et rapportent que la poudre de coquille d'œuf peut être utilisée comme supplément pour la chaux industrielle sur un sol argileux expansif et a également indiqué que la combinaison peut être utilisée lorsque des performances élevées de fondation ne sont pas nécessaires (71).

Freire et Holanda ont mené une enquête sur les déchets de coquille d'œuf et ont découvert son utilisation dans une pâte de carreaux de céramique murale. Basé sur la présence de  $\text{CaCO}_3$  dans la coquille d'œuf, il peut être utilisé comme matière première alternative dans la production de matériaux pour carreaux de mur. Ils ont également constaté que la coquille d'œuf peut être utilisée comme une excellente alternative pour la réutilisation des matériaux et les pratiques de recyclage des déchets (72).

Amu et Salami (2010) ont déclaré après réalisation de l'expérience que le sel commun avec la coquille d'œuf sur le sol latéritique obtenait un bon complément pour la coquille d'œuf comme

stabilisateur utile pour les travaux routiers. Stabilisation obtenue en ajoutant 2 à 10% de sel ordinaire avec une poudre de coquille d'œuf optimale. Le résultat a montré que l'ajout de sel commun améliorerait les caractéristiques de compactage des sols stabilisés en coquille d'œuf (73).

Okonkwo et al. ont conclu dans leurs travaux que la cendre de coquilles d'œuf peut être utilisée comme alternative au ciment, ce qui a entraîné une résistance à la compression plus élevée sur le sol latéritique. Le ciment constant de 6 et 8 pour cent ajouté avec la poudre de cendre d'œuf de 0 à 10 pour cent à des intervalles de 2 pour cent montre une augmentation de 35 pour cent de la résistance à la compression, mais n'a pas répondu aux exigences de résistance de la durabilité. En fin de compte, ils ont constaté que le mélange coquille d'œuf sol-ciment peut être utilisé pour les chaussées routières (74).

Barazesh et al., (2012) a réalisé l'expérience sur l'effet de la poudre de coquille d'œuf sur l'indice de plasticité dans l'argile et les sols expansifs et a rapporté qu'il peut être amélioré en ajoutant des déchets de coquille d'œuf avec le sol argileux et peut être utilisé dans les projets de construction, y compris les canaux de terre et les barrages en terre (75).

Les protéines ont une influence mesurable sur le mortier de ciment Portland. En effet, selon S. Chandra and J. Aavik 1987, elles jouent le rôle d'agent d'entraînement de l'air qui par conséquent donne une meilleure résistance à la flexion et l'addition de protéines introduit des propriétés hydrophobes dans le mortier de ciment (76).

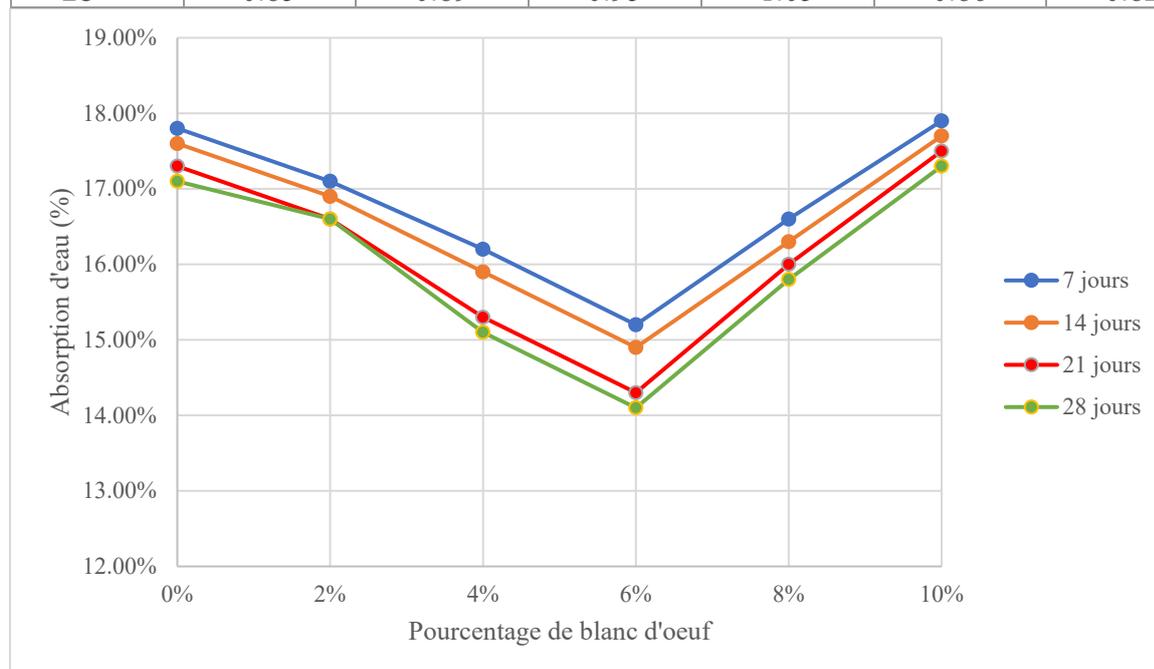
Ainsi, la question se pose : « l'ajout du blanc d'œuf au mortier ou au béton peut-il améliorer leurs propriétés ? ».

Les principaux travaux à ce sujet tournent au tour du mortier à base de chaux. Othuman Mydin 2017 a réalisé des échantillons avec différents pourcentages d'albumine d'œuf en gardant un même ration chaux/sable/eau pour examiner la résistance à la compression et à la flexion du mortier de chaux ainsi que l'absorption d'eau. Les résultats indiquent que les résistances à la compression et à la flexion augmentent avec l'augmentation du pourcentage d'albumine d'œuf ajoutée dans le mortier de chaux jusqu'à ce que le mélange atteigne 6% d'albumine d'œuf. Avec l'ajout du blanc d'œuf 8% et 10%, la résistance à la compression et à la flexion a commencé à diminuer. Le mortier de chaux qui contient 6% d'albumine d'œuf a une résistance à la compression et à la flexion la plus élevée par rapport aux autres groupes de conception de mélange. Les travaux supposent aussi que l'addition de blanc d'œuf a diminué la capillarité par divers mécanismes. Il a créé un film mince qui s'est réparti uniformément sur la structure du mortier, couvrant les grains du liant ; cela a entraîné une diminution de la connectivité entre les pores et un transport limité de l'eau. De plus, l'ajout du blanc d'œuf a modifié la distribution de la taille des pores de telle manière qu'elle a diminué le transport capillaire (77).

Les données ci-suit sont des exemples de résultats obtenues par Mydin :

**Tableau 2.4: Résistance à la flexion du mortier de chaux avec différents pourcentages de blanc d'oeuf**

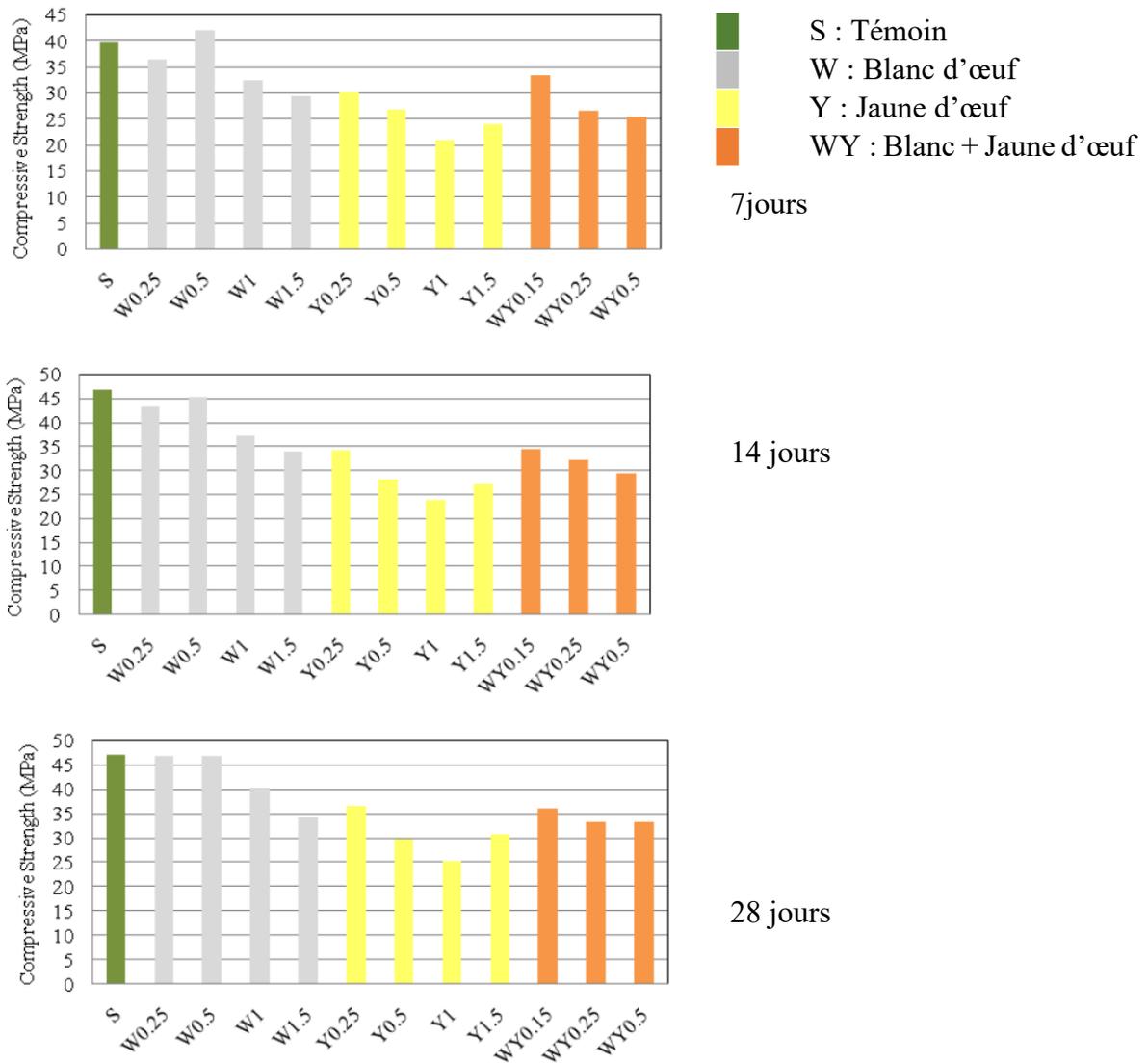
Ages du mortier	Résistance à la flexion (N/mm <sup>2</sup> )					
	0%	2%	4%	6%	8%	10%
7 <sup>ème</sup>	0.32	0.39	0.41	0.48	0.44	0.34
14 <sup>ème</sup>	0.57	0.72	0.74	0.84	0.71	0.54
21 <sup>ème</sup>	0.79	0.87	0.93	0.99	0.89	0.71
28 <sup>ème</sup>	0.85	0.89	0.95	1.05	0.86	0.82



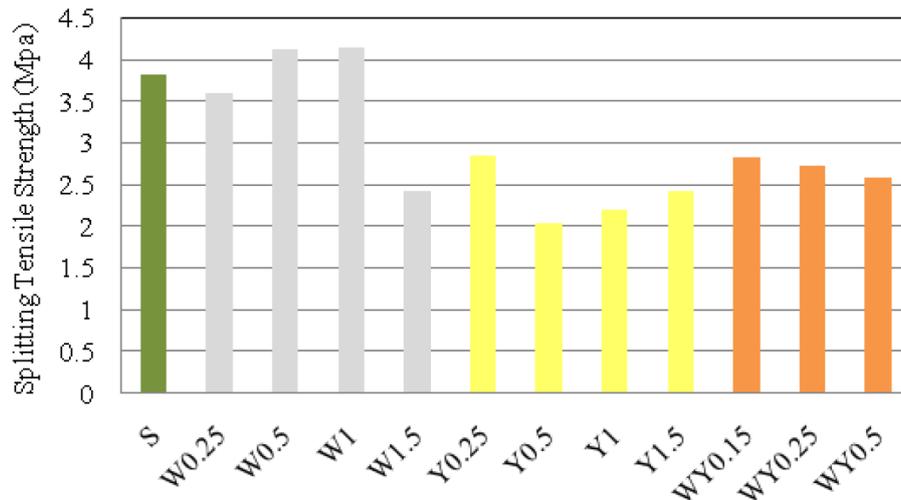
**Figure 2.3: Absorption d'eau d'un mortier de chaux avec différents pourcentages de blanc d'oeuf**

Pour ce qui est du mortier de ciment, une étude menée par Yong 2010 a visé à étudier les performances du mortier avec 1% et 5% d'albumine d'oeuf. L'étude conclut que la résistance à la compression des échantillons contenant le blanc d'oeuf était moindre que celle du témoin mais que la résistance à la flexion augmente avec l'ajout de l'albumine (78).

Enfin, divers pourcentages d'albumine et de jaune d'oeuf ont été utilisés dans un mélange de béton ordinaire. Les résultats ont montré qu'en substituant 0,5% de la teneur en eau à l'albumine, la résistance à la compression était similaire à celle de l'échantillon témoin. Mais la résistance à la traction par fendage et la résistance à la flexion trois points étaient respectivement de 7,2% et 18,9% supérieures à celles de l'échantillon témoin comme le montrent les résultats ci-dessous (79).



**Figure 2.4: Résistance à la traction du béton à différents âges et différentes substitutions d'eau(79)**



**Figure 2.5: Résistance à la traction par fendage du béton avec différentes substitutions(79)**

#### 2.4 Conclusion

En plus de ses utilisations dans l'industrie agroalimentaire, l'œuf a des caractéristiques intéressantes comme additif à la formulation du béton. Les coquilles en tout particuliers posent un problème écologique et de gestion des déchets. Ainsi leur incorporation dans les matériaux de constructions donne l'opportunité de résoudre 2 problèmes : la revalorisation d'un déchet et diminué les quantités à produire du ciment lequel connait un procédé de production hautement polluant.

Le blanc d'œuf quant à lui pourrait améliorer les propriétés du béton en le rendant plus durable, permettant alors un cycle de vie prolongé.

CHAPITRE 3 :  
TRANSPORT DE FLUIDE  
DANS LE BETON

## Chapitre 3 : Transport de fluide dans le béton

### 3.1 Introduction

À l'exception des dommages mécaniques, toutes les influences néfastes sur la durabilité impliquent le transport de fluides à travers le béton (20). Le béton étant un matériau poreux, composé d'une phase solide et d'un espace poreux ou espace des vides.

Il existe trois fluides principalement liés à la durabilité qui peuvent pénétrer dans le béton : l'eau, pure ou porteuse d'ions agressifs, le dioxyde de carbone et l'oxygène. Ils peuvent être régis par trois mécanismes : La perméabilité, la diffusion et la sorption (20). Le transport de fluide dépend fortement des propriétés de la microstructure ainsi que des conditions aux limites réelles (80).

Dans ce chapitre, nous considérons la diffusion moléculaire et la diffusion ionique dans des milieux poreux dont les pores contiennent une phase liquide que nous relierons à la perméabilité.

### 3.2 Diffusion

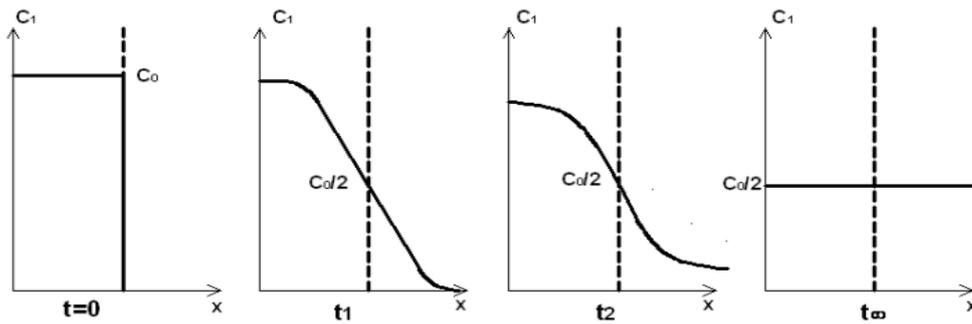
La diffusion est un processus qui se produit au niveau atomique et qui peut conduire, sous certaines conditions, au transport de matière à une échelle macroscopique (30). Elle se produit dans de nombreuses situations, et ce chapitre s'intéresse particulièrement à la diffusion d'un fluide (solvant) dans un milieu poreux en l'occurrence le béton.

Dans le domaine du génie civil, le transport par diffusion s'effectue principalement via des matériaux poreux. On peut citer, par exemple :

- La pénétration de chlorures dans le béton immergé dans l'eau de mer ;
- La pénétration de CO<sub>2</sub> dans le béton ;
- La diffusion de vapeur d'eau dans les murs des bâtiments.

Le béton est un matériau hétérogène composé de solides (granulats et pâte de ciment durcie), de liquide (eau interstitielle) et d'air humide (si le béton n'est pas saturé). A priori, le transport de gaz comme le CO<sub>2</sub> peut se produire dans ces trois parties, tandis que les ions peuvent se déplacer dans les phases liquide et solide. La différence entre les coefficients de diffusion dans les liquides et les solides étant de l'ordre de grandeur, et il y a quatre ordres de grandeur entre les gaz et les liquides, les débits sont très différents. En pratique, on peut considérer que les ions diffusent dans l'eau contenue dans les pores, et que le CO<sub>2</sub> pénètre à travers des pores vides ou dans l'eau, si le béton est saturé.

### 3.2.1 Loi de Fick



**Figure 3.1: Transport macroscopique de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration ce qui tend à homogénéiser les concentrations de particules dans le fluide**  
(30)

La théorie mathématique de la diffusion dans un milieu isotropique est basée sur l'hypothèse que le flux de matière  $J$  diffusante à travers une unité de surface, est proportionnel au gradient de concentration selon un axe normal à cette surface, et s'exprime selon la première loi de Fick (81, 82).

$$\vec{J} = -D \cdot \overrightarrow{\text{grad}} c \quad \text{eq 3-1}$$

Où :

$\vec{J}$  : représente le flux des espèces diffusantes ;

$c$  : est la concentration.

$D$  : est par définition le Coefficient de diffusion

Cette loi a été établie expérimentalement en 1855 par Adolph Fick, qui a montré la relation de proportionnalité entre le flux de chlorure de sodium dans une solution dans l'eau, et la concentration en soluté.(82)



**Figure 3.2 : Schéma représentatif de Diffusion unidirectionnelle** (83)

Dans le cas d'un déplacement de la matière dans la direction  $x$  l'équation pour un constituant  $i$  serait :

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad \text{eq 3-2}$$

### 3.2.2 Diffusion en milieu poreux

Dans le cas du béton, qui est considéré comme un matériau poreux constitué d'une phase solide (la matrice) et les pores remplis de fluide que ce soit l'eau ou l'air qui présente une phase aqueuse. Afin de permettre le déplacement d'un élément donné, les pores doivent être ouverts, interconnectés et suffisamment saturés, si l'étude de la diffusion du fluide est faite à grande échelle (diffusion à travers un matériau poreux).

En effet, dans un pore, les particules peuvent entrer en collision avec les parois. Cela perturbe le transport dans le sens du gradient de concentration. Le flux, écrit comme  $J_i^*$ , est toujours exprimé par la première loi de Fick, mais le coefficient de diffusion  $D_i^*$  est plus petit que le coefficient de diffusion dans l'environnement infini  $D_i$  :

$$J_i^* = -D_i^* \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad \text{eq 3-3}$$

Dans un milieu poreux, le transport est décrit à l'aide du flux effectif  $J_{e,i}$ , qui représente la quantité du constituant qui traverse le milieu poreux par unité de temps et par unité de section de la matière dans la direction  $x$ . Ce débit reste proportionnel au gradient de concentration de l'espèce dans la phase support dans laquelle elle diffuse (le liquide contenu dans les pores) et le coefficient de proportionnalité est donné par la première loi de Fick appliquée à un matériau poreux :

$$J_e = -D_{e,i} \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad \text{eq 3-4}$$

$D_{e,i}$  est appelé coefficient de diffusion effectif et dépend de l'espèce diffusante, de la phase de support, de la structure poreuse du matériau et de la température. Cela dépend également du degré de saturation. Ensuite, nous considérerons dans un premier temps que le milieu poreux est saturé par la phase support.

Les coefficients de diffusion sont exprimés en  $m^2/s$ .

Les modèles physiques lient le coefficient de diffusion effectif,  $D_{e,i}$ , d'un constituant  $i$  donné au coefficient de diffusion  $D_i$  de ce même constituant dans la phase remplissant les pores. La relation suivante est parfois utilisée :

$$D_{e,i} = \frac{p_0}{\tau} D_i \quad \text{eq 3-5}$$

-  $p_0$  est la porosité ; et

-  $\tau$  est la tortuosité.

Ce modèle montre que la taille des pores en elle-même n'a aucune influence sur les propriétés de transport par diffusion. En d'autres termes, il dépend des espèces diffusantes, la phase de support, la structure poreuse du matériau (porosité totale, distribution porale, degré de connectivité...), la température et également du degré de saturation (30, 84). Le coefficient de diffusion effectif est de nature macroscopique, car ce ne sont pas les pores individuels mais tout l'espace des pores qui doit être pris en compte (85).

### 3.3 Perméabilité

La perméabilité est définie comme la capacité d'un béton donné à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression (20, 23). En d'autres termes, elle décrit la facilité avec laquelle les fluides (liquides ou gaz), peuvent pénétrer dans le béton et se déplacer entre deux sites soumis à des pressions différentes (20). Elle est indépendante des propriétés du fluide saturant mais dépend fortement de paramètres du milieu poreux comme la porosité, la tortuosité et la connectivité (86).

Les facteurs les plus importants qui affectent la perméabilité sont la quantité et la qualité des matériaux constitutifs (le ciment, les granulats, l'eau, et ainsi que les éventuels adjuvants). Si le rapport eau / ciment est trop faible, ceci cause un compactage incomplet, ce qui implique un grand nombre de pores, et enfin l'augmentation de la perméabilité (36). En ce qui concerne les granulats, ils peuvent également contenir des pores, mais ceux-ci sont généralement discontinus ou enveloppés par la pâte de ciment. Donc, dans le béton entièrement compacté, c'est la perméabilité de la pâte de ciment durci qui contrôle la perméabilité du béton (20). L'hydratation du ciment produit un gel qui tend à remplir les vides d'eau et à diminuer la perméabilité, bien que les vides ne soient jamais complètement éliminés (15).

La perméabilité dépend non seulement de constituants du mélange mais également des microfissures provoquées par les cycles de température et d'humidité ambiantes (12).

Considérons une tranche d'un matériau d'épaisseur primaire  $dx$  et de zone visible  $A$ . Les deux faces parallèles du matériau sont en contact avec un fluide de viscosité,  $\mu$ . Une différence de pression,  $dP$ , existe entre les deux faces. Si le matériau est perméable, un débit volumique,  $q$ , de fluide se produit. L'expression de ce flux par la loi de Darcy est utilisée pour définir la perméabilité  $k$  du matériau :

$$q = -\frac{k}{\mu} A \frac{dP}{dx} \quad \text{eq 3-6}$$

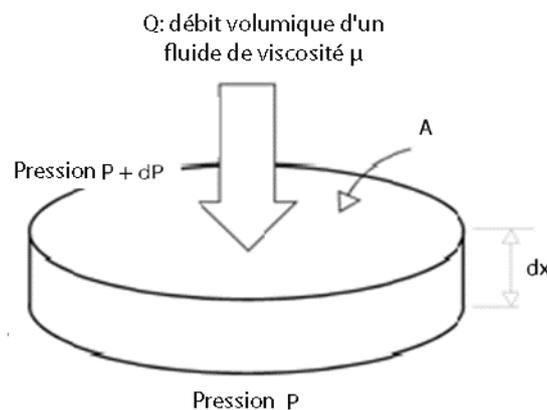


Figure 3.3: Schéma de transport par perméation(30)

La perméabilité ainsi définie est homogène dans une zone et est donc exprimée en  $m^2$  dans le système international (SI) d'unités.

La relation de Darcy n'est applicable que si le système d'écoulement est laminaire et si le fluide est inerte vis-à-vis du matériau. Les suppositions étant que :

- Le fluide s'écoule en régime permanent
- Le milieu poreux doit être totalement saturé par une seule phase fluide, sinon on parlera d'une perméabilité relative.
- L'écoulement des fluides dans l'échantillon est supposé laminaire.
- Pas d'interaction physico-chimique entre le fluide et le matériau (le fluide est inerte vis-à-vis du milieu poreux).
- La viscosité du fluide gouverne l'écoulement (les forces d'inertie sont négligées)(87).

