

République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université Mohamed El-Bachir

جامعة محمد البشير الابراهيمي

El-Ibrahimi Bordj bou-arreridj

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté Des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة المدنية

Département Génie civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

Thème

**Effet de l'eau magnétisée sur les propriétés
physico-mécaniques du mortier de ciment**

Présenté par :

- Bouhcida Youssef

- Leziar Miloud

Encadré par :

Dr. Layachi GUELMINE

Année universitaire : 2019-2020

RESUME

L'eau est indispensable à la vie de tout organisme sur terre. Toutes les plantes et les animaux sont composés en grande partie d'eau. 60% du poids de notre corps est constitué d'eau. L'eau, couvre environ 71 % de la surface de la terre. 97.2% de l'eau sur terre est constituée d'eau de mer, 2.15% de glace et seulement 0.65% d'eau douce directement utilisable.

Dans notre système d'approvisionnement en eau, cependant, l'eau est collectée et forcée à travers les pipelines sous pression. A ce stade, l'eau subit une grave agression pour la première fois. Les hautes pressions... sont très préjudiciables au liquide. L'eau est ensuite contaminée par l'ajout de puissantes produits chimiques tels que le chlore. Donc, le temps que cette eau arrive dans nos robinets, elle aura perdu beaucoup de ces propriétés physico-chimiques vitales (l'eau morte).

Dans ce travail, nous avons réalisé une large recherche bibliographique sur les matériaux cimentaires : Constituants du béton et mortiers: Granulats, Ciment, eau. Nous avons défini les propriétés physico-mécaniques essentielles. Pour la partie pratique et à cause d'épidémie de COVID-19 et de la fermeture du laboratoire nous avons limité cette étude à des recherches récentes pour conclure une synthèse bibliographique sur l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés de mortier ou de béton tel que les propriétés fraîches : consistance ou l'ouvrabilité, propriétés physiques : temps de fin et de début de prise et propriétés mécaniques : résistance à la compression, à la flexion ou à la traction.

Lorsque nous avons préparé des matériaux cimentaires (bétons ou mortiers), nous avons besoin de l'eau pour la réaction d'hydratation de ciment. Les réactions du ciment Portland en présence d'eau ou "hydratation" produisent des composés hydratés qui permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulats ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. La dynamique des réactions d'hydratation va dépendre de nombreux facteurs tels que les propriétés physico-chimiques des constituants notamment la qualité de l'eau de gâchage.

La magnétisation de l'eau de gâchage de béton est l'opération par laquelle on restitue à l'eau ses qualités énergétiques et vitales. Une eau restructurée est une eau qui a retrouvé sa vitalité, donc la puissance de son champ électro magnétique lui permettant de recréer des liens ou structures caractérisant l'eau vivante qui augmente le rendement de la réaction d'hydratation. Cette nouvelle technologie très peu définie assure une magnétisation de l'eau le rendant vital. Afin de mieux comprendre cette nouvelle notion, l'objet de cette étude consiste à évaluer les effets de l'eau magnétisée sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires gâchés avec cette eau.

Mots clés : eau magnétisée ; eau de robinet ; hydratation de ciment ; mortier ; propriétés physico-mécaniques.

ABSTRACT

Water is essential for the life of any organism on earth. All plants and animals are largely water. 60% of our body weight is made up of water. Water covers about 71% of the earth's surface. 97.2% of the water on earth is made up of sea water, 2.15% of ice and only 0.65% of directly usable fresh water.

In our water supply system, however, water is collected and forced through pipelines under pressure. At this point, the water is under severe assault for the first time. High pressures... are very damaging to the liquid. The water is then contaminated by the addition of powerful chemicals such as chlorine. So by the time this water gets to our taps, it will have lost many of these vital physicochemical properties (dead water).

In this work, we carried out a large bibliographical research on cementitious materials: Constituents of concrete and mortars: Aggregates, Cement, water. We have defined the essential physico-mechanical properties. For the practical part and because of the COVID-19 epidemic and the laboratory closure we have limited this study to recent research to conclude a bibliographical synthesis on the effect of magnetized water on the properties of mortar or concrete. such as fresh properties: consistency or workability, physical properties: time to end and start of setting and mechanical properties: compressive strength, bending or traction.

When we have prepared cementitious materials (concrete or mortar), we need the water for the cement hydration reaction. The reactions of Portland cement in the presence of water or "hydration" produce hydrated compounds which make it possible to bind the various particles of cement and aggregate, which gives concrete these qualities of mechanical resistance. The dynamics of the hydration reactions will depend on many factors such as the physicochemical properties of the constituents, in particular the quality of the mixing water.

The magnetization of the concrete mixing water is the operation by which the water is restored to its energetic and vital qualities. Restructured water is water that has regained its vitality, therefore the power of its electromagnetic field allowing it to recreate links or structures characterizing living water which increases the smoothness of the hydration reaction. This new, very undefined technology magnetizes the water, making it vital. In order to better understand this new concept, the object of this study is to assess the effects of magnetized water on the physico-mechanical properties of cementitious materials mixed with this water.

Keywords: magnetized water; tap water ; hydration of cement; mortar; physico-mechanical properties.

ملخص

الماء ضروري لحياة أي كائن حي على الأرض. جميع مكونات النباتات والحيوانات عبارة عن ماء إلى حد كبير. يتكون 60% من وزن الجسم من الماء. يغطي الماء حوالي 71% من سطح الأرض. 97.2% من المياه الموجودة على الأرض تتكون من مياه البحر ، و 2.15% من الجليد و 0.65% فقط من المياه العذبة الصالحة للاستخدام المباشر.

ومع ذلك ، في نظام إمدادات المياه ، يتم جمع المياه ودفعها عبر خطوط الأنابيب تحت الضغط. في هذه المرحلة تتعرض المياه لاعتداء شديد لأول مرة للضغوط العالية التي تتأثر بالسائل. يتلوث الماء بعد ذلك بإضافة مواد كيميائية قوية مثل الكلور. لذا مع الوقت الذي تصل فيه هذه المياه إلى الحنفيات، ستكون قد فقدت العديد من هذه الخصائص الفيزيائية والكيميائية الحيوية (الماء الميت).

في هذا العمل ، أجرينا بحثاً ببلوغرافياً كبيراً على المواد الأسمنتية: مكونات الخرسانة والملاط: الركام ، الأسمنت ، الماء. وحددنا الخصائص الفيزيائية الميكانيكية الأساسية. أما بالنسبة للجزء العملي وبسبب وباء COVID-19 حيث تم إغلاق المخابر ، فقد اقتصرنا هذه الدراسة على الأبحاث السابقة لاستخلاص بحث ببلوغرافي حول تأثير الماء الممغنط على خصائص الملاط أو الخرسانة. مثل الخصائص : الاتساق أو قابلية التشغيل ، الخصائص الفيزيائية: وقت بدء نهاية الإعداد والخصائص الميكانيكية: مقاومة الضغط أو الانحناء أو الشد.

عندما نجهز المواد الأسمنتية (الخرسانة أو الملاط) ، نحتاج إلى الماء لتفاعل ترطيب الأسمنت. تنتج تفاعلات الأسمنت البورتلاندي في وجود الماء مركبات مميهة تجعل من الممكن ربط جزيئات الأسمنت والركام المختلفة ، مما يعطي الخرسانة هذه الصفات المقاومة الميكانيكية. ستعتمد ديناميكيات تفاعلات الماء على العديد من العوامل مثل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمكونات ، لا سيما جودة ماء الخلط.

إن مغنطة مياه خلط الخرسانة هي العملية التي يتم من خلالها استعادة الماء لصفاته الحيوية . الماء المعاد هيكلته هو الماء الذي استعاد حيويته ، وبالتالي فإن قوة مجاله الكهرومغناطيسي تسمح له بإعادة الروابط أو الهياكل التي تميز المياه الحية مما يزيد من نعومة تفاعل الماء. هذه التكنولوجيا الجديدة غير المحددة للغاية تجذب المياه وتجعلها حيوية. من أجل فهم هذه الفكرة الجديدة بشكل أفضل ، فإن الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثيرات الماء الممغنط على الخواص الفيزيائية الميكانيكية للمواد الإسمنتية الممزوجة بهذا الماء.

الكلمات المفتاحية : المياه الممغنطة. ماء الحنفية ، ترطيب الأسمنت ، ملاط الاسمنت؛ الخصائص الفيزيائية الميكانيكية.

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné l'audace pour dépasser toutes les difficultés, ainsi que la force pour arriver à achever ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre encadreur : Dr Layachi GUELMINE pour nous avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il a accordée de nous avoir aidé et guidé durant notre projet

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs de département de génie civil et les responsables du laboratoire qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous remercions tous les gens qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Bouhcida Youssef

Leziar Miloud

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A ma grande et petite famille.

A mon Binôme Youssef qui a fournie
tant d'efforts et à toute sa famille.

A toute mes amis sans exception.

A toute la promotion du Master génie civil 2019-2020.

A tous personne ayant contribué à ce travail de près ou de loin.

Leziar Miloud

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mon Père Allah yarahmo

A la lumière de mes jours, source de mes efforts, Maman que j'adore

A toutes mes frères, sœurs et leurs enfants ici au bled et à l'étranger

A ma femme et mon fils ``**Abdelghafour**``

A mon cher binôme Miloud qui a fait un effort géant et a toute sa famille

A tous mes amis sans exception

A toute la promotion du Master génie civil 2019/2020.

Bouhcida Youssef

Liste des figures

Figure I.1 : Granulats roulés (arrondis et polis).....	6
Figure I .2 : Granulats concassés (de carrières).....	6
Figure II.1 : L'eau de gâchage.....	22
Figure II.2 : Représentation schématique de la solvataion par des molécules d'eau.....	26
Figure II.3 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté.....	28
Figure II.4 : les étapes du durcissement de la pâte de ciment.....	30
Figure II.5 : mesure de consistance avec l'appareil de Vicat.....	31
Figure II.6 : résistance du béton en fonction du nombre de jours de séchage.....	32
Figure II.7 : l'influence de la température extérieure sur la progression des résistances.....	33
Figure II.8 : Structure du ciment durci selon le modèle de Feldman et Sereda;1968].....	34
Figure II.9 : Processus de l'hydratation. A) état initial B) Recouvrement des grains de ciment	36
Figure II.10 : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau.	37
Figure.II.11 : Phénomène de capillarité : plus le tube est fin, plus le liquide s'élève.....	39
Figure III.1 : Mécanisme de l'eau magnétisée.....	46
Figure III.2. La structure de l'eau dynamisée en micromolécules.....	47
FigureIII.3 : Cristaux de Masaru Emoto (Médecin chercheur Japonais) (Emoto, 1999).....	47
Figure III.4 : Disposition des molécules d'eau après une exposition à un champ magnétique.	48
Figure III.5 : les changements dans l'eau magnétisée.....	49
Figure III.6 : Relation entre résistance à la compression et écoulement de l'eau.....	53
Figure III.7 : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse de l'eau.....	53
Figure III.8 : Relation entre la résistance à la compression et le temps de magnétisation.....	54
Figure III.9 : Changement du niveau de plasticité dans le béton frais.....	55
Figure III.10 : Variation de la résistance des échantillons avec la force de MFTW.....	58
Figure III.11 Absorption d'eau à différentes forces de MFTW.....	58
Figure III.12 : Porosité à différentes forces de MFTW.....	59
Figure III.14 : Graphique de comparaison de la sorptivité des échantillons de béton.....	60

Liste des Tableaux

Tableau I.1: les familles de granulats.....	7
Tableau I.2 : Dosage par m ³ de sable dans les mortiers.....	15
Tableau II.1 : Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment d'après.....	36
Tableau III.1: Propriétés physiques du ciment	51
Tableau III.2: Détails et propriétés des échantillons testés.....	52
Tableau III.3: Résultat des échantillons testés.....	53
Tableau III.4 : Résultat des échantillons testés	54
Tableau III.5 : Proportion de mélange d'essai pour 1m ³ de béton.....	57
Tableau III.6 : Résistance à la compression du béton.....	57
Tableau III.7 : Absorption d'eau de l'échantillon.....	58
Tableau III.8 : Porosité de l'échantillon de béton.....	59

Sommaire

Résumé.....	I
ABSTRACT.....	II
ملخص.....	III
Remerciements.....	IV
Dédicaces.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des Tableaux.....	VIII
Sommaire.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les matériaux cimentaires	2
Introduction.....	2
I.1- Les constituants cimentaires :.....	2
I.1.1- Ciment :	2
I.1.1.1-Constituants du ciment.....	2
I.1.1.1.2- Clinker.....	3
I.1.1.1.3- Gypse.....	3
I.1.1.1.4- Laitier de haut fourneau.....	4
I.1.1.1.5- Cendres volantes.....	4
I.1.1.1.6- Pouzzolanes.....	4
I.1.1.1.7- Les fillers.....	5
I.1.2- Les Granulats :.....	5
I.1.2.1- Définition :.....	5
I.1.2.2- Classification des granulats selon la provenance :.....	5
I.1.2.3-Classification des granulats selon la grosseur :.....	6
I.1.2.4-Désignation des granulats :.....	7
I.1.2.5-Propriétés importantes des granulats intervenants dans la composition des bétons :	7
I.1.3-Eau :.....	9
I.2. Les mortiers :.....	10
I.2.1. Historique :.....	10
I.2.2.Définition.....	10
I.2.3.Fonction des mortiers :.....	11
I.2.4.Caractéristiques essentielles :.....	11
I.2.5.Propriétés des mortiers :.....	12
I.2.5.1.Mortiers plastiques.....	12

I.2.5.2. Mortier durci :.....	12
I.2.6. Les emplois des mortiers :.....	13
I.2.6.1. les joints de maçonneries.....	13
I.2.6.2. Les enduits :.....	13
I.2.6.3. Les chapes :.....	13
I.2.6.4. Les scellements et les calages.....	14
I.2.6.5. Les coulis :.....	14
I.2.7. Les techniques particulières de mise en œuvre :.....	14
I.2.7.1. La projection :.....	14
I.2.7.2. L'injection :.....	15
I.2.8. Dosage des mortiers.....	15
I.2.8.1. Mortiers de portland.....	15
I.2.8.2. Mortiers bâtards.....	16
I.3- Propriétés physico-mécaniques essentielles des matériaux cimentaires :.....	16
I.3.1- Propriétés mécaniques :.....	16
I.3.1.1- Résistance mécanique :.....	16
I.3.2- Propriétés physiques :.....	17
I.3.2.1- Ouvrabilité :.....	17
I.3.2.2- Capacité d'absorption d'eau :.....	18
I.3.2.3- Coefficient de ramollissement :.....	18
I.3.2.4- Retrait et gonflement :.....	18
I.3.2.5- Porosité et perméabilité :.....	19
I.3.2.6- Compacité :.....	19
I.3.2.7- Adhérence :.....	19
I.3.2- Propriétés de durabilité :.....	19
I.3.2.1- Durabilité :.....	19
I.3.2.2- Porosité accessible à l'eau :.....	20
I.3.2.3- Coefficient De Diffusion (Apparent Ou Effectif) Des Ions Chlorures :.....	20
I.3.2.4- la Perméabilité au gaz et la perméabilité à l'eau :.....	21
Chapitre II : Rôle de l'eau dans la pâte cimentaire.....	22
II.1- Introduction :.....	22
II.2- les types de l'eau de gâchage dans les matériaux cimentaires :.....	22
II.2.1- L'eau potable :.....	22
II.2.2- L'eau de mer :.....	23
II.2.3- L'eau distillée :.....	24
II.3. Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'eau dans les matériaux cimentaire :.....	25

II.3.1-Absorption :.....	25
II.3.2-Hydrolyse :.....	25
II.3.3-Dissolution	25
II.3.4-Solvatation :.....	25
II.3.5-Cristallisation :.....	26
II.4- Hydratation du ciment :.....	27
II.4.1- Les réactions d'hydratation :.....	27
II.5-l'effet de l'eau sur la formation de la microstructure de la pâte cimentaire :.....	29
II.5.1-Structuration de la pâte de ciment hydratée :.....	29
II.5.1.1-La phase solide :.....	29
II.5.1.2- La structure poreuse :.....	29
II.6. durcissement de la pâte de ciment :.....	30
II.6.1 Prise et durcissement :	30
II.6.2- Les facteurs qui influencent la vitesse de durcissement :.....	32
II.7-l'effet de la qualité de l'eau sur les propriétés physiques et mécaniques de la pate de ciment durcie :.....	34
II.7.1- L'état de l'eau dans la pâte de ciment hydraté :	34
II.7.1.1-L'eau combinée chimiquement :.....	34
II.7.1.2- L'eau zéolitique :.....	35
II.7.1.3- L'eau absorbée :.....	35
II.7.1.4- L'eau des capillaires :.....	35
II.8. Différents types d'eau dans la pâte du ciment :.....	37
II.8.1. Eau liée :.....	37
II.8.2- Eau libre:.....	37
II.8.3-Eau absorbée:.....	38
II.9.1- Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériaux poreux :.....	38
II.9.1. La gravité :.....	38
II.9.2. L'énergie cinétique des gouttes d'eau :.....	38
II.9.3- La pression du vent :.....	38
II.10- Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'humidité dans un matériau de construction :.....	39
II.10.1- L'absorption physique :.....	39
II.10.2- La capillarité :.....	39

II.11- l'effet de champ magnétique sur les propriétés physiques et chimiques de l'eau pure :	40
II.11.1 Les EMF et l'eau :	40
II.11.1.1- Action des EMF sur les propriétés optiques de l'eau :	40
II.11.1.2- Action des EMF sur les propriétés physico-chimiques de l'eau :	42
Chapitre III : Etat de l'art sur l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés des matériaux cimentaires	46
III.1- L'eau magnétisée :	46
III.1.1. Définition :	46
III.1.2-Les propriétés de l'eau magnétisée	47
III.1.3- champ magnétique :	48
III.1.4-Effet champ magnétique mécanique sur l'eau :	48
III.1.5 Les changements dans l'eau magnétisée :	49
III.2-Effet de l'eau magnétisée sur les propriétés fraîches et durcies des matériaux cimentaires :	50
III.2.1 Essai 01 : Effet de l'eau magnétique sur les propriétés du béton (réalisé par Saddam M. Ahmed):	50
III.2.1.1 - Travaux expérimentaux :	50
A-Matériaux utilisés :	50
B-Procédure de mélange :	50
C-Mélanger les proportions :	51
D-Résultats et discussion :	52
E-Effet de l'eau magnétique sur la résistance à la compression et la consistance:	54
III.2.2-Essai 02 : Effet de l'eau magnétique sur les propriétés du béton (réalisée par Arihant Jain & al :	56
III.2.2.1-Travaux expérimentaux :	56
A-Matériaux utilisés :	56
B-Préparation de l'eau magnétique (MFTW) :	56
C-Proportion De Mélange :	57
D-Préparation Des Echantillons D'essai :	57
E-Variables D'expérience :	57
F-Résultat et discussions :	57
Conclusion générale	61
Références Bibliographiques	62

Introduction générale

Le mélange de ciment et d'eau constitue ce qu'on appelle "la pâte de ciment". En y rajoutant du sable, on obtient "un mortier". En y additionnant du sable et un granulat plus gros on obtient " un béton.

L'eau est un ingrédient important du béton car elle participe activement à la réaction chimique avec le ciment [1]. Il régit l'hydratation du ciment, l'ouvrabilité, la microstructure, la résistance et la durabilité globale du béton.

Au début des années nonante du siècle dernier, ont trouvé des scientifiques russes dans l'Union soviétique, « l'ancien » à la possibilité d'utiliser les forces de traitement de l'eau technologie aimantée pour la première fois, et après avoir atteint des résultats encourageants de cette expérience a émigré en Amérique, et se présentait comme des technologies les plus prometteuses.