Si ces hypothèses sont vérifiées, il apparaît que la perméabilité est une grandeur intrinsèque. Cela signifie notamment que sa valeur est indépendante du fluide (inerte) utilisé et du gradient de pression.

Dans le domaine de l'hydraulique des sols, on définit parfois un coefficient désigné par le terme « perméabilité », qui s'exprime en m/s dans le système unitaire SI, et est donc homogène avec la vitesse. Ce n'est donc pas le même paramètre.

Ce paramètre,  $k_e$ , que nous appellerons ici « coefficient de perméabilité » pour le distinguer de la perméabilité intrinsèque avec dans le cas de l'eau :

$$k_e = \frac{k \cdot \omega_e}{\mu_e} = \frac{k \cdot \rho_e \cdot g}{\mu_e} \quad \text{eq 3-7}$$

Où :

$\omega_e$  : poids volumique de l'eau est le produit de  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération gravitationnelle

$\mu_e$  : viscosité de l'eau

Il convient également de mentionner que le coefficient de perméabilité d'un béton aux gaz et à la vapeur d'eau est bien inférieur au coefficient de l'eau liquide; par conséquent, les tests de mesure de la perméabilité sont généralement effectués avec de l'eau (12).

### 3.3.1 Model de Kozeny-Carman

La théorie de Kozeny (1927) est basée sur l'idée d'un environnement équivalent. La porosité du matériau est assimilée à un seul canal rectiligne de section constante  $a$  et de longueur  $L_e$ .

- Hypothèse 1 : les vides sont assimilés à un seul canal de section  $a$  et de longueur  $L_e$  constantes.
- Hypothèse 2 : le volume des vides est égal au volume du canal ( $v = a \cdot L_e$ ) et la surface externe du canal est égale à la surface externe des pores.
- Hypothèse 3 : la phase d'écoulement est laminaire. Il est régi par la loi de Poiseuille.

La vitesse d'écoulement moyenne,  $u_e$ , est véhiculée par une forme générale de la loi de Poiseuille :

$$u_e = \frac{Q_e}{A} = \frac{m^2}{h_0 \mu} \cdot \frac{\Delta P}{L_e} \quad \text{eq 3-8}$$

où:

- $Q_e$  est le débit volumique à travers le canal. Il est égal au débit  $Q$  à travers le matériau.
- $m$  est le rayon hydraulique du canal. C'est le rapport entre le volume et la section extérieure du canal.
- $h_0$  est un facteur de forme, qui caractérise la forme de la section de canal.
- $\mu$  est la viscosité de l'air.
- $L_e$  est la longueur du débit ou la longueur effective du canal.

Ces deux derniers coefficients sont adaptés à la porosité des matériaux consolidés. Ainsi, le volume du canal modélisé est égal au volume des vides dans le matériau et sa surface latérale à la surface des vides.

Le rayon du canal est :

$$m = \frac{p_0}{S_s(1 - p_0)} \quad \text{eq 3-9}$$

En utilisant ces hypothèses et en introduisant la tortuosité,  $\tau$ , nous obtenons la relation Carman-Kozeny :

$$k = \frac{p_0^3}{(3 - p_0)^2} \frac{1}{S_v^2} \quad \text{eq 3-10}$$

Ce modèle est fréquemment utilisé dans le cas des poudres, car le facteur  $h_0 \cdot \tau$  est pratiquement constant ; on peut ainsi calculer la surface spécifique d'une poudre à l'aide d'une mesure de perméabilité. Dans le cas des matériaux cimentaires, il est très difficile d'appliquer ce modèle, qui nécessite une description parfaite du volume poreux participant à l'écoulement à travers des paramètres tels que  $h_0$ ,  $\tau$  et la surface spécifique du milieu poreux.

Le modèle de Kozeny-Maxwell est une variante du modèle initial dans laquelle on ignore la connaissance de  $h_0$  et  $\tau$  :

$$k = \frac{p_0^3}{(3 - p_0)^2} \frac{1}{S_v^2} \quad \text{eq 3-11}$$

Où  $S_v$  est la surface volumique spécifique du matériau.

Ainsi, divers modèles empiriques ont été proposés par d'autres chercheurs corrélant la conductivité hydraulique à la porosité effective pour le béton perméable. Quelques exemples sont cités dans le tableau suivant :

**Tableau 3.1: Équations pour prédire la propriété de transport de l'eau du béton perméable (avec m et n des constantes empiriques) (88)**

Model	Equation	Utilisé par	Type
Linéaire	$k_e = m \cdot p_0 + n$	Luck et al., 2006 (89)	Empirique
Puissance	$k_e = m \cdot p_0^n$	Ghafoori et Shivaji, 1995 (90)	
Exponentiel	$k_e = m \cdot \exp(n \cdot p_0)$	Neithalath et al., 2010 (91)	
Kozeny-Carman	$k_e = 18 \cdot p_0^3 / (1 - p_0)^2$	Haselbach et al., 2006 (92)	Semi-empirique

### 3.4 Les mécanismes de transport des fluides dans le béton

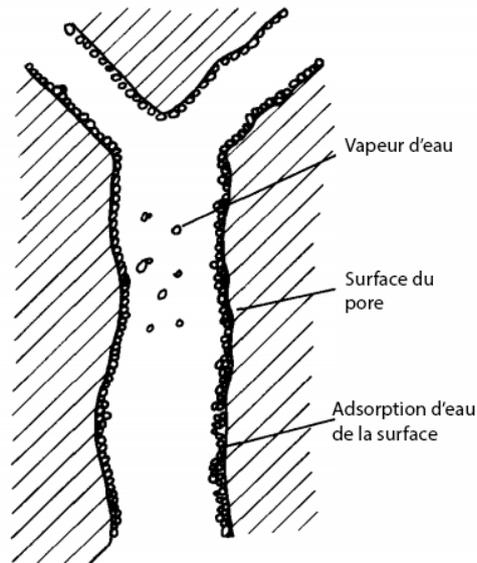
En tant qu'un matériau poreux, les fluides pénètrent le béton, avec différents mécanismes qui diffèrent selon les propriétés physiques et chimiques de ces fluides. Les mécanismes de transport et les mécanismes par lesquels les différents fluides affectent le béton ont été détaillés par Hilsdorf (93) et Soutsos (32).

#### 3.4.1 Transport d'eau dans le béton :

L'eau est le facteur le plus important contrôlant les divers processus de détérioration du béton, elle agit soit comme le principal agent responsable de la détérioration, soit comme un moyen de transport pour les espèces agressives (par exemple, les chlorures, le dioxyde de carbone et l'oxygène). Dans le béton, l'eau peut être présente sous diverses formes, à savoir sous forme d'eau libre qui est la partie de l'humidité dans le béton, dont les propriétés physiques approchent celles de l'eau pure. Ou d'eau chimiquement liée, y compris la partie de l'humidité qui est limitée par les forces de sorption dans le béton et dont les propriétés sont significativement différentes de celles de l'eau pure et l'eau d'hydratation et de cristallisation du ciment. Cependant, il n'y a pas de transition nette entre ces deux formes (94).

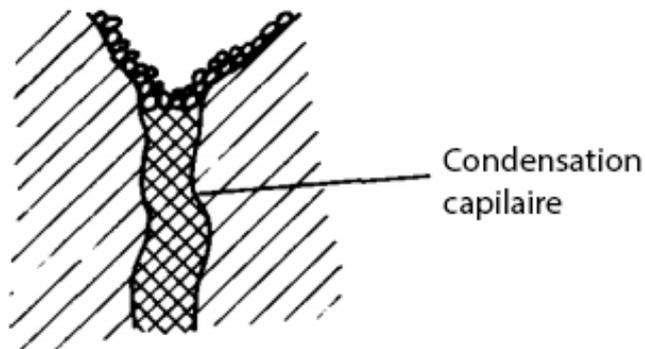
Le béton absorbe l'eau en fonction de leur exposition à la pluie, aux eaux souterraines, à la condensation et à l'air humide, et la rejettent en réponse aux effets desséchants de l'atmosphère.(95);

Pour le béton soumis à l'air humide, l'eau y est transférée par deux mécanismes : soit par l'adsorption moléculaire surfacique sous l'action des champs de forces superficielles émanant ; des forces intermoléculaires de Van Der Waals (adsorption physique pure) et des forces électrostatiques (liaisons Hydrogène), soit par la condensation capillaire, tout dépend de l'humidité relative (R.H) de l'air ambiant. Dans le domaine des faibles R.H, c'est l'adsorption surfacique qui est prédominante.



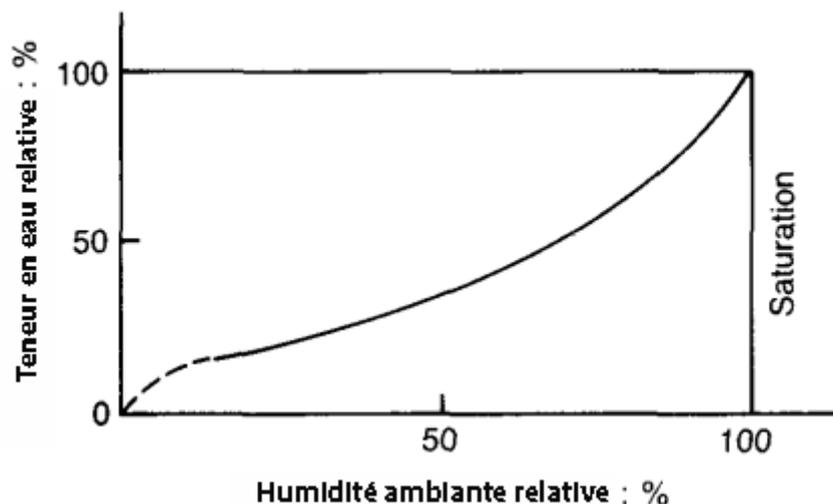
**Figure 3.4: Mode de pores simplifié montrant le phénomène d'adsorption d'eau(28)**

Pour les R.H plus élevées, le phénomène de condensation capillaire apparaît et c'est alors la distribution des tailles de pores qui joue un rôle très important (quantité importante de pores condensables, c'est à dire ayant une taille caractéristique inférieure à  $1000 \text{ \AA}$ ) (96).



**Figure 3.5: Mode de pores simplifié montrant le phénomène de condensation capillaire d'eau (28)**

La quantité d'humidité fixée par adsorption moléculaire surfacique et par condensation capillaire conduit au quasi saturation du matériau.



**Figure 3.6: Relation entre l'humidité relative de l'air ambiant et du béton, par rapport à la saturation (28)**

Dans le cas du mouillage des surfaces en béton (par exemple, pluie et éclaboussures), le transport de l'eau est une importance majeure. En raison de l'aspiration capillaire, la saturation sera rapidement atteinte. Cependant, Dans le cas de structures immergées en continu, de grandes quantités d'eau peuvent, dans des conditions défavorables, être transportées. La pénétration de l'eau se fera d'abord par aspiration capillaire, éventuellement accélérée par une pression hydraulique accrue (perméabilité) (28).

Comme le transfert de l'eau dans les pores étant fortement dépendant de l'humidité relative, son transfert vers l'extérieur lorsque le béton s'assèche dépend également de l'humidité relative.

### 3.4.2 Séchage à humidité relative élevée

A saturation, tout le réseau est rempli d'eau liquide et cette phase "capillaire" est continue. Cependant, le béton est très vite dé-saturé par auto-dessiccation. Dès que les pores se désaturent en surface, un écoulement "capillaire" s'établit depuis l'intérieur vers l'extérieur du système poreux. Ainsi, au tout début du séchage, tant que la phase capillaire reste continue et que la perméabilité à l'eau liquide est encore relativement forte, c'est le transfert en phase liquide, provoqué par les forces capillaires, qui est prépondérant : c'est la pression capillaire qui gouverne les mouvements d'eau.

### 3.4.3 Séchage à humidité relative intermédiaire

C'est le domaine où il y a coexistence de la phase gazeuse et de la phase liquide, les pores se vident et les filets d'eau liquide se rompent avec la diminution de l'humidité ; on assiste alors à un phénomène d'évaporation donc à un transfert diffusionnel de l'humidité.

### 3.4.4 Séchage à humidité relative faible

Ici, il n'y a plus de l'eau dans les pores sauf un film liquide de quelques molécules d'épaisseur qui se déplacera vers l'extérieur par ce qu'on appelle diffusion surfacique (migration du film adsorbé). dans ce cas, le transfert en phase gazeuse est dominant, avec des effets Knudsen plus ou moins importants (96).

Plusieurs chercheurs ont étudié le processus de transfert d'eau dans les matériaux poreux en général et dans le béton en particulier, et les différents facteurs qui affectent ce phénomène ; on peut citer les suivantes :

Kanema (97) l'un des auteurs qui a abordé le thème de le transfert de masse dans le béton en décrivant un modèle couplé thermo-hydraté, basé sur les deux types de transferts ; de masse et de chaleur et des hypothèses simplificatrices dans le cas du béton, y compris la considération du béton comme un poreux insaturé, homogène et isotrope contenant trois phases : squelette solide, phase liquide (eau pur )et phase gazeuse ( vapeur d'eau), son model basé sur le bilan massique qui prend en compte à la fois la quantité échangée par vaporisation ou condensation et la quantité d'eau (liquide) libérée par déshydratation pour écrire le bilan massique des transferts d'eau et de vapeur, l'équation de Darcy pour décrire les gradients de pression interstitielle, l'équilibre liquide - la vapeur qui est décrit par l'équation de Clapeyron.

Homan et ses collègues (98) ont étudiés l'effet du transport de l'humidité sur la pénétration des chlorures dans le béton partiellement saturé, en mesurant les profils de concentration de chlorure dans des échantillons de béton initialement partiellement saturés et initialement entièrement saturés. Les résultats ont montré que le transport de l'humidité augmente considérablement le processus de pénétration des chlorures dans le béton. Ainsi, il existe un effet de couplage significatif du transport d'humidité sur la pénétration des chlorures.

Gong et Jacobsen (99) ont modélisé le transport de l'eau dans le béton hautement saturé avec surface humide lors du cycle gel / dégel en étudiant le gradient de température, le gradient de pression et l'écoulement du liquide sous une exposition au gel humide avec différentes quantités d'air entraîné. Ils ont montré que l'absorption d'eau se produit au stade de la fusion, et pour le béton non entraîné par l'air, l'effet de pompage hydraulique est dominant et aspirera l'eau de la surface humide. Alors que pour le béton à air entraîné, la pression de cryosuccion est la principale force motrice du flux entrant.

### **3.4.5 Transport des ions dans le béton**

Le béton peut être pénétré par de nombreux ions agressifs qui peuvent se déplacer seulement dans la phase liquide (comme les ions de chlorure et de sulfate) (81), ce qui affecte sa durabilité.

Les principaux mécanismes de transport par lesquels les ions agressifs pénètrent le béton sont la diffusion et l'action capillaire, la diffusion seule peut être un processus très lent, d'où le fait que le transport capillaire, en particulier près d'une surface de béton non saturé, est le mécanisme d'invasion dominant (100).

Les processus de dégradation du béton en milieu agressif a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années; en particulier l'effet des sulfates (cela se produit par exemple dans les fondations, galeries, magasins de déchets radioactifs en contact avec des sols riches en sulfate (101–103), et de chlorure pour les bétons armés soumis à des environnements marins.

Les mécanismes par lesquels le béton se détériore en raison de l'attaque du sulfate sont complexes et comprennent la diffusion ionique, les réactions chimiques et les dommages par expansion (104–106), la réaction entre le sulfate et les produits hydratés du ciment conduit à la formation des produits expansifs comme le gypse et l'ettringite qui ont peu de solubilité et remplissent les pores, conduisant à des microfissures et à l'expansion du béton, la dissolution de la portlandite (CH) et la décalcification des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) qui

diminuent la résistance du béton en affaiblissant la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats (103).

Qin et al. (104) ont développé un modèle couplé de dommages chimio-transport pour l'attaque par sulfate externe, validé à l'aide des résultats expérimentaux, ce modèle sert à prédire les effets de la lixiviation du calcium sur la dilatation des matériaux en béton, et de la température sur les processus de détérioration, en analysant trois aspects des effets de la température: la création de gradients de température, les taux de réactions chimiques et de lixiviation du calcium, et le taux de transport des ions. Les résultats ont montré que l'accélération de la lixiviation du calcium a un effet considérable sur la vitesse des réactions chimiques car elle augmente la concentration des ions calcium en solution ce qui augmente l'expansion du matériau. De plus, La température a fait une grande différence pour l'expansion sous une attaque de sulfate externe. L'expansion était plus importante à une température plus élevée en raison d'une diffusion accrue et d'une vitesse de réaction chimique plus élevée.

Cefis et Comi (103) ont construit un modèle couplé qui permet de quantifier les produits expansifs à partir d'une équation de réaction diffusive, en tenant compte de la déplétion d'aluminate due à la réaction, et au même temps de prédire le gonflement et les dommages matériels.

En ce qui concerne la diffusion du chlorure, la corrosion de l'acier d'armature est le mécanisme de détérioration le plus important des structures en béton armé (107). En milieu saturé (béton immergé), les ions chlorures pénètrent par diffusion dans le béton sous l'effet d'un gradient de concentration entre la surface contenant le chlorure et le cœur exempt de chlorure. En milieu insaturé, où le béton soumis à des cycles d'humidification-séchage, les chlorures pénètrent par absorption capillaire puis migrent par convection avec la phase liquide. La progression s'effectue ensuite par diffusion dans la zone saturée (3, 108). Dans le même contexte (109) ont étudiées l'influence de la vitesse hydrique du matériau cimentaire sur la pénétration des chlorures pour montrer à la fin l'effet important du taux de saturation sur la migration et la fixation des chlorures au sein du béton, car le transport convectif régi par le gradient de pression du liquide est beaucoup plus rapide que le transport diffusif de en le gradient de la concentration.

### **3.4.6 Transport du gaz dans le béton**

Le transport du gaz dans le béton est un processus qui se produit dans diverses situations : carbonatation de la pâte de ciment hydraté (transfert de dioxyde de carbone), transfert d'oxygène et divers transferts gazeux dans des conteneurs à déchets. Ce processus peut se produire seul ou être associé à des transferts en phase liquide, ou couplé à des réactions chimiques (30, 110). Les mécanismes fondamentaux de la migration des gaz sont l'écoulement dû à un gradient de pression imposé (perméabilité) et l'écoulement dû à un gradient de composition (diffusion) (111).

Le dioxyde de carbone se diffuse dans le béton en raison d'une réaction chimique entre le dioxyde de carbone et le béton se développant au niveau des parois des pores, ce qui entraîne une réduction de la concentration dans les pores (28). Chimiquement ; le CO<sub>2</sub> est dissout dans l'eau pour former l'acide carbonique qui réagira par la suite avec les hydroxydes de calcium, de potassium et de sodium dans l'eau interstitielle, réduisant le pH en dessous du seuil critique de 10,5 ce qui provoque la corrosion de l'acier des armatures du béton armé (32). Thiery (112) a construit un modèle de carbonatation permettant de prédire la chute du pH, variable pertinente

pour appréhender la corrosion des armatures. Une campagne d'analyses thermogravimétriques, de gamma densimétries et de prosimétrie par intrusion de mercure, réalisés sur trois bétons et plusieurs pates de ciment, permet de comprendre les mécanismes physico-chimiques, de déterminer les conséquences de la carbonatation sur la microstructure et l'état hydrique, de calibrer et de valider le modèle à partir d'essais de carbonatation accélérée.

Un processus similaire s'applique à l'oxygène lorsqu'il est consommé lors de la corrosion du renfort (28). Ce thème est discuté par Hussain, et autres auteurs (113), en étudiant l'influence de la concentration en oxygène sur la vitesse de corrosion de l'armature dans diverses conditions définies (séchage à l'air, immergé, humidité relative de 95% et alternance de mouillage et de séchage).

Nombreuses études ont abordés le thème de transport des gaz en milieu poreux, alors que l'étude du transport de gaz dans le béton est très limitée, par exemple de ces études, on peut citer : Odeh et autres chercheurs (114) qui ont développés un système expert pour évaluer le transport de gaz en régime permanent, isotherme et isobare à travers les fondations de tapis de béton en utilisant le modèle de gaz poussiéreux (Le système gazeux est un système ternaire composé du gaz polluant mélangé aux composants de l'air naturel de l'oxygène ( $O_2$ ) et de l'azote ( $N_2$ )) qui combine différents mécanismes de flux de transport de gaz ( les flux moléculaires, Knudsen, non équimolaires et visqueux). à partir de cette étude, ils ont montré que le flux de vapeur de contaminant est fortement affecté par le rapport de ciment de la teneur en eau et le rayon des pores, L'effet de l'augmentation du rayon des pores sur les flux totaux s'est avéré négligeable lorsque la diffusion de Knudsen devient insignifiante par rapport à la diffusion moléculaire, et la loi de diffusion de Fick s'est avérée inadéquate pour étudier le flux gazeux pour les petits pores dans lesquels la diffusion de Knudsen est significative. Et Culot (115) qui a construit avec ses collègues un modèle de diffusion linéaire sert de base à la détermination d'un coefficient de diffusion efficace du radon dans le béton.

### **3.5 Conclusion**

Les problèmes de transport des fluides dans les milieux poreux en général, et dans le béton en particulier ont attiré l'attention de nombreux chercheurs, ingénieurs et scientifiques de divers domaines , tels que le génie chimique, civil , environnemental ...,et cela en étudiant les processus avec lesquels ces fluides peuvent pénétrer le béton et l'étendue des dommages qu'ils ont causés, ces processus peuvent être la diffusion , la perméabilité ou sorption selon la nature de fluides et la structures interne du béton.

# PARTIE 2 : PARTIE EXPERIMENTALE

# CHAPITRE 4 : MATERIAUX

## Chapitre 4 : Matériaux

### 4.1 Introduction

Le béton est un mélange de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Pour un impact environnemental minimal, les matériaux constitutifs utilisés dans cette étude sont ceux disponibles au niveau local.

### 4.2 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland ordinaire au calcaire (OPC), de type (CEM II/B, 32.5 N), conforme à la norme Algérienne [NA442 – 2013] et Européenne [EN 197-1], fabriqué par la cimenterie LAFARGE, ses propriétés sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 4.1: Propriétés chimiques et minéralogiques du ciment utilisé

Teneur en SO <sub>3</sub> (%)	Teneur en MgO (%)	Teneur en Chlorures (%)	Teneur en C <sub>3</sub> A (%)	Teneur en C <sub>3</sub> S (%)	Perte en feu (%)	Module de finesse (Cm <sup>2</sup> /g)
2.5 ±0.5	1.7 ±0.5	0.02-0.04	7.5±1	60±3	13.0 ±2	4300-5500



Figure 4.1: Ciment utilisé

### 4.3 Granulats

Quatre types de granulats ont été utilisés dans cette étude : un sable (0/5), Sable de dune, et deux types des granulats grossiers : le gravier (8/15) et le gravier (15/25), proviennent la carrière de KEDDARA au sud-ouest au Boumerdes.



**Figure 4.2: Types de Granulats utilisés**

#### **4.3.1 Analyse granulométrique (NF P18-560)**

Ce test consiste à classer les granulats, en fonction de leurs dimensions, à l'aide d'une tamiseuse électrique et d'une série des tamis dont la dimension de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon de granulat à traiter et de la précision attendue. L'échantillon de granulats doit être lavé puis séché pendant 24 heures dans une étuve à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Les résultats obtenus sont dans les annexes A à B.



**Figure 4.3: Série des tamis installés dans une tamiseuse électrique**

L'analyse granulométrique effectuée sur les différents types des granulats utilisés donne les courbes suivantes.

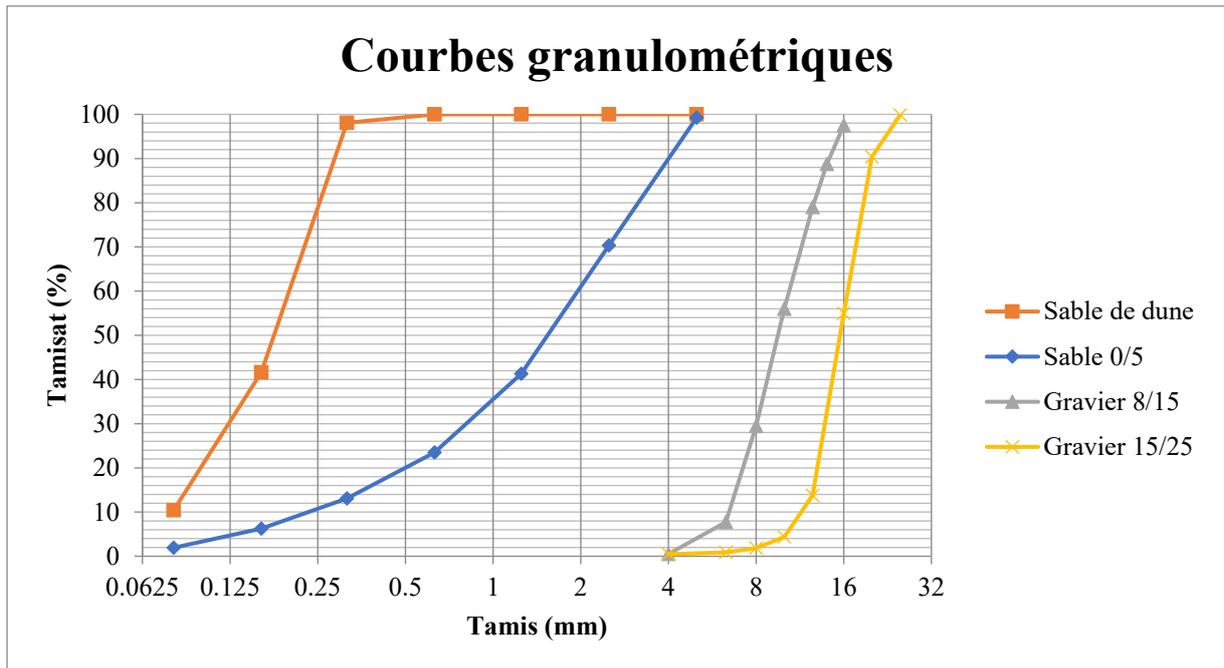


Figure 4.4: courbe granulométrique

#### 4.3.2 Module de finesse du sable (NF P 18- 540)

Le module de finesse est une caractéristique importante pour déterminer la qualité de granulat utilisé, surtout en ce qui concerne les sables, il est égal au 1/100e de la somme des pourcentages des refus cumulés de la série des tamis suivantes : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.50 et 5 mm:(11)

$$M_f = (\text{Somme de pourcentage des refus cumulés}) / 100$$

$$\text{Module de finesse du sable 0/5 : } M_{f1} = 3.46$$

Notre sable est très grossier (Module de finesse > 3), Donc il nécessite une correction, en utilisant le sable de dune.

$$\text{Module de finesse du sable de dune : } M_{f2} = 0.60$$

#### 4.3.3 Masse volumique (NF P 18-554, NF P 18-555)

##### 4.3.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est un simple rapport entre une masse **M** bien déterminée de l'échantillon des granulats lavé et séché pendant 24 heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  et son volume déterminé en versant cette masse dans une éprouvette graduée.

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

##### 4.3.3.2 Masse volumique absolue

L'essai consiste à verser une masse bien déterminée **M** de l'échantillon des granulats lavé et séché pendant 24 heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  dans une éprouvette graduée remplie d'un volume **V<sub>1</sub>**

d'eau, en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, et déterminer le volume final  $V_2$ . La masse volumique absolue est déterminée par la relation suivante :

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

**Tableau 4.2: Masses volumiques apparentes et absolues des granulats**

Types de granulat	Sable 0/5	Sable de dune	Gravier 8/15	Gravier 15/25
$\rho_{app} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1724	1500	1300	1160
$\rho_{abs} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2632	2531	2542.4	2500

#### 4.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour fabriquer notre béton est de l'eau potable du robinet propre et sans impuretés.

#### 4.5 Coquilles d'œuf

Deux types de déchets des coquilles d'œufs crus ont été utilisés, des coquilles d'œufs blanches et brunes, collectées de diverses pâtisseries à proximité.



**Figure 4.5: Coquilles d'œufs blanches et brunes**

Ils ont d'abord été lavées pour éliminer les résidus du jaune et une quantité maximale des membranes, et séchées à l'air avant les mettre dans une étuve pendant 24 heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ .



**Figure 4.6: Lavage des coquilles d'œufs**



**Figure 4.7: Séchage à l'air des coquilles d'œufs**

Dans une troisième étape, les coquilles d'œuf ont été écrasées et broyées à sec en utilisant un broyeur à boulets pendant 30 minutes pour obtenir une poudre qui a été tamisée à travers un

tamis avec une dimension de maille de 80  $\mu\text{m}$ . Les caractéristiques chimiques des coquilles d'œufs ont été emprunté de la littérature dans la partie théorique.



**Figure 4.8: Broyeur à boulets**

#### 4.5.1 Surface Blaine

La surface spécifique est le rapport de la surface de solide en contact avec le milieu extérieur à la masse. La méthode Blaine permet de calculer la surface spécifique d'une poudre selon la norme EN 196-6. Le principe consiste à mesurer le temps de passage d'une certaine quantité d'air à travers un lit de poudre d'une hauteur connue.

Cet essai a été effectué au niveau de l'Université de Médéa et nous a donné un résultat prometteur de 3250  $\text{cm}^2/\text{g}$  qui de l'ordre de quelques ciments utilisé.

#### 4.6 Blanc d'œuf

Nous avons utilisé des œufs disponibles dans une supérette à proximité. Ils ont été produits 7 jours avant utilisation. Le blanc a été séparé manuellement et pesé avant d'être ajouté à l'eau de gâchage.



Figure 4.9: œufs utilisés

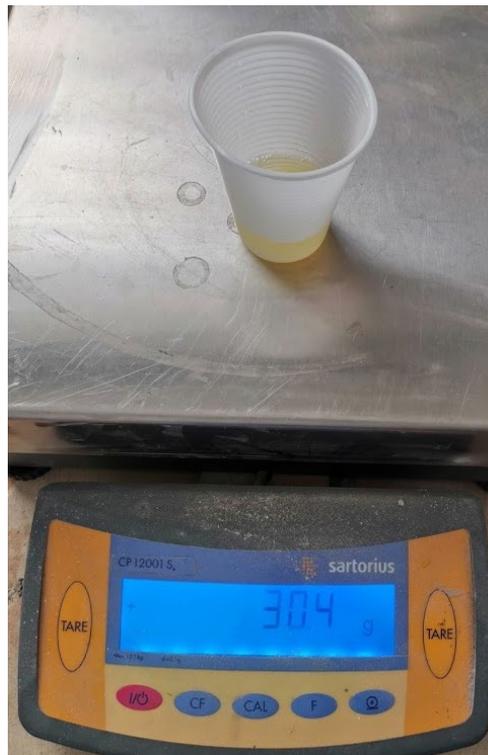


Figure 4.10: Peser du blanc d'œuf

# CHAPITRE 5 : FORMULATION DU BETON

## Chapitre 5 : Formulation du béton

### 5.1 Introduction

La formulation du béton consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau pour réaliser un béton avec la qualité désirée. Il existe de nombreuses méthodes que les chercheurs ont proposées pour déterminer les dosages des différents composants du béton, par exemple : Méthode de Joisel, Méthode de Valette, Méthode de Faury, et la Méthode de Dreux-Gorisse qu'on utilisera dans notre étude. (11)

### 5.2 Détermination de la composition du béton

En se basant sur la méthode de DREUX-GORISSE, nous obtenons un béton avec les propriétés suivantes :

- Un dosage du ciment de  $C=380 \text{ kg /m}^3$  du béton,
- Un rapport  $E/C=0.5$ ,
- Une dimension maximale des granulats utilisés de  $D_{\text{Max}}=25 \text{ mm}$ ,
- Affaissement de 9 cm (béton plastique)
- Une vibration normale (aiguille vibrante)

### 5.3 Dosage en eau

$$E = \frac{E}{C} * C \rightarrow E = 190 \text{ kg}$$

Si on prend la masse volumique de l'eau  $\rho_E = 1 \text{ kg /L}$  on obtient  $E= 190 \text{ L}$

Etant donné que la dimension maximale des granulats utilisés est de 25 mm, donc on n'a pas besoin de correction sur le dosage de l'eau. (**Annexe 1**)

### 5.4 Courbe granulatoire de référence et lignes de partages

Sur le graphe de l'analyse granulométrique, on trace la courbe de référence qui relie entre le point O (0,0), A ( $X_A, Y_A$ ) appelé 'le point de brisure' et B ( $D_{\text{Max}}, 100\%$ ).

Avec :

$X_A$  : est situé au milieu de segment allant du module 38 au module correspondant à  $D_{\text{Max}} \rightarrow X_A = 11.5$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{\text{Max}}} + K + K_s + K_p \rightarrow Y_A = 45.8$$

Avec:

$K$  : est un terme correcteur dépend principalement du dosage en ciment, la forme des granulats et la puissance de la vibration (**Annexe 2**).

Par interpolation on trouve :  $K=0.8$

$K_s$  : est un terme correcteur dépend de module de finesse désiré avec :

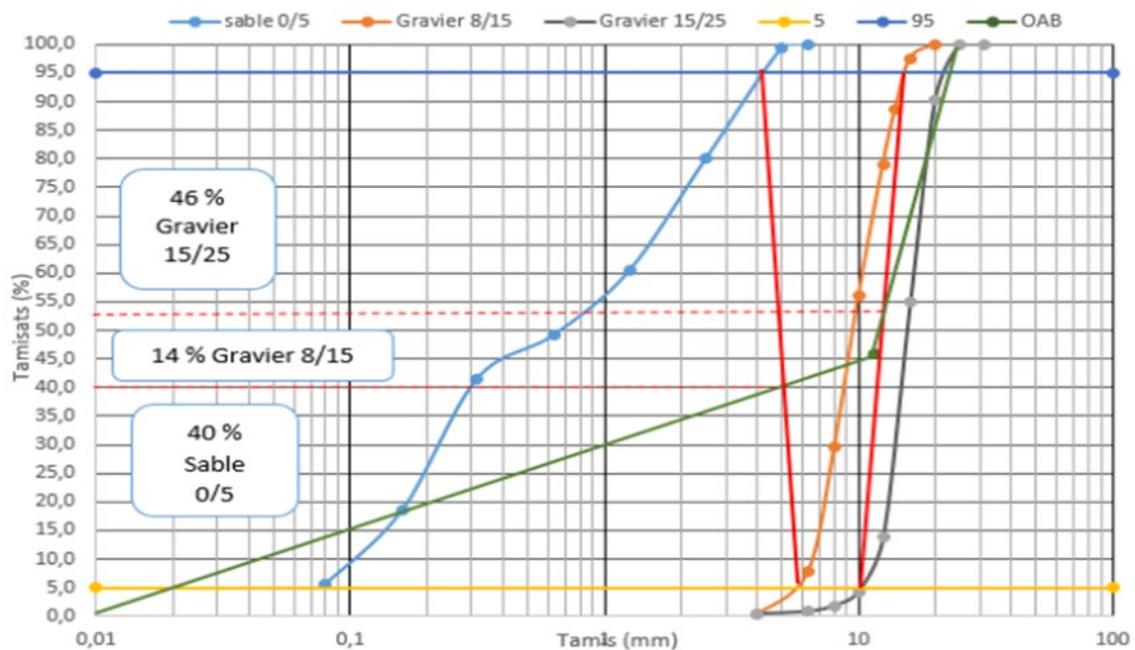
$$K_s = 6 * M_{f \text{ optimal}} - 15 ;$$

Pour  $M_{f \text{ optimal}}=2.5$  ;  $K_s = 0$

$K_p$  : est un terme correcteur dépend de la nature du béton.

Notre béton est non pompable, donc  $K_p = 0$

Ensuite, On trace les lignes de partages pour chaque type de granulat en joignant le point d'ordonnée 95 % de la première courbe avec l'ordonnée de 5 % de la courbe suivante, les intersections entre la courbe de référence et les lignes de partage nous donne les proportions de différents types de granulats.



**Figure 5.1: Courbes granulométriques, courbe de référence et lignes de partages**

%S = 40%

%G<sub>8/15</sub> = 14%

%G<sub>15/25</sub> = 46%

## 5.5 Dosage des Granulats pour 1 m<sup>3</sup> du béton

### 5.5.1 Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité est le rapport entre les volumes absolus des matières solides  $V_M$  avec  $V_M = V_G + V_S + V_C$  et un mètre cube de béton frais mise en œuvre.

$$\gamma = \frac{V_M}{1000}$$

Avec :

$\gamma$  : Coefficient de compacité

$V_G$  : volume total du gravier

$V_S$  : Volume total du sable

$V_C$  : Volume total du ciment

La valeur du coefficient de compacité pour un dosage du ciment de 350 kg /m<sup>3</sup> du béton et des granulats roulés et par interpolation est de  $\gamma \approx 0.834$  (**Annexe 3**), pour un dosage du ciment de 380kg /m<sup>3</sup> du béton et des granulats concassés cette valeur doit soumettre aux corrections comme suit :

$$\gamma_{\text{Corrigé}} = \gamma - 0.03 + \frac{C-350}{5000} \rightarrow \gamma_{\text{Corrigé}} = \mathbf{0.808}$$

### 5.5.2 Dosage des différents granulats

$$V_M = \gamma_{\text{Corrigé}} * 1000 \rightarrow V_M = 0.808 * 1000 \rightarrow V_M = 808 L$$

$$V_M = V_G + V_s + \frac{C}{\rho_c} \text{ avec } \rho_c = 3.10 \text{ kg /L} \rightarrow V_G + V_s = 685.42 L$$

#### 5.5.2.1 Dosage en sable

Comme mentionné ci –dessus, on a besoin de corriger notre sable 0/5 par la sable dune :

$$M_{f1} = 3.46 \text{ (Sable 0/5) ;}$$

$$M_{f2} = 0.60 \text{ (Sable dune) ;}$$

Afin d'obtenir un mélange dont le module optimal est :  $M_{f \text{ Opt}} = 2.5$ , et en utilisant la règle d'Abrams :

$$\% S_1 = \frac{M_{f \text{ Opt}} - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} * 100 \rightarrow \% S_1 = \mathbf{66.43 \%};$$

$$\% S_2 = \frac{M_{f1} - M_{f \text{ Opt}}}{M_{f1} - M_{f2}} * 100 \rightarrow \% S_2 = \mathbf{33.57 \%};$$

Donc, on a besoin de 66.43 % du Sable 0/5 et de 33.57 % du sable dune.

$$V_{S1} = \% S_1 * (V_G + V_s) \rightarrow V_{S1} = \mathbf{182.13 L}$$

$$V_{S2} = \% S_2 * (V_G + V_s) \rightarrow V_{S2} = \mathbf{92.03 L}$$

$$m_{S1} = V_{S1} * \rho_{\text{abs}, S1} \rightarrow m_{S1} = \mathbf{479.37 kg}$$

$$m_{S2} = V_{S2} * \rho_{\text{abs}, S2} \rightarrow m_{S2} = \mathbf{232.92 kg}$$

#### 5.5.2.2 Dosage en gravier :

$$V_{8/15} = \% G_{8/15} * (V_G + V_s) \rightarrow V_{8/15} = \mathbf{95.96 L}$$

$$V_{15/25} = \% G_{15/25} * (V_G + V_s) \rightarrow V_{15/25} = \mathbf{315.29 L}$$

$$m_{8/15} = V_{8/15} * \rho_{\text{abs}, 8/15} \rightarrow m_{8/15} = \mathbf{243.93 kg}$$

$$m_{15/25} = V_{15/25} * \rho_{\text{abs}, 15/25} \rightarrow m_{15/25} = \mathbf{788.23 kg}$$

Le tableau suivant montre les proportions des constituants de chaque type du béton :

**Tableau 5.1: Proportions des constituants de 1 m<sup>3</sup> de chaque type du béton**

Type du béton	Sable 0/5 (kg/m <sup>3</sup> )	Sable de dune (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 8/15 (kg)	Gravier 15/25 (Kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	PCO (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	BO (kg/m <sup>3</sup> )
<b>BT</b>	479.37	232.92	243.93	788.23	380.00	/	190.00	/
<b>BPCO</b>	479.37	232.92	243.93	788.23	361.00	19.00	190.00	/
<b>BBO</b>	479.37	232.92	243.93	788.23	380.00	/	189.05	0.95

### 5.6 Préparation des éprouvettes

Tout d'abord, la matière première a été mélangée à l'aide d'un malaxeur au béton de capacité de 60 L, pour obtenir un mélange homogène.



**Figure 5.2: Malaxage de matière première pour obtenir un béton**

Des moules ont été remplis par le béton pour former des éprouvettes sous forme des cubes de 150mm de côté et des cylindres 160x320 mm conformes à la norme NF EN 12390-2, et soumis à une vibration à l'aide d'un vibreur pour réaliser un meilleur compactage qui sert à éliminer de l'air emprisonné pendant le malaxage.



**Figure 5.3: Moules coulés par le béton**

Trois types du béton ont été coulés : un béton témoin (BT) sans aucun remplacement, un béton avec un remplacement de 5 % du ciment par la poudre de coquilles d'œuf (BPCO) et un béton avec un remplacement de 0.5% de l'eau par le blanc d'œuf (BBO). Toutes les éprouvettes coulées ont été laissés à sécher dans les moules pendant 24 heures avant le démoulage, ensuite elles ont été placées dans un bac à eau pour poursuivre leur durcissement pendant 14 jours.

# CHAPITRE 6 : ESSAIS

## Chapitre 6 : Essais

Notre béton a été étudié à l'état frais en mesurant son ouvrabilité, et après 14 jours de durcissement dans l'eau au moyen d'essais de résistances mécaniques (la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage), et les Tests de perméabilité à l'eau. Deux éprouvettes ont été testées pour chaque essai et la valeur moyenne a été prise.

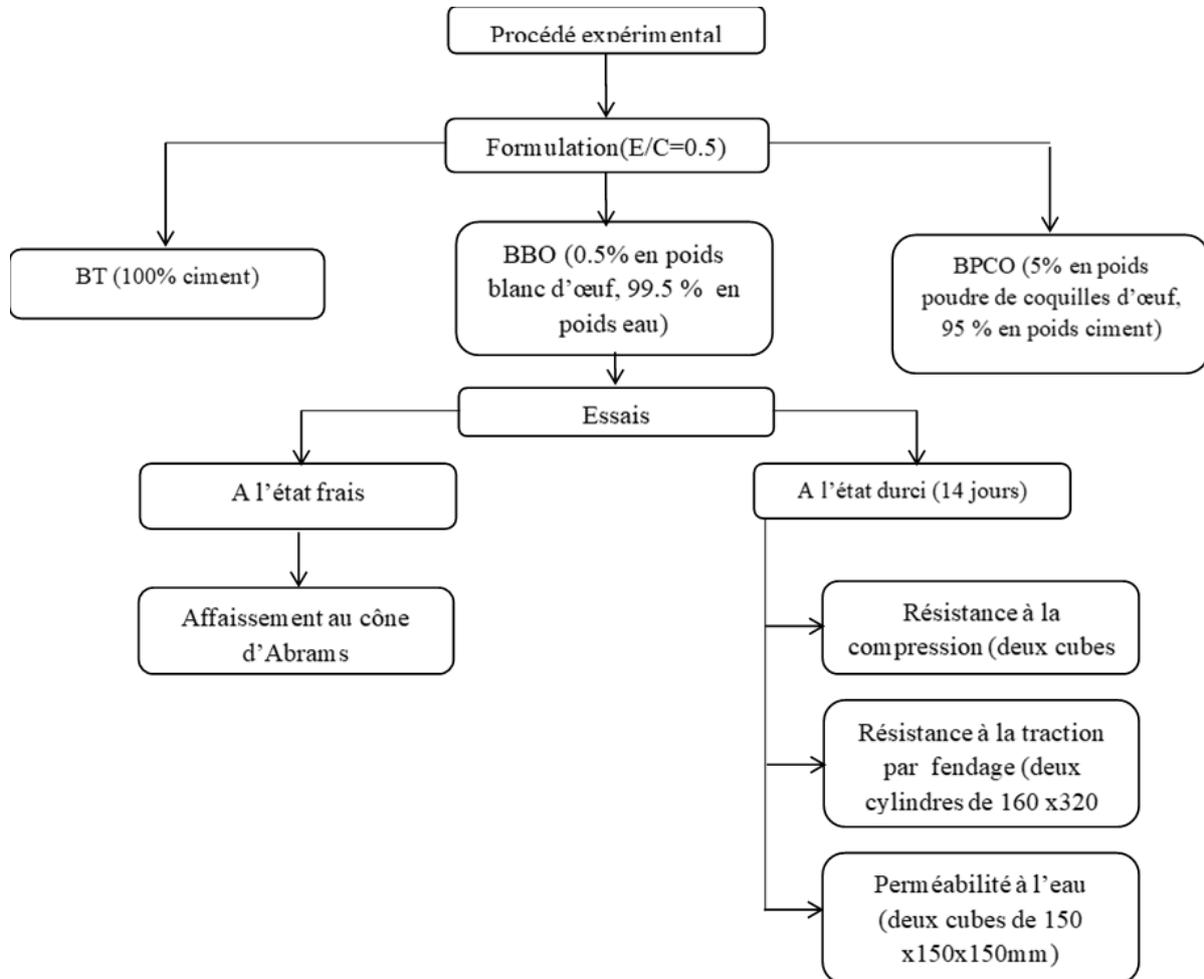


Figure 6.1: Organigramme présentant notre programme expérimental

### 6.1 Affaissement au cône d'Abrams (NF P 98 -248 -2)

#### 6.1.1 Appareillage

**Cône d'Abrams** : est un cône tronconique en acier sans fond de diamètre de base inférieure de  $300 \pm 0.5$  mm, de diamètre de base supérieure de  $150 \pm 0.5$  mm et de hauteur de  $450 \pm 1$  mm.

**Rehausse** : c'est un tronc de cône inversé de diamètre de base inférieure de  $150 \pm 0.5$  mm, de diamètre de base supérieur de  $270 \pm 0.5$  mm et d'une hauteur de  $150 \pm 15$  mm.

**Tige de piquage** : C'est une tige en acier de diamètre de  $20 \pm 1$  mm et de longueur  $900 \pm 50$  mm

**Portique de mesure** : C'est un dispositif qui nous permet de mesurer l'affaissement avec une certitude de 5 mm.

**Surface d'appui** : C'est une plaque en acier plane, lisse et rigide de dimensions de 500x500x10 mm

### 6.1.2 Mode opératoire

Le cône d'Abrams placé sur la surface d'appui horizontale est rempli de trois couches du béton frais de 150 mm de hauteur à l'aide de la rehausse, et compactée en utilisant de la tige de piquage avec 25 coups pour chaque couche. La rehausse est ensuite retirée et le béton frais est arasé en partie supérieure pour éliminer l'excès. Enfin, Le cône est soulevé verticalement sans secousses, et l'affaissement du béton frais est mesuré en utilisant le portique de mesure comme le montre la figure :



**Figure 6.2: Mesure de l'affaissement à l'aide du portique de mesure**

## 6.2 Résistance mécanique

### 6.2.1 Appareillage

Machine d'essai de compression de marque 'CONTROLS' de capacité de 5000 kN, conforme à la norme NF EN 12390-4.



**Figure 6.3: Machine d'essai de compression**

### 6.2.2 Mode opératoire

D'abord, l'éprouvette doit être essuyée et nettoyée pour éliminer toute humidité et corps étrangers présents sur sa surface. Elle est ensuite pesée pour déterminer sa masse qui est un indicateur utile pour interpréter les résultats, et enfin les tests de résistance sont effectués.

### 6.2.2.1 Résistance à la compression (NF EN 12390-4)

Cet essai est effectué en appliquant un taux de charge de compression de 0.5 MPa/s sur une éprouvette sous forme d'un cube de 150 mm de côté, positionnée au centre du plateau inférieur de la machine d'essai de compression, jusqu'à sa rupture.



Figure 6.4: Essai de compression

### 6.2.2.2 Résistance à la traction par fendage (NF EN 12390-6)

L'essai de résistance à la traction par fendage consiste à écraser un cylindre de dimension 160x320 mm, en appliquant une charge de compression de taux de 0.5MPa / s. Le cylindre est centralisé avec l'axe horizontal de la machine entre les deux plateaux de compression avec deux barreaux métalliques de 2 mm d'épaisseur et d'environ de 10 mm de largeur placés en haut et en bas de l'éprouvette.

## 6.3 Test de porosité

La porosité ainsi mesurée est appelée porosité relative ( $P_R\%$ ) ou apparente, parce que seules les cavités communiquant avec la surface se remplissent d'eau. Une immersion dans l'eau bouillante – moins visqueuse – ou sous vide permettrait une détermination plus précise de tous les vides (116).