D'après les recherches, L'eau magnétisée est formée en faisant passer l'eau à travers un champ magnétique d'une certaine force dans des conditions spécifiques. Généralement, lorsque l'eau est magnétisée, il y a une réduction de la tension superficielle de l'eau qui est mesurée à l'aide de l'appareil appelé tensiomètre. De plus, la magnétisation de l'eau entraîne des changements dans les éléments structurels de l'eau, la viscosité et la conductivité électrique de l'eau [2]. La réduction de la tension superficielle de l'eau permet de briser les gros amas d'eau en petits amas d'eau. L'eau magnétisée améliore les propriétés physicomécaniques du ciment.

A cet effet, nous avons proposé d'étudier l'effet de l'eau aimantée (magnétisée) sur les propriétés physico-mécaniques de mortier de ciment. Au début de l'année, nous avons programmé de réaliser une étude expérimentale sur l'effet de l'eau magnétisée sur le mortier de ciment. Mais à cause de l'épidémie de COVID-19 et la fermeture de laboratoire; donc nous avons limité cette étude à une étude théorique bibliographique sur le même thème. Pour cela, nous avons adopté le plan suivant :

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est une étude théorique constitué de 3 chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons donné des généralités sur les matériaux cimentaires.

Le chapitre II a été consacré à une synthèse bibliographique sur le rôle de l'eau dans la pâte cimentaire.

Dans le chapitre III, a été consacré à la présentation d'une synthèse bibliographique sur l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires :

A la fin du mémoire, nous avons présenté une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des remarques et bénéfices de cette étude.

Chapitre I : Généralité sur les matériaux cimentaires

Introduction

Les caractéristiques physico mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication. Jusqu'à ce qu'il soit mis en œuvre dans le coffrage.

Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation, etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, écoulement, etc..).

I.1- Les constituants cimentaires :

Les composants de base d'un béton sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico- chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

I.1.1- Ciment :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450 °C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable de faire prise et de durcir progressivement et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [5]

I.1.1.1-Constituants du ciment

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment sera obtenu par un procédé continu de fabrication en masse et en particulier par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation [6].

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 20 à 80 % [4].

Pour régler le temps de prise du ciment, on ajoute au clinker pendant le broyage du gypse en quantité équivalente de 3 à 5 % de la masse de ciment. Les deux matières citées précédemment constituent le ciment portland artificiel, on peut avoir d'autres types de ciments en y ajoutant des laitiers de hauts fourneaux, des cendres volantes, des pouzzolanes et des fillers.

I.1.1.1.2- Clinker :

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) du mélange (calcaire + argile), dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrières (calcaire, argile, marnes,). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfates de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des portlands et confère aux ciments de ce groupe leurs propriétés caractéristiques [5].

Le clinker portland est constitué principalement selon [7] de :

Silicate tricalcique : $[3\text{CaO}, \text{SiO}_2]$ que l'on écrit : C_3S (alite)

□ Silicate bi calcique : $[2\text{CaO}, \text{SiO}_2]$ que l'on écrit : C_2S (belite)

□ Aluminate tricalcique : $[3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3]$ que l'on écrit : C_3A (celite)

□ Alumino – ferriques tétracalcique : $[4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3]$ que l'on écrit : C_4AF

On peut déterminer la composition minéralogique en se basant sur les formules données par Bogue [8]:

$$\text{C}_3\text{S} = 4.071 (\text{Ca O}) - [7.6 (\text{SiO}_2) + 6.718 (\text{Al}_2\text{O}_3) + 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) + 2.852 (\text{SO}_3)]$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.867 (\text{SiO}_2) - 0.7544 (\text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.043 \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Le clinker portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins 2/3 en masse de C_2S et C_3S , la partie restante contenant de l'oxyde d'alumine Al_2O_3 , de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et d'autres oxydes. La teneur en oxyde de magnésium MgO ne doit pas dépasser 5 % en masse[6]. D'après la composition minéralogique du clinker, le ciment portland se subdivise selon [3] en plusieurs espèces :

- Ciments fortement alitique, contenant plus de 60 % de C_3S .
- Ciments alitiques, contenant de 50 à 60 % de C_3S .
- Ciments bilitiques, contenant plus de 35 % de C_3S .
- Ciments aluminatiques, contenant plus de 12 % de C_3A .
- Ciments alumino-ferriques, moins de 2 % de C_3A et moins de 18% de C_4AF .

I.1.1.1.3- Gypse

Issus des industries de fabrication d'acide phosphorique ou d'acide citrique, les gypses artificiels freinent les réactions d'hydratation. on les appelle régulateurs de prise.

Le gypse [$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$] est un minéral tendre, de densité 2300 Kg/m³, de structure granulaire, lamellaire ou fibreuse. Le gypse est de couleur blanche et prend quelquefois du fait de différentes impuretés des couleurs grise, rougeâtre, jaunâtre et noir. Il se dissout facilement dans l'eau (à peu près 75 fois plus que le calcite) [3].

I.1.1.1.4- Laitier de haut fourneau

Le traitement au haut fourneau du minerai de fer produit la fonte et le laitier. A sa sortie, le laitier liquide est refroidi rapidement par l'eau, c'est la granulation qui donne un sable ayant des propriétés hydrauliques [7].

C'est un résidu de la préparation de la fonte dans les HF à partir du minerai de fer et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500 °C.

Figé par refroidissement brusque il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui. Il contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine (15 à 20 %) et 10 % environ de magnésie, oxydes divers et manganèse. Le laitier est un véritable ciment manifestant par lui-même des propriétés hydrauliques, grandement activés d'ailleurs par la présence du clinker. Son hydratation, qui se produit par le développement des résistances mécaniques est moins rapide que celle du portland surtout dans sa période initiale [5].

I.1.1.1.5- Cendres volantes

Produits pulvérulents formés de billes pleines au bous soufflés généralement vitreuse, résidus de la combustion en central thermique de houille ou de lingite [7].

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulents du courant de gaz des chaudières alimentés au charbon pulvérisé. Elles doivent contenir essentiellement de la silice et de l'alumine, le restant contient l'oxyde de fer et d'autres oxydes. La proportion de chaux réactive CaO doit être inférieure à 5 % en masse. La teneur en SiO₂ réactif ne doit pas être inférieur à 25 % en masse [6].

Les cendres volantes rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20 %), on les ajoute au moment du broyage du clinker. [5]

I.1.1.1.6- Pouzzolanes

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice, alumine et oxyde ferrique, ils sont employés en cimenterie pour leur propriétés pozzolaniques, c.-à-d., une aptitude à fixer la chaux à la température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c.-à-d. pouvant faire prise et durcir par hydratation. On obtient artificiellement des pouzzolanes à partir d'argile cuite par exemple [5].

Elles ont un couleur rougeâtre ou noirâtre. Elles sont utilisées comme granulats pour la confection des bétons légers, après broyage, comme constituant des ciments [7].

I.1.1.1.7- Les fillers

Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite, cendres volantes,...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité,...).

Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau, ils sont actifs s'ils ont, même partiellement des propriétés hydrauliques ou pozzolaniques en présence de ciment et d'eau [7]

I.1.2- Les Granulats :

I.1.2.1- Définition :

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le 1eréconomique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition); et le2emetechique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment).

I.1.2.2- Classification des granulats selon la provenance :

A) Granulats naturels :

a) Granulats roulés : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.

N.B. : Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de **grains arrondis et polis**.



Figure I.1 : Granulats roulés (arrondis et polis)

b) Granulats concassés (de carrières) : ils proviennent du concassage de roches dures (granits porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arrêter vives.



Figure I.2 : Granulats concassés (de carrières)

B) Granulats artificiels :

Ils proviennent de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

I.1.2.3-Classification des granulats selon la grosseur :

Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les imensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2).

On distingue les familles de granulats suivantes :

— fillers 0/D	où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
— sablons 0/D	où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
— sables 0/D	où $1 < D < 6,3$ mm ;
— graves 0/D	où $D > 6,3$ mm ;
— gravillons d/D	où $d > \text{let } D < 125$ mm ;
— ballasts d/D	où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.

Tableau I.1: les familles de granulats

I.1.2.4-Désignation des granulats :

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit :

Granulat d/D : sable ou gravier

d : dimension minimale des grains

D : dimension maximale des grains

Exemples : granulats rencontrés en pratique : sable 0/3, gravier 3/8, gravier 8/15, gravier 15/25.

I.1.2.5-Propriétés importantes des granulats intervenants dans la composition des bétons :

La composition d'un béton est décrite par une formule montrant les quantités relatives des différents composants qui en interviennent.

Pour 1 m³ de béton on prend environ- 350 kg de ciment ; - 1100 kg de gravier ; - 550 kg de sable ; - 190 l d'eau.

Dans la recherche d'une formule pour béton, on doit tenir compte que :

- Les granulats sont moins chers que les ciments (les liants en général).
- Les granulats sont souvent plus résistants que la pâte de ciment.
- Les granulats (matériau inerte) augmentent la stabilité dimensionnelle du béton (retrait, fluage).

Par conséquent, dans le composé béton, Il faut augmenter au maximum la quantité de granulats relativement à la quantité de ciment, en respectant toutefois les conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité (résistance mécanique).
- La quantité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.
- Les granulats doivent contenir différentes dimensions afin de minimiser les vides inter granulaires.

Toutefois il faut essayer d'augmenter la proportion des gros granulats pour minimiser la surface spécifique du mélange granulats et par conséquent utiliser le minimum de la quantité de ciment.

A) Courbe granulométrie : c'est l'outil de base qui permet le choix de la composition d'un béton performant ayant les caractéristiques citées en haut.

B) Masse volumique apparente :

Les quantités des granulats intervenant dans une composition de béton, sont données en terme de masses (masses de granulats secs).

En pratique dans la fabrication, on compose le béton très souvent en mesurant des volumes au lieu de masses (exemple : 1 brouette, 2 brouettes...etc). Il est ainsi important de connaître la masse volumique apparente des granulats :

Remarque : Cette méthode de composition en volume présente des erreurs certaines à cause du foisonnement.

En effet, La masse volumique apparente peut changer beaucoup pour un même granulat en fonction de sa compacité (foisonnement).

C) Teneur en eau :

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu au poids des grains composant le granulat

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats. Moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

D) Propreté des granulats :

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques...etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains.

Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai **d'équivalent de sable**.

Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation.

E) Le coefficient d'aplatissement :

A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui E) Le coefficient d'aplatissement : A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation : **$G/E \geq 1.58$**

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi :

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

La forme des granulats influence : La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton et La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

L'état de surface des grains influence : La compacité du mélange et l'adhérence du granulat à la pâte de ciment et La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.

F) Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers. C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Les modalités de cet essai font l'objet de la norme NF P 18-572. L'essai **Micro Deval** : Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573. Le coefficient **Los Angeles** calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat. Pour les granulats susceptibles d'être soumis aux effets du gel, on peut mesurer le coefficient Los Angeles après une série de 25 cycles gel/dégel (-25 °C, +25 °C) et le comparer au coefficient de référence.

I.1.3-Eau :

L'eau remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment, et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas de béton un faible rapport eau-ciment est préférable. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

I.2. Les mortiers :

I.2.1. Historique :

Les mortiers ont été très utilisés du 16ème siècle. En 1959, l'anglais JHON Smeaton produit un mortier aussi dur que la pierre en mélangeant des CaO hydrauliques et des cendres volcaniques [10].

A la première guerre mondiale, en raison de leur grande légèreté, pour le même calibre, par rapport aux autres bouches à feu, et parce qu'ils permettent de tirer à partir d'un emplacement encaissé ou d'atteindre des objectifs masqués. Pendant la seconde guerre mondiale, leur emploi a été plus restreint, le bombardement aérien s'étant révélé plus efficace. C'est pourquoi l'utilisation des mortiers lourds (jusqu'à 160 mm) a pratiquement disparu au profit des mortiers légers, dit d'infanterie [11].

I.2.2. Définition

Le terme mortier désigne un mélange de liant (ciment ou chaux) et de sable gâché avec une certaine quantité d'eau, des adjuvants et des colorants peuvent aussi être ajoutés.

Selon qu'il contient plus au moins de liant, un mortier est dit gras ou maigre.

On distingue les mortiers de leur composition et de leur utilisation :

- Mortier de ciment fabriqué avec du ciment artificiel de type portland blanc ou gris, il est très résistant.
- Mortier de chaux fabriqué avec de la chaux hydraulique. Moins résistant et moins étanche que le mortier de ciment, il est plus souple et laisse respirer les murs.
- Mortier bâtard, fabriqué avec un mélange de ciment et de chaux, avec des caractéristiques intermédiaires entre le mortier de ciment et le mortier de chaux.
- Mortier réfractaire à base de ciment fondu.
- Mortier rapide à base de ciment prompt.
- Mortier pour hourdage : C'est le mortier utilisé pour construire, c'est lui qui assemble les éléments de maçonneries. On utilise du mortier de ciment ou du mortier bâtard.
- Mortier pour enduit : C'est le mortier qui est utilisé en revêtement de murs. On utilise du mortier de ciment, du mortier de chaux ou du mortier bâtard.

Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris,
- Préparés sur le chantier à partir des mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire),

- Livré par une centrale : Ce sont les mortiers prêts à l'emploi, dans les dernières années, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange de constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès: rénovation, travaux souterrains [12].

I.2.3.Fonction des mortiers :

La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonneries de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs les mortiers séparent les éléments et remplissent toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le liasonnement doit permettre les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.

Les mortiers et bétons à maçonneries contiennent les mêmes constituants de base, c'est pourquoi beaucoup de gens croient que le béton et le mortier remplissent les mêmes fonctions, ce qui n'est pas le cas [14]. La différence entre ces deux matériaux est démontrée par leur mise en œuvre sur un chantier de construction. Le béton est placé dans des coffrages étanches non absorbants, en métal ou en bois, destinés à retenir toute l'eau afin que l'hydratation du béton soit complète et que celui-ci acquiert la plus grande résistance mécanique possible. Le mortier est placé entre des éléments de maçonnerie absorbants, et dès qu'il est en contact avec eux il commence à perdre de l'eau. La qualité primordiale recherchée pour le béton est la résistance mécanique, mais pour le mortier, elle ne constitue qu'une caractéristique parmi plusieurs d'autres.

I.2.4.Caractéristiques essentielles :

Pour que les mortiers et les bétons soient de bonne qualité, il est indispensable que les granulats composant ces matériaux adhèrent parfaitement au ciment. En effet, la résistance à la traction d'un matériau hydraulique dépend essentiellement de l'adhérence des grains au ciment durci. On recherche également, pour un mortier ou un béton, les qualités suivantes :

- Résistance à l'écrasement,
- Compacité,
- Etanchéité ou imperméabilité,
- Constance du volume pendant la prise et le durcissement.

Toutes ces qualités dépendent d'une multitude de facteurs, qui sont en particulier :

- La qualité du liant, sa nature et son dosage,
- La composition granulométrique du sable,
- La quantité d'eau de gâchage,

- Les conditions de mise en œuvre,....etc.

I.2.5. Propriétés des mortiers :

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories :

I.2.5.1. Mortiers plastiques :

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. L'ouvrabilité ne se mesure pas avec précision en laboratoire, mais le maçon peut l'évaluer en observant le comportement du mortier lorsqu'il l'étale avec sa truelle.

L'ouvrabilité est due à l'effet de roulement à billes résultant de la lubrification des granulats par le lait de ciment. Bien que la classe des granulats (sable) et la proportion des matériaux jouant un rôle très important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales de retrait, et le maçon peut la contrôler à la mise en œuvre. La capacité d'un mortier de garder une certaine ouvrabilité sous l'influence de la succion des briques dépend de son pouvoir de rétention d'eau mesuré lors d'essais en laboratoire. Une bonne ouvrabilité et une bonne rétention d'eau sont essentielles à une qualité maximale de liaisonnement [12].

Le pouvoir de rétention d'eau est caractérisé par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier (exemple : pendant le transport), et de conserver assez d'eau dans la couche fine sur une base poreuse.

La dessiccation du mortier peut être si importante qu'il n'y aura plus suffisamment d'eau pour le durcissement du mortier qui ne pourra pas atteindre la résistance requise. Le pouvoir de retenir de l'eau peut être augmenté par introduction des plastifiants minéraux et organiques [13].

En réalité, l'ouvrabilité est une combinaison de plusieurs propriétés comprenant : la plasticité, la fluidité (la maniabilité), la compacité et la cohérence.

La fluidité est la propriété d'une pâte de mortier qui puisse avoir, suivants les composants, des consistances différentes, depuis sèche jusqu'à fluide. Les mortiers de maçonnerie, de travaux de finissage des bâtiments et autres se font suffisamment fluides [13].

I.2.5.2. Mortier durci :

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés mécaniques d'importance majeure. La solidité du liaisonnement entre l'élément et le mortier est très importante. Quant à l'ouvrabilité, il n'existe pas de méthodes sûres pour la mesurer et par conséquent les mortiers sont évalués d'après les valeurs de résistance à la compression d'éprouvettes soumises à des

conditions de moulage et de cures plus proches de celles que l'on rencontre avec le béton qu'avec le mortier.

La solidité du liaisonnement, la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au liaisonnement une force maximale, et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression. la résistance à la flexion est également importante, parcequ'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonneries pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatés [12].

I.2.6. Les emplois des mortiers :

Selon les auteurs [14], les mortiers peuvent être employés pour :

I.2.6.1. les joints de maçonneries

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques,...) nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité importante pour être étanche. On a généralement à utiliser un mortier ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans se fissurer.

I.2.6.2. Les enduits :

Les enduits au mortier sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réparation des façades.

Les enduits remplissent plusieurs rôles :

- Protection des gros œuvres contre les intempéries,
- Imperméabilisation, tout en laissant respirer le support,
- L'esthétique (aspect décoratif, couleur).

Les enduits habillent le gros œuvre en le protégeant. Ils constituent la finition extérieure visible de construction.

I.2.6.3. Les chapes :

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau de dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou

flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique.

I.2.6.4. Les scellements et les calages

L'évolution des techniques de construction, le positionnement précis de pièces préfabriquées, le scellement d'éléments rapportés sur béton, entraînent une utilisation croissante de produits de scellement et de calage. Parmi les multiples utilisations, on peut citer : Calage d'équipements industriels, machines lourdes à fort couple ou à fortes vibrations,

- Scellement des poutres, poteaux, acrotères,...
- Scellement de portes, fenêtres et éléments de second œuvre,
- Scellement de mobilier urbain, d'éléments de signalisation,
- Travaux de scellement en milieu marin,
- Assemblage d'éléments,
- Scellement de regards de visite sur routes à fort trafic avec remise en circulation quasi immédiate.

I.2.6.5. Les coulis :

Le coulis est un mélange fluide, à base de charges fines inférieures à une valeur de 0.3 mm de liants hydrauliques et d'adjuvants, les ciments utilisés sont des ciments portland artificiels ou des ciments portland composés. Les ciments de laitier ou les ciments alumineux sont utilisés pour leur résistance aux milieux agressifs [1, 33]. Il existe aussi des liants spéciaux pour coulis d'injection. Les charges sont constituées par des suspensions d'argile, de bentonite (argile colloïde). Les domaines d'utilisation des coulis sont les remplissages des cavités et fissures dans les roches, les sols ou les ouvrages béton ou maçonneries.

I.2.7. Les techniques particulières de mise en œuvre :

Suivant les auteurs [14], les mortiers peuvent être mis en place par deux méthodes :

I.2.7.1. La projection :

Fabriqués sur chantier ou plus généralement prédosés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques améliorant l'adhérence, des charges (silice, carbonate,..) et parfois des fibres (verres, polypropylènes, acier). Projetés à l'aide de machines, le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien à son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière. La suppression de manipulation délicate et pénible, ainsi que les gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications :

- Enduits monocouches, enduits isolants,

- Revêtement de voûtes, en galeries, consolidation de talus,
- Travaux de réparation, etc....

I.2.7.2. L'injection :

L'injection de mortier n'intéresse que certains types de travaux où les cavités à remplir sont suffisamment larges. Il est nécessaire que le diamètre maximum des grains de sable les plus gros ne dépassent pas le 1/5 des vides les plus fins à remplir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait utiliser des coulis d'injection. Comme dans le cas de coulis de ciment, le mortier d'injection doit être constitué de façon à être le plus injectable possible : grande fluidité pour un ressuage modéré (et, partant, une bonne stabilité, peu de ségrégation). Les applications de l'injection sont essentiellement le remplissage des cavités, gaines, enveloppes diverses, ou plus généralement les vides d'accès difficile. L'injection est généralement pratiquée pour certains travaux sous l'eau, avec des formules de mortiers étudiés pour éviter le délavage.

I.2.8-Dosage des mortiers

On appelle dosage d'un mortier la masse, en Kg, de ciment ou de chaux qu'il faut mélanger à 1 m³ de sable sec, de façon à remplir les vides du sable. Selon la quantité du ciment utilisée, on distingue trois types de mortiers différents [13].

Si on emploie peu de liant, on a un mortier maigre, si on utilise davantage de liant, on a un mortier riche, le mortier intermédiaire étant appelé mortier normal. Les dosages des mortiers varient avec le but à atteindre et avec la nature de liant. Les dosages normaux de mortiers de ciment sont plus élevés que ceux des mortiers de chaux.

I.2.8.1. Mortiers de portland : Les dosages par m³ de sable ainsi que les usages, des différents types de mortiers fabriqués sont indiqués au tableau I.2 :

Tableau I.2 : Dosage par m³ de sable dans les mortiers

Détermination du mortier	Dosage En Kg	usages
Mortier maigre	250-350	Maçonnerie de remplissage
Mortier normal	350-400	Toutes maçonneries à l'air et à l'eau douce (rivière) immergés seulement lorsque le mortier a durci
Mortier semi riche	400-500	Parements, voûtes, enduits aériens
Mortier assez riche	500-600	Travaux à la mer, radiers d'écluse, fondations immergés
Mortier riche	600-800	Rejointoiement
Mortier très riche	800-1000	Spéciaux pour tuyaux centrifugés
Mortier spéciale ment riche	1000-1200	Enduits à immerger dès le début du durcissement, pierres artificielles, dallages

I.2.8.2. Mortiers bâtards

On appelle ainsi les mortiers qui contiennent à la fois du ciment et de la chaux. Ces derniers sont excellents à condition que le mélange chaux plus portland soit bien homogène [14].

I.3- Propriétés physico-mécaniques essentielles des matériaux cimentaires :

I.3.1-Propriétés mécaniques :

I.3.1.1- Résistance mécanique :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- la nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant)
- les conditions de mise en œuvre de ces constituants
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

- **Résistance à la compression** : est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

- **Résistance à la traction** : Elle est moins étudiée que la résistance à la compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28}

De nombreux chercheurs ont essayé de traduire en formule les influences des ces facteurs. Parmi ces formules, nous citerons les deux plus connues, à savoir les formules de FERET et de BOLOMEY .

-Formule de FERET :

En 1866, FERET a établi la formule suivante :

$$R_c = k \left(\frac{1}{1 + \frac{E}{C}} \right) \dots \dots \dots 1$$

R_c : désigne la résistance à la compression en bars

E/C : étant le rapport des volumes de l'eau de gâchage et du ciment.

-Formule de BOLOMEY

BOLOMEY, ingénieur suisse, qui était professeur à l'université de Lausanne, a donné, en 1925, la formule suivante :

$$R_c = k \left(\frac{C}{E+V} - 0.5 \right) \dots \dots \dots 2$$

R : la résistance à la compression du mortier

K : un coefficient numérique qui dépend de la qualité du liant (chaux ou ciment), et de l'âge du mortier

C : désigne la masse du liant en Kg

E : le volume d'eau, en litres V : le volume des vides, en litres.

Si comme précédemment pour la formule de FERET, nous considérons un mortier qui a peu ou pas de vides, la formule se simplifie, et s'écrit :

$$R_c = k \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \dots \dots \dots 3$$

On peut encore citer la formule empirique proposée par le professeur N-PROPOV qui exprime la résistance des mortiers à ciment portland : [3]

$$R_M = 0.25 \times R_c (C/E - 0.4) \dots \dots \dots 4$$

R C: étant l'activité du ciment en Pa

Cette formule est valable pour les mortiers posés sur une base compacte, si la base est poreuse, elle aspire l'eau du mortier en le rendant compact, la résistance croît avec 1,5 fois à peu près. La résistance du mortier dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité du sable, ce que l'on voit de l'expression suivante :

$$R_M = K \cdot R_c (C - 0.5) + 4Pa \dots \dots \dots (5)$$

K : étant le coefficient dont la valeur pour un sable fin est prise égale : 0.5 à 0.7, pour le sable moyen : 0.8, pour le sable gros : 1.0.

C : la consommation du ciment en t/m³ de sable.

I.3.2-Propriétés physiques :**I.3.2.1-Ouvrabilité :**

C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au être

d'Abrams (norme NF P 18-451) et l'essai d'étalement à la table à secousses ; mais les essais Vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [15]

I.3.2.2-Capacité d'absorption d'eau :

La capacité d'absorption d'eau (CAE) des matériaux de constructions est leurs pouvoirs d'absorber et de retenir l'eau. elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique).

Elle se calcule d'après la formule suivante :

$$CAE = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

Où : m sat: la masse du matériau saturé d'eau m sec: la masse du matériau sec

La CAE varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions. Elle est aussi influencée par la nature de la substance et son pouvoir hydrophile.

La CAE des mortiers de finissage à agrégats en sable de quartz, pas plus de 8 % ; et celle des mortiers à agrégats en roches de 12 % au maximum.

I.3.2.3-Coefficient de ramollissement :

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau R sat à la résistance à la compression du matériau à sec R sec, :

$$K_{Ram} = \frac{R_{sat}}{R_{sec}} \times 100\%$$

Ce coefficient caractérise la résistance à l'eau des matériaux. Pour l'argile, il est égale à 0, pour les autres (métaux, verres), dont la résistance à l'action de l'eau est stable, Kr am est égale à 1. Les matériaux dont Kr am \geq 0.8, sont considérés comme résistants à l'eau. il est interdit d'utiliser les matériaux au Kr am < 0.8 dans les régions, où l'humidité est un facteur constant.

I.3.2.4- Retrait et gonflement :

On sait que l'hydratation du ciment s'accompagne, du fait de la contraction Le Chatelier, de la réaction d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydratée. Mais lorsque la consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque leur assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques. On s'accorde à expliquer le retrait par les forces de traction (capillaires ou autres) qui se développent de ce fait à l'intérieur des capillaires les plus fins. Le départ d'eau par évaporation a les mêmes conséquences [9].

Le gonflement observé après la prise est du à la constitution d'hydrates comme la portlandite, Ca(OH) 2, qui, contrairement à la formation des autres hydrates, se fait avec

augmentation de volume. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable.

Le retrait et le gonflement peuvent être déterminés en appliquant la formule :

$\Delta L/L \times 10^6$ et éventuellement : $\Delta m/m \times 100\%$

ΔL : la variation de longueur par rapport à la longueur origine

L : la longueur de base prise égale à 160 mm,

Δm : variation de masse par rapport à la masse au moment de démoulage,

m : masse de l'éprouvette au moment de démoulage.

I.3.2.5-Porosité et perméabilité :

La porosité (contraire de la compacité) est le rapport du volume des vides au volume total. Elle se mesure donc par la quantité : $1 - (C + S)$

La perméabilité (inverse de l'étanchéité) est la propriété qu'a le mortier de se laisser traverser par les liquides [9].

I.3.2.6-Compacité :

La compacité est une des qualités essentielles d'un mortier car elle entraîne une bonne résistance ainsi qu'une bonne étanchéité. L'étude de la compacité (C+S) revient principalement à l'étude de la composition granulométrique du mortier et à la détermination des dosages en ciment et en eau. Pratiquement, dans les conditions les plus favorables, la compacité d'un mortier de ciment atteint 0.90 et peut descendre jusqu'à 0.75. Pour les mortiers de chaux hydrauliques, cette compacité varie de 0.60 à 0.80 suivant les cas.

I.3.2.7-Adhérence :

L'adhérence concerne la liaison du mortier lui-même avec les maçonneries. Une des conditions essentielles pour que le mortier adhère bien aux pierres et que ces dernières soient propres. Par ailleurs, le ciment portland adhère mieux que les ciments prompt et les chaux.

I.3.2-Propriétés de durabilité :

I.3.2.1- Durabilité :

Elle est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (Moranville, Regourd, 1982), et aussi aux contraintes mécaniques (fluage). La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, composition des différents constituants

(ciment, granulats, eau, adjuvant), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes au béton comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlorure (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats, les ions sulfates (oxydations des pyrites contenues dans certains granulats calcaires), ou externes les ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglace, formation des sels gonflants), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies, de neige, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz [13].

I.3.2.2- Porosité accessible à l'eau :

Cet indicateur est un paramètre global ayant un impact sur la qualité du matériau vis-à-vis de la plupart des désordres du béton et sur sa résistance mécanique (La diminution de la porosité implique une diminution du rapport E/C). Néanmoins ce rapport n'est pas toujours discriminant sur les réactions internes au béton notamment

Le principe consiste en la mesure des vides connectés avec la surface à l'intérieur de la masse du béton :

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100$$

Avec M_{eau} : la pesée hydrostatique, i.e le poids du béton saturé sous l'eau

M_{air} : le poids du béton saturé dans l'air

M_{sec} : le poids du béton sec dans l'air

I.3.2.3- Coefficient De Diffusion (Apparent Ou Effectif) Des Ions Chlorures :

Le coefficient effectif de diffusion des ions chlorures D_{eff} apparaît dans la 1ère

loi de Fick : $J = -D_{eff} * \frac{dcf}{dx}$ où J est le flux massique d'ions chlorures et c*f* la concentration de chlorures libres en solution interstitielle du béton.

Le coefficient effectif de diffusion des ions chlorures est fonction du matériau (sa composition, son âge, son état de carbonatation) et des conditions environnementales (concentration en chlorures et température).

Le coefficient apparent de diffusion des ions chlorures D_{app} apparaît dans la 2^{de} loi de Fick : $\frac{\partial c_f}{\partial t} = D_{app} * \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2}$

par application de la conservation de la masse. Ainsi, on peut relier D_{app} et D_{eff} par : $D_{app} = D_{eff} \frac{\phi + \rho \cdot kb}{\phi}$ avec ϕ la porosité du matériau, ρ sa masse volumique sec et kb la capacité de fixation des ions chlorures à la matrice cimentaire.

I.3.2.4- la Perméabilité au gaz et la perméabilité à l'eau :

La perméabilité au gaz ou à l'eau témoigne de l'aptitude du matériau à se laisser traverser sous un gradient de pression. Elle est déterminée par la loi de Darcy : $\vec{v} = - \frac{k}{\eta} * \nabla p$ avec k la perméabilité intrinsèque du matériau dépendant des volumes poreux et de leur connectivité mais indépendante du fluide (kr , $saturation$ est un paramètre lié à la saturation du fluide dans le matériau ; η est la viscosité dynamique du fluide).

Le béton est caractérisé par une basicité accentuée dû à la nature de la pâte durcie qui est composé de : de 15 à 20 % de portlandite : base forte

- environ 70 % de C-S-H : considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte $Ca(OH)_2$

- 10 à 15 % d'aluminates et sulfa aluminates de calcium - une solution interstitielle, dans les pores et capillaires enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie entre 12.5 et 13.5

Alors que le pH de l'environnement est en général inférieur à ces valeurs, ce qui donne une réaction entre le milieu extérieur et le béton pour former des sels et de l'eau sous la forme suivante : **Milieu extérieur + béton \longrightarrow sel + eau**

Cette réaction peut améliorer la durabilité du béton si le sel formé possède des propriétés liantes, on peut citer l'exemple de la carbonatation superficielle du béton de ciment portland par le CO_2 de l'air, mais le pH de la solution interstitielle du béton diminue jusqu'au environ une valeur de 9 ce qui entraîne la dé passivation des armatures. Dans le cas où le sel formé est soluble ce qui crée des risques de dégradation par dissolution et lessivage. Par ailleurs les aluminates du ciment (anhydres ou hydratés) réagissent avec les ions sulfates pour former l'étringite secondaire potentiellement expansive ($3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$) [14]. Sous certaines conditions le C-SH peuvent aussi réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasites ($CaCO_3 \cdot CaSiO_2 \cdot CaSO_4 \cdot 15 H_2O$) entraînant des phénomènes expansifs et surtout une désagrégation de l'ensemble du liant [14]. Il a été toujours dit qu'un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable.

Chapitre II : Rôle de l'eau dans la pâte cimentaire

II.1-Introduction :

On ne peut concevoir le comportement des matériaux cimentaires (mortier or béton) sans connaître l'influence de l'eau sur leurs propriétés de durabilité, non seulement elle induit des phénomènes propres tels que les variations dimensionnelles (gonflement, retrait) mais, elle influe également sur les autres caractéristiques telles que la diminution de la résistance mécanique et l'augmentation de la conductivité thermique. En outre, l'eau influe également sur le confort dans la construction. En effet, les moisissures qu'elle engendre sont à l'origine de plusieurs cas pathologiques respiratoires et allergiques graves pour les êtres humains.

II.2- les types de l'eau de gâchage dans les matériaux cimentaires :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier, nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours.

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008 [NF_03].



Figure II.1 : L'eau de gâchage

II.2.1- L'eau potable :

L'eau potable est une eau que l'on peut utiliser à des fins domestiques et industrielles (eau minérale ou eau de source). Toute eau du réseau public d'eau potable convient à la fabrication de Béton. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines Conditions restrictives. En raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable sur la viscosité et la capacité de remplissage du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très

important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas Échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants [15].

II.2.2-L'eau de mer :

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction.[16].

La norme autorise l'emploi d'eau de mer dans la confection des bétons qui ne sont ni armés ni précontraints, mais les spécifications du fascicule 65 A sont plus rigoureuses et en interdisent formellement l'emploi lors du gâchage. Bien que les textes officiels ne traitent pas de ce sujet, l'utilisation d'eau de mer pour le gâchage de bétons non armés ne présente pas de risque quant à la pérennité de l'ouvrage, seules des efflorescences, dues à une migration des sels, pouvant apparaître sur les parements [17].

Teneur En Chlorures :

Admise en général, certains règlements considèrent qu'elle ne doit pas dépasser 500 mg par litre. D'autres critères moins rigoureux font une différenciation en fonction du type de béton confectionné, c'est ainsi que les limites suivantes sont fixées :

Pour la possibilité d'utilisation d'une eau pour le gâchage du béton :

≤ 600 mg/l Pour les bétons précontraints, $\leq 2\ 000$ mg/l pour les bétons armés, $\leq 4\ 500$ mg/l Pour les bétons non armés.

De toute façon, c'est essentiellement la teneur totale en ions chlore dans le béton qui importe. Or les chlorures peuvent provenir de l'eau de gâchage, mais également du ciment, des granulats et éventuellement des adjuvants, en sorte que l'on doit toujours prendre en compte la teneur totale d'ions chlorure dont la valeur ne doit pas dépasser certaines limites, fonction du type d'ouvrage réalisé avec le béton. Ces limites sont spécifiées dans différents documents tel le fascicule 65 A, la norme AFNOR P 18325 d'août 1991, et le projet de révision de la EN 206 avec, dans ce dernier cas des valeurs légèrement différentes de celles du fascicule 65 A.

Les valeurs limites spécifiées présentant de petites différences, nous les reproduisons ci-après avec leurs références, celles à prendre en compte pouvant être , par sécurité, les plus faibles, à moins que le cahier des prescriptions techniques de l'ouvrage ne se réfère de façon précise à l'un de ces

documents, auquel cas les valeurs qui y sont indiquées doivent être celles à respecter.

• Dans le fascicule 65 A complété par son additif, il est précisé (art. 24 -25) que par rapport à la masse du ciment (actif) la quantité maximale de ions-chlore est fixée aux valeurs suivantes :

- 1 % pour les bétons non armés;
- 0.65 % pour les bétons armés ;
- 0.15 % pour les bétons précontraints par post-tension ;
- 0.10 % pour le béton précontraint par pré tension ;

• Dans la norme Afnor P 18 -325. Les valeurs limites sont fixées à :

- 10% pour les bétons non armés :
- 0.4 % pour les bétons armés :
- 0.2% pour les bétons précontraints.

Le projet de révision de la norme européenne limite les ions chlorures dans le béton à

- 1 % pour les bétons non armés:
- 0,4 % pour les bétons armés :
- 0.10 % pour les bétons précontraints classés 0.10:
- 0,20 % pour les bétons précontraints classés 0.20, la classe 0.10 ou 0.20 dépendant des dispositions en vigueur, là où le béton est utilisé

Les chlorures en faible proportion peuvent légèrement modifier la prise et le durcissement du ciment, par contre en forte proportion ils peuvent réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton.

II.2.3-L'eau distillée :

L'eau distillée est une eau qui a subi une distillation, donc est théoriquement exempte de certains sels minéraux et organismes que l'on pourrait retrouver dans l'eau « naturelle ». Elle contient idéalement des molécules H₂O, des gaz dissous comme O₂ et CO₂. Elle est qualifiée d'eau purifiée.

Lors des essais effectués s, le temps de début de prise, obtenu sur des éprouvettes fabriquées avec l'eau essayée ne doit pas être inférieur à 1 h et ne doit pas s'écarter de plus de 25 % du temps de début de prise obtenu avec des éprouvettes préparées avec de l'eau distillée ou de l'eau dé-ionisée. Le temps de fin de prise ne doit pas être supérieur à 12 h et ne doit pas s'écarter de plus de 25 % du temps de début de prise obtenu avec des éprouvettes préparées avec de l'eau distillée ou de l'eau dé-ionisée. La résistance moyenne à la compression à 7 jours des éprouvettes de béton ou de mortier préparées avec l'eau essayée, doit atteindre au moins 90 % de la résistance moyenne des éprouvettes correspondantes préparées avec de l'eau distillée ou dé-ionisée.

En outre, par rapport à de l'eau distillée, l'eau ne doit pas induire de variation du temps de prise > 25%, et de baisse de Rc7 > 10 %

II.3. Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'eau dans les matériaux cimentaire :

II.3.1-Adsorption :

Cette fixation en surface d'un solide de molécules d'eau peut être physique ou chimique. L'adsorption physique résulte des forces de Van der Waals. Il s'agit d'une liaison d'énergie faible et réversible qui ne modifie pas l'état électronique de la molécule adsorbée. L'adsorption chimique résulte elle de mise en commun d'électrons. L'énergie de cette liaison est donc de haute intensité et modifie l'état de la molécule d'eau adsorbée qui devient alors une eau liée.

II.3.2-Hydrolyse :

L'hydrolyse est une réaction qui met en jeu à la fois la transformation du solide et la décomposition de l'eau : l'ion H^+ de l'eau s'associe à l'anion du composé et l'ion OH^- s'associe avec le cation.

II.3.3-Dissolution :

La dissolution est le changement d'état d'un solide ionique mis en présence d'un solvant. L'eau, du fait de ses molécules polaires, est un solvant puissant des structures cristallines ioniques par l'attraction qu'elles exercent sur les ions du cristal.

II.3.4-Solvatation :

Les ions dispersés du cristal anhydre sont dispersés dans la solution puis solvates, c'est-à-dire entourés de molécules d'eau qui les isolent.