$M_1$  est la masse de l'éprouvette qui a été pesée immédiatement après l'avoir sortie du réservoir d'eau,  $M_2$  est la masse de la même éprouvette après avoir été séchée pendant 24 h dans une étuve à 105 ° C. La porosité est donnée par la relation suivante

$$Pr = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}}$$

Avec : Volume de vides =  $M_1 - M_2$

## 6.4 Test de perméabilité

### 6.4.1 Perméabilité à l'eau



**Figure 6.5: Test de perméabilité à l'eau**

L'essai de la perméabilité à l'eau a été effectué sur des bétons durcis de 14 jours. La profondeur de pénétration d'eau a été déterminée à l'aide d'un perméamètre à eau représenté sur la figure ci-dessus.

Cet appareil (CONTROLS 55-C0246/6) permet de déterminer la profondeur de pénétration de l'eau sous pression dans les éprouvettes de béton. L'essai est effectué en serrant l'éprouvette - cubique, cylindrique ou prismatique de longueur d'arête, ou de diamètre non inférieur à 150 mm - entre deux brides avec des joints circulaires spéciaux. L'eau, sous pression contrôlée, est ensuite appliquée sur la surface de l'éprouvette de béton. La pénétration de l'eau est mesurée, après la période d'essai, par fendage de l'éprouvette. La quantité d'eau pénétrée peut également être mesurée à travers les burettes graduées montées sur le dessus de l'appareil.

Les résultats sont obtenus en utilisant deux échantillons cubiques de chaque mélange après les avoirs fait sécher pendant 24h dans une étuve à  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Une fois placé sur l'appareil, de l'eau agit sur l'échantillon sous une pression de  $5\pm 0.5$  bars pendant 72h.

Etanchéité ou la perméabilité du béton détermine la durabilité de la construction. D'autres facteurs sont des fissures existantes, des joints, des nids de gravier, etc.

# CHAPITRE 7 : RESULTATS ET DISCUSSION

## Chapitre 7 : Résultats et discussions

### 7.1 Résultats

Il est à noter que le béton témoin a été réalisé durant différentes périodes, ceci est dû à la pandémie qui nous a touché. Les comparaisons faites sont à prendre avec retenue.

#### 7.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

Tableau 7.1: Valeurs d'affaissements des différents types de béton fabriqués

Type du béton	BT	BPCO	BBO
Affaissement (mm)	85.00	58.00	70.00
Taux de chute (%)	/	31.76	17.65

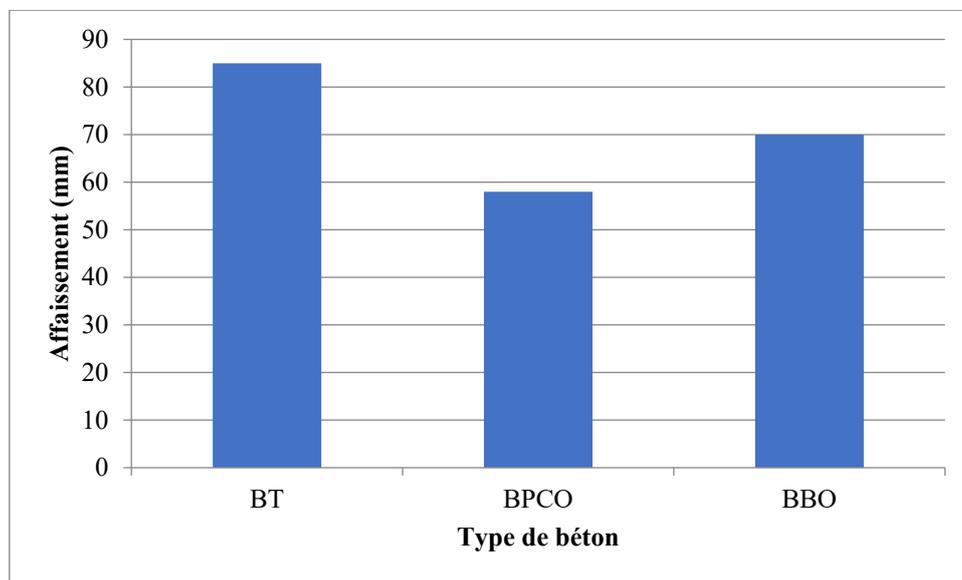


Figure 7.1: Affaissement des bétons fabriqués

On observe que le béton témoin atteint 85 mm d'affaissement, cette valeur diminue après différents types de remplacement, de sorte que le béton perd environ 32% de son ouvrabilité lorsque 5% du ciment est remplacé par la PCO, et d'environ 18% si 0,5% d'eau est remplacé par BO, Comme indiqué la figure 7.1. Cette large différence est principalement due à l'utilisation de granulats secs non humidifié avant le malaxage. Ces derniers absorbent une certaine quantité de l'eau de gâchage et causent cette disparité.

Pour ce qui est du BPCO, les coquilles d'œufs ont un pouvoir adsorbant notable. Il est donc possible qu'elles fixent l'eau de gâchage et ainsi minimisent l'affaissement.

## 7.1.2 Résistances mécaniques

Tableau 7.2: Résistances des différents types de béton

Type du béton		BT	BPCO	BBO	
Résistance à la compression (MPa)	14 jours	Essai 1	27.39	18.90	19.81
		Essai 2	29.43	18.68	27.53
		Moyenne	28.41	18.79	23.67
		Taux de chute (%)		33.86	16.68
Résistance à la traction par fendage (MPa)	14 jours	Essai 1	2.41	2.06	2.23
		Essai 2	2.75	1.51	2.69
		Moyenne	2.58	1.79	2.46
		Taux de chute (%)		30.62	4.65

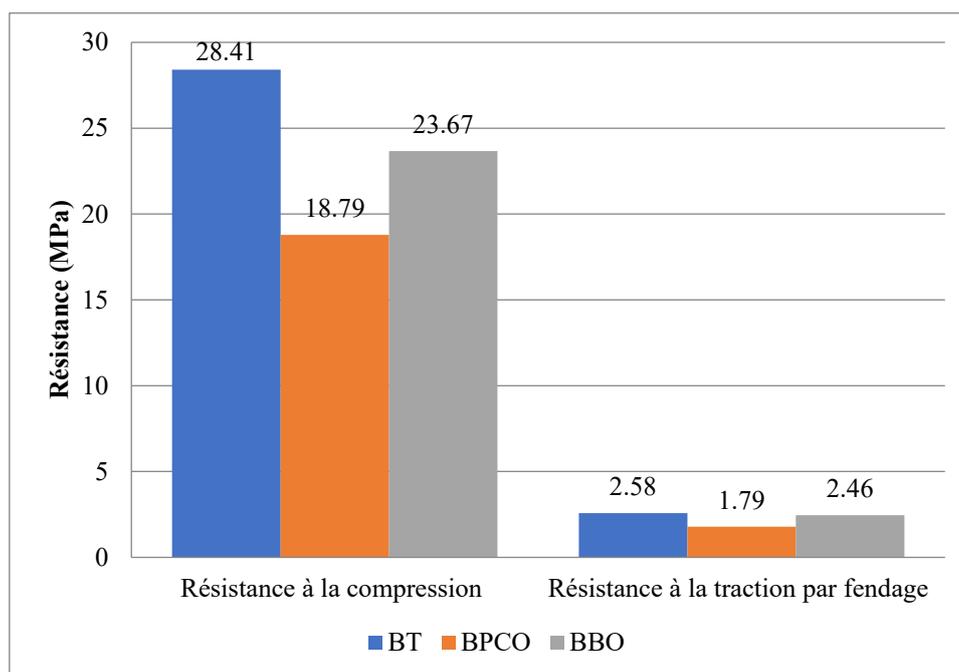


Figure 7.2: Résistances à la compression et à la traction par fendage des différents types de béton fabriqués

La figure 7.2 nous permet de bien observer que la résistance à la compression et à la traction par fendage de BPCO était de 18,79 MPa et 1,79 MPa, respectivement (avec des réductions d'environ 34% et 31%, respectivement, par rapport à celle du béton témoin). La substitution partielle de l'eau par BO affecte les propriétés mécaniques négativement, les résistances étant respectivement de 23.67 MPa et 2,46 MPa, ce qui nous donne des diminutions de 17% et 5% respectivement.



**Figure 7.3: Profils des échantillons de fendage, BPCO à gauche et BBO à droite**

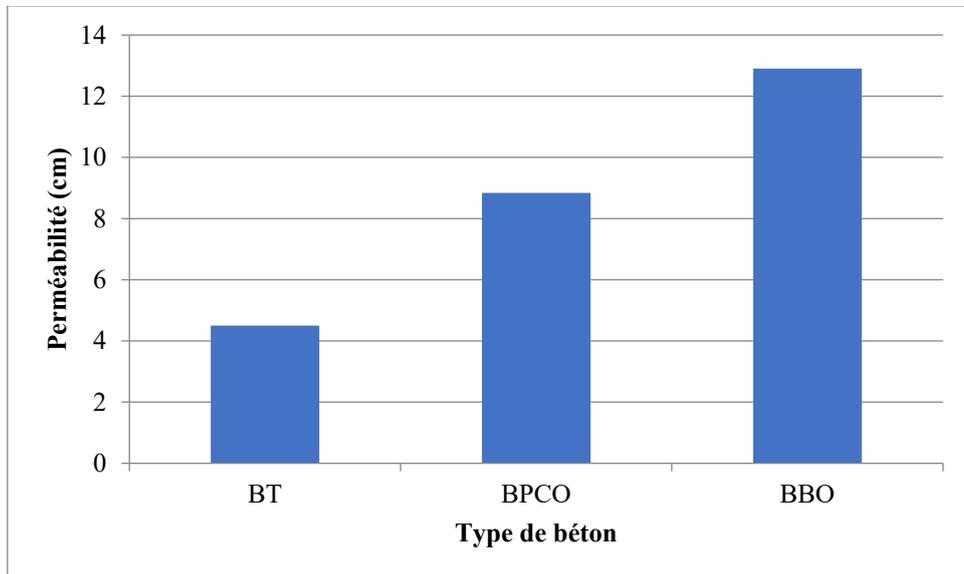
### 7.1.3 Test de perméabilité à l'eau et porosité

**Tableau 7.3: Perméabilité et Porosité des bétons fabriqués**

Type du béton	BT	BPCO	BBO
Perméabilité (mm)	45.00	88.40	129.00
Taux d'augmentation de la perméabilité (%)	/	49.09	65.11
Porosité $P_R$ (%)	11.93	11.11	10.07
Taux de chute de porosité (%)	/	6.87	15.59



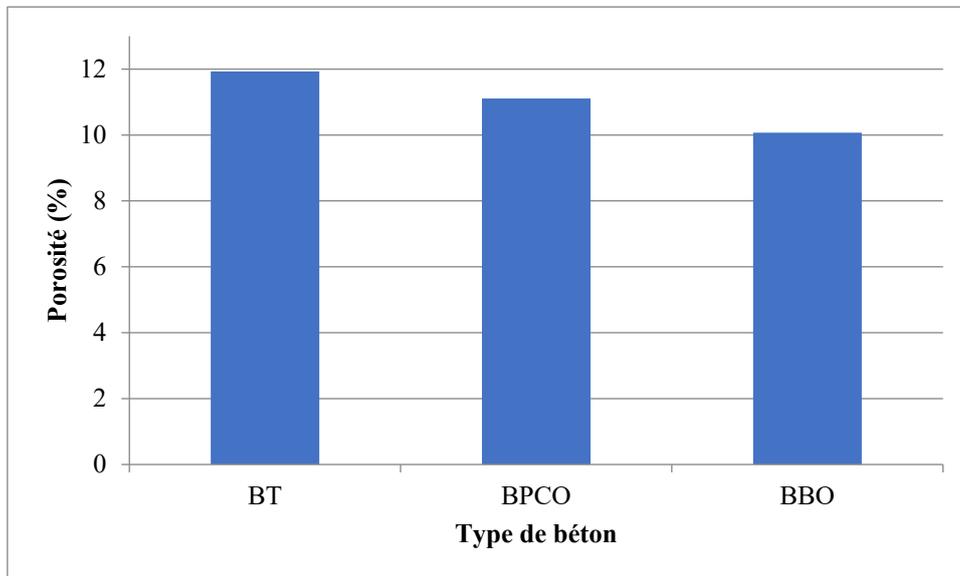
**Figure 7.4: Rejet de la poudre de coquilles d'œuf**



**Figure 7.5: Perméabilité de bétons fabriqués**



**Figure 7.6: Profils des échantillons de perméabilité ; BPCO à gauche et BBO à droite**



**Figure 7.7: Porosité des bétons fabriqués**

Les chiffres que nous avons collectés ne donnent pas l'image complète de nos observations.

La première observation est que le BPCO a rejeté la poudre de coquilles d'œuf.

La seconde est que le front humide pour le blanc d'œuf était difficilement perceptible par comparaison. C'est-à-dire que la quantité d'eau absorbée est distribuée sur un volume plus grand. Aussi le front est très profond ce qui nous pousse à supposer que la diffusion s'est faite par forces capillaire et ainsi nous pouvons dire que les pores du BBO sont probablement de diamètre plus petit.

Ces résultats prouvent que la perméabilité n'est pas un critère suffisant pour juger la structure interne d'un matériau, mais elle dépend beaucoup plus de la distribution et de la forme des pores.

## 7.2 Discussion

L'incorporation de la PCO a eu une influence significative sur les propriétés physiques et mécaniques du béton. Sa capacité élevée d'adsorption de l'eau est la raison principale de perte de l'ouvrabilité. Evidemment, une demande en eau plus élevée a été observée lors du malaxage. Cela est montré par des études précédemment menées par Jhatial et autres chercheurs, qui ont remarqué une diminution de l'ouvrabilité du béton avec l'augmentation de la quantité de PCO incorporée (117).

La réduction de résistance due à la substitution de ciment Portland par la PCO pourrait être principalement attribuée à l'irrégularité de la morphologie, la distribution granulométrique et la finesse des particules de PCO qui peut être liée au procédé de fabrication (118). Jhatial et ses collègues ont montré par son étude que l'augmentation de la finesse de la PCO a un effet considérable sur l'amélioration de la résistance à la compression du béton (117).

Cette irrégularité peut rendre la réactivité de la PCO avec le ciment Portland plus faible (119). Par conséquent, la PCO agit comme une charge inerte pour remplir les pores malgré sa finesse importante comparable à celle du ciment.

Selon Tiong la PCO peut-être une cause de dilution de la teneur en  $C_3S$  ; le responsable de la résistance précoce du béton, ce qui fait retardé le durcissement de ce dernier (120).

Il faut aussi noter que nous avons utilisé un ciment ordinaire composé à caractère calcaire, il est donc possible que l'ajout de carbonate de calcium sous forme de poudre de coquilles d'œuf ait eu un effet de surcharge de calcaire.

Toutes ces raisons peuvent avoir un impact négatif sur la répartition et l'adhérence entre la matrice de ciment, les granulats fins et les particules de la PCO, qui est très évident dans nos échantillons.

Les mauvais résultats de résistance du béton n'ont aucune indication de sa porosité, et c'est ce que nous montre notre étude, malgré la réduction de la résistance du béton, l'incorporation de PCO aurait un effet positif sur sa porosité à long terme, du fait du remplissage des vides par le PCO, comme déjà mentionné ci-dessus.

Pour ce qui est du blanc d'œuf, son ajout a révélé des résultats plus faibles à ceux du béton témoin à un âge de 14 jours. Ceux-ci restent à désirer et d'autres études restent à être réalisées pour confirmer les résultats des recherches précédentes notamment de Mirzabagheri (79).

Le résultat le plus important est son effet sur la structure des pores et en conséquence sur la perméabilité de l'échantillon. En effet, nos observations nous poussent à supposer que l'effet des protéines que contiennent l'albumen est de rétrécir le diamètre des pores. Quelques raisons pourraient être : que ces dernières jouent le rôle d'agents d'entraînement d'air, qu'elles permettent une meilleure adhésion ou bien qu'elles introduisent des propriétés hydrophobes.(76)

Afin d'étudier la relation entre perméabilité et diffusion, une étude prenant en compte de l'évolution dans le temps de ces paramètres reste à être menée. En effet, la relation de la perméabilité avec le coefficient de diffusion est liée à la structure des pores, la tortuosité et l'arrangement granulaire au sein du béton, nous étions donc incapable d'énoncer une relation par manque de données.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

L'utilisation de matériaux naturels a longtemps été envisagée dans le domaine de construction. Certaines structures anciennes à travers le monde ont été construites avec des œufs, notamment des églises aux Philippines.

La PCO a une teneur élevée en  $\text{CaCO}_3$ , ce qui permet de l'utiliser comme substitut du ciment dans le béton. Alors que, le BO est généralement utilisé comme additif. Dans ce projet, nous avons utilisé la PCO comme substitut de 5% en poids du Ciment Portland, et nous avons remplacés 0.5% de la quantité massique de l'eau utilisée par le BO. Sur la base des résultats de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La substitution partielle de 5% de ciment par la PCO affecte les propriétés physiques et mécaniques du béton, à l'état frais et durci, de sorte que :
  1. L'affaissement du BPCO est réduit grâce à la capacité élevée d'adsorption de la PCO
  2. La PCO a un impact négatif important sur les résistances du béton en général, et sur la résistance à la compression en particulier, en raison de la morphologie irrégulière et de la finesse des particules de PCO
  3. En termes de propriétés de transport, la PCO a réagi comme une charge inerte pour combler les vides et réduire la porosité, ceci n'a pas minimiser le transport des fluides dans le béton, et par conséquent, sa durabilité reste à être déterminée.
- En ce qui concerne l'ajout du BO, il n'a pas une influence significative sur les propriétés mécaniques du béton, mais il réduit sa porosité malgré valeur élevée de la perméabilité à l'eau, du fait de la présence de pores capillaires de petits diamètres, ce qui augmente la force de sorption capillaire.

Ainsi, la possibilité d'utiliser la PCO comme substitut du ciment dans le béton reste toujours possible mais en améliorant ses propriétés, notamment en augmentant la surface spécifique d'adsorption d'agents corrosifs. Alors que, l'utilisation du BO dans le béton est acceptable et bénéfique.

Enfin, les essais ont été réalisés dans des conditions dicté par la pandémie de COVID-19, ce qui nous a empêché d'accomplir les objectifs que nous nous étions posés. Il est donc important de continuer sur ce sujet d'actualité avec des approches en apprenant des constats et conclusions faits sur ce document. Parmi les perspectives futures, il serait intéressant de voir l'évolution de la perméabilité à l'eau et à l'air selon l'âge du béton. Quantifier l'effet d'adsorption qu'aurait l'ajout de PCO serait une étude captivante ainsi que le taux de PCO qui a été rejeté par les échantillons. Il est aussi important de voir l'effet qu'ont les procédés de lavages notamment la séparation de la membrane coquillère sur la durabilité et l'efficacité de l'adsorption. Ce sujet reste grand ouvert aux esprits curieux en s'inspirant des techniques ancestrales avec la technologie moderne.

# ANNEXES

## Annexes

### Annexe 1 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale $D_{Max}$ des granulats (11)

Dimension maximale des granulats D en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

### Annexe 2 : Valeur du termecorrecteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats (11)

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

### Annexe 3 : Compacité du béton en fonction de $D_{Max}$ , de la consistance et du serrage (11)

Consistance	Serrage	$\gamma$ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0,01.
- sable et gravier concassé = - 0,03.

**Annexe 4: Analyse granulométrique du sable 0/5 (300 g)**

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>5</b>	2.3	2.3	0.77	99.23
<b>2.5</b>	86.7	89	29.67	70.33
<b>1.25</b>	87.1	176.1	58.7	41.3
<b>0.63</b>	53.4	229.5	76.5	23.5
<b>0.315</b>	31.3	260.8	86.93	13.07
<b>0.16</b>	20.4	281.2	93.73	6.27
<b>0.08</b>	13	294.2	98.07	1.93
<b>Fines</b>	5.1	299.3	99.77	0.23
<b>Pertes</b>	0.7	300	100	0

**Annexe 5: Analyse granulométrique du sable de dune (300 g)**

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>5</b>	0	0	0	100
<b>2.5</b>	0	0	0	100
<b>1.25</b>	0	0	0	100
<b>0.63</b>	0	0	0	100
<b>0.315</b>	5.7	5.7	1.9	98.1
<b>0.16</b>	169.4	175.1	58.37	41.63
<b>0.08</b>	93.7	268.8	89.6	10.4
<b>Fines</b>	17.4	286.2	95.4	4.6
<b>Pertes</b>	0.8	300	100	0

**Annexe 6: Analyse granulométrique du gravier 8/15 (2000 g)**

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>16</b>	50	50	2.5	97.5
<b>14</b>	175	225	11.25	88.75
<b>12.5</b>	195	420	21	79
<b>10</b>	460	880	44	56
<b>8</b>	530	1410	70.5	29.5
<b>6.3</b>	435	1845	92.25	7.75
<b>4</b>	145	1990	99.5	0.5
<b>&lt; 4</b>	10	2000	100	0

**Annexe 7: Analyse granulométrique du gravier 8/15 (5000 g)**

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (g)</b>	<b>Refus cumulés de chaque tamis (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
<b>25</b>	7	7	0.14	99.86
<b>20</b>	475	482	9.6	90.4
<b>16</b>	1770	2252	45.04	54.96
<b>12.5</b>	2060	4312	86.24	13.76
<b>10</b>	470	4782	95.64	4.36
<b>8</b>	125	4907	98.14	1.86
<b>6.3</b>	50	4957	99.14	0.86
<b>4</b>	20	4977	99.54	0.46
<b>&lt; 4</b>	23	5000	100	0

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

1. WBCSD. *The Cement Sustainability Initiative: Recycling Concrete* [en ligne]. 2009. [Consulté le 28 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.wbcasd.org/pmtes>
2. AÏTCIN, Pierre-Claude. *Binders for Durable and Sustainable Concrete* [en ligne]. CRC Press, 2007. ISBN 9780429175848. Disponible à l'adresse : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482265767> Linking theory to practice, this book provides a better fundamental understanding of Portland cement and hydraulic binders which is necessary to make better concrete. It has been clearly demonstrated that concrete durability is closely linked to its water/binder ratio and proper curing during the first week after casting. In this rigorously present.
3. LARRARD, François de. *Construire en béton: l'essentiel sur les matériaux*. Presses des Ponts, 2002. ISBN 978-2-85978-366-2. Google-Books-ID: hXQIkCk9V7AC
4. JAHREN, Per et SUI, Tongbo. *History of Concrete: A Very Old and Modern Material* [en ligne]. World Scientific Publishing Co. Pte Ltd Co-Published with Chemical Industry Press, 2018. ISBN 978-981-314-573-3. Disponible à l'adresse : <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/10172> Post-war Europe and Asia have seen the rapid development of German and Japan from a war torn countries into two of the most powerful nations in the world. Their achievement is nothing short of miraculous. However, as the two most populated countries; China and India, transform themselves into Asia powerhouses, cement and concrete will be their brick and mortar to sustain their double digit growth in economy. This book summarizes the history and development of cement and concrete. From prehistoric period to today, from ancient Egypt and Rome period to China, over tens of thousands of years of human civilization in the form of the gelled material (cement, concrete). The book is divided into seven chapters, including more than 300 references. Chapter 1 introduces the prehistoric gelled material development; Chapter 2 is about the birth of Portland cement and the technological application; Chapter 3 introduces the important role that concrete played in the human society developing process; Chapter 4 subdivides the performance and the wide application of different function of cement and concrete; Chapter 5 focuses on northern Europe, especially the history of Norwegian cement; Chapter 6 elaborates the development of concrete in China and its impact in the world's ancient civilizations history; Chapter 7 describes the development prospect of cement and concrete.
5. LI, Zongjin. *Advanced Concrete Technology* [en ligne]. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 9780470437438. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470950067> Over the past two decades concrete has enjoyed a renewed level of research and testing, resulting in the development of many new types of concrete. Through the use of various additives, production techniques and chemical processes, there is now a great degree of control over the properties of specific concretes for a wide range of applications. New theories, models and testing techniques have also been developed to push the envelope of concrete as a building material. There is no current textbook which brings all of these advancements together in a single volume. This book aims to bridge the gap between the traditional concrete technologies and the emerging state-of-the-art technologies which are gaining wider use. © 2011 John Wiley & Sons, Inc.

6. BELLIS, Mary. The History of Concrete and Cement. *ThoughtCo* [en ligne]. 11 février 2020. [Consulté le 25 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.thoughtco.com/history-of-concrete-and-cement-1991653>
7. PLISKIN, Lucien. Le béton. *Culture technique N° 26* [en ligne]. 1992. pp. 58-64. [Consulté le 25 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/32774>
8. LAMOND, Joseph F. et PIELERT, James H. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials* [en ligne]. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International, 2006. [Consulté le 25 juillet 2020]. ISBN 978-0-8031-3367-9. Disponible à l'adresse : <http://www.astm.org/doiLink.cgi?STP169D-EB>This chapter builds upon chapters on the same topic from previous editions of the ASTM STP 169 series. Due to the fundamental nature of the subject, much of what appeared before in ASTM STP 169, 169A, and 169B, authored by Lewis H. Tuthill, and 169C, authored by G. W. DePuy, appears again here. This chapter will review and update the topic as addressed by the previous authors, introduce new technology that has been developed, and include updated references.
9. TORRENTI, Jean-Michel et D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER, Laetitia. *Le grand livre des bétons*. Le Moniteur Editions, 2014. ISBN 978-2-281-11689-2. Google-Books-ID: JiTPrQEACAAJ
10. CIMBÉTON. *Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre* [en ligne]. Fiches Tec. CIMBÉTON, 2013. [Consulté le 15 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G11-2.pdf>
11. FESTA, Jean et DREUX, Georges. *Nouveau guide du béton et ses constituants* [en ligne]. 8ème édit. Eyrolles, 1998. [Consulté le 25 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.aryanalibris.com/index.php?post/2012/09/23/Festa-Jean-Dreux-Georges-Nouveau-guide-du-beton-et-de-ses-constituants>
12. MEHTA, P Kumar et MONTEIRO, Paulo J M. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2006. ISBN 978-0-07-146289-1.
13. BERNARD, Simon. La composition du béton - GuideBeton.com. [en ligne]. [Consulté le 17 février 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.guidebeton.com/composition-beton>
14. TAYLOR, H.F.W. *Cement chemistry* [en ligne]. 2nd ed. Thomas Telford Publishing, 1997. ISBN 0-7277-3945-X. Disponible à l'adresse : <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/cc.25929>There has long been an understanding by all military services that simulation systems provide an effective means to train combat units and their command structure to prepare them for eventual combat situations. Less well understood is application of simulation to support the command staff mission planning process. The Marine Air-Ground Task Force (MAGTF) Tactical Warfare Simulation (MTWS) is a combat simulation system designed to train tactical commanders and their staffs. Insights into the potential of the application of simulation to mission planning were gained in a major joint-level exercise conducted in 1998. For that exercise, an MTWS suite was employed in the future

operations planning cell. A second MTWS suite supported the overall exercise conduct for senior staff training. This paper provides an overview of the application of MTWS to support mission planning in a major staff exercise, and describes the lessons learned from this exercise that will provide a basis for continued investigations in 1999.

15. AKROYD, Thomas Norman Westhead. *Concrete: properties and manufacture* [en ligne]. PERGAMON PRESS LTD., 1962. ISBN 9780080095950. Disponible à l'adresse :

[https://books.google.com.et/books?hl=en&lr=&id=x9Q\\_DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=The+strength+of+concrete+is+dependent+on+many+things.+The+hydration+reaction,+water+to+Cement+ratio,+aggregate+type,+amount+and+size,+water+content,+cement+content,+curing+condit](https://books.google.com.et/books?hl=en&lr=&id=x9Q_DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=The+strength+of+concrete+is+dependent+on+many+things.+The+hydration+reaction,+water+to+Cement+ratio,+aggregate+type,+amount+and+size,+water+content,+cement+content,+curing+condit)Concrete describes the properties of concrete, its manufacture, and use in building and civil engineering construction. A scientific approach to the properties of materials and concrete has been united with a practical approach to methods of construction. The book begins with an introduction to the properties of concrete. Concrete is a constructional material which consists essentially of a binding agent and a mineral filler. The binding agent is a hydraulic cement which develops its strength when mixed with water. Separate chapters cover the manufacture and properties of concrete materials; m. Front Cover; Concrete: Properties and Manufacture; Copyright Page; Table of Contents; Preface; CHAPTER 1. THE PROPERTIES OF CONCRETE; Introduction; Properties of plastic or wet concrete; Properties of hardened concrete; REFERENCES; CHAPTER 2. CONCRETE MATERIALS; Cement; Portland cement; Types of Portland cement; High alumina cement; Slag cements; Special cements; Aggregates; The winning of concrete aggregates; The influence of aggregates on concrete; Manufactured and lightweight aggregates; Water; Additives; REFERENCES; CHAPTER 3. MIX DESIGN; Nominal mixes. Mix proportioning based on strength and workabilityExamples of mix design; The combination of single-sized aggregates; Mix design for high alumina cement; Trial mixes; The quantities of materials per cubic yard of concrete; Ordering materials; REFERENCES; CHAPTER 4. MANUFACTURE OF CONCRETE; Handling materials; Batching materials; Mixing and placing; Conveying concrete; Placing concrete; The compaction of concrete; Curing; Winter concreting; REFERENCES; CHAPTER 5. QUALITY CONTROL; Field control; Statistics and concrete quality; REFERENCES; CHAPTER 6. RESISTANCE OF CONCRETE TO DETERIORATION. Corrosion of reinforcementReaction between aggregate and cement; Resistance to various chemicals; Resistance to sulphate attack; Resistance to soft moorland waters; Resistance to sewage; Resistance to freezing; Resistance to erosion and abrasion; Resistance to fire; REFERENCES; CHAPTER 7. SURFACE TREATMENT OF CONCRETE; Surface treatment of in situ concrete; Precast facing concrete; REFERENCES; CHAPTER 8. SPECIAL CONCRETES; Gap-graded concrete; Lightweight concrete; Concrete for atomic radiation shielding; Dry-lean concrete; Pre-packed or grouted concrete; Vacuum concrete; Ready-mixed concrete.

16. HEWLETT, Peter Clive et LISKA, Martin. *Lea's chemistry of cement and concrete*. Elsevier, 2019. ISBN 9780081007730. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fifth Edition, examines the suitability and durability of different types of cements and concretes, their manufacturing techniques and the role that aggregates and additives play in achieving concrete's full potential of delivering a high-quality, long-lasting, competitive and sustainable product.From Duplicate 1 (*Lea's chemistry of cement and concrete* - Hewlett, Peter Clive; Liska, Martin)From Duplicate 2 (*Lea's Chemistry of*

- Cement and Concrete - Hewlett, Peter)Google-Books-ID: v1JVu4iifnMC
17. CHATELIER, Henri Le. *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*. Dunod, 1905. Google-Books-ID: Us6EAAAIAAJ
  18. MICHAELIS, W. *The Hardening Process of Hydraulic Cements*. Cement & Engineering News, 1907. Google-Books-ID: V3M6AAAAMAAJ
  19. POPOVICS, Sandor. *Concrete Materials: Properties, Specifications, and Testing* [en ligne]. 2. Noyes Publication, 1992. Building materials science series. ISBN 9780815513087. Disponible à l'adresse : <https://books.google.dz/books?id=BVdRIVs447YCF> From Duplicate 1 (Concrete Materials: Properties, Specifications, and Testing - Popovics, Sandor)Google-Books-ID: pfxrt0zcN6MC
  20. NEVILLE, AM. *Properties of Concrete - 5th Edition* [en ligne]. Pearson Education, 2012. ISBN 9788177585872. Disponible à l'adresse : <https://books.google.dz/books?id=-NaoPNkFk8oC> Concrete and steel are the two most commonly used structural materials. They sometimes complement one another, and sometimes compete with one another so that structures of a similar type and function can be built in either of these materials. And yet, the engineer often knows less about the concrete of which the structure is made than about the steel. From Duplicate 3 (Properties of Concrete PDF eBook: PoC Amazon ePub eBook\_o5 - Neville, A M)Google-Books-ID: WW1wUvwQ0sUC
  21. LUNK, Dr. Peter, HOMANN, Cathleen, RITSCHARD, Erich, HAMMERSCHLAG, Dr. Jean-Gabriel, WASSMANN, Kerstin et SCHMIDT, Dr. Thomas. *Guide pratique du béton Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables Table de matières* [en ligne]. Edition Su. Edition Suisse, 2015. Disponible à l'adresse : [https://www.mtextur.com/system/product\\_lines/pdfs/000/000/292/original/mtextur\\_sur\\_faces-exposees\\_holc\\_fr.pdf?1453848668](https://www.mtextur.com/system/product_lines/pdfs/000/000/292/original/mtextur_sur_faces-exposees_holc_fr.pdf?1453848668)
  22. Propriétés des bétons frais - Planete TP. [en ligne]. 1 novembre 2007. Disponible à l'adresse : <http://www.planete-tp.com/proprietes-des-betons-frais-a669.html>
  23. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI CT-13 ACI Concrete Terminology* [en ligne]. janvier 2013. American Concrete Institute. [Consulté le 26 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : [https://www.academia.edu/33181135/ACI\\_CT-13\\_ACI\\_Concrete\\_Terminology](https://www.academia.edu/33181135/ACI_CT-13_ACI_Concrete_Terminology)
  24. NEVILLE, A.M. M. et BROOKS, J.J. J. *Concrete Technology Second Edition*. Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-273-73219-8. The success of any concrete structure depends on the designer's sound knowledge of concrete and its behaviour under load, under temperature and humidity changes, and under exposure to the relevant environment and industrial conditions. This book gives students a thorough understanding of all aspects of concrete technology from first principles. It covers concrete ingredients, properties and behaviour in the finished structure with reference to national standards and recognised testing methods used in Britain, the European Union and the United States. Examples and problems are given throughout to emphasise the important aspects of each chapter. From Duplicate 2 (Concrete Technology - Neville, Adam M; Brooks, J J)Google-Books-ID: iVr8QQAACAAJ

25. NEVILLE, A. *Properties of Concrete* [en ligne]. 4th ed [up. Pearson, 1995. Disponible à l'adresse : <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=1f07dda3fbd2abddd568ad2ebc9a0e72>
26. TAYLOR, Peter, YURDAKUL, Ezgi, CEYLAN, Halil et BEKTAS, Fatih. *Development of performance properties of ternary mixtures and concrete pavement mixture design and analysis (MDA) : effect of paste quality on fresh and hardened properties of ternary mixtures*. [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26322>The purpose of this study was to investigate the effect of cement paste quality on the concrete performance, particularly fresh properties,
27. MA, Hongyan et LI, Zongjin. Realistic pore structure of Portland cement paste: experimental study and numerical simulation. *Computers & concrete* [en ligne]. 25 avril 2013. Vol. 11, n° 4, pp. 317-336. DOI 10.12989/cac.2013.11.4.317. Disponible à l'adresse : <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=KJKHDQ&py=2013&vnc=v11n4&sp=317>
28. EURO-INTERNATIONAL COMMITTEE FOR CONCRETE et COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *Durable concrete structures design guide* [en ligne]. London : Telford : [Online] : ICE Virtual library Books, 1997. ISBN 978-0-7277-1620-0 978-0-7277-3549-2 978-0-7277-3954-4. Disponible à l'adresse : <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/dofic.35669>From Duplicate 2 (Durable concrete structures design guide - Euro-International Committee for Concrete)
29. YOUNG, J Francis, MINDESS, Sidney, BENTUR, Arnon et GRAY, Robert J. *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. Prentice Hall, 1998. ISBN 978-0-13-659749-0. Innovative in approach, this book is a comprehensive, integrative exploration of the science and technology of construction materials that begins with a section on the structure and mechanical properties of materials. Begins with a discussion of the structure of materials (at a microscopic level), moves through mechanical properties, and follows-up with sections dealing individually with specific construction materials. A source of information for beginning and practicing civil engineers. Google-Books-ID: bJdRAAAAMAAJ
30. OLLIVIER, Jean-Pierre, TORRENTI, Jean-Michel Michel et CARCASSÈS, Myriam. *Physical Properties of Concrete and Concrete Constituents* [en ligne]. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2012. [Consulté le 26 juillet 2020]. ISBN 978-1-118-56273-4. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118562734>Understanding the rheological properties of fresh concrete, the hydration phenomenon of cement responsible for structuration, the relationship between the characteristics of the porous solid obtained and its mechanical performances or resistance to the aggressive penetration requires a complex knowledge of the physicochemistry of reactive porous materials. The development of simple formulation rules therefore requires the assimilation of this knowledge and a good command of the properties of these materials. The purpose of this book is to provide the mix designer with useful knowledge on granular materials and porous materials, which will enable the innovative design of concrete. Topics covered include the characterization of granular materials, the concepts of porosity and specific surface area, and the transport properties (diffusion and permeation) of concrete. Some of these topics are already covered in other general books dedicated to granular or porous materials.

The objective here is to bring them together in one book by adapting them for use by concrete specialists. Applications in the form of exercises are offered at the end of each chapter to enable readers to assimilate the theoretical knowledge and to apply such knowledge to concrete problems encountered in civil engineering. © ISTE Ltd 2012.

31. DIAMOND, S et WINSLOW, D N. A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in Portland cement. *Journal of Materials*. 1970. Vol. 5, n° 3, pp. 564-585.
32. SOUTSOS, Marios. *Concrete durability: a practical guide to the design of durable concrete structures*. Thomas Tel. Thomas Telford, 2010. ISBN 978-0-7277-3517-1. Concrete Durability is a comprehensive, practical guide for engineers involved in designing concrete structures of all types. Featuring contributions from leading practitioners and academics in the field, it combines a thorough but accessible exposition of the principles of durable concrete design with a practical, hands-on approach to its application in construction projects. In recent years clients have begun to realise that much of the cost of maintaining concrete structures stems from problems relating to the durability of the concrete used, and construction companies are increasingly having to shoulder these costs. There is also growing demand for whole-life costing of construction projects in environmental as well as economic terms. The information contained within this volume will help contribute to the design of structures that are not only more sustainable environmentally, but offer clients better long-term value for money. Concrete Durability gives a comprehensive overview of durability design requirements, providing practitioners with the information they need to understand the likely causes of future deterioration to the concrete structures they are designing, and enable them to select materials, adopt new designs, or modify their existing designs, in order to minimise the risks arising from these deterioration mechanisms. Google-Books-ID: 2JfgQgAACAAJ
33. FELDMAN, R. F. et SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Matériaux et Construction* [en ligne]. novembre 1968. Vol. 1, n° 6, pp. 509-520. [Consulté le 18 septembre 2020]. DOI 10.1007/BF02473639. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02473639> Recent findings in DBR and other laboratories has made it necessary here to revise the accepted model for hydrated portland cement paste. The model recognizes surface areas and porosities obtained by N<sub>2</sub> adsorption as the most reliable values, and attributes many of the phenomena observed, to the behaviour of interlayer hydrate water. The bonds between and within individual "crystallites" are clearly defined; it is shown that the « inter-crystallite » bonds do not separate when exposed to physically adsorbed water. The paper describes some of the thermodynamic equations pertinent to the phenomena of adsorption, length change and creep, and some basic principles governing physical adsorption and types of hystereses. The results were obtained from two areas of work: A. Surface chemical experiments. B. Measurement of mechanical properties of compacted and cast systems of hydrated cement and gypsum. The experiments in (A) included sorption and length change scanning isotherms of water and methanol and led to the following conclusions: (i) The water isotherm for « d-dried » hydrated cement is irreversible at all regions of the primary curves, due to the re-entry of inter-layer hydrate water. (ii) B.E.T. calculations on the water isotherm are invalid. Surface areas and porosities obtained from N<sub>2</sub> adsorption are more reliable values. (iii) By use of the scanning isotherms and calculation it is possible to separate interlayer and physical water; each of these were used to describe properties of the hydrated cement.

The experiments in (B) included measurements of modulus and strength versus relative humidity, and porosity, and led to the following conclusions: (i) Physically adsorbed water is not present at « inter-crystallite » boundaries. (ii) The bonds formed during hydration are not stronger than those formed by compaction, in sharp contrast to the gypsum system. However, the bonds are fairly strong and involve a varying proportion of long-range and short-range forces. Physically adsorbed water does not normally influence these bands. (iii) The reversible and part of the irreversible creep is probably associated with the slow decomposition of the interlayer hydrate due to application of stress. (iv) The irreversible creep is probably the result of breaking and re-making of « inter-crystallite » bonds under confining stress conditions. © 1968 Secrétariat de Rédaction.

34. GARNER, Sharon B et HAMMONS, Michael I. *Development and implementation of time-dependent cracking material model for concrete*. 1991. Minimizing thermal cracking in mass concrete continues to be a concern for the US Army Corps of Engineers. Thermal cracking is due to the restraint of volume change due to hydration, shrinkage, and creep. The prediction of stresses, strains, and cracking at early times presents special problems because many of the properties of concrete depend on the degree of hydration of the cementitious materials. To better model the time-dependent properties and response of mass concrete, a time-dependent cracking material model was developed for use in a general-purpose heat-transfer and structural analysis finite element code. The model includes the effects of time and temperature on compressive strength, elastic modulus, and creep. An interactive strain-driven, stress-modified cracking criterion based on the smeared-crack approach is included. Examples of calibration and verification of the model are included.
35. VERBECK, George J. The Camera Lucida Method for Measuring Air Voids in Hardened Concrete. *ACI Journal Proceedings*. 1 mai 1947. Vol. 43, n° 5, pp. 1025-1040. DOI 10.14359/8772.
36. PAGE, Chris L et PAGE, M M. *Durability of Concrete and Cement Composites*. Elsevier Ltd., 2007. ISBN 9781855739406. Whilst most structures made using concrete and cement-based composites have not shown signs of premature degradation, there have been notable exceptions. In addition, there is increasing pressure for new structures to remain in serviceable condition for long periods with only minimal maintenance before being recycled. All these factors have highlighted the issues of what affects the durability of these materials in different circumstances and how material properties can be measured and improved. Durability of concrete and cement composites summarises key research on these important topics. After an introductory chapter, the book reviews the pore structure and chemistry of cement-based materials, providing the foundation for understanding the particular aspects of degradation which are discussed in the following chapters. These include dimensional stability and cracking processes, chemical and microbiological degradation of concrete, corrosion of reinforcing and prestressing steels, deterioration associated with certain aggregates, effects of frost and problems involving fibre-reinforced and polymer-cement composites. With its distinguished international team of contributors, Durability of concrete and cement composites is a standard reference for all those concerned with improving the service life of structures using these materials. © 2007 Woodhead Publishing Limited All rights reserved. From Duplicate 2 (Durability of Concrete and Cement Composites - Page, Chris L; Page, M M)Google-Books-ID: eAikAgAAQBAJ

37. LEA, F M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd Editio. Chemical Publishing Company, 1971. ISBN 978-0-8206-0212-7. THE CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE, Third Edition F.M LEA The advances in the chemistry and physics of cements led to the necessity for this third edition. Lea's book deals with the chemical and physical properties of cements and concretes and their relation to the practical problems that arise in their manufacture and use. It will be of great interest not only to the chemist involved in the science and technology of silicate materials but also to those using concrete in building and civil engineering construction. Attention is given to problems arising in the use of concrete, from the suitability of materials, to the conditions under which concrete may deteriorate and the precautionary or remedial measures that can be adopted. It is well illustrated with line drawings, tables and photographs. PARTIAL CONTENTS: History of calcareous cements; Classification of cements; Portland cements: Raw materials and manufacturing processes; Cement components and their phase relations; Cementing qualities of the cement compounds; Constitution, burning, proportioning, hydration and setting and hardening of Portland cement; Structure of cement compounds; Action of acid and sulphate waters of Portland Cement; Physical and mechanical properties of Portland Cement, Pozzolanas and Pozzolanic cements; Cements made from blast furnace slag; High Alumina cement, some special cements and cement properties; Concrete aggregates; Resistance of Concrete to various organic and inorganic agents; Examination of concrete failures. Google-Books-ID: CSNHygEACAAJ
38. TAYLOR, Peter C. *Curing concrete*. CRC Press, 2013. ISBN 9780203866139. Curing is one of those activities that every civil engineer and construction worker has heard of, but in reality does not worry about much. In practice, curing is often low on the list of priorities on the construction site, particularly when budgets and timelines are under pressure. Yet the increasing demands being placed on concrete mixtures also mean that they are less forgiving than in the past. Therefore, any activity that will help improve hydration and so performance, while reducing the risk of cracking, is becoming more important. Curing Concrete explains exactly why curing is so important and shows you how to best do it. The book covers: • The fundamentals behind hydration • How curing affects the properties of concrete, improving its long-term performance • What curing technologies and techniques you can use for different applications • How to effectively specify, provide, and measure curing in a project The author also gives numerous examples of how curing-or a lack of it-has affected concrete performance in real-world situations. These include examples from hot and cold climates, as well as examples related to high-performance concrete, performance parameters, and specifications and testing. Written for construction professionals who want to ensure the quality and longevity of their concrete structures, this book demonstrates that curing is well worth the effort and cost. Google-Books-ID: 4QRrAAAAQBAJ
39. NAU. *Science et technologie de l'œuf, volume 2 : de l'œuf aux ovoproduits* [en ligne]. Lavoisier, 2010. ISBN 978-2-7430-1790-3. Disponible à l'adresse : [https://books.google.dz/books?id=7c3uAQAQBAJ&lpg=PP1&dq=Science et technologie de l'œuf%2C volume 2 %3A de l'œuf aux ovoproduits&pg=PR12#v=onepage&q&f=false](https://books.google.dz/books?id=7c3uAQAQBAJ&lpg=PP1&dq=Science+et+technologie+de+l'œuf%2C+volume+2+%3A+de+l'œuf+aux+ovoproduits&pg=PR12#v=onepage&q&f=false) La filière de production et de transformation des œufs occupe une place majeure au sein des industries agroalimentaires avec une production mondiale estimée en 2007 à mille milliards d'œufs. Dotés de propriétés fonctionnelles très performantes, les œufs et les ovoproduits sont devenus omniprésents dans les aliments et constituent des atouts

précieux pour le développement de produits nouveaux. Fruit de la collaboration de 35 spécialistes internationaux reconnus, scientifiques et industriels, Science et technologie de l'œuf rassemble en deux volumes tous les savoir-faire et les acquis scientifiques mis à la disposition des acteurs du secteur, de l'amont jusqu'à l'aval de la filière. Il constitue une référence unique dans la littérature professionnelle. Le premier volume offre toutes les clés pour optimiser le rendement du cheptel avicole et améliorer la qualité de sa production à travers une présentation détaillée de l'œuf : formation, constitution, qualités physico-chimiques et microbiologiques, un exposé complet sur les conditions optimales d'élevage des poules pondeuses et leur sélection génétique, de nombreuses données sur la production et le conditionnement des œufs, des analyses sur l'économie du secteur. Véritable synthèse technique et scientifique, Science et technologie de l'œuf, s'appuie sur de nombreux résultats de recherche et références bibliographiques. Il s'adresse à tous les professionnels du secteur avicole et des ovoproduits (aviculteurs, producteurs d'œufs, fournisseurs et distributeurs) ainsi qu'à tous les services R&D et qualité des industries agroalimentaires. Il intéressera également les organismes de surveillance sanitaire, les étudiants et les enseignants mais aussi tous les consommateurs. Google-Books-ID: 7c3uAQAAQBAJ

40. FRONING, Glenn. Egg Science and Technology. *Poultry Science* [en ligne]. 4. 1995. Vol. 74, n° 12, pp. 2061. DOI 10.3382/ps.0742061. Disponible à l'adresse : <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=4c21fd3540f0ba45e259ed2abcf3222> Predicting the binding mode of flexible polypeptides to proteins is an important task that falls outside the domain of applicability of most small molecule and protein-protein docking tools. Here, we test the small molecule flexible ligand docking program Glide on a set of 19 non- $\alpha$ -helical peptides and systematically improve pose prediction accuracy by enhancing Glide sampling for flexible polypeptides. In addition, scoring of the poses was improved by post-processing with physics-based implicit solvent MM-GBSA calculations. Using the best RMSD among the top 10 scoring poses as a metric, the success rate (RMSD  $\leq$  2.0 Å for the interface backbone atoms) increased from 21% with default Glide SP settings to 58% with the enhanced peptide sampling and scoring protocol in the case of redocking to the native protein structure. This approaches the accuracy of the recently developed Rosetta FlexPepDock method (63% success for these 19 peptides) while being over 100 times faster. Cross-docking was performed for a subset of cases where an unbound receptor structure was available, and in that case, 40% of peptides were docked successfully. We analyze the results and find that the optimized polypeptide protocol is most accurate for extended peptides of limited size and number of formal charges, defining a domain of applicability for this approach.
41. HORST, Frank, DOMSAU2 et -XFI-. File:Anatomy of an amiotic egg.svg - Wikimedia Commons. [en ligne]. 11 décembre 2006. [Consulté le 9 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy\\_of\\_an\\_amiotic\\_egg.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_an_amiotic_egg.svg)
42. SAUVEUR, Bernard. *Reproduction des volailles et production d'œufs*. Quae, 1988.
43. LI-CHAN et Y., E. C. The chemistry of eggs and egg products. *Egg Science and Technology* [en ligne]. 1995. pp. 105-175. [Consulté le 26 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://ci.nii.ac.jp/naid/10012097542/en/>
44. SUGINO, H, NITODA, T et JUNEJA, L R. *General chemical composition of hen eggs*. CRC press Boca Raton, FL, 1997.