La nature polaire de l'eau fait de l'eau liquide un puissant solvant des substances ionisables et des substances polaires. L'eau dissout rapidement le réseau cristallin des sels en dépit des fortes interactions électrostatiques entre ions positifs et négatifs, en raison des propres interactions entre les molécules dipolaires de l'eau avec les ions pour former des enveloppes d'hydratation. Ces dernières isolent ces ions, on dit alors qu'ils sont solvatés.

Si les molécules du solvant entourent le soluté, c'est que les interactions solvant-soluté sont suffisamment stables : la molécule d'eau est fixée par le champ de forces électrostatique généré par le soluté pendant un temps beaucoup plus long (plusieurs centaines de fois) que celui de la réorganisation de ses propres liaisons hydrogène. La structure des enveloppes d'hydratation est donc à la fois stable et dynamique.

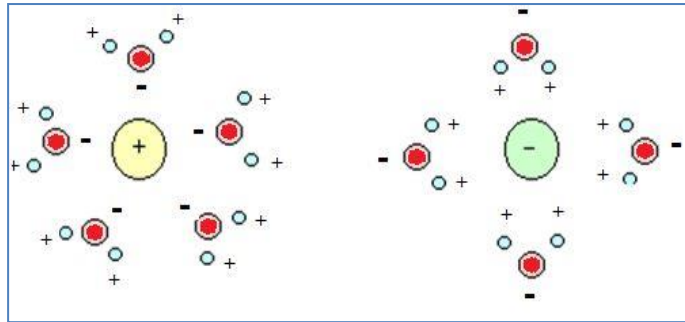


Figure II.2 : Représentation schématique de la solvation par des molécules d'eau.

II.3.5-Cristallisation :

La cristallisation voit se succéder deux phénomènes qui sont la nucléation et la croissance du germe. Les ions passés en solution s'assemblent aléatoirement en germes. A partir de ces germes s'organise une accumulation d'atomes ou de molécules.

L'hydratation est donc une réaction complexe au sens de la cinétique chimique, c'est-à-dire d'une transformation qui résulte d'un ensemble de réactions simultanées... pour accroître la difficulté, les liants hydrauliques sont des mélanges de constituants actifs.

En effet le clinker du ciment Portland est composé de gypse (introduit lors de sa fabrication pour réguler la prise du C_3A notamment) de silicate tricalcique (C_3S) de silicate bicalcique (C_2S), d'aluminate tricalcique (C_3A) et d'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF). Lors de l'hydratation, ces composés vont réagir et former les hydrates de la pâte de ciment : silicate de calcium hydraté (C-S-H), portlandite ($Ca(OH)_2$), ettringite (AF_t), monosulfoaluminate (AF_m).

Les hydrates en question ne contiennent pas d'eau en tant que telle, mais ils sont composés de ses éléments ou de leur combinaison : hydrogène (H), oxygène (O) ou hydroxyle (HO)

Une théorie de l'hydraulicité d'un liant doit ainsi coordonner plusieurs séries de phénomènes :

- Phénomène chimique d'hydratation,
- Phénomène physique de cristallisation
- Phénomène mécanique de durcissement

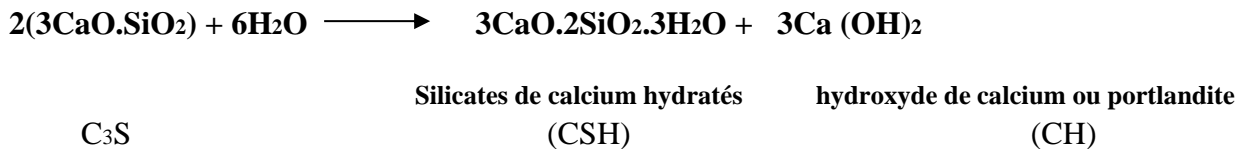
Aujourd'hui, les recherches sont toujours en cours pour comprendre le mécanisme complexe de l'hydratation. Avec leur avancée, il semblerait que les deux théories de l'hydraulicité soient moins opposées que complémentaires dans la mesure où elles peuvent s'appliquer à différents moments de l'hydratation et à différents hydrates. En effet, il a été montré que pour les C-S-H, germination et croissance avaient lieu aussi bien au sein de la solution que sur le grain de ciment anhydre.

II.4- Hydratation du ciment :

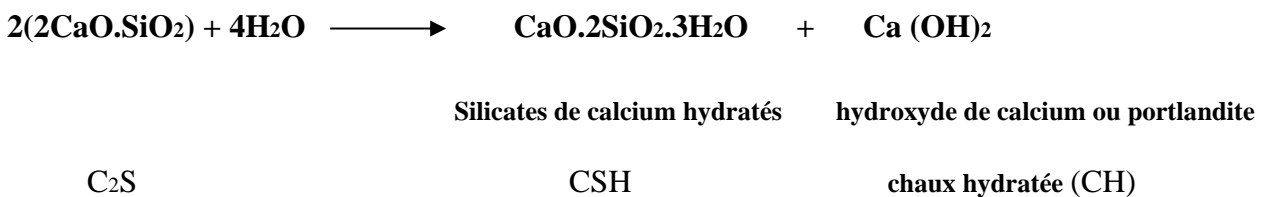
II.4.1- Les réactions d'hydratation :

De manière très schématique, on peut présenter les réactions des différents composés du ciment Portland en écrivant les relations suivantes:

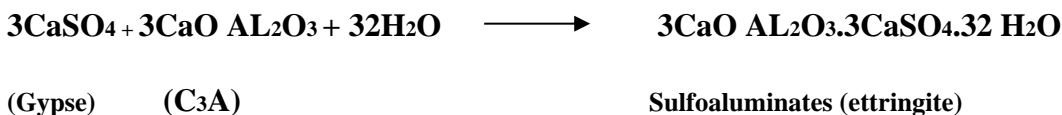
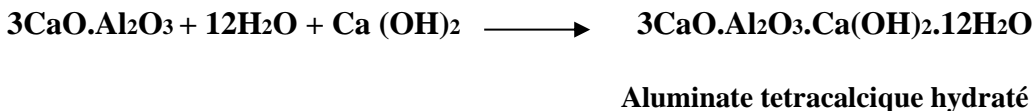
- Le silicate tricalcique (C₃S):



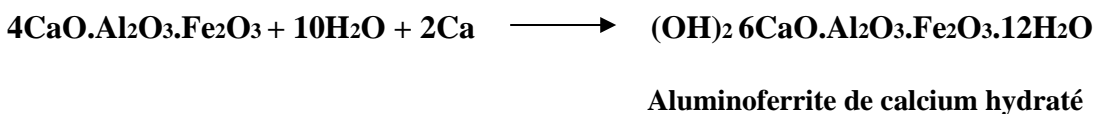
- Le silicate bicalcique (C₂S):



-L'aluminate tricalcique (C₃A):



- L'alumino ferrite tétracalcique (C₄AF):



Une fois hydratée, la pâte de ciment forme une structure cristalline; il est à remarquer que les C₃S et C₂S donnent la même famille d'hydrates dans le C-S-H; ils sont aussi l'agent liant le plus important, soit par les proportions, soit par les caractéristiques mécaniques qu'ils confèrent au matériau durci. Le C-S-H (la pâte de ciment durcie) qui occupe entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée, se présente sous la forme de feuillets très minces qui s'enroulent sur eux même en formant des tubes creux. D'un point de vue morphologique, le gel solide et poreux du C-S-H est un micro-cristal lamellaire, la lamelle étant composée de 2-3 feuillets très minces (voir fig.1.6)[11].

L'excès de calcium, libéré par les réactions d'hydratation du liant, se retrouvent sous forme

de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cristallisée sous forme de plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment partiellement hydratés. On trouve une forte concentration de cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans la zone de transition à l'interface pâte de ciment-granulat ou en bordure des bulles d'air.

Le gypse contenu dans le ciment Portland sert à réguler la réaction de prise du ciment par la formation d'un film de cristaux d'ettringite ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) à la surface des grains de C_3A , qui se révèlent très actifs et très violent à l'eau et dégage beaucoup de chaleur.

En ralentissant l'hydratation de C_3A on évite le phénomène de la fausse prise. La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

La pâte de ciment hydraté est formée par :

- Les hydrates (CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfaluminates);
- Des grains de ciment non hydraté;
- Des espaces capillaires;
- Des bulles d'air. (Figure)

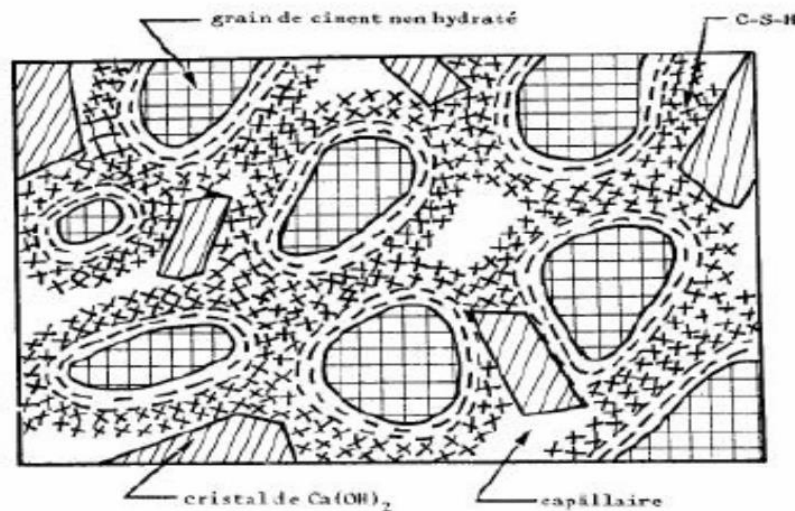


Figure II.3 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté
[Pigeon 1981] (Tirée par Dr : Guettala, a h.2005).

Les réactions d'hydratation sont exothermiques et responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires . Le matériau passe alors d'un état de suspension de particules floclées à celui de solide viscoélastique. L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que les réactions de ses différents constituants se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et que celles-ci peuvent s'interférer.

Dès le contact avec l'eau, les différentes phases du ciment se dissolvent superficiellement, ce qui correspond au recouvrement des grains de ciment par les premiers produits de l'hydratation, les silicates de calcium hydrates C-S-H . Elle dure une vingtaine d'heures. Au fur et à mesure de leur

formation, les C-S-H forment des ponts entre les particules de ciment et la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Ce cristallisé dans la solution entre les grains .

II.5-l'effet de l'eau sur la formation de la microstructure de la pâte cimentaire :

II.5.1-Structuration de la pâte de ciment hydratée :

Le développement de la microstructure dans la pâte de ciment comprend deux phases principales : La phase solide formée principalement de produits d'hydratation et la phase poreuse (structuration du réseau poreux) [12].

II.5.1.1-La phase solide :

Les trois principaux produits d'hydratation sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), la portlandite (CH) et l'ettringite. La Figure I.2 présente, de façon résumée le développement des hydrates au cours du temps. Comme nous l'avons mentionné plus haut, les séquences d'hydratation des phases C3A et C3S sont prépondérantes. Lors de l'hydratation ces deux séquences ne s'écroulent pas de façon indépendante mais bien au contraire sont soumises à des interactions. L'activation thermique des réactions des silicates par la chaleur de réaction des aluminates entraîne un effet accélérateur de la prise et du durcissement. De même, l'élévation du pH et de la concentration en calcium due à la libération de chaux lors de l'hydratation du silicate tricalcique modifie sensiblement la vitesse de réaction de l'aluminate.

II.5.1.2- La structure poreuse :

La structuration progressive de la pâte de ciment du fait de l'hydratation s'accompagne aussi d'une diminution de la quantité d'eau initiale, ayant pour conséquence la création d'un réseau poreux évolutif. Cette structure poreuse peut être scindée en deux principales catégories qui sont [13]:

- les pores des hydrates ou pores du gel,
- les pores capillaires.

Les pores de gel sont une caractéristique intrinsèque des hydrates et dépendent peu du rapport eau/ciment. Le gel de C-S-H est la source principale de cette porosité. Et dans ce cas, on retrouve deux types de pores :

- les pores inter-cristallites situés entre les particules de gels,
- les pores intra-cristallites correspondant aux espaces entre les feuillets des C-SH (la dimension caractéristique des espaces inter feuillets est de quelques dizaines d'angströms).

Les pores capillaires sont le résultat des reliquats des espaces inter granulaires puisque les produits d'hydratation ne remplissent pas tout le volume de la pâte de ciment. Cette porosité peut être considérée comme le volume occupé par l'eau évaporable [13].

Les pores de taille supérieure à 50 nm abaissent la résistance et nuisent à l'imperméabilité. De même, ils influent sur le retrait et le fluage.

Les volumes de ces deux familles de pores dépendent de la porosité initiale et de l'avancement des réactions d'hydratation.

Il faut noter que la différence entre la taille des pores de gel et les pores capillaires est dans une large mesure arbitraire, car le spectre de la taille des pores est un processus continu [14]. Selon Mindess & Young, seuls les pores capillaires sont responsables de la perméabilité à l'eau.

Guang Ye dans son étude bibliographique a donné une classification des pores, proposés dans la littérature. Le tableau suivant nous donne une classification des pores d'après Mindess et Young.

II.6. durcissement de la pâte de ciment :

II.6.1 Prise et durcissement :

Lorsqu'on réalise une Gâchée de pâte de ciment, de mortier ou de béton, on constate après un certain temps un raidissement du produit : c'est le début de prise. Ce raidissement s'accroît jusqu'à ce que le produit obtienne une résistance appréciable en fin de prise. Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et qui se poursuivent dans le temps sont complexes. Il se produit une micro-cristallisation. La multiplication de ces cristaux dans le temps explique l'augmentation de résistance mécanique. [3]

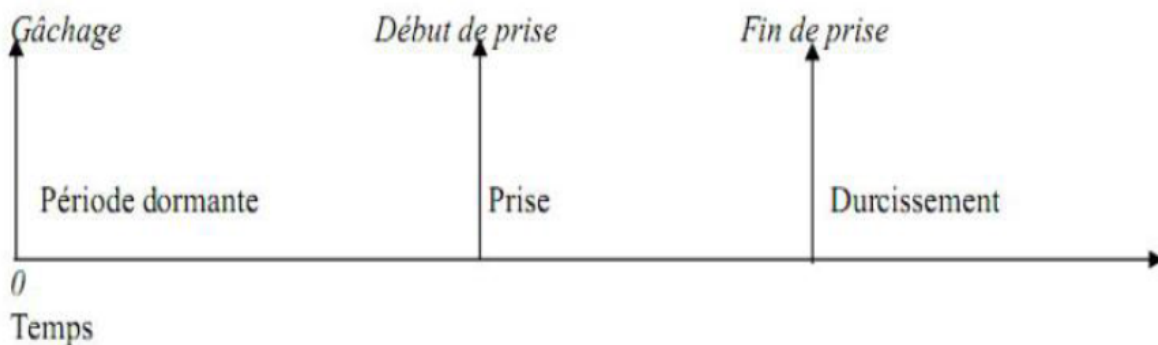


Figure II.4 : les étapes du durcissement de la pâte de ciment

- La phase dormante :

La pâte reste en apparence inchangée malgré le démarrage des premières réactions.

-Le début et la fin de prise :

Après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur c'est le début de prise. La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide.

-Le durcissement :

L'hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle. Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il durcit.

Le durcissement est un phénomène de "cristallisation". Des cristaux se forment (à partir d'un délai correspondant au début de prise) et s'enchevêtrent les uns avec les autres. Le béton qui est parfaitement fluide avant la prise du ciment devient ainsi progressivement dur. Le mélange eau et ciment ainsi "cristallisé" enserre les granulats et produit un matériau compact. Le durcissement se poursuit de manière continue pendant plusieurs mois.



Appareil de Vicat

Figure II.5 : mesure de consistance avec l'appareil de vicat

Le durcissement n'est pas un séchage. Il peut très bien se produire sous l'eau. La chaleur accélère la prise et le durcissement du ciment et le froid les ralentit et peut même les stopper. Pour sa cristallisation (ou hydratation) le ciment a besoin d'une quantité d'eau égale à 25 % de son poids. Mais pour qu'il puisse être mis en place et rester suffisamment maniable à utiliser, une quantité double d'eau est en général nécessaire. Mais il ne faut pas utiliser trop d'eau car un excès d'eau diminue la résistance et la durabilité du béton. La pâte (mélange du ciment et de l'eau) joue le rôle de lubrifiant puis de colle. Le durcissement ne se déclenche pas immédiatement lorsque l'on mélange de l'eau et du ciment mais après un délai appelé début de prise ce qui permet de malaxer, transporter, mettre en place et vibrer le béton. L'hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle. [20]

Le graphique suivant présente l'évolution typique de la résistance à la compression d'un béton traditionnel. On observe que 1/3 de la résistance à 28 jours est obtenue au bout de 2 jours ; les

2/3 de la résistance à 28j sont obtenus au bout de 7 jours. La montée en résistance se poursuit même au-delà des 28 jours conventionnels.

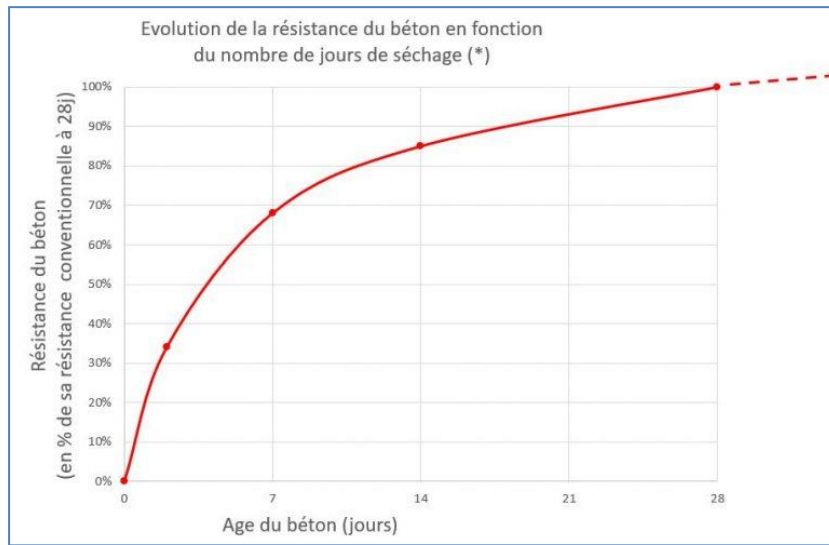


Figure II.6 : résistance du béton en fonction du nombre de jours de séchage.[20]

(*) valeurs indicatives, pour une formule de béton courante à base de ciment CEM II/A ou B, 32,5 ou 42,5 sans addition ou adjuvant modifiant la vitesse de durcissement, et pour une température moyenne de 20°C

II.6.2- Les facteurs qui influencent la vitesse de durcissement :

La résistance en compression du béton à un âge donné dépend de sa composition et des conditions de maturation.

A-Facteurs liés à la composition du béton :

- **Qualité du béton** : notamment sa classe de résistance à 28 jours et sa classe d'exposition.
- **Type de ciment** : la classe de résistance à court terme impacte la montée en résistance du béton. Pour une montée en résistance plus rapide, privilégier un ciment de type « **R** » (exemple : CEM II/B-LL 32,5 **R** CE CP2 NF).
- **Dosage en ciment** : plus le dosage en ciment est important, plus la montée en résistance sera rapide.
- **Quantité d'eau** : au-delà du fait que la quantité d'eau a un impact très important sur la résistance à 28 jours du béton, plus la quantité d'eau de gâchage est importante, plus la montée en résistance sera lente.
- **Adjuvants plastifiant ou super plastifiant** : leur utilisation permet de réduire la quantité d'eau de gâchage, ce qui augmente indirectement la vitesse de montée en résistance du béton.