45. R.W., Burley et V., Vadehra Dharam. *The avian egg: chemistry and biology*. 1989.
46. MINE, Yoshinori. *Egg Bioscience and Biotechnology* [en ligne]. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 9780470181249. Disponible à l'adresse : <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=4540e3b418cfd6d6703e7ec250667abEgg> Bioscience and Biotechnology provides a very focused look at the most recent advances in the study and value-added use of the bioactive components of eggs. This book focuses mainly on biologically active substances derived from egg components and their potential use. These include substances with anti-microbial, anti-adhesive, immunomodulatory, anti-cancer, anti-hypertensive, and anti-oxidant properties. © 2008 John Wiley & Sons, Inc. From Duplicate 1 (Egg {Bioscience} and {Biotechnology} - Ph.D Yoshinori, Mine) Water is the major constituent of egg albumen, ranging from 84% to 89% from the outermost to innermost layers. Proteins are the major component of albumen solids, accounting for about 10 – 11% of the albumen weight, while carbohydrates (primarily glucose), lipids, and minerals are minor components (Li - Chan and Nakai 1989 ). Tables 1.6 – 1.8 show the composition of amino acids, fatty acids, and minerals and vitamins, respectively, in egg albumen compared to egg yolk.
47. NYS, Yves et GAUTRON, Joel. Structure and Formation of the Eggshell. In : *Bioactive Egg Compounds* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007. pp. 99-102. Disponible à l'adresse : [http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-72173-6\\_15](http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-72173-6_15)
48. STADELMAN, William J.; COTTERILL, Owen J., NEWKIRK, D et NEWBY, L. *Egg Science and Technology* [en ligne]. CRC Press, 2017. ISBN 9781351453707. Disponible à l'adresse : <https://books.google.fr/books?id=dwZDDwAAQBAJ>
49. BEKKAR, Lounis et AOUM, Zakaria. *Adsorption d'un polluant pharmaceutique sur charbon de coquilles d'œufs*. Ecole Nationale Polytechnique, 2019.
50. ZULFIKAR, Muhammad Ali, MARISKE, Edeh Dieke et DJAJANTI, Samitha Dewi. Adsorption of lignosulfonate compounds using powdered eggshell. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology* [en ligne]. 2012. Vol. 34, n° 3, pp. 309-316. [Consulté le 26 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.sjst.psu.ac.th> Batch adsorption of lignosulfonates using untreated powdered eggshell under the influences of mixing time, pH, particle size and dose of powdered eggshell was investigated. Adsorption isotherms of lignosulfonates onto powder eggshell were also studied. Eggshells were collected from the Balubur traditional market in Bandung, Indonesia, washed with distilled water, air dried, and then ground into powder of different particle sizes. Kinetic studies found that equilibrium time was as high as 90 minutes. From experiments carried out at different pH, it was observed that pH plays an important role in the adsorption of lignosulfonate compounds. It was also observed that particles size has no significant effect on the adsorption of lignosulfonate compounds. The optimum dosage of powdered eggshell was 30 g/100 mL of 500 mg/L lignosulfonate solution. Adsorption isotherms studied through the use of graphical methods revealed that the adsorption of lignosulfonates onto powdered eggshell follows the Langmuir model.
51. HASSAN, Afrah A et SALIH-HASSAN, Zahra A. Methylene Blue Removal From Aqueous Solution By Adsorption on Eggshell Bed حلاص ذبع ترهز نسح ذوبع حارفأ. *Euphrates Journal of Agriculture Science*. 2013. Vol. 5, n° 2, pp. 11-23.

52. SCHAAFSMA, A., PAKAN, I., HOFSTEDDE, G. J.H., MUSKIET, F. A.J., VAN DER VEER, E. et DE VRIES, P. J.F. Mineral, amino acid, and hormonal composition of chicken eggshell powder and the evaluation of its use in human nutrition. *Poultry Science*. 1 décembre 2000. Vol. 79, n° 12, pp. 1833-1838. DOI 10.1093/ps/79.12.1833. Chicken eggshell powder (ESP) might be an attractive source of Ca for human nutrition. To study its nutritional value, we analyzed minerals, amino acids, and hormones in commercially available Slovakian ESP. The mineral composition was compared with three Dutch ESP samples that differed in feed and housing, a Japanese ESP, refined CaCO<sub>3</sub>, and an oyster shell supplement. Chicken eggshell powder contains high levels of Ca (mean  $\pm$  SD/g EPS: 401  $\pm$  7.2 mg) and Sr (372  $\pm$  161/ $\mu$ g) when compared with recommended or estimated daily intakes for humans 51 to 70 yr of age. Levels of potentially toxic Pb, Al, Cd, and Hg were very low as were levels of V, B, Fe, Zn, P, Mg, N, F, Se, Cu, and Cr. Large differences in the levels of F, Se, Cu, Cr, and Sr in the Dutch and Slovakian ESP indicated a strong influence of feed and environment. The small protein fraction of ESP contains high levels of Gly and Arg. Furthermore, small amounts of transforming growth factor- $\beta$ 1 (0.75 to 7.28 ng/g ESP), calcitonin (10 to 25 ng/g ESP), and progesterone (0.30 to 0.33 ng/g ESP) were detected. Estradiol-17 $\beta$  and calcitriol were below the detection limit of the methods used. Compared with ESP, refined CaCO<sub>3</sub> was found to contain increased levels of Cd, and the oyster shell supplement showed increased levels of Al and Cd. Therefore, ESP seems to have a beneficial composition with about 39% of elemental Ca, relevant amounts of Sr, and low levels of Al, Pb, Cd and Hg. It may be used as a Ca source in human nutrition.
53. YEDDOU, Nacèra et BENSMAILI, Aïcha. Equilibrium and kinetic modelling of iron adsorption by eggshells in a batch system: effect of temperature. *Desalination*. 5 février 2007. Vol. 206, n° 1-3, pp. 127-134. DOI 10.1016/j.desal.2006.04.052. This paper aims to investigate the sorption of Fe(III) onto eggshells. In our experiments the batch sorption is studied with respect to solute concentration, contact time, adsorbent dose and temperature. The results show that the sorption capacity decreases with an increase in temperature from 20 to 50°C at the initial Fe(III) solution concentration of 5 mg/l. Pseudo-second order model can be used to describe the kinetics of Fe(III) sorption. The constants obtained from the pseudo-second order kinetic model at different temperatures were evaluated and the activation energy was found to be -13.40 kJ/mol. Thermodynamic parameters such as enthalpy, entropy and Gibb's free energy changes were also calculated. The Freundlich and Langmuir adsorption models were applied to experimental equilibrium data and the isotherm constants were calculated using linear regression analysis. © 2007.
54. KATO, A. et NAKAI, S. Hydrophobicity determined by a fluorescence probe method and its correlation with surface properties of proteins. *Biochimica et biophysica acta*. 24 juillet 1980. Vol. 624, n° 1, pp. 13-20. DOI 10.1016/0005-2795(80)90220-2. The fluorescence method of Sklar et al. (Sklar, L.A., Hudson, B.S. and Simoni, R.D. (1977) *Biochemistry* 16, 5100-5108) using cis-parinaric acid as a probe was applied to determine the effective hydrophobicity of proteins. The initial slope (S<sub>0</sub>) of fluorescence intensity vs. protein concentration plot was used as an index of the protein hydrophobicity. A good correlation was observed for S<sub>0</sub> of native proteins, denatured proteins and surfactant-bound proteins with an effective hydrophobicity determined by the hydrophobic partition method. The effective hydrophobicity determined fluorometrically showed significant correlations with interfacial tension and emulsifying activity of the proteins studied. The fluorescence technique using cis-parinaric acid is

useful for determination of the effective hydrophobicity, as the procedure is much simpler and quicker than hydrophobic chromatography and hydrophobic partition.

55. KESHAVARZ, Elaheh et NAKAI, Shuryo. The relationship between hydrophobicity and interfacial tension of proteins. *BBA - Protein Structure*. 26 février 1979. Vol. 576, n° 2, pp. 269-279. DOI 10.1016/0005-2795(79)90402-1. Charge-free hydrophobic gels of Hjerten et al. (Hjerten, S., Rosengren, J. and Pahlman, S. (1974) *J. Chromatogr.* 101, 281-288) were used for hydrophobic affinity chromatography. The effective hydrophobicity of proteins was expressed as their retention volumes from columns of butylepoxy- and hexylepoxy-Sepharose 4B. The effective hydrophobicity was also estimated by a partition method of Shanbhag and Axelsson ((1975) *Eur. J. Biochem.* 60, 17-22) from the partition coefficients of proteins between two phases, poly (ethylene glycol) and dextran. The former contained a hydrophobic ligand, palmitate. A close correlation was observed between the hydrophobicities determined by the two methods. However, no significant relationship was observed between these effective hydrophobicities and the average hydrophobicity of Bigelow ((1967) *J. Theoret. Biol.* 16, 187-211) that was calculated from the total amino acid composition of each protein. The interfacial tensions at the 0.2% protein/corn oil interface revealed negative correlations with the effective hydrophobicities determined by both methods indicating lower interfacial tensions with more hydrophobic proteins. © 1979.
56. STRIXNER, T et KULOZIK, U. Egg proteins. In : PHILLIPS, G O et WILLIAMS, P A (éd.), *Handbook of Food Proteins* [en ligne]. Woodhead Publishing, 2011. pp. 150-209. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. ISBN 9781845697587. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845697587500071> This chapter investigates the uses of hen egg white and yolk proteins in food processing. Egg whites are used extensively as ingredients in food processing due to their unique functional properties such as foaming and gelling. Without the existence of a complex macrostructure, egg white is more or less a colloidal suspension of different protein constituents. The egg white proteins represent more than 80% of the total dry matter in egg white. Therefore investigations into the physicochemical characteristics, e.g. the isoelectric point of these proteins, have promoted the elucidation of their structure-function relationships for the benefit of food processing. Egg yolk, meanwhile, is an essential ingredient in the preparation of a large variety of food emulsions. The potential of egg yolk has not been sufficiently explored however, so many research activities, such as pre-processing by a variation of the environmental conditions, heat treatment and enzymatic modification via phospholipase A<sub>2</sub>, are now focussing on the development of new methods to improve the technological functionality of egg yolk.
57. HUOPALAHTI, Rainer, LÓPEZ-FANDIÑO, Rosina, ANTON, Marc et SCHADE, Rüdiger. *Bioactive Egg Compounds* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-37883-9. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-37885-3>
58. MASON, Anne B., WOODWORTH, Robert C., OLIVER, Ronald W.A., GREEN, Brian N., LIN, Lung Nan, BRANDTS, John F., SAVAGE, Kerry J., TAM, Beatrice M. et MACGILLIVRAY, Ross T.A. Association of the two lobes of ovotransferrin is a prerequisite for receptor recognition: Studies with recombinant ovotransferrins. *Biochemical Journal* [en ligne]. 15 octobre 1996. Vol. 319, n° 2, pp. 361-368. [Consulté le 26 septembre 2020]. DOI 10.1042/bj3190361. Disponible à l'adresse :

/biochemj/article/319/2/361/33110/Association-of-the-two-lobes-of-ovotransferrin-  
 isDifferent recombinant N-lobes of chicken ovotransferrin (oTF/2N) have been isolated from the tissue-culture medium of baby hamster kidney cells transfected with the plasmid pNUT containing the relevant DNA coding sequence. Levels of up to 40, 55 and 30 mg/1 oTF/2N were obtained for constructs defining residues 1-319, 1-332 and 1-337-(Ala)<sub>3</sub> respectively. In addition, a full-length non-glycosylated oTF was expressed at a maximum of 80 mg/1 and a foreshortened oTF consisting of residues 1-682 was expressed at a level of 95 mg/1. These preparations were then used to produce, proteolytically, two different C-lobes (oTF/2C) comprising residues 342-686 and 342-682. The purified recombinant N-lobes (oTF/2N) are similar to the proteolytically derived half-molecule with regard to immunoreactivity and spectral properties; they show some interesting differences in thermal stability. A sequence analysis of the cDNA revealed six changes at the nucleotide level that led to six differences in the amino acid sequence compared with that reported by Jeltsch and Chambon [(1982) Eur. J. Biochem. 122, 291-295]. Electrospray mass spectrometry gives results consistent with these six changes. Interaction between the various N- and C-lobes was measured by titration calorimetry. Studies show that only those lobes that associate in solution are able to bind to the receptors on chick embryo red blood cells. These findings do not support a previous report by Oratore et al. [(1989) Biochem. J. 257, 301-304].

59. *Mosque built from egg white and sand mixture* {textbar} {Daily} {Express} {Online} - {Sabah}'s {Leading} {News} {Portal} [en ligne]. [Consulté le 15 février 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.dailyexpress.com.my/news.cfm?NewsID=122770KANGAR>: The Alwi Mosque's uniqueness not only lies in its beautiful classic Mughal's architecture but also on the use of the main materials in its construction, namely the egg white and sand mixture
60. Mosque built from egg white and sand mixture. [en ligne]. 7 février 2018. [Consulté le 15 février 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.dailyexpress.com.my/news.cfm?NewsID=122770KANGAR>: The Alwi Mosque's uniqueness not only lies in its beautiful classic Mughal's architecture but also on the use of the main materials in its construction, namely the egg white and sand mixture
61. COLLETT, Richard. How Building Churches Out of Egg Whites Transformed Filipino Desserts - Gastro Obscura. *Atlas Obscura* [en ligne]. 22 février 2019. [Consulté le 9 février 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.atlasobscura.com/articles/filipino-desserts>What else are you going to do with all those yolks?From Duplicate 1 (How Building Churches Out of Egg Whites Transformed Filipino Desserts - Collett, Richard)From Duplicate 1 (How {Building} {Churches} {Out} of {Egg} {Whites} {Transformed} {Filipino} {Desserts} - Collett, Richard)The egg whites were needed to form a sort of mortar, known as argamasa, which binded and protected the building materials used to construct the churches. Egg whites were meant to make the mixture "more durable," and historical records attest to this widespread practice.
62. ONS. *Evolution des produits de l'élevage (2000-2009)* [en ligne]. 2009. Disponible à l'adresse : <http://www.ons.dz/IMG/pdf/Elevage-2.pdf>
63. A, Imene. Selon l'ANCA : 5 milliards d'œufs d'une valeur de près de 60 milliards de

- DA ont été consommés en 2017. [en ligne]. 4 janvier 2018. [Consulté le 20 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.algerie-eco.com/2018/01/04/selon-lanca-5-milliards-doeufs-dune-valeur-de-pres-de-60-milliards-de-da-ont-ete-consommés-2017/>
64. SOUZA, Marcelo T., MAIA, Bianca G.O., TEIXEIRA, Luyza B., DE OLIVEIRA, Karine G., TEIXEIRA, Alexandre H.B. et NOVAES DE OLIVEIRA, Antonio P. Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. *Process Safety and Environmental Protection*. 1 octobre 2017. Vol. 111, pp. 60-64. DOI 10.1016/j.psep.2017.06.011. Glass foams were produced from discarded glass bottles (GB) and eggshells (ES) as foaming agent in contents between 1 and 30 wt%. The raw materials (GB, ES) were homogenized and uniaxially pressed (20 MPa). The obtained powder compacts were fired at 900 °C/30 min and characterized according to their chemical, physical and structural properties. The results (porosities between 60 and 95% with thermal conductivities between 0.177 and 0.055 W/m K and compressive mechanical strength between 0.15 and 1.50 MPa) indicate that the obtained glass foams have potential for applications where thermal and acoustic insulation and non-flammability are the main technical requirements.
65. QUINA, Margarida J., SOARES, Micaela A.R. et QUINTA-FERREIRA, Rosa. Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 août 2017. Vol. 123, pp. 176-186. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.09.027. Nowadays the European guidelines boost the concept of “circular economy” which is focused on catalysing sustainable development. “Closing the loop” is particularly important for improving the recycling rates, and thus waste and by-products can be turned into a resource with benefits to the economy and environment. Within this scope, this work reviews and updates the potential of valorisation and legal framework of an anthropogenic biomineral with high content of calcium carbonate. Namely, the waste under consideration is the industrial eggshell waste (ES) resulting from egg breakage. This is considered an animal by-product (ABP) and thus some constraints may limit ES applications. The flux of this ABP mainly within the European region is also indicated and the estimated data highlight that significant amount of this biomineral is being produced. Despite legal restrictions, countries such as the UK, Spain and Portugal have been able to find practical application for ES, avoiding landfilling. The literature shows that applications for industrial eggshell may be grouped into two categories: raw material and operating supply. In the first case, the options are food additive, soil amendment, purified calcium carbonate, cosmetics and biomaterial composite. As operating supply, ES may be used as catalyst and sorbent. Although the economic profit should be evaluated in each case, the environmental benefit of those potential applications is in general high. Considering ES properties and the soil properties in large areas of Europe (acidic pH and low topsoil organic carbon content) the production of Ca-rich compost obtained through composting seems to be a particularly interesting approach toward “circular economy”.
66. WONG, Y. C. et ANG, R. X. Study of calcined eggshell as potential catalyst for biodiesel formation using used cooking oil. *Open Chemistry* [en ligne]. 27 novembre 2018. Vol. 16, n° 1, pp. 1166-1175. [Consulté le 20 juillet 2020]. DOI 10.1515/chem-2018-0127. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0127> Eggshells were utilized as a cost effective catalyst to assist in biodiesel formation. Eggshells were calcined using different calcination conditions such as temperature and time. The eggshells underwent calcination under 1000 °C in which calcium carbonate was

completely converted into calcium oxide under open air conditions. The calcined eggshell catalyst was characterized by X-ray diffraction (XRD). Then the eggshell derived CaO catalyst was subjected to transesterification of used cooking oil (UCO). The parameters in the transesterification of used cooking oil such as a methanol to oil ratio, weight of catalyst and reaction temperature were evaluated. The optimum result exhibited a 4:1 methanol to oil ratio, 2wt % catalyst, and a 65 °C reaction temperature within two hours. Pure calcined CaO acted as the control of the experiment that was subject to the most optimum eggshell derived catalyst transesterification conditions. The catalytic activity for both the pure calcined CaO and the calcined eggshell derived catalyst were comparable. The biodiesel formation was identified by gas chromatography mass spectrometry (GC-MS).

67. BHAUMIK, R, MONDAL, N K, DAS, B., ROY, P, PAL, K C, DAS, C, BANEERJEE, A. et DATTA, Jayanta kumar. Eggshell Powder as an Adsorbent for Removal of Fluoride from Aqueous Solution: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies. *E-Journal of Chemistry* [en ligne]. 2012. Vol. 9, n° 3, pp. 1457-1480. [Consulté le 20 juillet 2020]. DOI 10.1155/2012/790401. Disponible à l'adresse : <http://www.ejchem.A> A new medium, eggshell powder has been developed for fluoride removal from aqueous solution. Fluoride adsorption was studied in a batch system where adsorption was found to be pH dependent with maximum removal efficiency at 6.0. The experimental data was more satisfactorily fitted with Langmuir isotherm model. The kinetics and the factor controlling adsorption process fully accepted by pseudo-second-order model were also discussed. E a was found to be 45.98 kJmol<sup>-1</sup> by using Arrhenius equation, indicating chemisorption nature of fluoride onto eggshell powder. Thermodynamic study showed spontaneous nature and feasibility of the adsorption process with negative enthalpy ( $\Delta H < 0$ ) value also supported the exothermic nature. Batch experiments were performed to study the applicability of the adsorbent by using fluoride contaminated water collected from affected areas. These results indicate that eggshell powder can be used as an effective, low-cost adsorbent to remove fluoride from aqueous solution as well as groundwater.
68. WU, Xinchun, STROLL, Stephanie I., LANTIGUA, Darlin, SUVARNAPATHAKI, Sanika et CAMCI-UNAL, Gulden. Eggshell particle-reinforced hydrogels for bone tissue engineering: An orthogonal approach. *Biomaterials Science*. 1 juillet 2019. Vol. 7, n° 7, pp. 2675-2685. DOI 10.1039/c9bm00230h. Hydrogel-based biomimetic scaffolds have generated broad interest due to their tunable physical, chemical, and biological properties for bone tissue engineering applications. We fabricated eggshell microparticle (ESP) reinforced gelatin-based hydrogels to obtain mechanically stable and biologically active three-dimensional (3D) constructs that can differentiate pre-mature cells into osteoblasts. Physical properties including swelling ratio, degradation, and mechanical properties of the composite hydrogels were investigated. Pre-osteoblasts were encapsulated within the ESP-reinforced hydrogels to study their differentiation and evaluate mineral deposition by these cells. The ESP-reinforced gels were then subcutaneously implanted in a rat model to determine their biocompatibility and degradation behaviors. The composite hydrogels have shown outstanding tunability in physical and biological properties holding substantial promise for engineering mineralized tissues (e.g. bone, cartilage, tooth, and tendon). These 3D scaffolds enabled the differentiation of pre-osteoblasts without the use of specialized osteogenic growth medium. The ESP-reinforced gels exhibited significant enhancement in mineralization by pre-osteoblasts. These behaviors are positively correlated with increasing

- concentrations of ESP. Findings suggest that our novel composite hydrogel exhibits superior mechanical properties and indicates a favorable in vivo response by subcutaneous implantation in a rat model.
69. HENDRIKS, C A, WORRELL, E, DE JAGER, D, BLOK, K et RIEMER, P. *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry* [en ligne]. 1998. [Consulté le 20 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42.htm> 5% of global carbon dioxide emissions originates from cement production. About half of it from calcination and half of combustion processes. A wide range of options exists to reduce CO<sub>2</sub> emissions considerably.
  70. YERRAMALA, Amarnath. Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. *The Indian Concrete Journal*. 2014. Vol. 88, n° 10, pp. 94-105. This paper describes research into use of poultry waste in concrete through the development of concrete incorporating eggshell powder (ESP). Different ESP concretes were developed by replacing 5-15% of ESP for cement. The results indicated that ESP can successfully be used as partial replacement of cement in concrete production. The data presented cover strength development and transport properties. With respect to the results, at 5% ESP replacement the strengths were higher than control concrete and indicate that 5% ESP is an optimum content for maximum strength. In addition, the performance of ESP concretes was comparable up to 10% ESP replacement in terms of transport properties with control concrete. The results further show that addition of fly ash along with ESP is beneficial for improved performance of concretes.
  71. AMU, O.O. Effect of Eggshell Powder on the Stabilizing Potential of Lime on an Expansive Clay Soil. *Journal of Applied Sciences* [en ligne]. 1 janvier 2005. pp. 1474-1478. [Consulté le 15 juillet 2020]. DOI 10.3923/jas.2005.1474.1478. Disponible à l'adresse : <http://www.scialert.net/abstract/?doi=jas.2005.1474.1478> this research was meant to study the effect of eggshell powder (ESP) on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil.
  72. FREIRE, M. N. et HOLANDA, J. N.F. Caracterização de resíduo de casca de ovo visando seu aproveitamento em revestimento cerâmico poroso. *Cerâmica* [en ligne]. 2006. Vol. 52, n° 324, pp. 240-244. [Consulté le 15 juillet 2020]. DOI 10.1590/S0366-69132006000400004. Disponible à l'adresse : [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132006000400004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132006000400004&lng=en&nrm=iso&tlng=en) In Brazil, the food industry generates every year huge amounts of avian eggshell waste, and a critical question is to find an adequate use for this waste. The aim of this work is to determine the chemical, mineralogical and physical characteristics of a nonprocessed avian eggshell waste sample, as well as to investigate its use in wall tile paste. The sample was analyzed regarding to chemical composition, X-ray diffraction, morphology, particle size analysis, density, organic matter, soluble salts, and thermal analysis. The results indicated that the eggshell waste sample rich in CaCO<sub>3</sub> can be used as an alternative raw material in the production of wall tile materials.
  73. AMU, O. O. et SALAMI, B. A. Effect of common salt on some engineering properties of eggshell stabilized lateritic soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010. Vol. 5, n° 9, pp. 64-73. This paper studied the effect of common salt on the compaction and California Bearing Ratio (CBR) properties of eggshell stabilized lateritic soils with

a view of obtaining a good compliment for eggshell as a useful stabilizer for road works. Classification and consistency tests were performed on the soil samples which were also subjected to compaction and CBR tests. Stabilization was performed at optimum eggshell and with 2, 4, 6, 8, and 10% of common salt. The addition of common salt reduced the Plastic Indices (PI) of the samples. The values reduced from 14.82, 11.11 and 7.99% to 8.03, 1.25 and 1.23% in samples A, B and C respectively. Maximum Dry Density (MDD) increased from 1995 to 2140 kg/m<sup>3</sup> and 2000 to 2110 kg/m<sup>3</sup> in samples B and C respectively. The unsoaked CBR values also increased from 34.78 to 50.99 kN/m<sup>2</sup>, 15.64 to 28.89 kN/m<sup>2</sup> and 27.31 to 34.20 kN/m<sup>2</sup> at optimum stabilization in samples A, B and C respectively. The result showed that the addition of common salt improved the compaction and CBR characteristics of eggshell stabilized soils. © 2006-2010 Asian Research Publishing Network (ARPN). All rights reserved.

74. OKONKWO, U, ODIONG, I ; C et AKPABIO, E E. *THE EFFECTS OF EGGSHELL ASH ON STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT-STABILIZED LATERITIC* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCETEggshell> ash obtained by incinerating Fowls' eggshells to ash has been established to be a good accelerator for cement-bound materials and this would be useful for road construction work at the peak of rainy seasons for reducing setting time of stabilized road pavements. However this should be achieved not at the expense of other vital properties of the stabilized matrix. This is part of the effort in adding value to agricultural materials which probably cause disposal problems. Thus this study aimed at determining the effect of eggshell ash on the strength properties of cement-stabilized lateritic soil. The lateritic soil was classified to be A-6(2) in AASHTO rating system and reddish-brown clayey sand (SC) in the Unified Classification System. Constant cement contents of 6% and 8% were added to the lateritic soil with variations in eggshell ash content of 0% to 10% at 2% intervals. All proportions of cement and eggshell ash contents were measured in percentages by weight of the dry soil. The Compaction test, California Bearing Ratio test, Unconfined Compressive Strength test and Durability test were carried out on the soil-cement eggshell ash mixtures. The increase in eggshell ash content increased the Optimum Moisture Content but reduced the Maximum Dry Density of the soil-cement eggshell ash mixtures. Also the increase in eggshell ash content considerably increased the strength properties of the soil-cement eggshell ash mixtures up to 35% in the average but fell short of the strength requirements except the durability requirement was satisfied.
75. BARAZESH, Arash, SABA, Hamidreza, GHARIB, Mehdi et RAD, Moustafa Yousefi. Laboratory Investigation of the Effect of Eggshell powder on Plasticity Index in Clay and Expansive Soils. *European Journal of Experimental Biology* [en ligne]. 2012. Vol. 2, n° 6, pp. 2378-2384. Disponible à l'adresse : [www.pelagiaresearchlibrary.com](http://www.pelagiaresearchlibrary.com) Nowadays, considerable attention has been paid to the utilization of alternative materials, which bear higher engineering quality than traditional materials and are financially affordable. Soil is one of the most important materials used in a variety of construction projects including earth canals and earth dams. The fact that soil may provide all the resistance characteristics necessary for a project illustrates the importance of various methods used to improve soil quality. Clay soil is widely used in most of the construction projects. Clay soils, particularly soft clay soils, have good plastic properties so that increased moisture results in their decreased shear strength, compressive strength and volume changes. These damages typically take

an irreparable toll on structures, which further clarifies the importance of soil improvement. Considering millions of tons of waste produced annually across the country, which not only poses the problem of disposal but also adds to environmental contamination and health risks, utilization of such refuse and industrial wastes and their subsidiary products as alternatives to construction materials may effectively contribute to environmental preservation and minimization of their adverse effects on the environment. In the present study, eggshell powder was used as a waste to combine with soil so that the plasticity properties of clay soil were investigated in different mixture proportions. Then the plasticity properties of soils including liquid and plasticity limits as well as plasticity index, already measured, were compared with those of the experimental specimens mixed with eggshell powder in different proportions.

76. CHANDRA, S et AAVIK, J. Influence of proteins on some properties of portland cement mortar. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* [en ligne]. mai 1987. Vol. 9, n° 2, pp. 91-94. DOI 10.1016/0262-5075(87)90024-8. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0262507587900248> Natural organic materials were incorporated in building materials in ancient times. The major content in these materials is proteins. Some proteins have been tested in portland cement mortar as admixtures. Air entrainment, adhesiveness and hydrophobic properties introduced to cement mortar by the proteins were measured. It is seen that the proteins worked like air entraining agents, improved the adhesiveness and hydrophobic property. They also acted as retarders because of complex formation with calcium by crosslinking. © 1987.
77. MYDIN, Md Azree Othuman. Preliminary studies on the development of lime-based mortar with added egg white. *International Journal of Technology* [en ligne]. 2017. Vol. 8, n° 5, pp. 800-810. DOI 10.14716/ijtech.v8i5.442. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/320738514\\_Preliminary\\_Studies\\_on\\_the\\_Development\\_of\\_Lime-based\\_Mortar\\_with\\_Added\\_Egg\\_White](https://www.researchgate.net/publication/320738514_Preliminary_Studies_on_the_Development_of_Lime-based_Mortar_with_Added_Egg_White) Lime is among the binding agents used in binding masonry units, such as brick, in many historical buildings around the world. Its physical strength, mechanical strength, and durability properties, as well as its raw material composition, can play substantial roles in the structural behavior of historic buildings. The production technologies may also differ according to their specific use in the structural layout. Hence, the characteristics of lime mortars are of interest in the assessment of the structural characteristics of historic buildings. In addition, the determination of characteristics of lime mortars is also important for the production of intervention mortars to be used in the restoration of historic buildings. This research focused on the effects of egg white on lime mortar's physical and mechanical properties. Five mixes were prepared by maintaining a constant lime-sand-water ratio of 1:2:0.035. As the binder material, the control mixture comprised only lime putty, while various percentages of egg white in the range of 2-10% were used to prepare the remaining mixtures. An experiment was then performed with different percentages of egg white to examine the lime mortar's axial compressive and flexural strength, as well as the water absorption. The results indicated that the compressive and flexural strength of the lime mortar increased with the increasing percentage of egg white added into lime mortar until the mixture reached 6% egg white. The addition of 8% and 10% egg white made the compressive and flexural strength start to decrease. Lime mortar that contains 6% egg white had the highest compressive and flexural strength compared to the other mix design groups. The axial compressive strength and bending strength of lime mortar can also be influenced by the air pores.

78. YONG, Sharon Wen Tin. *Performance of mortar with egg albumen* [en ligne]. 2010. [Consulté le 9 février 2020]. Disponible à l'adresse : <http://portal.ump.edu.my/lib/item?id=chamo:51851&theme=UMP2>This study is to investigate the performance of mortar with 1% and 5% egg albumen. The field of studies covered the important parameters in determining the engineering properties such as compressive and flexural strength and drying shrinkage of egg albumen additive in mortar. It was achieved by compression test and flexural test conducted to determine the highest strength development between samples for 7, 14 and 28 age days of both air and water curing time. There were three types of samples That has been tested, which are mortar containing 1% of egg albumen, 5% of egg albumen and mortar with plain ordinary Portland cement as the control samples. The result obtained showed that the compressive strength for water curing for 100% mortar control samples achieved the highest strength where is it 5.78Mpa and it is 3.58% higher strength than the air cured samples, while mortar with 5% egg albumen achieved 5.02Mpa of strength where it is 9.37% higher than air cured samples. Next it is mortar with 1% egg albumen that achieved 4.64Mpa where it is only 4.71% higher than air cured samples. For flexural test, the result obtained where mortar with 5% egg albumen achieved the highest flexural strength for watercured samples where it is 36.27% higher than the air cured samples, while for mortar with 1% egg albumen has achieved flexural strength of 2.4Mpa for air cured samples, where it is 20.6% higher than the water cured samples. As for 100% mortar control samples has achieved the lowest strength, where it is 1,98Mpa for air cured samples. As for the result achieved from drying shrinkage test, result obtained for air cured samples achieves highest shrinkage if compared with water cured samples. The used of concrete as samples besides mortar is recommended for future works and studies.
79. MIRZABAGHERI, Sara, VATANKHAH, F, ZIAEE, Zeynab, DERHAMJANI, Ghazaleh, MAHARATI, Sahar et ASLANI, H. Performance of Concrete by Using Albumen, Yolk and Milk. *Journal of Applied Engineering Sciences* [en ligne]. mai 2018. Vol. 8, n° 1, pp. 67-72. DOI 10.2478/jaes-2018-0009. Disponible à l'adresse : <http://content.sciendo.com/view/journals/jaes/8/1/article-p67.xml>In ancient structures such as Jabalieh dome at Kerman and Dokhtar Bridge at Mianeh in Iran, it was said that egg and in some cases egg and camel milk were used in the mortar. Thus, it was imagined that the stability of these structures were based on these traditional materials. Therefore egg parts and also camel milk were used as a portion of water in the concrete to evaluate this traditional theory. For this purpose, 16 concrete mix designs included 144 cubes, 16 cylinders and 16 prisms were casted. Various percentages of albumen, yolk or camel milk were used. Results showed that by substituting 0.5% of water content with albumen, compressive strength was similar to control specimen. But splitting tensile strength and three-point flexural strength were 7.2% and 18.9% higher than control specimen, respectively. Moreover, because of camel milk's fat, usage of this material was not suggested.
80. MENGEL, Lena, KRAUSS, Hans-Werner et LOWKE, Dirk. Water transport through cracks in plain and reinforced concrete – Influencing factors and open questions. *Construction and Building Materials* [en ligne]. 10 septembre 2020. Vol. 254, pp. 118990. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118990. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820309958>The main mechanisms for water transport in cementitious materials, diffusion, capillary suction and permeation, are first presented basically related to uncracked concrete and discussed

with regard to their individual mass transport potential. The discussion of transport mechanisms illustrates that crack geometry is a key factor with regard to permeation and durability. However, existing models are based on oversimplified crack geometry assumptions. The effects of concrete mixture, reinforcement, concrete cover, and self-healing are discussed, and measurement techniques on crack geometry are presented. Based on the results, the consideration of effecting factors in parameters for existing transport models is recommended to meet the complexity.

81. LARBI, Bouthaina. *Caractérisation du transport diffusif dans les matériaux cimentaires: influence de la microstructure des mortiers* [en ligne]. Université Paris-Est, 2013. [Consulté le 26 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00966392>
82. FICK, Adolph. V. On liquid diffusion. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [en ligne]. juillet 1855. Vol. 10, n° 63, pp. 30-39. [Consulté le 26 septembre 2020]. DOI 10.1080/14786445508641925. Disponible à l'adresse : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786445508641925>This is an english abstracted version of the article in *Annalen der Physik*
83. CHATTERJI, S. Transportation of ions through cement based materials. Part 1 fundamental equations and basic measurement techniques. *Cement and Concrete Research* [en ligne]. janvier 1994. Vol. 24, n° 5, pp. 907-912. [Consulté le 26 juillet 2020]. DOI 10.1016/0008-8846(94)90010-8. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884694900108>In this paper the fundamental equations of diffusion i.e. Fick's two equations, Nernst and Nernst-Planck equations have been collected. Attention has been drawn to the fact that Fick's two equations are valid for non-ionic diffusants and that for ions the relevant equations are those of Nernst and Nernst-Planck. The basic measurement techniques have also been commented upon. © 1994.
84. STEPHANT, Sylvain. Étude de l'influence de l'hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires. [en ligne]. 2015. DOI 10.13140/RG.2.1.1665.4483. Disponible à l'adresse : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1665.4483>
85. COUTELIERIS, Frank A et DELGADO, J.M.P.Q. *Transport Processes in Porous Media* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. Advanced Structured Materials. ISBN 978-3-642-27909-6. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27910-2>
86. CHEN, Wei. *Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables* [en ligne]. Ecole Centrale de Lille, 2011. [Consulté le 26 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00778621>
87. YEHYA, Mohamad. *Propriétés de transfert dans le béton par imagerie neutronique* [en ligne]. Université Grenoble Alpes (ComUE), 2018. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2018GREAI103>
88. ZHONG, Rui, XU, Man, VIEIRA NETTO, Roberto et WILLE, Kay. Influence of pore

tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. *Construction and Building Materials* [en ligne]. 2016. Vol. 125, pp. 1158-1168. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.060. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.060>A variety of empirical models have been proposed by other researchers correlating hydraulic conductivity to effective porosity for pervious concrete (PC). However, most of these models do not account for the influence of pore tortuosity or require complicated measurements. To quantify the influence of pore tortuosity, PC with different microstructure is proportioned through varying workability of matrix, amount of binder and size of aggregate. A relationship between relative mean pore size and pore tortuosity is proposed and incorporated into the Kozeny-Carman model. The relative mean pore size is defined as the ratio of mean pore size to aggregate size. Mean pore size is derived from the pore size distribution (PSD) extracted from linear path function (LPF) tailored to PC. The modified Kozeny-Carman model is validated by the agreement between predicted and experimentally obtained results.

89. LUCK, Joe D., WORKMAN, Stephen R., HIGGINS, Stephen F. et COYNE, Mark S. Hydrologic properties of pervious concrete. *Transactions of the ASABE* [en ligne]. novembre 2006. Vol. 49, n° 6, pp. 1807-1813. [Consulté le 26 septembre 2020]. DOI 10.13031/2013.21029. Disponible à l'adresse : <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=21029&CID=por2006&T=1>Pervious concrete is concrete made by eliminating most or all of the fine aggregate (sand) in the concrete mix, which allows interconnected void spaces to be formed in the hardened product. These interconnected void spaces allow the concrete to transmit water at relatively high rates. The main objective of this project was to conduct research on the potential application of pervious concrete in agricultural settings, specifically for use in animal feed lots, manure storage pads, animal manure and bedding compost facilities, or floor systems in animal buildings. Laboratory tests were conducted on replicated samples of pervious concrete formed from two rock sources (river gravel and limestone) for coarse aggregates and different size fractions to determine hydrologic relationships. Linear relationships were found between density and porosity, density and permeability, porosity and permeability, and porosity and specific yield. The results suggest that properties such as permeability, porosity, and specific yield are not significantly affected by different aggregate types. However, density and porosity can be effective methods for predicting porosity, specific yield, and permeability. In addition, t-tests were conducted to determine the effect of aggregate types on the solid/liquid separation properties of the pervious concrete after adding composted beef cattle manure and bedding to the surface of the specimens. The amount of composted beef cattle manure and bedding retained within the specimens was significantly less ( $p = 0.012$ ) when samples constructed of #8 river gravel were used rather than the other aggregates. The #8 river gravel also had significantly less reduction in permeability compared to other aggregates. Although the #8 river gravel had a different effect on the compost retained and the reduction in permeability for the specimens, all four aggregates exhibited a significant reduction in the permeability after the compost was applied. © 2006 American Society of Agricultural and Biological Engineers.
90. GHAFORI, Nader et SHIVAJI, Dutta. Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* [en ligne]. 1 août 1995. Vol. 7, n° 3, pp. 183-191. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:3(183). Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1995\)7:3\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:3(183)).

91. NEITHALATH, Narayanan, SUMANASOORIYA, Milani S. et DEO, Omkar. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*. 1 août 2010. Vol. 61, n° 8, pp. 802-813. DOI 10.1016/j.matchar.2010.05.004. Methods of characterizing the pore structure features in a cement-based material with open pore structure, called pervious concrete, and the use of these pore structure features in permeability prediction is the focus of this paper. Porosity of several pervious concrete mixtures is determined using volumetric and area fraction methods whereas stereology and mathematical morphology based methods are used to extract the characteristic pore sizes. The characteristic pore sizes determined using several methods relate well to each other. A Weibull probability distribution function is found to adequately model the pore size distribution in pervious concretes. The values of porosity and the morphologically determined pore sizes, along with the pore phase connectivity represented using an electrical conductivity ratio, are used in a Katz-Thompson type relationship to predict the permeability of pervious concretes. It is shown in this paper that maximization of water transport behavior of pervious concretes is best achieved by increasing the pore connectivity factor. © 2010 Elsevier Inc.
92. HASELBACH, Liv M., VALAVALA, Srinivas et MONTES, Felipe. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*. 1 octobre 2006. Vol. 81, n° 1, pp. 42-49. DOI 10.1016/j.jenvman.2005.09.019. Pervious concrete is an alternative paving surface that can be used to reduce the nonpoint source pollution effects of stormwater runoff from paved surfaces such as roadways and parking lots by allowing some of the rainfall to permeate into the ground below. This infiltration rate may be adversely affected by clogging of the system, particularly clogging or covering by sand in coastal areas. A theoretical relation was developed between the effective permeability of a sand-clogged pervious concrete block, the permeability of sand, and the porosity of the unclogged block. Permeabilities were then measured for Portland cement pervious concrete systems fully covered with extra fine sand in a flume using simulated rainfalls. The experimental results correlated well with the theoretical calculated permeability of the pervious concrete system for pervious concrete systems fully covered on the surface with sand. Two different slopes (2% and 10%) were used. Rainfall rates were simulated for the combination of direct rainfall (passive runoff) and for additional stormwater runoff from adjacent areas (active runoff). A typical pervious concrete block will allow water to pass through at flow rates greater than 0.2 cm/s and a typical extra fine sand will have a permeability of approximately 0.02 cm/s. The limit of the system with complete sand coverage resulted in an effective system permeability of approximately 0.004 cm/s which is similar to the rainfall intensity of a 30 min duration, 100-year frequency event in the southeastern United States. The results obtained are important in designing and evaluating pervious concrete as a paving surface within watershed management systems for controlling the quantity of runoff. © 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.
93. HILSDORF, H et KROPP, Jörg. *Performance criteria for concrete durability*. CRC Press, 2004. ISBN 1482271524. This is a state-of-the-art report prepared by RILEM Technical Committee 116-PCD and is an authoritative, international review of the subject and is an essential reference source for engineers and technologists. Performance

Criteria for Concrete Durability explains key aspects of concrete durability, and the relationships between transport mechanisms and concrete durability characteristics. It reviews test methods for measuring permeability in the laboratory and on site, and discusses the many factors which influence the durability of concrete to carbonation, chlorides, abrasion etc. From Duplicate 2 (Performance {Criteria} for {Concrete} {Durability} - Hilsdorf, H; Kropp, J) Google-Books-ID: P6yp\_9RLqFYC

94. CERNY, Robert et ROVNANIKOVA, Pavla. *Transport Processes in Concrete*. CRC Press, 2002. ISBN 978-0-415-24264-6. *Transport Processes in Concrete* presents a comprehensive survey of the physical and chemical processes and transport mechanisms in concrete, and analyses their significance for the movement of heat, moisture and chemical compounds. A critical analysis of the available mathematical models is given, and from this analysis the most suitable models to describe transport processes in concrete are selected. The authors provide an overview of methods for determining field variables and transport and storage parameters, and demonstrate the practical application of computational modelling of transport processes in the design of concrete structures. This book presents a practical methodology for researchers and practitioners in the field of concrete technology and durability.
95. HALL, Christopher et HOFF, William D. *Water Transport in Brick Stone and Concrete*. 2012.
96. BAROGHEL-BOUNY, Véronique. *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances* [en ligne]. 1994. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00523299> Ce document présente les résultats obtenus pour différents bétons et pâtes de ciment, en ce qui concerne la microstructure, les propriétés hydriques et les déformations de retrait. En particulier, des matériaux à très hautes performances ont été étudiés (formulations avec un faible rapport eau sur ciment, contenant fumée de silice et fluidifiant). De nombreuses techniques expérimentales ont été utilisées à cet effet. Ainsi, les paramètres texturaux ont été déterminés par des méthodes classiques d'investigation de la structure poreuse (intrusion de mercure, adsorption d'azote, ...). Cependant, ces méthodes sont apparues suivant les cas incomplètes ou inadéquates pour fournir les caractéristiques exactes du réseau poreux des pâtes de ciment ou des bétons durcis, notamment dans le cas des matériaux à très hautes performances. La difficulté d'accès à la porosité fine des hydrates (gel C-S-H) est essentiellement responsable des insuffisances de ces méthodes. De plus, le séchage et le dégazage nécessaires, préalablement à la mesure, rendent l'interprétation des résultats délicate. Aussi, un autre type d'expérimentations plus pertinent a été mis en oeuvre : les expériences de désorption et d'adsorption de vapeur d'eau, à partir desquelles ont été obtenues les isothermes, c'est à dire les courbes « Teneur en Eau en fonction de l'Humidité Relative », à l'équilibre, à température constante ( $T = 23\text{ °C}$ ) et pour chaque chemin de désorption/adsorption. L'analyse de ces courbes n'a pas seulement fourni les paramètres de texture (porosité, surface spécifique B.E.T., distribution poreuse,...) dans le domaine des mésopores, non accessible par beaucoup d'autres méthodes, elle a aussi permis l'étude des interactions eau/solide (épaisseur du film liquide adsorbé sur la surface solide, état d'énergie de l'eau des pores, hystérésis, ...). Les cinétiques de transfert d'humidité sont très lentes dans un tel milieu microporeux et elles sont fonction de l'épaisseur de l'échantillon testé ; l'équilibre hydrique a été établi après plusieurs mois avec nos échantillons de quelques millimètres d'épaisseur. La diffusivité a été calculée à partir des courbes de perte (ou gain) de masse

en fonction du temps, pour chaque palier d'humidité relative. Au cours de ces expériences, les déformations hygrométriques ont aussi été mesurées, afin d'évaluer le retrait de dessiccation en fonction de l'humidité relative, et de le comparer au retrait endogène. La caractérisation hydrique a été complétée p...

97. KANEMA, M., MORAIS, M. V. G., NOUMOWE, A., GALLIAS, J. L. et CABRILLAC, R. Experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers in concrete exposed to high temperature. *Heat and Mass Transfer* [en ligne]. 12 octobre 2007. Vol. 44, n° 2, pp. 149-164. DOI 10.1007/s00231-006-0212-9. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00231-006-0212-9>The compressive strength of concrete can be as high as 80 MPa at 28 days. High strength concrete (HSC) can be obtained by decreasing porosity and lowering permeability. Concrete, especially HSC, performs poorly when subjected to fire. This is attributed to high thermal stresses and water vapour pressure. High thermal gradient induces high thermo-mechanical stresses in the concrete system. Low permeability prevents water from escaping and induces high water vapour pressure causing cracking and spalling. The aim of this study is both experimentally and numerically study the coupled heat and mass transfers in concrete exposed to elevated temperature. Five concrete mixtures with various cement contents and water cement ratios of a constant aggregate content were studied before and after heating-cooling cycles. The concrete cylindrical specimens were subjected to several tests: compression and splitting tensile tests, measurement of modulus of elasticity, heating-cooling cycles, thermal field and mass loss during the heating-cooling cycles, and permeability tests. Comparisons between the numerical and experimental results on the thermo-hydrous behaviour were reported. Parametric analyses were carried out in order to underline main parameters involved in concrete behaviour at high temperature. The numerical and experimental results included thermal gradient, water vapour pressure, relative humidity, concrete mass losses due to dehydration, and water content for concrete elements heated from 20 to 600°C. The results show the degrees of damage due to the concrete chemical transformations at high temperature. © 2007 Springer-Verlag.
98. HOMAN, Lydia, ABABNEH, Ayman Nureddin et XI, Yunping. The effect of moisture transport on chloride penetration in concrete. *Construction and Building Materials* [en ligne]. octobre 2016. Vol. 125, pp. 1189-1195. [Consulté le 10 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.124. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816313873>This paper presents results of an experimental investigation on the effect of moisture transport on chloride penetration in partially saturated concrete. The paper includes the development of an experimental setup, analysis of experimental data, and formulation of the governing equations to characterize the moisture-chloride interaction in non-saturated concrete. The experimental setup consisted of two sets of fully and partially saturated concrete specimens that were exposed to chloride solutions. Humidity sensors were embedded in the concrete specimens to measure the internal relative humidity and the variation of humidity profiles over time. The governing equation that describes the chloride transport in saturated concrete was modified to account for the chloride movement induced by the moisture transport. The comparison of the chloride profiles obtained from the partially and fully saturated concrete specimens confirmed the coupling effect between the moisture transport and chloride penetration in concrete. The measured chloride and humidity profiles were analyzed to determine the coupling parameter in the governing equation. The analysis of the experimental data indicated

that the coupling term in the governing equation is concentration dependent which means that the governing equation is nonlinear.