- **Adjuvants accélérateurs de durcissement** : ils permettent d'augmenter la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Ils sont surtout utilisés par temps froid pour pouvoir continuer de bétonner normalement.
- **Adjuvants accélérateurs/retardateurs** :
- **Les accélérateurs de prise et/ou de durcissement** : ils permettent d'augmenter la vitesse de prise et/ou le développement des résistances initiales du béton. Ils sont surtout utilisés par temps froid pour pouvoir continuer de bétonner normalement.
- **Les retardateurs de prise** : l'utilisation d'un retardateur de prise permet d'augmenter le temps de prise du béton et ainsi d'avoir un délai d'utilisation du béton plus important. Ils sont utilisés **par temps chaud** ou bien en cas de temps de transport allongé ou de mise en place compliquée pour éviter les reprises de bétonnage.

B-Facteurs liés aux conditions climatiques :

- **La température ambiante** :
- Le taux d'hydratation du ciment, et donc la résistance du béton, augmente avec la température. Plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme (1 à 3 jours) est élevée. Alors qu'à long terme (28 jours et plus), l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances.

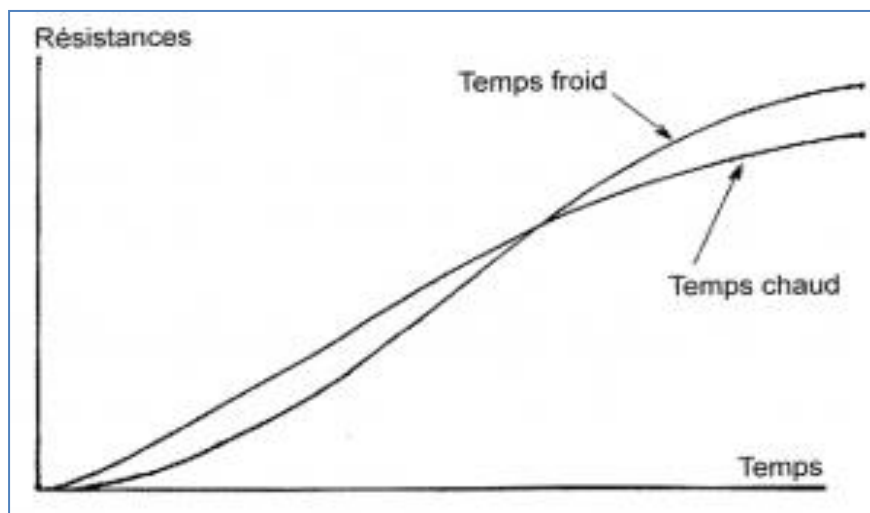


Figure II.7: l'influence de la température extérieure sur la progression des résistances. .[40]

II.7-l'effet de la qualité de l'eau sur les propriétés physiques et mécaniques de la pate de ciment durcie :

II.7.1- L'état de l'eau dans la pâte de ciment hydraté :

Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. Cette eau interviendra différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état (Figure II.8).

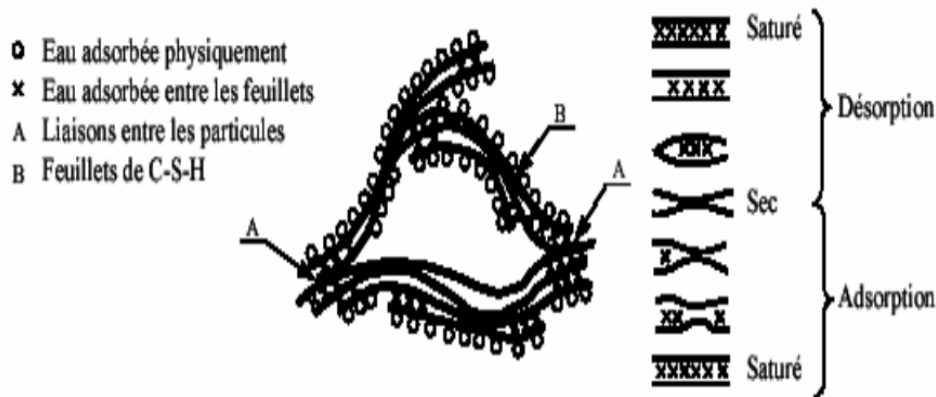


Figure II.8 : Structure du ciment durci selon le modèle de Feldman et Sereda;1968]

Le rapport Eau/Ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte du ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du mortier ou du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles. Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont très proche les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire . La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton ou mortier seront très élevées, comme elles montrent les figures ci- dessous [18,19,20]

II.7.1.1-L'eau combinée chimiquement :

Cette eau fait partie intégrante des C-S-H. Elle représente environ 23% du poids de ciment qui a réagi. Elle est très stable et on ne peut l'évaporer qu'en décomposant le C-S-H à haute température.

II.7.1.2- L'eau zéolitique :

Cette eau n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-SH mais elle est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène. Pour l'évaporer il faut que le taux d'humidité s'abaisse au-dessous de 30%, ce qui provoque un très fort retrait de la pâte

II.7.1.3- L'eau absorbée :

Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides (surtout sur les parois des capillaires ou des pores de gel). On croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau, peut être retenue par des liens hydrogène. Une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité est inférieur à 50%. Cette perte d'eau est en grande partie responsable du retrait de la pâte ou du béton.

II.7.1.4- L'eau des capillaires :

Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment, et selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface, on trouve l'eau libre contenue dans les plus gros capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait) et l'eau non libre qui est contenue dans les plus petits capillaires ($0,05 \mu\text{m}$ à $0,005 \mu\text{m}$). Elle y est retenue par des tensions capillaires. Il faut abaisser le taux d'humidité en dessous de 90% pour qu'elle commence à s'évaporer. Elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte.

Le durcissement de la pâte de ciment correspond au remplissage graduel de l'espace entre les grains de ciment par les produits de réaction qui continuent de se former (Figure). La pâte se densifie et la résistance du matériau augmente. Cette étape de durcissement peut durer jusqu'à un an, tant que l'hydratation n'est pas complète. Le gain sur la résistance mécanique n'est alors plus significatif mais le comportement aux agressions chimiques diverses d'un béton vieilli suffisamment longtemps sera meilleure que celle d'un béton comportant encore des grains de ciment anhydres [8].

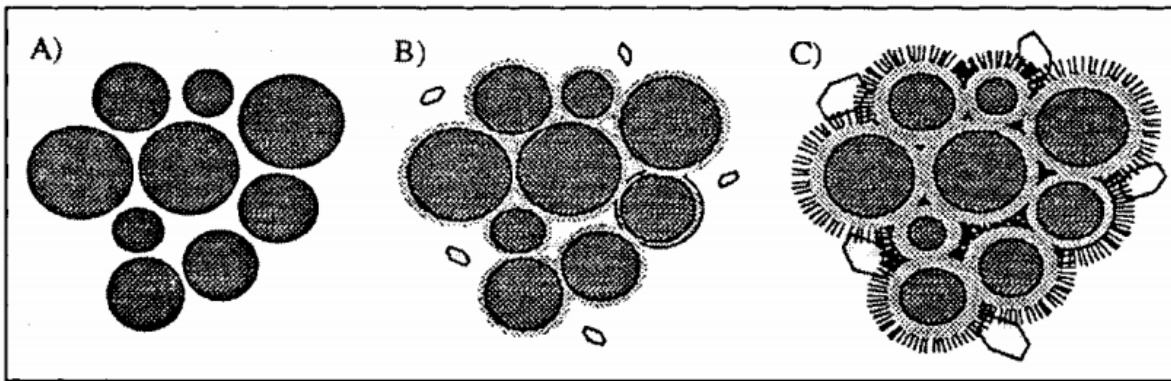


Figure II.9 :Processus de l'hydratation. A) état initial B) Recouvrement des grains de ciment
C) Création des liens entre particules [8].

Tableau II.1 : Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment d'après [9].

Période	Processus chimique	Processus physique
Gâchage	Dissolution rapide du ciment, formation du C-S-H et d'étringite	Fort dégagement de chaleur (1 ^{er} pic thermique)
Dormante	Augmentation rapide du pH et de la teneur en Ca^{2+} de l'eau de gâchage ce qui induit un ralentissement de la dissolution des constituants du ciment. Formation lente de C-S-H et d'étringite et sursaturation en chaux de la phase aqueuse	Inertie thermique et augmentation lente de la viscosité
Prise	Accélération de la dissolution des constituants du ciment grâce à la diminution de la teneur en Ca^{2+} par la formation de $Ca(OH)_2$; Hydratation de C_3S pour donner du C-S-H et de la portlandite,	Augmentation du flux thermique, solidification et diminution de la porosité
Ralentissement	Epuisement du gypse et formation du monosulfo aluminat par la réaction des ions sulfates (provenant de l'étringite) avec le reste des aluminates; Accélération de l'hydratation des C_3S et C_2S .	Deuxième pic thermique et diminution de la porosité
Durcissement	Ralentissement des réactions du fait que les grains anhydres sont recouverts d'hydrate de plus en plus épais.	Diminution du flux thermique et de la porosité

la figure II.10 permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100% d'hydratation (conservation dans l'eau).

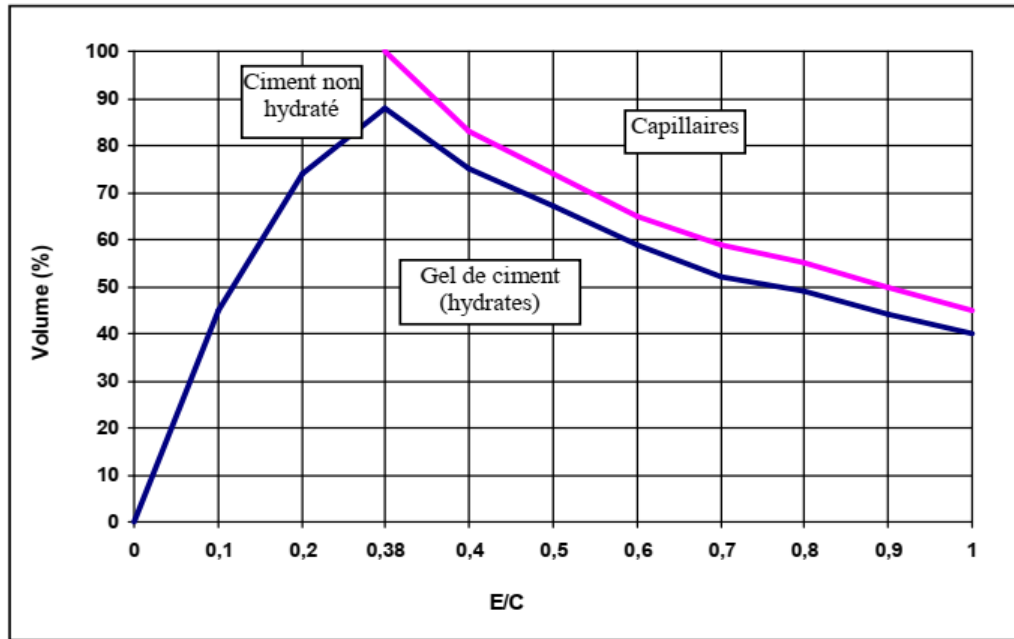


Figure II.10: Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau. [10].

II.8. Différents types d'eau dans la pâte du ciment :

A la fin de la réaction d'hydratation, la structure poreuse de la pâte du ciment durcie contient trois sortes d'eau qui sont les suivants :

II.8.1. Eau liée :

L'eau peut être liée chimiquement, elle entre dans la composition chimique des hydrates. C'est ainsi que les silicates de calcium C2S et C3S s'hydrate en présence d'eau pour donner un produit final hydraté de type C3S2H3. Très approximativement, il a été montré que l'eau liée chimiquement par le C3S et le C2S correspond respectivement à 24 et 21% de la masse de ces deux silicates. L'eau peut aussi être liée physiquement à l'hydrate par des forces d'attraction intermoléculaires. L'eau liée chimiquement et l'eau liée physiquement sont nécessaires à la constitution de l'hydrate [18].

II.8.2- Eau libre:

C'est l'eau qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation du ciment, la grande finesse du ciment anhydre et la dimension très faible des pores du ciment hydraté font que cette eau est soumise à des forces de surface qui limitent ses possibilités de déplacement. L'eau libre est cependant susceptible de migrer à l'intérieur de la pâte de ciment et, dans certaines conditions, de s'évaporer [18].

II.8.3-Eau adsorbée :

L'eau retenue par les forces superficielles des particules de gel est appelée eau adsorbée. L'eau adsorbée à la surface de solide est due aux forces électromagnétiques, qui agissent à la surface des grains, solidarisent sur une faible épaisseur (de 10 à 15Å) les molécules d'eau avec le solide, réduisant leur mobilité [18].

II.9.1- Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériaux poreux :

Il est y de nombreux phénomènes physiques et chimiques qui peuvent agir isolement ou simultanément permettant à l'humidité de pénétrer puis de se répandre dans les matériaux de construction [21,23], parmi ces mécanismes:

II.9.1. La gravité :

Depuis Newton, tout le monde sait que les corps subissent l'attraction de la terre. Cette attraction terrestre s'exerce, bien évidemment, sur les gouttes d'eau déposées à la surface d'un élément de construction et c'est elle qui va leur permettre de pénétrer à l'intérieur de la construction, pour peu toutefois qu'elles rencontrent à cet effet quelques passages. Mais, cette pénétration ne pourra s'effectuer qu'à condition que ces passages présentent une dimension suffisante que l'on peut évaluer à 0.5mm. En deçà, sous l'effet des tensions s'exerçant à la surface des gouttes, celle-ci « n'éclateront » pas et ne se réperdront pas à l'intérieur des matériaux [21,23].

II.9.2. L'énergie cinétique des gouttes d'eau :

Transportées par le vent, les gouttes de pluie peuvent dans leur trajet avoir emmagasiné une énergie suffisante pour pénétrer à l'intérieur de la paroi contre laquelle elles sont projetées. Notons toutefois que cela ne se produira que si ces gouttes rencontrent une ouverture de largeur suffisante, que l'on peut estimer de l'ordre de 4 à 5mm. En deçà de cette largeur, les gouttes ruisselleront à la surface de la paroi contre laquelle elles se seront écrasées mais sans y pénétrer [21,23].

II.9.3- La pression du vent :

Lorsque la pluie atteint en abondance une paroi constituée d'un matériau peu perméable, par exemple un enduit à base de liant hydraulique, elle finit par ruisseler à la surface de cette paroi. En l'absence de vent, le film d'eau de ruissellement franchit les fissures éventuelles des parements sans pénétrer dans la paroi. A l'inverse, lorsque le vent s'exerce sur le film de ruissellement, l'eau parvient à pénétrer dans les fissures éventuelles du parement, cela se produit même si ces fissures sont très fines : à partir de 0.1mm d'ouverture [21,22,23].

II.10- Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'humidité dans un matériau de construction :

D'une manière générale, la fixation de l'humidité dans les milieux poreux résulte de l'action plus ou moins conjointe de deux mécanismes physiques fondamentaux:

II.10.1- L'absorption physique:

C'est le résultat de l'interaction entre la vapeur d'eau dans l'ambiance et la surface solide en contact. Les forces de contact mutuelles qui s'exercent entre les particules de vapeur d'eau et les particules du solide en surface (forces de Van Der Waals) permettent aux molécules d'eau de se fixer sur la paroi du solide. Plus l'humidité relative de l'ambiance est élevée, plus la quantité d'eau adsorbée est importante. Ce processus est généralement modélisé par une courbe reliant la masse d'eau adsorbée à l'humidité relative appelée isotherme de sorption et désorption [21,22,23].

II.10.2- La capillarité :

On désigne par le vocable "capillarité", le phénomène dans lequel dans un tube fin plongé dans un liquide mouillant, le niveau du liquide s'élève plus haut qu'à la surface libre extérieure. On démontre en physique que plus le tube est fin, plus le liquide ne s'élève. Or, les matériaux les plus couramment utilisés en construction sont poreux et les petits canaux internes qu'ils comportent jouent, lorsque la construction est mise en contact avec l'eau, le rôle de tubes capillaires qui permettent à cette eau de remonter dans les maçonneries. Ce phénomène physique est dû aux forces capillaires qui se manifestent entre les parois des pores et l'eau en contact. Plus le réseau poreux est fin, plus les forces capillaires sont grandes et plus la hauteur d'ascension est importante [21,22,23]. Ce phénomène se constate effectivement pour tous les matériaux qui présentent des pores très fins (d'un diamètre inférieur à 0.5 mm) (voir la figure ci-dessous).

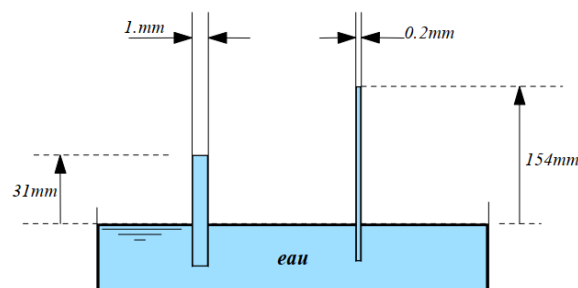


Figure.II.11 : Phénomène de capillarité : plus le tube est fin, plus le liquide s'élève

II.11- l'effet de champ magnétique sur les propriétés physiques et chimiques de l'eau pure :

II.11.1 Les EMF et l'eau :

Peu de recherches montrant l'interaction des champs électromagnétiques sur de l'eau pure ont été faites. Ce constat est corrélé avec le fait que de **nombreuses études théoriques mettent en avant que les propriétés chimiques de l'eau pure ne peuvent pas être modifiées par un traitement magnétique**. En effet, l'idée d'un changement de la structure des molécules d'eau par un traitement magnétique a été critiquée parce que l'énergie générée par un champ magnétique est faible par rapport à celle de l'agitation thermique.

Comme nous venons de le voir, l'effet de l'action des champs électromagnétiques est en général étudié sur des solutions aqueuses (ioniques et/ou colloïdales, etc...) ce qui ne permet pas d'isoler la contribution intrinsèque de l'eau. Ici nous allons présenter les quelques expériences sur l'effet des EMF sur de l'eau « pure » :

La molécule d'eau étant un dipôle électrique, elle peut s'aligner dans un champ électrique. Cette caractéristique d'alignement doperait la forme normale de la glace hexagonale avec les ions hydroxydes (Fukazawaa et al. 1998). Bramwell montre l'effet d'une source électrostatique sur le mouvement d'un courant d'eau (Bramwell 1999). L'eau étant diamagnétique, elle peut léviter dans une atmosphère paramagnétique (air ou de l'oxygène pressurisé à plus de 12 atm) avec un champ magnétique d'intensité extrêmement élevée de 10 T (Ikezoe et al. 1998). [24]

II.11.1.1- Action des EMF sur les propriétés optiques de l'eau :

Quelques études semblent mettre **en évidence l'effet d'un champ magnétique sur les spectres d'absorption infrarouge de l'eau** :

Iwasaka a mis en évidence l'effet de champ magnétique élevé d'environ 14 T sur le spectre proche infrarouge de l'eau (domaine d'étude de 900 à 2000 nm) en circulation (vitesse du flux non précisé). Il a observé **un déplacement des bandes 970 et 1927 nm de 1 à 3 nm vers les hautes longueurs d'ondes**. Pour une solution de glucose, le même traitement magnétique entraîne toujours un déplacement vers les basses longueurs d'onde .

Toutes les expériences (pour chaque spectre 100 à 600 mesures) sont effectuées à une température stabilisée de 25°C. L'auteur émet l'hypothèse que le champ magnétique de 14 T affecterait la formation des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau ainsi que l'hydratation des molécules de glucose . Malheureusement dans cette étude, la qualité chimique de l'eau n'a pas été précisée. Et comme nous le verrons plus tard, la définition de la qualité chimique de l'eau ainsi que de la pureté de celle-ci jouent un rôle important dans l'observation de l'effet du traitement électromagnétique.

Klassen a observé un **déplacement de quelques dizaines de cm^{-1} des bandes d'absorption infrarouge de l'eau** vers la région des hautes fréquences et **une augmentation de l'intensité d'absorption** d'environ 10% pour **les bandes intramoléculaires de 1640 cm^{-1} et de 3400 cm^{-1}** , lorsque l'eau bidistillée (de faible résistivité $0,16 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) circule à une faible vitesse de $0,15 \text{ cm/s}$ à travers un champ magnétique statique de densité de flux de $0,02 \text{ T}$. L'effet observé serait perceptible pendant 5 h [25]. Une autre série d'expériences réalisées par le même auteur a consisté à traiter une solution de 0,3 à 1% d'eau pure dans de l'eau lourde D_2O à une vitesse de $4,3 \text{ m/s}$ dans un champ magnétique statique de densité de flux de $0,03 \text{ T}$. On observe une augmentation de l'absorption d'environ 30 à 40% dans la région fréquentielle de 3450 cm^{-1} . L'effet disparaîtrait spontanément en 24 h . [25]

En 1971, Klassen a renouvelé son expérience **en diluant l'eau à 0,58% dans un composé organique comme l'acétonitrile**. Ce solvant perturbe les liaisons hydrogène entre les molécules d'eau. Klassen montre que l'application d'un champ magnétique de $0,06 \text{ T}$ **augmente d'environ 25% l'intensité d'absorption des bandes de 3540 cm^{-1}** (attribuée aux vibrations d'élongation antisymétrique des molécules d'eau faiblement liées par liaison hydrogène) et de 3626 cm^{-1} (attribuée aux vibrations d'élongation des molécules d'eau monomères) [25]. On peut s'interroger sur la qualité de l'eau utilisée ayant une faible résistivité et du taux d'impuretés organiques résiduelles. Cette eau additionnée en faible quantité dans un solvant organique comme l'acétonitrile pourrait peut-être engendrer des micelles inverses selon la nature des impuretés organiques résiduelles.

Mirumyants établit expérimentalement qu'il n'y a aucun effet sur **le spectre d'absorption infrarouge de l'eau** que cette eau soit bidistillée ou de l'eau dure du robinet circulant à différentes vitesses dans un champ magnétique statique de $0,05 \text{ T}$ [26]. Malgré l'utilisation de cette technique spectroscopique qui est la plus sensible pour observer les changements structuraux dans la molécule, Mirumyants ne confirme pas les travaux de Klassen. Néanmoins, les études sont-elles comparables étant donné que les conditions expérimentales sont très brièvement décrites et ne semblent pas rigoureusement identiques ?.

Quelques études semblent mettre en évidence **l'effet d'un champ magnétique sur l'absorption de la lumière par l'eau** :

Klassen a aussi montré que l'action d'un champ magnétique statique ($1,6 \text{ mT}$) sur de l'eau bidistillée (de très faible résistivité $0,03 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) en circulation à une vitesse de $0,75 \text{ m/s}$ engendre plus rapidement l'agrégation de particules colloïdales de Kaolin et de schiste argileux (à une concentration de 4%). La sédimentation est suivie par absorption de la lumière dans les quelques secondes après agitation (300 expériences effectuées). Malgré les imprécisions sur les conditions expérimentales (environnement chimique et électromagnétique), Klassen semble mettre en évidence

l'effet indirect du champ magnétique sur la coagulation qui est d'autant plus important à basse température (aux alentours de 3 à 5°C qu'à 20°C),. [27]

Bruns a montré qu'un **champ magnétique statique** de densité de flux variant jusqu'à 0,015 T sur de l'eau distillée (de faible résistivité 0,05 MΩ.cm) circulant à une vitesse de 0,6 m/s entraîne **une modification de 30% de l'intensité d'absorption de la lumière**[28]. Quelle que soit l'intensité du champ, le maximum d'absorption de la lumière se produit à la même longueur d'onde. La méthode utilisée permet de détecter des substances dans l'eau à des concentrations d'environ 0,01 ppm. D'après l'auteur [28], les concentrations d'impuretés éventuelles de l'eau distillée étant inférieures au seuil de détection, les effets observés seraient dus aux propriétés structurales de l'eau. Au vu de la faible résistivité de leur eau distillée, cet effet observé serait plus dû à un artéfact qu'à une propriété physique de l'eau. En outre, nous verrons par la suite que l'eau distillée est loin d'être une eau pure, une concentration non négligeable de composés organiques est présente. De plus elle dépend de la maintenance de l'appareil de production.

Ushakov rapporte qu'un champ magnétique statique du même ordre de grandeur que celui utilisé dans les études de Klassen (quelques dizaines de mT) n'a pas d'effet sur l'indice de réfraction de l'eau circulant à une vitesse inférieure à 0,20-0,25 m/s, malgré la sensibilité de la technique d'interférométrie qui est de 10^{-8} – 10^{-7}

Kirgintsev confirme les travaux d'Ushakov : un champ magnétique statique de densité de flux de 0,02 à 0,03 T est **sans effet sur de l'eau distillée ou sur une solution circulant à une vitesse de 0,25 m/s** sur la densité et l'indice de réfraction de l'eau et de solutions. La variation de température du point de congélation de l'eau distillée après traitement électromagnétique n'a pas changé à +/- 0,003 degré près. La différence de solubilité du sulfate de calcium dihydraté entre l'eau distillée traitée et non traitée n'excède pas +/- 0.1%. [29]

II.11.1.2- Action des EMF sur les propriétés physico-chimiques de l'eau :

Gonet ne rapporte dans son étude **aucun changement du pH, de la tension de surface de l'eau tridistillée (résistivité 0,8 MΩ.cm)** ou de l'eau sanitaire ayant suivi un traitement dynamique (à une vitesse de flux de 0,01 m/s) à travers **un champ magnétique statique allant jusqu'à 0,8 T** avec un temps d'exposition de 15 min. Il n'a observé **aucun changement de la constante électrique de l'eau tridistillée qu'elle soit immobile ou avec une vitesse de flux de 0,6m/s**.

Zhao a fait une étude calorimétrique de l'effet d'un champ magnétique (de densité de flux de 0,8 T) sur l'enthalpie d'une solution de chlorure de potassium (circulant à une vitesse de 0,09 m/s) mesurée à la température de 298,15°K. Il a détecté un effet qui serait, selon l'auteur, dû à la distorsion des liaisons hydrogènes de l'eau. [30]

Fesenko met en évidence **un changement des propriétés de l'eau distillée** (à 21°C, pH = 6) dans les 10 premières minutes d'exposition à **des micro-ondes de fréquence 36 GHz** à deux puissances, 50 μ W et 5 mW [30]. Il mesure la diminution de l'amplitude des oscillations de tension électrique à travers un condensateur rempli d'eau après l'excitation du circuit par une pulsation rectangulaire unipolaire (18 V, 1 ms, duty 1000).

L'analyse des oscillations basses fréquences révèlent deux pics prononcés autour de 5 Hz et 47 Hz. L'exposition de la cellule de mesure aux micro-ondes de 36 GHz pendant plusieurs minutes supprime le pic de 47 Hz. Cet état de l'eau persiste, après l'arrêt du traitement, pendant plusieurs minutes ou des heures selon la force du champ magnétique appliqué.

L'effet de la plus petite puissance utilisée 50 μ W des micro-ondes aurait un effet plus prononcé qu'avec la puissance 100 fois plus grande. Les auteurs [31] pensent que les micro-ondes modifieraient l'état original de l'eau et que l'exposition à ces micro-ondes changerait la concentration des gaz dissous. Comme nous le verrons ci-dessous, l'eau distillée a une concentration non négligeable de composés organiques. De plus ici la cellule de mesure étant un capillaire (diamètre 1 mm) en polyéthylène, les interactions contenant/contenu sont facilitées pouvant engendrer la pollution de l'eau .

Bone met en évidence l'hydratation d'enzyme comme le lysozyme par des mesures de spectroscopie diélectrique. Deux dispersions diélectriques sont identifiées, la première centrée approximativement à 8 MHz et la seconde autour d'1 GHz. La dispersion la plus élevée est considérée comme le résultat de la relaxation rotationnelle des molécules d'eau liées à l'enzyme. Ces résultats indiqueraient ainsi l'existence d'une population de 32 molécules d'eau par molécule de lysozyme. Une plus large population de molécules d'eau relativement libre répond au champ électrique et présente un moment dipolaire proche de molécules d'eau à l'état de vapeur (Bone 1996). Cette étude suggère une **interaction d'un champ électrique sur la structure de l'eau liée à une enzyme à des fréquences précises.**

Higashtani a exposé des solutions aqueuses additionnées de sondes fluorescentes à des champs magnétiques statiques de densité de flux de 0,42 T appliqués pendant 45 min. L'eau utilisée est purifiée par distillation et osmose inverse, elle a une résistivité d'environ 17 M Ω .cm, thermostatée à 25°C. L'intensité d'émission des sondes fluorescentes augmente avec la durée d'exposition du champ magnétique et se stabilise au bout d'environ 35 min d'exposition. Toutefois aucun effet magnétique n'est observé pour les sondes n'ayant pas de chaîne alkyle. Les effets magnétiques sur la sonde fluorescente en solution décroissent avec la concentration d'alcool (nécessaire selon la sonde pour augmenter la solubilité de celle-ci) dans les solutions aqueuses, avec la température de la solution supérieure à 30°C et le temps d'attente après la fin de l'exposition. L'auteur considère que ces

résultats sont en relation avec la mobilité des chaînes alkyles des sondes et les molécules d'eau entourant celles-ci. Cette étude permettrait d'étayer l'hypothèse de **l'action des champs magnétiques sur la structure des molécules d'eau plus ou moins ordonnées autour des chaînes hydrophobes des molécules fluorescentes** [32]. La résistivité annoncée par l'auteur nous paraît élevée sachant qu'aucune précaution n'est mentionnée au niveau de l'environnement atmosphérique (taux de CO₂,...), de plus les contenants sont des tubes en verre.

Zhou montre, par des simulations de Monte Carlo, **qu'un champ magnétique de 0,2 T change de façon significative la capacité calorifique et l'énergie interne de l'eau pure**. Il fait l'hypothèse que le champ magnétique agirait sur l'organisation des molécules d'eau et **affecterait la distribution des liaisons hydrogène**. Selon lui, le champ magnétique affaiblirait ou même casserait partiellement les liaisons hydrogène, augmentant ainsi le nombre de monomères de molécules d'eau, qui pourraient engendrer un effet biologique [30].

Ozeki a montré qu'un **champ magnétique statique pourrait augmenter la structure ordonnée formée par l'eau au contact d'une surface hydrophobe ou colloïdale**. A 30°C l'eau serait repoussée de la surface des solides **par un champ magnétique statique d'environ 0,1 T, nous serions en présence d'un phénomène de désorption. Par contre sous l'action d'un champ de densité de flux supérieure à 0,9 T**, l'eau serait adsorbée sur la surface des particules. La quantité d'eau adsorbée change après l'application des champs magnétiques et atteint une valeur seuil après quelques minutes. **Il semblerait que seulement l'eau faiblement en interaction avec des surfaces solides, telle que l'eau associée à des surfaces hydrophobes serait apte à répondre à l'action des champs magnétiques**. L'eau et tous les solides utilisés étant diamagnétiques, l'eau peut se désabsorber par une perte d'énergie libre sous l'effet des champs magnétiques. La stabilisation apparente de l'eau adsorbée sous le champ magnétique peut être attribuée à une transition magnétique ou à un changement structural. Les propriétés paramagnétiques de l'eau deviendraient alors plus significatives mais pas dominantes comme l'augmentation des ponts d'hydrogène ou la progression de l'adsorption. Dans une étude récente Tikhonov et al. Démontrent que l'eau existe sous deux isomères de spin nucléaire différent : la molécule ortho et para comme pour l'hydrogène .

D'après les auteurs, les molécules para ont une plus grande probabilité d'être piégées par les surfaces solides. Dans la même idée, Ozeki et al. Supposent que l'effet magnétique peut provenir de la conversion para/ortho de **l'eau par le champ magnétique appliqué** [33].

Colic et Morse étudiant des solutions et des suspensions aqueuses, font l'hypothèse que **l'action des champs électromagnétiques porterait sur l'interface gaz/eau** [34]. Cette hypothèse est renforcée par les expériences de dégazage (dépression non précisée, pendant 30 min) de l'eau qui

inhibe, avant ou après, l'action du champ de fréquence de 27 MHz (durée de traitement : 15min). **De plus les gaz rares ainsi que le dioxyde de carbone pourraient augmenter les effets observés.**

Les gaz en s'accumulant sur les surfaces hydrophobes augmenteraient leur caractère hydrophobe et engendreraient la formation d'eau de « basse densité » [34]. Les auteurs ont aussi observé de petites quantités de différentes espèces réactives d'oxygène (ozone, de peroxyde d'hydrogène, etc.) dans la solution après l'exposition du traitement électromagnétique.

Del Giudice et al., à partir d'une approche de mécanique quantique, suggèrent que l'application d'un champ électromagnétique sur des molécules d'eau engendrerait des structures ordonnées de tailles macroscopiques (quelques centaines de microns) qui pourraient avoir un rôle fondamental dans l'organisation de la matière vivante [35].

Les travaux de l'équipe de Semikhina montrent **l'effet d'un faible champ magnétique variable sur la perte diélectrique, la conductivité électrique, le coefficient de transfert thermique d'eau bidistillée** (de résistivité 0,5 M Ω .cm). Selon les auteurs, un champ magnétique **d'amplitude variant de 0,01 à 26,6 μ T et de fréquence variant de 0,014 à 156 Hz affecte les spins nucléaires de protons** induisant un changement dans les probabilités de « mobilité » de ces ions dans les liaisons hydrogène des chaînes de Bernal. Fowler [36] ont décrit l'organisation structurale des atomes oxygène et hydrogène dans le réseau des liaisons hydrogène pour la glace. La règle de Bernal et Fowler consiste à définir que chaque atome d'oxygène a comme voisin deux hydrogènes et chaque liaison hydrogène contient un atome d'hydrogène. La dissociation des molécules d'eau liquide engendre la formation d'ions hydroxyle (OH⁻) et d'ions hydronium (H₃O⁺) qui entrave cette règle. **L'apparition des ions OH⁻ et H₃O⁺ engendre des « défauts ioniques » dans la structure de l'eau (Binhi 2002). L'effet du faible champ magnétique sur la perte diélectrique est maximum au bout de 6h de traitement puis décroît avec un temps de relaxation d'environ 3h.** Kiselev et al. cherchent à relier cet effet magnétique aux spins de la molécule d'eau isolée dont le temps de relaxation est, par contre, incommensurablement inférieur (10-11 s). Ils attribuent cette grande différence de temps à l'organisation de l'eau sous forme de clusters induisant un grand nombre d'interface entre les phases, ainsi qu'à des défauts locaux au sein du réseau de liaisons hydrogène (Kiselev et al.1990). [24]

Chapitre III : Etat de l'art sur l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés des matériaux cimentaires

III.1- L'eau magnétisée :

III.1.1. Définition :

L'eau magnétisée est une eau obtenue après son passage à travers un certain champ magnétique ou inversement, ou après le passage du champ magnétique à proximité de cette eau pendant un certain temps. Le processus d'aimantation réorganise les charges d'eau, correctement, sachant que ces charges étaient disposés au hasard dans l'eau non aimantée.

La magnétisation de l'eau est l'opération par laquelle on restitue à l'eau ses qualités énergétiques et vitales. Une eau restructurée est une eau qui a retrouvé sa vitalité, donc la puissance de son champ électro magnétique lui permettant de recréer des liens ou structures caractérisant l'eau vivante (Figure III.1).

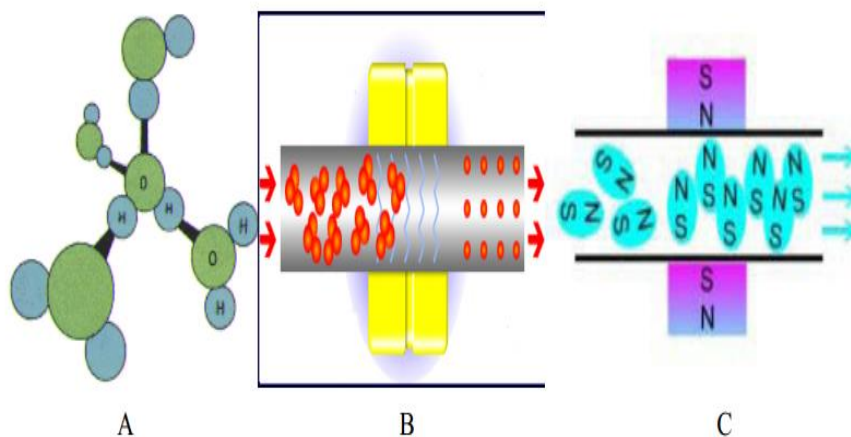


Figure III.1 : Mécanisme de l'eau magnétisée [39].

Une eau magnétisée, redynamisée sur le plan moléculaire, retrouve son pouvoir inné d'absorption de l'oxygène; elle est aussi moins tendue en surface. La magnétisation permet d'obtenir une eau hautement énergisée, contrairement à l'eau fournie par le réseau public (ou par les eaux en bouteille) qui perd toute "vitalité" (transport et stockage).

La magnétisation vise à rectifier la nature subtile de l'eau qui peut produire des effets positifs sur la santé.

La magnétisation de l'eau permet d'éclater les groupements de molécules en de plus petits amas qui hydrateront mieux les cellules du corps . (FigureIII.2)

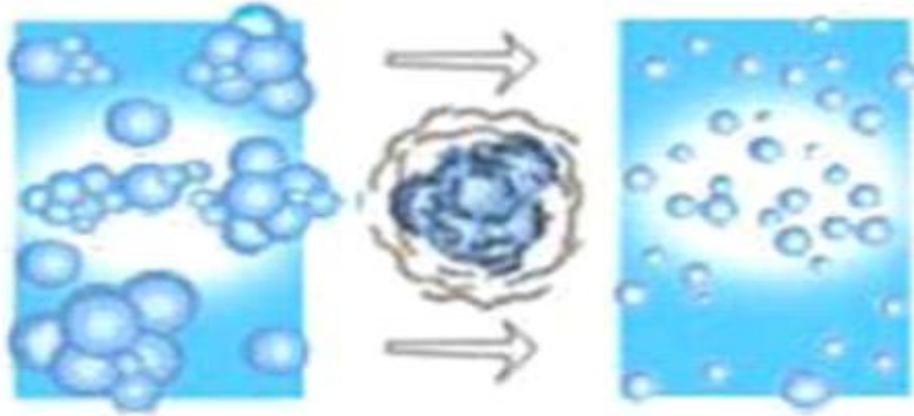
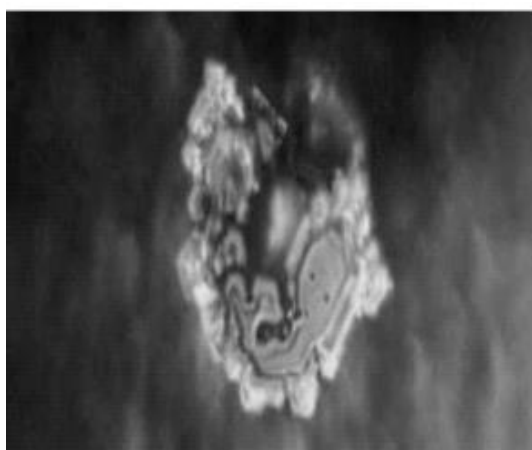


Figure III.2. La structure de l'eau dynamisée en micromolécules

III.1.2-Les propriétés de l'eau magnétisée :

Les propriétés de l'eau magnétisée sont les suivantes :

- Elle augmente considérablement sa fréquence vibratoire qui passe de 1011 à 1015 hertz, la fréquence de la lumière visible
- Elle favorise l'ionisation des molécules d'eau.
- Plus des ions hydroxyle (OH-) sont créés pour former des molécules alcalines, et réduire l'acidité.
- Elle détruit les masses d'eau inertes pour créer une majorité d'isomères trimères
- Elle transforme une eau oxydée en eau réduite et produit des électrons libres (Figure III.3).