99. GONG, Fuyuan et JACOBSEN, Stefan. Modeling of water transport in highly saturated concrete with wet surface during freeze/thaw. *Cement and Concrete Research* [en ligne]. janvier 2019. Vol. 115, pp. 294-307. [Consulté le 14 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.cemconres.2018.08.013. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618301558> Wet frost exposure is a usual environmental condition for cement-based materials (CBM) during winter and the most common way of frost testing in the lab. In this study, the temperature gradient, pressure gradient, and the liquid flow under wet frost exposure are modeled for highly saturated CBM with different amount of entrained air. It is found that the water uptake happens at the melting stage, and for non-air-entrained CBM, the hydraulic pumping effect is dominant and will suck the water from wet surface. While for air-entrained CBM, the cryosuction pressure is the main driving force of the inward flow. The results are compared with experimental data from rapid freeze/thaw testing of various types of concrete in water, showing a satisfactory agreement. Sensitivity analysis also indicates that the hydraulic induced flow depends on the amount of entrained air, while the cryosuction induced flow mainly relies on the permeability and temperature gradient.
100. MARTYS, Nicos S. et FERRARIS, Chiara F. Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research* [en ligne]. 1 mai 1997. Vol. 27, n° 5, pp. 747-760. [Consulté le 26 juillet 2020]. DOI 10.1016/S0008-8846(97)00052-5. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884697000525> Results are presented of a study concerning capillary transport of water in concretes and mortars as a function of water/cement ratio, sand size distribution, and curing. Our studies indicate that the capillary sorption (1) of water in concrete exhibits a complex time dependence. At early times, of the order of one hour, the total water uptake increased with the  $t_{1/2}$  behavior of typical capillary sorption theories. At longer times, of the order of tens of days, a slow crossover regime is seen as the rate of capillary suction decreases. At very long times, of order hundreds of days, a slower uptake which may be driven by the capillary forces in the smaller gel pores is found. Again the  $t_{1/2}$  behavior is recovered but with a much smaller sorptivity coefficient. We describe an empirical fitting form for data which describes capillary suction at both short and long times. Aspects of the experimental design including sample drying and exposure to air are discussed. The utility of service life predictions from such measurements is discussed. © 1997 Elsevier Science Ltd.
101. EL-HACHEM, R., ROZIÈRE, E., GRONDIN, F. et LOUKILI, A. Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack. *Cement and Concrete Research* [en ligne]. octobre 2012. Vol. 42, n° 10, pp. 1327-1335. [Consulté le 22 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.cemconres.2012.06.005. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884612001548> This work aims to contribute to the design of durable concrete structures exposed to external sulphate attacks (ESA). Following a preliminary study aimed at designing a representative test, the present paper suggests a study on the effect of the water-to-cement (w/c) ratio and the cement composition in order to understand the degradation mechanisms. Length and mass measurements were registered continuously, leached calcium and hydroxide ions

were also quantified. In parallel, scanning electron microscopy observations as well as X-ray microtomography were realised at different times to identify the formed products and the crack morphology. Test results provide information on the basic aspects of the degradation mechanism, such as the main role of leaching and diffusion in the sulphate attack process. The mortar composition with a low w/c ratio leads to a better resistance to sulphate attack because the microstructure is less permeable. Reducing the C 3A content results in a macro-cracking decrease but it does not prevent expansion, which suggests the contribution of other expansive products, such as gypsum, in damage due to ESA. The observation of the cracks network in the microstructure helps to understand the micro-mechanisms of the degradation process. © 2012 Elsevier Ltd.

102. LEI, Mingfeng, PENG, Limin, SHI, Chenghua et WANG, Shuying. Experimental study on the damage mechanism of tunnel structure suffering from sulfate attack. *Tunnelling and Underground Space Technology* [en ligne]. juin 2013. Vol. 36, pp. 5-13. [Consulté le 22 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.tust.2013.01.007. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779813000163>The function of tunnels is degraded due to sulfate ambient, which has spread widely in Western China. The characteristics of tunnel concrete damage, development of cracks, structure deformation, and the safety factor of tunnel liner suffering from sulfate attack are studied in this work using field investigation and laboratory tests. The main damage styles of tunnel lining structure included structure cracking, spalling, leakage filtration, degradation, and corrosion. These indicate that either physical damage by crystal erosion or chemical dissolution damage - or both - may have occurred. They appeared in the liners with weak waterproof ability, poor compaction, and high hydraulic gradient. The crack of the tunnel liner first developed at the vault, and there were more cracks at the vault than in other places when the load was high. Crack width and structure deformation increased with load and erosion time as exponential functions, whereas the safety factor was reduced as a negative exponential function. © 2013 Elsevier Ltd.
103. CEFIS, N. et COMI, C. Damage modelling in concrete subject to sulfate attack. *Frattura ed Integrità Strutturale* [en ligne]. juillet 2014. Vol. 8, n° 29, pp. 222-229. [Consulté le 9 septembre 2020]. DOI 10.3221/IGF-ESIS.29.19. Disponible à l'adresse : <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/IGF-ESIS.29.19>In this paper, we consider the mechanical effect of the sulfate attack on concrete. The durability analysis of concrete structures in contact to external sulfate solutions requires the definition of a proper diffusion-reaction model, for the computation of the varying sulfate concentration and of the consequent ettringite formation, coupled to a mechanical model for the prediction of swelling and material degradation. In this work, we make use of a two-ions formulation of the reactive-diffusion problem and we propose a bi-phase chemo-elastic damage model aimed to simulate the mechanical response of concrete and apt to be used in structural analyses.
104. QIN, Shanshan, ZOU, Dujian, LIU, Tiejun et JIVKOV, Andrey. A chemo-transport-damage model for concrete under external sulfate attack. *Cement and Concrete Research* [en ligne]. juin 2020. Vol. 132, pp. 106048. [Consulté le 9 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106048. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884619308919>Sulfate-induced deterioration can reduce the service life of a concrete structure. A coupled chemo-transport-damage model for external sulfate attack is developed, which predicts the effects of calcium leaching and temperature on the deterioration processes. Specifically,

calcium leaching is described using a solid–liquid equilibrium curve, and temperature effects are included in the creation of a temperature gradient and in the rates of chemical reactions, calcium leaching, and ion transport. The model is validated using published experimental results, and the effects of calcium leaching and temperature on expansion are analyzed. The results show that model predictions agree well with the available experimental data. One conclusion is that calcium leaching has a strong effect on deterioration, and therefore should be included when modeling external sulfate attack. Temperature influences sulfate attack, but a more substantial conclusion about the effect of temperature requires further experimental evidence.

105. YU, Yuguo, ZHANG, Y. X. et KHENNANE, Amar. Numerical modelling of degradation of cement-based materials under leaching and external sulfate attack. *Computers and Structures* [en ligne]. octobre 2015. Vol. 158, pp. 1-14. [Consulté le 22 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.compstruc.2015.05.030. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794915001765A> A finite element model is developed in this paper to simulate the degradation of cement-based materials when subjected to aggressive agents, including deionized water and sodium sulfate solutions. The proposed model includes three main modules, i.e. the ionic diffusion module, the chemical reaction module, and the damage quantification module. A modified Poisson-Nernst-Planck model is developed to model the diffusion of multiple ions in the ionic diffusion module. The cracking suction effect is accounted for the suction action caused by newly-formed unsaturated cracks with potential to accelerate the entire diffusion process. In the chemical reaction module, chemical interactions between ions and cement hydration products are solved based on a local equilibrium assumption. Different approaches in dealing with the simulation of the decalcification process of ill-crystallized Calcium Silicate hydrate (C-S-H) are discussed. The entire reactive diffusion mechanism is achieved by using the operator splitting approach to couple the ionic diffusion and the chemical modules. In the damage quantification module, the diffusivities of material are evaluated at the end of each time step based on the change of porosity and propagation of cracking. Two mechanisms of precipitation of hydration products, i.e. through-solution and topochemical reactions, are discussed in the light of their distinct contributions to the cracking propagation. The proposed model is applied to model the experiments reported in the literature and the computed results are also compared with those obtained from other available models. It is found that the results obtained from the proposed model agree very well with those from experiments and generate more accurate predictions than other models.
106. YIN, Guang Ji, ZUO, Xiao Bao, SUN, Xiang Hua et TANG, Yu Juan. Macro-microscopically numerical analysis on expansion response of hardened cement paste under external sulfate attack. *Construction and Building Materials* [en ligne]. mai 2019. Vol. 207, pp. 600-615. [Consulté le 22 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.159. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819304544A> macro-microscopically chemo-mechanical model has been proposed to numerically investigate the expansion response of hardened cement paste (HCP) under external sulfate attack (ESA). In this model, a saturated HCP specimen and a representative volume element (RVE) are regarded as macro- and microscopic objects. At the macroscale, the sulfate diffusion and expansion response in HCP are described by using Fick's law and continuum mechanics. At the microscale, the growth of sulfate products and its induced mechanical response in RVE are characterized by using reaction kinetics and

microporomechanics. Meanwhile, the macro-micro transition of relevant parameters, such as sulfate concentration, mechanical property, and expansive eigenstrain, is constructed to bridge the relationship between the macro and micro scales. Numerical simulation on expansion response of a HCP cylinder immersed in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution is performed. Results show that, there exist some differences in the macro- and microscopic expansion responses induced by the growth of sulfate products in the pore, and the microscopic hoop tensile stress is responsible for the initiation and propagation of microcracks in the cement paste.

107. GU, Chun ping, YE, Guang et SUN, Wei. A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations. *Journal of Zhejiang University: Science A* [en ligne]. février 2015. Vol. 16, n° 2, pp. 81-92. [Consulté le 10 septembre 2020]. DOI 10.1631/jzus.A1400247. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400247> Chloride transport property is very important for the durability and service life of reinforced concrete structures subjected to marine environments and de-icing salt. In reality, for different reasons, concrete structures are frequently cracked, and cracks can alter the chloride transport properties of concrete. Recently, several studies have been conducted by both experiment and simulation on the influence of cracks on the chloride transport properties of concrete. The aim of this paper is to review these research efforts. The experimental methods and simulation approaches on the chloride transport properties of cracked concrete are introduced. Detailed discussions on the findings from these experimental and simulation studies are given. The chloride transport properties of cracked concrete are influenced by various factors, such as crack geometry, concrete composition, and load condition. Research in this area is still on-going, and many problems need to be settled before proposing reliable models for predicting the service life of real cracked concrete structures in chloride environments. Hence, some further research topics are recommended. The influences of other factors, such as carbonation, freeze-thaw, fatigue, and saturation degree, on the transport properties of cracked concrete should be revealed.
108. SOUCHU, AuthorPhilippe. *Les chlorures dans le béton* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <http://doc.lerm.fr/les-chlorures-dans-le-beton/>
109. CHALABI, Hayet, BEZZAR, Abdelillah et KHELIDJ, Abdelhafid. Chloride transport on partially saturated Concrete media: The influence of the hydric state. *Energy Procedia* [en ligne]. décembre 2017. Vol. 139, pp. 367-372. [Consulté le 10 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.egypro.2017.11.223. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217356345> Transport of chloride in unsaturated concrete media is largely controlled by various phenomena occurring during the kinetics of the penetration of the ions chlorides within this media. This article studies the influence of the hydric rate of cementitious material on the penetration of chlorides. This transfer test was performed which insures an optimal contact of the material with a chloride solution without perturbing the hydric state of the material during these tests and by taking into account the fixation of chlorides on the matrix materiel. The results showed the important effect of the rate of saturation on the chlorides transfer and fixation.
110. NEVILLE, Adam M. *Properties of concrete*. 5th ed. Pearson, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.

111. HARRIS, A. W., ATKINSON, A. et CLAISSE, P. A. Transport of gases in concrete barriers. *Waste Management* [en ligne]. 1 janvier 1992. Vol. 12, n° 2-3, pp. 155-178. [Consulté le 26 juillet 2020]. DOI 10.1016/0956-053X(92)90046-L. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0956053X9290046L>The performance of the cementitious materials within a radioactive waste repository as a physical barrier to the migration of radionuclides depends on the maintenance of the integrity of the barrier. One mechanism which can potentially compromise the behaviour of a repository is physical damage to the barrier caused by pressurisation as gas is generated. The maintenance of chemical homogeneity within the material used for backfilling the repository may also be compromised as a consequence of gas pressurisation through the formation of additional cracks and the reaction of cementitious materials with gases such as carbon dioxide. Consequently, the migration of gas within repository construction materials may be a significant parameter in both the design of a repository and the provision of a safety case for disposal. The migration of hydrogen, helium, methane, argon, and carbon dioxide have been studied for materials selected to be typical of repository structural concretes and grouts that are being considered for both repository backfilling and waste encapsulation and solidification. The apparent permeability of these materials to gas has been shown to be dependent on gas type and average pressure in the structural concrete due to the effects of Knudsen flow at pressures of the order of 100 kPa. This is not observed in the grouts due to the significantly greater pore size. The permeability coefficients for the grouts are several orders of magnitude greater than those of the concrete. Gas migration is strongly influenced by the degree of water saturation of the materials. The presence of interfaces within the materials results in an increase in permeability at higher degrees of water saturation. A simple model has been developed to simulate the effects of gas pressurisation. The tangential hoop stress at the surface of a void is calculated and comparison with the expected tensile strength of the materials is used to assess the potential for cracking. The backfill grouts seem to have sufficient permeability to disperse gas without crack formation. © 1992.
112. THIERY, M. Modelisation de la carbonatation atmospherique des materiaux cimentaires: Prise en compte des effets cinetiques et des modifications microstructurales et hydriques. *ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES - SERIE OUVRAGES D'ART* [en ligne]. mars 2006. N° OA 52. [Consulté le 14 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://trid.trb.org/view/942339>
113. HUSSAIN, Raja Rizwan, ISHIDA, Tetsuya et WASIM, Muhammad. Oxygen transport and corrosion of steel in concrete under varying concrete cover, w/c, and moisture. *ACI Materials Journal* [en ligne]. 2012. Vol. 109, n° 1, pp. 3-10. [Consulté le 14 septembre 2020]. DOI 10.14359/51683565. Disponible à l'adresse : <http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=51683565>This study aims to verify the detailed experimentation and electrochemical mass balance modeling of corrosion in reinforced concrete under the effect of varying oxygen concentrations. Various concrete corrosion cells with different compositions under four different environmental conditions (air dry, submerged, 95% relative humidity [RH], and alternate wetting and drying) were investigated under controlled laboratory conditions. Using the results (half-cell potential and gravimetric corrosion mass loss) of these laboratory tests and a constitutive equivalent electrochemical circuit model based on mass and energy transfer through the porous

media for the corrosion process, it was possible to predict the influence of oxygen concentration on the corrosion rate of the reinforcement under various defined conditions. The variation in oxygen concentration available for the corrosion reaction was taken into account, simulating the actual field conditions, such as varying the concrete cover depth, RH, and water-cement ratio (w/c). The modeling task was incorporated by the use of the concrete durability model as a finite element computational approach for the effect of oxygen on corrosion in relation to the w/c, concrete cover, chloride concentration, and various environmental humidity conditions. This comprehensive modeling and experimental investigation involving a variety of materials and environmental variables will help in the understanding of oxygen-controlled corrosion reaction in reinforced concrete structures and will provide significant future research prospects in the field of oxygen-limiting corrosion modeling of steel-reinforced concrete. Copyright © 2012, American Concrete Institute. All rights reserved.

114. ODEH, Abdalla M., ABU-EL-SHA'R, Wa'il et AL-RUZOUQ, Rami. Gas transport through concrete slabs. *Building and Environment* [en ligne]. avril 2006. Vol. 41, n° 4, pp. 492-500. [Consulté le 10 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.02.004. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305000764>The ability of mat slabs (foundations) to shield in-door air space from contaminants vapor or/and gaseous pollutants migration from the subsurface has been explored. An expert system that employs the Dusty Gas Model (DGM) has been developed to assess the steady state, isothermal, and isobaric gas transport through concrete mat foundations. The DGM combines different gas transport flux mechanisms, such as the molecular, Knudsen, non-equimolar and viscous fluxes. The gaseous system has been modeled as a ternary system composed of the pollutant gas mixed with natural air components of Oxygen (O<sub>2</sub>) and Nitrogen (N<sub>2</sub>). Results indicate that the contaminant vapor flux is strongly affected by the water content's cement ratio and the radius of pores. For water cement ratio less than 0.6, capillary pores are not connected and diffusion through the gel pores is dominant. For water cement ratio greater than 0.6, capillary pores are connected and occupy a major part of cement paste and control diffusion. The effect of increasing radius of pores on total fluxes has been found negligible when Knudsen diffusion becomes insignificant compared to molecular diffusion. Also, Fick's law of diffusion has been found inadequate to study gaseous flux for small pores in which the Knudsen diffusion is significant. © 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.
115. CULOT, Michel V.J., OLSON, Hilding G. et SCHIAGER, Keith J. Effective diffusion coefficient of radon in concrete, theory and method for field measurements. *Health Physics* [en ligne]. mars 1976. Vol. 30, n° 3, pp. 263-270. [Consulté le 11 septembre 2020]. DOI 10.1097/00004032-197603000-00002. Disponible à l'adresse : [https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1976/03000/Effective\\_Diffusion\\_Coefficient\\_of\\_Radon\\_in.2.aspx](https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1976/03000/Effective_Diffusion_Coefficient_of_Radon_in.2.aspx)A linear diffusion model serves as the basis for determination of an effective radon diffusion coefficient in concrete. The coefficient was needed to later allow quantitative prediction of radon accumulation within and behind concrete walls after application of an impervious radon barrier. A resolution of certain discrepancies noted in the literature in the use of an effective diffusion coefficient to model diffusion of a radioactive gas through a porous medium is suggested. An outline of factors expected to affect the concrete physical structure and the effective diffusion coefficient of radon through it is

also presented. Finally, a field method for evaluating effective radon diffusion coefficients in concrete is proposed and results of measurements performed on a concrete foundation wall are compared with similar published values of gas diffusion coefficients in concrete. © 1976 Health Physics Society.

116. HUBERTY, Jean-Marie. *ABC du ciment et du béton* [en ligne]. 2ème. FEBELCEM, 2005. Disponible à l'adresse : <https://www.febelcem.be/fr/publications/abc-du-ciment-et-du-beton/>
117. JHATIAL, Ashfaque Ahmed, SOHU, Samiullah, MEMON, Muhammad Jaffar, BHATTI, Nadeem-ul-Karim et MEMON, Darya. Eggshell powder as partial cement replacement and its effect on the workability and compressive strength of concrete. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES* [en ligne]. septembre 2019. Vol. 6, n° 9, pp. 71-75. [Consulté le 25 septembre 2020]. DOI 10.21833/ijaas.2019.09.011. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencegate.com/IJAAS/2019/V6I9/1021833ijaas201909011.html> Concrete is the most preferred building material in the world and its production has increased exponentially with the rapid construction of infrastructures. The generation of waste materials has also increased due to rapid urbanization. Eggshell is one such solid waste material which is being generated in huge quantity due to it being a cheap source of nutrition. Cement, the vital ingredient of concrete has been reported to contribute approximately 7% of total global Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) gas emissions. This experimental study was carried out to study the workability and compressive strength of M40 grade concrete incorporating Eggshell Powder (ESP) as supplementary cementitious material, to reduce the cement content in concrete. ESP was ground into two fineness (50 µm and 100 µm) and three different percentages (5%, 10% and 15% by weight of cement) of ESP was used to replace cement content. It was observed that partial cement replacement using ESP was successful in achieving higher strength compared to the control sample. It was determined that 10% ESP was optimum, where the highest compressive strength was achieved. Furthermore, the fineness of ESP also had an influence on the compressive strength, the ESP which passed 50 µm resulted in better strength. The optimum ESP to be utilized was determined to be 10% in both fineness.
118. CREE, Duncan et PLIYA, Prosper. Effect of elevated temperature on eggshell, eggshell powder and eggshell powder mortars for masonry applications. *Journal of Building Engineering* [en ligne]. 2019. Vol. 26, pp. 100852. [Consulté le 14 février 2020]. DOI 10.1016/j.jobbe.2019.100852. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219302086> Eggshell powder (ESP) may be an alternative natural sustainable supplementary cementitious material (SCM). Mortar specimens containing 0, 5, 10 and 20 wt. % of ESP as Portland cement replacements were submitted to 20, 150, 300 and 450°C. To gain a better understanding of the organic membranes bonded to the eggshell/ESP, digital images, scanning electron microscopy (SEM) and thermo-gravimetric analysis (TGA) were used after heating of eggshells and ESP. The residual mortar weight loss, porosity, compressive and flexural strengths were determined and compared to the unheated samples. For all temperatures, significant color changes occurred for the eggshells and ESP (e.g. white, pale yellow, light brown and black/gray as temperature increased). SEM showed the interior of the eggshell membranes were not present after 450°C. TGA showed the processed ESP did not contain high amounts of organic membrane. The reduction in compressive and flexural strengths of ESP mortars at room temperature ranged from 21-50% and 8-39%,

respectively in contrast to mortars without ESP, while the residual ESP mortar strengths remained below the control. The results showed ESP can be used in amounts up to 20 wt. % as an alternative SCM in mortar applications and still be within the ASTM standard 28-day compressive strength requirements.

119. LERTWATTANARUK, Pusit, MAKUL, Natt et SIRIPATTARAPRAVAT, Chalothorn. Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. *Journal of Environmental Management* [en ligne]. novembre 2012. Vol. 111, pp. 133-141. [Consulté le 23 septembre 2020]. DOI 10.1016/j.jenvman.2012.06.032. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712003477>In this research, four types of waste seashells, including short-necked clam, green mussel, oyster, and cockle, were investigated experimentally to develop a cement product for masonry and plastering. The parameters studied included water demand, setting time, compressive strength, drying shrinkage and thermal conductivity of the mortars. These properties were compared with those of a control mortar that was made of a conventional Portland cement. The main parameter of this study was the proportion of ground seashells used as cement replacement (5%, 10%, 15%, or 20% by weight). Incorporation of ground seashells resulted in reduced water demand and extended setting times of the mortars, which are advantages for rendering and plastering in hot climates. All mortars containing ground seashells yielded adequate strength, less shrinkage with drying and lower thermal conductivity compared to the conventional cement. The results indicate that ground seashells can be applied as a cement replacement in mortar mixes and may improve the workability of rendering and plastering mortar. © 2012 Elsevier Ltd.
120. TIONG, Hock Yong, LIM, Siong Kang, LEE, Yee Ling et LIM, Jee Hock. Engineering Properties of 1200 kg/m Lightweight Foamed Concrete with Egg Shell Powder as Partial Replacement Material of Cement. *E3S Web of Conferences* [en ligne]. 2018. Vol. 65, pp. 2010. [Consulté le 14 février 2020]. DOI 10.1051/e3sconf/20186502010. Disponible à l'adresse : [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/40/e3sconf\\_iccee2018\\_02010/e3sconf\\_icce\\_e2018\\_02010.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/40/e3sconf_iccee2018_02010/e3sconf_icce_e2018_02010.html)This study presents the effects of egg shell powder on lightweight foamed concrete when partially replace the cement. At 2017, 12235 million eggs were consumed and around 85 thousand tonnes of egg shell waste was the yield in Malaysia. The waste might result in an environmental problem if it is not reused properly. Besides, large cement production also results in carbon dioxide emission and depletion of natural limestone. Therefore, studies on effects of egg shell powder on properties of lightweight foamed concrete as partial replacement of cement is attractive to be carried out by aiming to promote the application of lightweight foamed concrete as well as to mitigate the environmental issue by reducing the number of eggshell wastes and pure cement production. The objective of this study is to investigate the effects on engineering properties of lightweight foamed concrete with a fresh density of  $1200 \pm 50$  kg/m<sup>3</sup> when the cement is partially replaced by egg shell powder at replacement levels of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% by mass. The properties of the lightweight foamed concrete studied included workability, stability, compressive strength, flexural strength, water absorption, and sorptivity. The results show that the replacement of egg shell powder reduces the spread diameter, stability, and sorptivity, and improve the compressive and flexural strengths at replacement level of up to 5%. The eggshell powder is feasible to be used as partial cement replacement material for the production of the masonry unit.