FigureIII.3 :Cristaux de Masaru Emoto (Médecin chercheur Japonais) (Emoto, 1999)

III.1.3- champ magnétique :

Retour à utiliser l'aimant pour longtemps, tel qu'il est utilisé par les Pharaons, les Chinois et les Indiens dans différents domaines, et ont la science magnétique a évolué, en soulignant que les propriétés magnétiques ne se limitent pas à des éléments spécifiques, il est une propriété associée à tous les solides, liquides et gazeux et quartiers tous.

Cette technique n'est pas nouvelle, mais les pays en développement, comme le premier brevet pour un magnétiquement traitement de l'eau et l'élimination des dépôts de calcaire qui se forment sur les tubes en Europe en 1251 après JC et a rencontré des premières recherches entre 1960 ADn- 1980 magnétisme spécial et menées dans les instituts russes et des pays de l'Europe enregistrés la Chine a surpris et remis en question l'incapacité de fournir des explications convaincantes pource point de grandioses, mais maintenant la plupart des concepts de faits scientifiques magnétiques peut être défendue.

III.1.4-Effet champ magnétique mécanique sur l'eau :

L'énergie magnétique affecte l'eau en raison de la nature de l'installation d'eau lui-même des atomes Quand mettre molécules d'eau dans un champ magnétique, les liaisons hydrogène entre les molécules sont soit modifiées, ou se désintégrer, ce qui conduit à l'absorption d'énergie en réduisant ainsi le niveau de la parties Union l'eau entre eux, et augmente la sensibilité del'é lectrolyse affecte la décomposition des cristaux.

La figure montre la manière dont les molécules d'eau se déplacent dans une direction après que l'eau passe à travers un champ magnétique d'une certaine intensité iceberg.

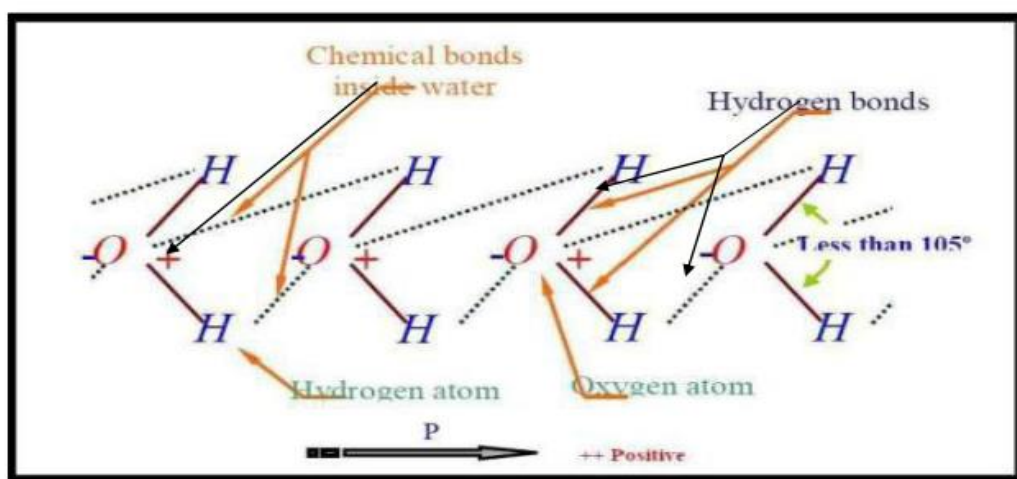


Figure III.4 : Disposition des molécules d'eau après une exposition à un champ magnétique.

III.1.5 Les changements dans l'eau magnétisée :

Le champ magnétique fonctionne selon les principes de la physique en créant un champ magnétique sous forme de lignes parallèles de conduites d'eau.

L'eau liquide est affectée par le champ magnétique, bien que sa capacité à appliquer le champ magnétique est inférieure à l'air.

Les champs magnétiques (0,2 Tesla) a montré qu'il augmente le nombre de molécules d'eau de cristallisation (qui sont des molécules simples résultant des particules recueillies ayant moins de poids).

En raison de ce bon équilibre résultant du conflit entre les liaisons hydrogènes et les liaisons non-hydrogènes dans les agrégats d'eau, tout affaiblissement des liens (Van Der-waals) conduisent à un resserrement et un espacement plus des liaisons hydrogènes ; ce qui crée une boucle de clusters des liaisons hydrogènes. Ces très faibles champs magnétiques peuvent affecter la solubilité des gaz dans l'eau, particulièrement celle de l'oxygène. Ceci peut-être dû à l'impact de ces champs magnétiques sur la stabilité et l'équilibre de la structure de l'eau.

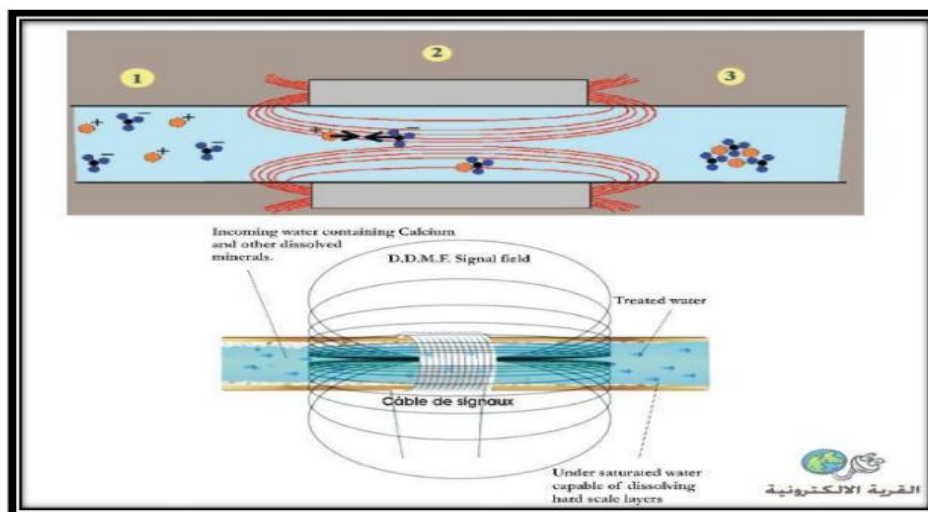


Figure III.5 : les changements dans l'eau magnétisée

III.2-Effet de l'eau magnétisée sur les propriétés fraîches et durcies des matériaux cimentaires :

III.2.1 Essai 01 : Effet de l'eau magnétique sur les propriétés du béton (réalisé par Saddam M. Ahmed):

Les recherches conduites par **Saddam** [37] sur l'influence de l'eau magnétisée sur la résistance à la compression et la maniabilité du béton. Ces résultats ont montré que la résistance à la compression des échantillons de béton préparés avec l'eau magnétisée est améliorée de 10-20% en comparaison avec de l'eau de robinet. De plus, On le constate également que l'eau magnétisée a été aussi améliorée la maniabilité du béton frais.

III.2.1.1 - Travaux expérimentaux :

A-Matériaux utilisés :

Ciment : le ciment utilisé tout au long de ces travaux était du ciment Portland ordinaire (C.P.O) produit par Usine de ciment Adana, les résultats des tests physiques du ciment utilisé sont donnés en Tableau 1). Il est conforme aux spécifications irakiennes n ° 5 (1984) .

Agrégat fin (sable): le sable était du sable de rivière de la région de Kanhash, qui avait apparence, son classement était conforme à la spécification ASTM C33 et mesuré la gravité était de 2,65 et le module de finesse de 2,75. Les poids de l'agrégat fin sont basés sur un matériau à l'état sec de surface saturée, dans lequel, comme l'indique la description, le granulat fin est entièrement saturé mais ne contient pas d'eau à l'extérieur des particules.

Agrégat grossier (gravier): Gravier naturel non concassé (gravier de rivière local de Mossoul région) a été utilisée et sa classification était conforme à la spécification ASTM C33 . Le volume spécifique la gravité basée sur le matériau à l'état sec de surface saturée était de 2,70 et la finesse module de 3,20.

Eau: l'eau est nécessaire pour le processus chimique (hydratation) dans lequel le ciment la poudre prend et durcit en une seule masse solide. Pour les bétons normaux, le rapport eau-ciment est généralement dans la plage d'environ (0,4-0,6) , l'eau potable de l'approvisionnement en eau de Mossoul est utilisée tout au long de la recherche pour le cas de l'eau magnétique et normal.

B-Procédure de mélange :

Il est d'usage de définir les proportions d'un mélange de béton en fonction du poids total de chaque composant nécessaire pour constituer 1 m³ de béton humide, comme 400 kg de ciment, 170 kg d'eau, 700 kg de sable et 1200 kg d'agrégat grossier, plus le volume total d'air, en pour cent. Méthode d'essai par lots utilisée pour obtenir des mélanges des propriétés souhaitées à partir du

ciments et agrégats à portée de main, produits à partir de plusieurs petits lots d'essai avec des quantités d'agrégat pour obtenir la résistance requise.

Tableau III.1: Propriétés physiques du ciment :

Propriétés physiques du ciment		Résultat du test	Limite de S.I., n ° 5
Temps de prise	Réglage initial (heure)	3 heures	≥ 1.0 h
	Réglage finale (heure)	4.5 heures	≥ 10.0 h
Solidité (%)		0.8	≤ 0.8
Résistance à la compression de mortier (MPa)	3 jours	27.5 Mpa	≥ 15 Mpa
	7 jours	37.2 Mpa	≥ 23 Mpa

Essai :

Consistance du béton (maniabilité): La consistance du béton est le plus souvent mesuré par le test d'affaissement. L'affaissement est une bonne mesure de la teneur totale en eau dans le mélange. L'affaissement de chaque groupe de mélanges de béton a été effectué selon BS 1881: partie 2 (1970). Les résultats des mélanges testés sont résumés dans les tableaux III.3 et III.4.

Résistance à la compression : tous les échantillons étaient des échantillons cubiques standard (150 * 150 * 150mm) conformément à BS, et testé immédiatement après le retrait de l'eau, la résistance à la compression de chaque groupe de béton a été réalisée selon BS 1881 . La résistance à la compression a été considérée comme la valeur moyenne de trois échantillons.

Les résultats des échantillons testés sont résumés dans les tableaux III.3 et III.4.

C-Mélanger les proportions :

- Dans la présente étude, pour trouver l'effet de la vitesse du courant et du temps de traitement de l'eau sur la résistance à la compression et la consistance du béton, puis pour trouver l'optimum caractéristique du traitement de l'eau, 7 mélanges de type ont été préparés, ces mélanges sont (N,M1, M2, M3, M4, M5 et M6), mix-N est le béton normal qui est préparé avec eau normale, (M1, M2, M3, M4, M5 et M6) sont le béton normal préparé avec eau magnétique préparée en exposant l'eau à une intensité de champ magnétique d'environ (12000 gauss) avec des vitesses égales à 1,27, 0,71, 0,42, 0,32, 0,25 et 0,20 m / s respectivement, la durée du traitement est indiquée dans le tableau (3). Tous les mélanges avaient un mélange proportions d'environ (400 kg) de ciment, (180 kg) d'eau, (700 kg) d'amende agrégat, et (1110 kg) d'agrégats grossiers (1: 1,75: 2,775 / 0,45 - en poids), le les

échantillons sont testés à l'âge de 7 jours, les échantillons testés sont résumés dans le tableau III.3.

- Des mélanges d'essai sont préparés pour trouver l'effet de l'eau magnétique sur la compression résistance et consistance du béton avec des proportions de mélanges (1: 1,75: 2,775 / 0,45, mixNA), (1: 1,60: 2,0 / 0,56, mix-NB) et (1: 1,75: 3,0 / 0,425, mix-NC), par poids, préparé tout d'abord avec de l'eau normale. Les mêmes mélanges sont également préparés avec eau magnétique à une décharge, une vitesse et un temps de magnétisation optimaux de l'eau (force magnétique d'environ 1,2 Tesla et le temps de traitement est de 4,5 s / litre) pour produire mix-MA, mix-MB et MC. Le tableau III.2 résume les détails de ces mélanges et le les échantillons sont testés à l'âge de 7 et 28 jours. Les résultats des échantillons testés sont résumé dans TableauIII. 4.

Tableau III.2: Détails et propriétés des échantillons testés :

Échantillons	Poids en kg / m3				E/c par poids	Type d'eau
	Ciment	Sable	Gravier	Eau		
NA	400	700	1110	180	0.45	eau du robinet
MA	400	700	1110	180	0.45	Magnétique
NB	405	720	900	225	0.56	eau du robinet
MB	405	720	900	225	0.56	Magnétique
NC	400	700	1200	170	0.425	eau du robinet
MC	400	700	1200	170	0.425	Magnétique

D-Résultats et discussion :

Effet du traitement du débit, de la vitesse et du temps de l'eau sur la résistance à la compression et consistance du béton :

Les résultats montrent que le béton préparé avec de l'eau magnétique (M1, M2, M3, M4,M5 et M6) a une résistance à la compression supérieure à celle du mélange avec de l'eau normale

(mix N), bien que les mêmes proportions de mélange soient utilisées pour tous les mélanges, l'augmentation de la compression la force dépend de la vitesse du courant d'eau qui passe à travers le champ magnétique, comme indiqué dans Figure III.6, Figure III.7 et Tableau III.3. La meilleure augmentation des performances de l'échantillon est obtenue lorsque la vitesse du courant est de (0,71 m / s) et le débit d'eau qui traverse le champ d'environ (0,22 litre / sec.). La figure III.8 montre que la résistance à la compression dépend également du temps de traitement de l'eau qui est utilisée dans le mélange, et le meilleur moment de traitement de l'eau en magnétique le champ est (4,5 s / litre),

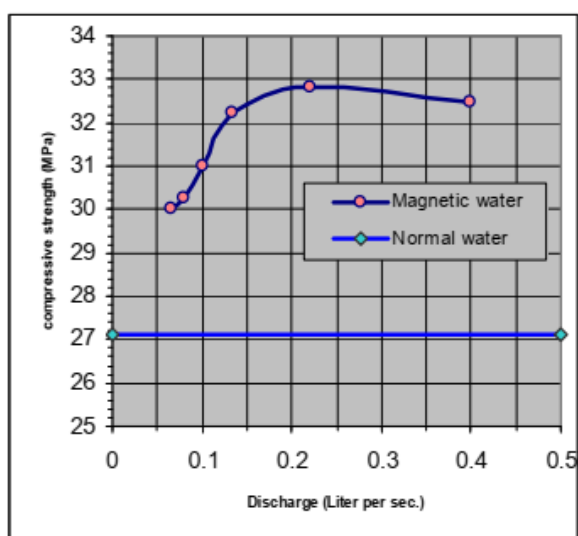


Figure III.6: Relation entre résistance à la compression et écoulement de l'eau.

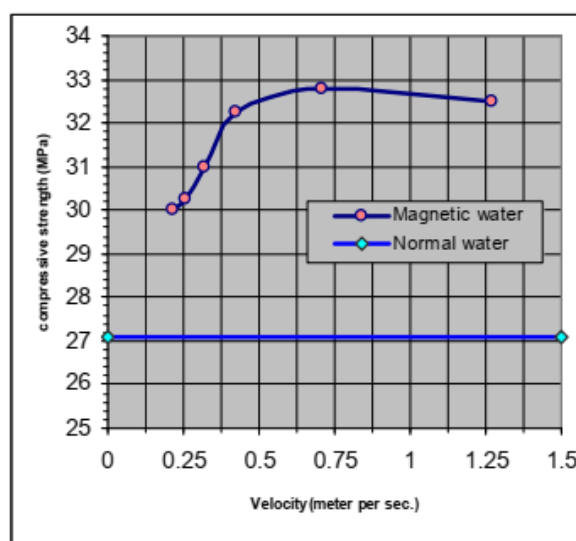


Figure III.7: Relation entre la résistance à la compression et la vitesse de l'eau.

Tableau III.3: Résultat des échantillons testés

Echant	Temps de traitement Sec./Liter	Vitesse du courant Meter / Sec.	Affaissement mm	Résistance moyenne à la compression (MPa), à 7 jours	augment de Pourc %
N	Eau de robinet	-	20	27.10	
M1	2.5	1.27	55	32.50	20%
M2	4.5	0.71	65	32.80	21%
M3	7.5	0.42	50	32.50	20%
M4	10.0	0.32	45	31.00	14.4%
M5	12.5	0.25	40	30.25	11.6%
M6	15.0	0.20	40	30.00	10.7%

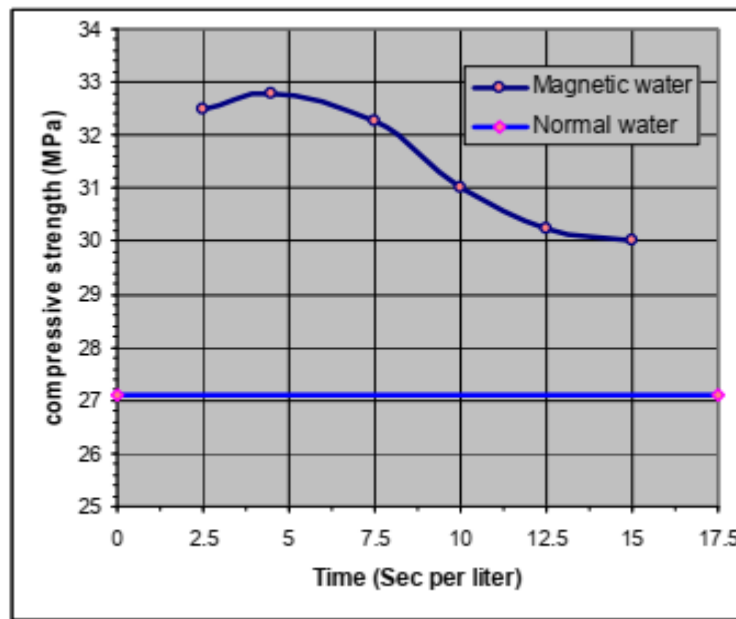


Figure III.8: Relation entre la résistance à la compression et le temps de magnétisation.

bien que l'augmentation de la résistance à la compression soit observée, l'ouvrabilité (consistance) du béton frais augmente également de manière significative pour tous les mélanges magnétiques spécialement dans le mélange-M2 du mélange-N qui est préparé avec de l'eau normale et dans les mêmes conditions, ce qui signifie que la consistance du béton frais est également améliorée lors de l'utilisation d'eau magnétique.

E-Effet de l'eau magnétique sur la résistance à la compression et la consistance:

Les trois mélanges d'essai MA, MB et MC, qui ont été préparés en utilisant de l'eau magnétique provenant de l'eau de traitement à une vitesse (0,71 m / s) et un temps de traitement de l'eau d'environ (4,5 s / litre). Le tableau III.4 montre que la résistance à la compression augmentée (10-20%) lors de l'utilisation d'eau magnétique par rapport à celles préparées avec de l'eau ordinaire.

Tableau III.4 : Résultat des échantillons testés :

Échantillons	Affaissement mm	Résistance moyenne à la compression (MPa) à 7 jours / 28 jours	Augmentation en pourcentage à 7 jours / 28 jours
NA	20	27.10 / 47.3	21% / 13%
MA	65	32.80 / 53.4	
NB	75	21.10 / 36.1	13% / 10%
MB	115	MB	16% / 14%
NC	10	28.7 / 48.6	
MC	35	MC	

Cela peut s'expliquer par le fait qu'un réseau plus homogène de nouvelles formations de minéraux de ciment hydraté se développe lorsqu'il est mélangé à de l'eau magnétisée.

L'augmentation de la résistance à la compression du béton par ce processus conduit à un effet supplémentaire d'économie de ciment, d'additifs et d'énergie thermique lorsque de l'eau magnétisée est utilisée dans le béton, pour lequel la résistance à la compression est vitale. Même lorsque la résistance à la compression est le principal facteur du béton, confirmation statistiquement pertinente de l'augmentation de la plasticité du ciment lorsqu'il est préparé avec de l'eau magnétique. Les niveaux de plasticité dépendent des qualités de la colle de ciment et puisque le traitement magnétique influence les qualités de la colle, alors le niveau de plasticité du béton changements, comme le montre la Figure III.9, lors de l'utilisation d'eau magnétique pour pétrir du ciment.



-A-

Béton préparé avec de l'eau normale
(mix-NA)



-B-

Béton préparé avec de l'eau magnétisé
(mix-MA)

Figure III.9 : Changement du niveau de plasticité dans le béton frais.

Conclusion :

- La résistance du béton préparé avec de l'eau magnétisée a augmenté de 10 à 20%, lorsque la densité de flux magnétique était de (1,2 Tesla).
- L'utilisation de l'eau magnétique a augmenté la maniabilité et la résistance, c'est un bon phénomène, car l'augmentation conventionnelle de la maniabilité en ajoutant de l'eau entraîne une diminution de la résistance du béton.
- La vitesse du courant d'eau d'environ (0,71 m / s) et le temps de traitement de (4,5 s / litre) sont le meilleur traitement caractéristique de l'eau qui convient le mieux à la préparation du béton frais.

III.2.2-Essai 02 : Effet de l'eau magnétique sur les propriétés du béton (réalisée par Arihant Jain & al :

Dans des récents études faites par **Arihant Jain & al [38]**, sur l'effet de l'eau magnétique également connu sous le nom d'eau traitée de champ magnétique (MFTW) sur la résistance à la compression, l'absorption de l'eau, la porosité et la sorptivité pour des échantillons préparés avec de l'eau magnétique. MFTW a été obtenu par le dépassement par un champ magnétique. Les résultats ont révélé que la résistance à compression des bétons préparés avec de l'eau magnétique est plus haute que ceux préparés avec de l'eau normale de robinet. L'augmentation de la résistance à la compression du béton préparée avec de l'eau magnétique est plus significative à l'âge jeune. Le meilleur résultat réalisé pour l'absorption de l'eau et la porosité ont été obtenus à la force magnétique de l'eau traitée est de 1T. Le meilleur résultat pour la sorptivité a été obtenu à la force magnétique de l'eau traitée est de 0.9t.

III.2.2.1-Travaux expérimentaux :

Pour l'étude de l'eau magnétique sur le mélange de béton, les propriétés mécaniques et de durabilité des échantillons de béton sont déterminées (comme l'absorption d'eau, la porosité et la sorptivité) comme paramètre représentatif pour le béton non conventionnel. Maintenant Pour l'étude de l'eau magnétique sur le mélange de béton, les propriétés mécaniques et de durabilité des échantillons de béton sont déterminées (comme l'absorption d'eau, la porosité et la sorptivité) comme paramètre représentatif pour le béton non conventionnel. Maintenant par force magnétique différente de l'eau traitée de 0,8 T, 0,9 Tet 1T tandis que 0T représente l'eau du robinet normale.

A-Matériaux utilisés :

Le ciment utilisé est du ciment Portland ordinaire de grade 43 fabriqué par ACC Cement Company. Granit concassé pierre de taille maximale 20 mm confirmant IS 383-1970 utilisée sous forme d'agrégats grossiers. L'agrégat fin utilisé dans cette essai passait à travers un tamis de 4,75 mm. Le classement la zone d'agrégat fin était la zone II selon la norme indienne spécification. L'eau est utilisée pour la préparation de l'eau magnétique est exempt de particules en suspension et de substances chimiques.

B-Préparation de l'eau magnétique (MFTW) :

L'eau magnétique a été préparée en faisant passer de l'eau du robinet normale à travers un champ magnétique généré par des électroaimants dans un laboratoire de physique. L'eau tournait dans un champ électromagnétique pendant 120 minutes pour 3 litres d'eau. Les matériaux ont été utilisés

dans la préparation des électroaimants MFTW, du compteur de Gauss, du 9V au moteur, de l'hélice, des pailles en plastique.

C-Proportion De Mélange :

Pour cette enquête, le béton Grade M30 pour les échantillons a été utilisé. La procédure de conception détaillée du mélange du grade M30 de le béton est donné dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Proportion de mélange d'essai pour 1m3 de béton

MATERIEL	QUANTITÉ EN KG
Ciment	413.33
Agrégats fins	664.67
Agrégats de 20 mm	684.15
Agrégats de 10 mm	456.1
Eau	186

D-Préparation Des Echantillons D'essai :

Pour étudier l'effet de l'eau magnétique sur la résistance à la compression des cubes de béton de taille 150x150x150 mm était utilisé. Pour l'absorption d'eau, la porosité et la sorptivité du des cubes de béton de 100x100x100 mm ont été utilisés.

E-Variables D'expérience :

La force magnétique de l'eau traitée est de 0,8 T, 0,9 T et 1T. L'âge de durcissement des échantillons était de 7 jours et 28 jours pour le essai de résistance à la compression. L'âge de guérison était de 28 jours pour Test d'absorption d'eau, de porosité et de sorptivité.

F-Résultat et discussions :

1-Résistance à la compression :

Tableau III.6 : Résistance à la compression du béton

Force magnétique de l'eau traitée	Résistance à la compression	
	7 jours	28 jours
0 Tesla	18.67	33.16
0.8 Tesla	20.1	34.20
0.9 Tesla	22.05	34.43
1.0 Tesla	22.23	35.91

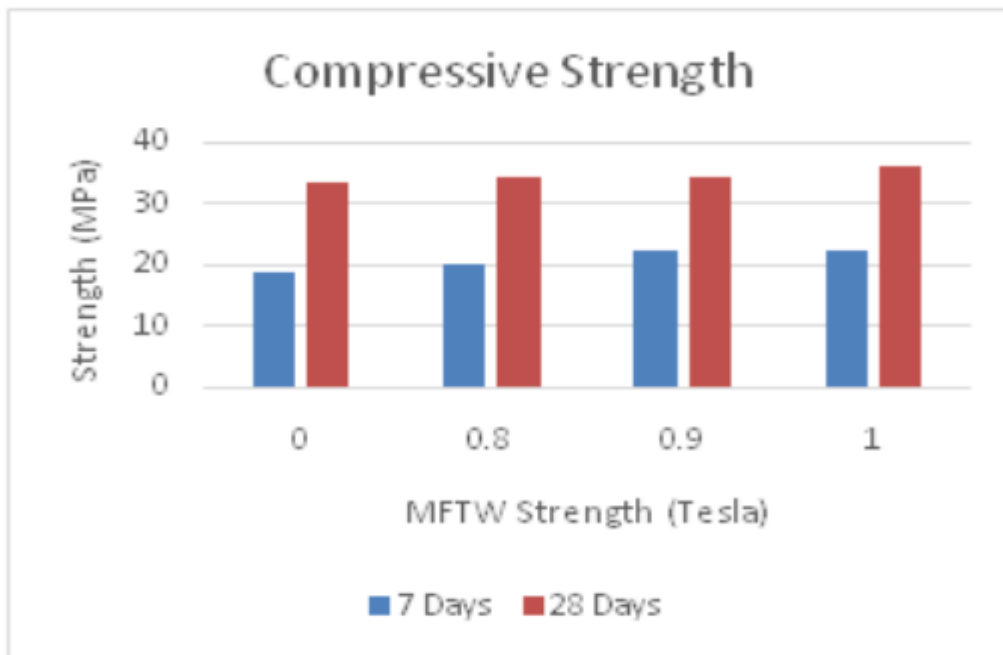


Figure III.10 : Variation de la résistance des échantillons avec la force de MFTW

2-Absorption de l'eau :

Tableau III.7 : Absorption d'eau de l'échantillon

Force magnétique de l'eau traitée	Absorption de l'eau (%)
0 Tesla	5.618
0.8 Tesla	6.344
0.9 Tesla	6.914
1.0 Tesla	5.519

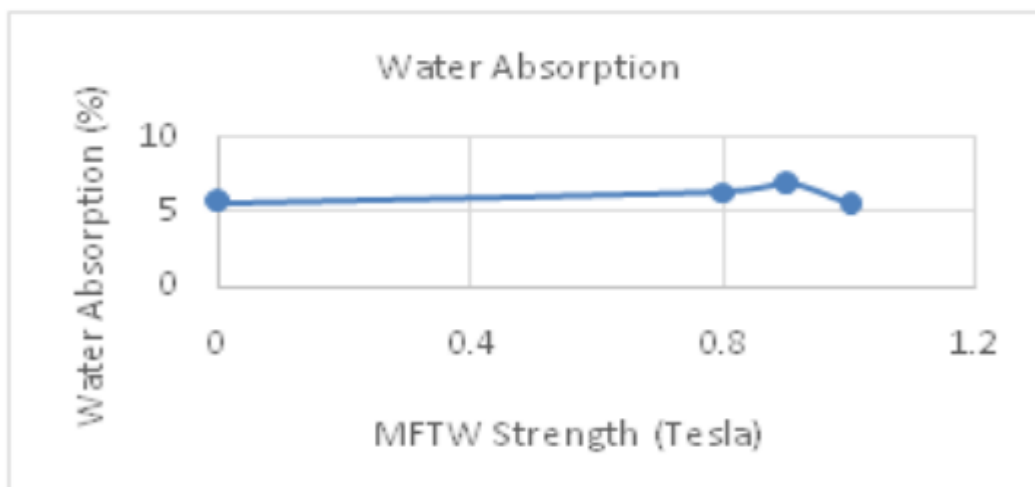


Figure III.11 Absorption d'eau à différentes forces de MFTW

3-Porosité :

Tableau III.8 : Porosité de l'échantillon de béton

Force magnétique de l'eau traitée	Porosité (%)
0 Tesla	13.4
0.8 Tesla	15.32
0.9 Tesla	16.21
1.0 Tesla	13.11

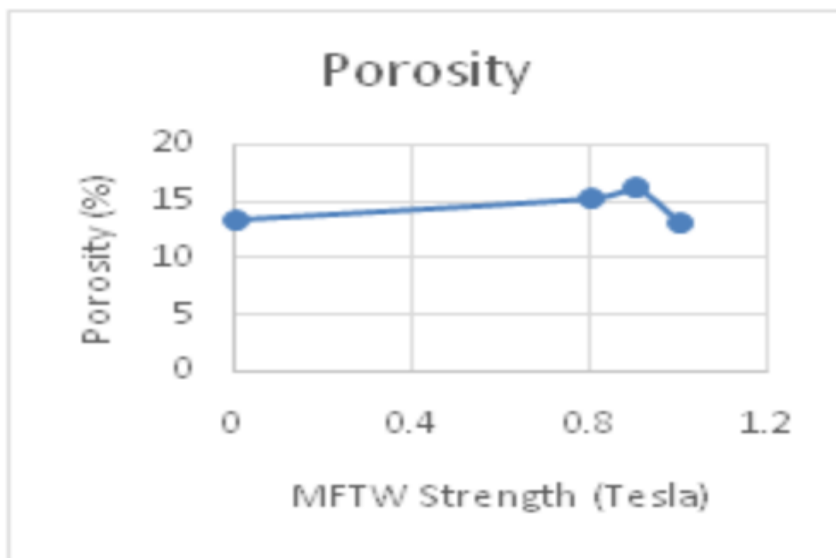


Figure III.12 : Porosité à différentes forces de MFTW.

4-Sorptivité :

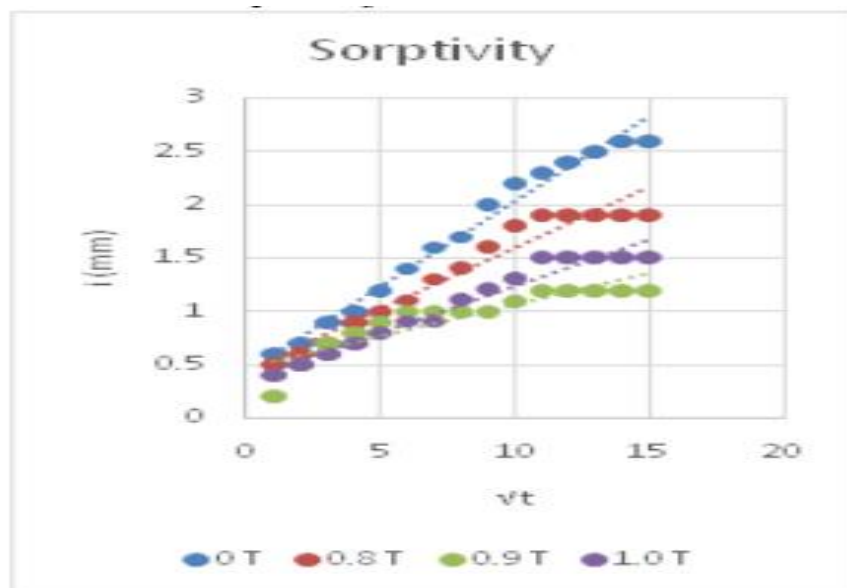


Figure III.14 : Graphique de comparaison de la sorptivité des échantillons de béton

Conclusion :

La résistance à la compression du béton augmente avec l'utilisation de MFTW et cette augmentation de la force est due au concept de cluster. Comme il y a plus d'eau disponible pour l'hydratation, plus de nombre de la particule de ciment est hydraté et cela se traduit par une augmentation de l'hydratation qui peut conduire à une augmentation de la résistance à la compression du béton. Ce phénomène augmente l'efficacité du ciment utilisé dans le béton. Les résultats de l'absorption d'eau et de la porosité montrent une tendance à la hausse de 0,8 Tesla et 0,9 Tesla, mais finalement une diminution de 1 Tesla qui sort de moins de 0 Tesla. Le meilleur résultat de la sorptivité montre une tendance à la hausse jusqu'à 0,9 Tesla, ce qui est inférieur à 0 Tesla. Le processus de magnétisation de l'eau modifie ainsi les propriétés mécaniques et de durabilité du béton.

Conclusion générale

Le but essentiel de ce travail, était de voir l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés physico-mécaniques sur le mortier :

A travers des résultats obtenus d'après des recherches récentes, il en résulte que :

- Les résistances à la compression, à la traction et à la flexion ont été trouvées maximales dans le béton avec de l'eau magnétisée. Par conséquent, le remplacement pourrait être effectué pour économiser efficacement le ciment dans la construction durable.
- Une augmentation précoce et significative des paramètres de résistance du béton en raison de l'utilisation d'eau magnétisée serait utile pour l'élimination précoce du coffrage du béton. Pour les structures de grande hauteur où le temps est important, l'eau magnétisée pourrait être la meilleure option pour la production de béton.
- L'utilisation d'eau magnétisée améliore l'ouvrabilité (affaissement) du béton par rapport au mélange de contrôle en raison de la faible absorption d'eau de l'effet de dispersion de l'eau magnétisée. Par conséquent, 10 à 12% de la teneur en eau pourrait être réduite sans compromettre l'ouvrabilité du béton. Étant donné que l'eau magnétisée a amélioré les propriétés d'écoulement.

Outre les perspectives envisagées, il serait certainement très intéressant de réaliser la même étude de l'effet de l'eau magnétisée sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux en général.

Références Bibliographiques

- [1] : M.S.Shetty, Concrete Technology Theory and Practice page 10 Mai 2005.
- [2] : Joshi et al. 1966. Health Physics Bivkion, Air Monitoring Section, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay-74
- [3] : KOMMAR. A.. « Matériaux et éléments de constructions ». Moscou, édition Mir, 1975.page 1-56
- [4] : « Cimbéton ». Documentation technique édité par le centre d’information sur le ciment et ses applications. Paris, France 1994.page 19-31
- [5] : Dreux. G.. « Nouveau guide du béton ». Eyrolles, Paris 1979.
- [6] : « Clauses techniques – ciments – CT 2/1994 (composition et spécifications) ». Administration des Ponts et Chaussées. Service du laboratoire d’essais des matériaux.
Site Web : <http://www.etat.lu/PCH/public/structureorg/labomater/publications/clauses/ct2.html>
- [7] : AFNOR.. « Bétons et constituants du béton : ciments et chaux ». Tome 2.
3eme édition, AFNOR 1990.
- [8] : DREUX. G et FESTA. J.. « Nouveau guide du béton et ses constituants ». 8eme édition. France, Eyrolles 1998.
- [9] : VON EUW . M.. « Les laitiers de haut fourneau ». Annales de ITPBP , 1981
- [10] : J. P. LATTEUR.. « *Les ciments belges composition et classification suivant la norme NBN*». Guide abrégé d’application. Febelcem, 1996.
Site Web : <http://www.febelcem.be>
- [11] : « les mortiers ». <http://www.yahoo.com/search/fr?p=les+mortiers.html>
- [12] : DAVISON. J. I.. « *Mortier pour maçonnerie* ». Conseil national de recherche. Canada,1975. Site Web : <http://www.nrc.ca/irc/cbd-f.html>
- [13] : KOMMAR. A.. « *Matériaux et éléments de constructions* ». Moscou, édition Mir, 1975.
- [14] : « *Cimbéton* ». Documentation technique édité par le centre d’information sur le ciment et ses applications. Paris, France 1994.
- [15] : Site Web :<https://www.cieau.com/espace-enseignants-et-jeunes/les-enfants-et-si-on-en-apprenait-plus-sur-leau-du-robinet/la-definition-de-leau-potable/>
- [16] : Site Web : https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_de_mer#cite_note-1
- [17] : Site Web :[https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Matériaux de construction/Eau et adjuvants.pdf](https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Matériaux_de_construction/Eau_et_adjuvants.pdf)
- [18] : G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Ed Eyrolles, pp.317 (1998),Paris.
- [19] : M.N. Adam, Propriétés des bétons, Ed Eyrolles, pp. 754 (1998), Paris.

- [20] : Guelmine, L., Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures, thèse de doctorat en sciences, usthb d'Alger, 2017, pp.159.
- [21] : **C. Raymond**, L'humidité des bâtiments anciens: Causes et effets diagnostic et remèdes, Ed du Moniteur Technique, pp.13-30(1989), Paris.
- [22] : **S. Bories**, Analyse critique des différents modèles mathématiques utilisés pour les transferts de masse et de chaleur, Collège International des Sciences de la Construction, ITBTP (1982).
- [23] : L. Guelmine, Influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment durcis, Mémoire de Magister, Université Amar Telidji de Laghouat, 2006 pp. 86.
- [24] : Philippe Vallée. Etude de l'effet de champs électromagnétiques basse fréquence sur les propriétés physico-chimiques de l'eau. Sciences pharmaceutiques. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2004. Français. page entre 20 et 30
- [25] : Klassen et al. 1968.
- [26] : Mirumyants et al. 1972.
- [27] : Klassen and Zinov'ev 1967
- [28] : Bruns et al. 1966.
- [29] : Kirgintsev and Sokolov 1966.
- [30] : Zhao et al. 1995.
- [31] : Fesenko and Gluvstein 1995.
- [32] : Higashitani et al. 1996.
- [33] : Ozeki et al. 1991.
- [34] : Colic and Morse 1998c), (Colic and Morse 1999.
- [35] : Del Giudice et al. 1988), (Del Giudice et al. 2000.
- [36] : Kiselev et al. 1990). En 1933, Bernal et Fowler
- [37] : Saddam M. Ahmed, Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete, Al-Rafidain Engineering.17 (1) (2009) 71-82.
- [38] : Arihant Jain, Aakash Laad, KirtiChitrarth Singh, Krishna Murari, Effect of Magnetic Water on Properties of Concrete, IJESC Journal. Volume 7 Issue No.5 (2017), 11864-11866.
- [39] : B. Siva Konda Reddy, Vaishali, G Ghorpade, Dr.H.Sudarsana Rao: Use Of Magnetic Water for Mixing and Curing Of Concrete, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, Volume 4 Issue 1, December 2014: P 93-95.
- [40] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/prise-et-durcissement-du-beton/>