

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER EN GÉNIE CIVIL

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

**Effet des agents agressifs sur le
comportement des mortier autoplaçants à
base de marbre recyclés**

Soutenu par

TAOUNZA Maroua

KESSAI Fella

Encadreurs

BENTLEMSAN Nadia Prof. U. Saad Dahleb-Blida 1

YAHIAOUI Walid Prof. U. Saad Dahleb-Blida 1

Blida, septembre 2020



RÉSUMÉ

La mise en décharge des déchets des matériaux présente de nombreux problèmes (la place occupée par les sites de stockage, importance des coûts, impact sur l'environnement) ; ainsi que l'industrie de construction ne pose pas de problème seulement à la fin du cycle de vie de ces produits mais également au début. Il est nécessaire de trouver un moyen pour la valorisation et la réutilisation de ces déchets, d'un autre côté, l'épuisement des gisements naturels et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent d'autres sources d'approvisionnement. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Notre étude s'inscrit dans une politique de valorisation des matériaux industriels locaux en Algérie, pouvant être utilisés dans la formulation des bétons autoplaçants (BAP).

Le but principal de cette étude est de mettre en évidence la possibilité d'utiliser le sable de déchets de marbre, et de démontrer techniquement la possibilité d'utiliser les fines des déchets de marbre sous forme d'addition dans la formulation de béton auto plaçant (BAP). Elle consiste à étudier principalement la durabilité des mortiers autoplaçants à base de déchets de marbre. On base sur les caractéristiques physico mécanique et chimique des mortiers visant comme objectif la possibilité d'élaboration d'un béton résistant aux milieux agressifs. La procédure expérimentale consiste à étudier le comportement des éprouvettes en mortier exposés traitements chimiques, à savoir, les sulfates et l'acide sulfurique pendant une durée déterminée.

La recherche bibliographique montre que le marbre qu'il soit utilisé comme substitution du ciment ou du sable, peut dans certains cas améliorer l'ouvrabilité et permet aussi d'améliorer la résistance à la compression et à la flexion, sous toutefois dépasser un certain pourcentage de substitution. Les travaux de recherche passés en revus montre aussi que le marbre améliore la résistance aux attaques sulfatiques et améliore la résistance du béton aux attaques des acides. Des essais de caractérisation des du ciment, du sable et du marbre ont été menés.

Mots clés : granulats, déchet, recyclage, marbre, mortier autoplaçant, la durabilité.

ABSTRACT

Landfall of waste materials presents many problems (the space occupied by storage sites, importance of costs, impact on the environment) ; as well as the construction industry is not only a problem at the end of the life cycle of these products but also at the beginning.

It is necessary to find a way for the recovery and reuse of this waste, therefore our study is part of a policy of valuing local industrial materials in Algeria, That can be used in the formulation of self-compacting concrete (BAP).

The depletion of natural deposits and the difficulties in opening up new quarries require other sources of supply.

Recycling and recovery of waste are now seen as a solution of the future in order to meet the deficit between production and consumption and to protect the environment.

The main purpose of this study is to highlight the possibility of using sand from waste marble, and to technically demonstrate the possibility of using the fines from waste marble as an addition in the formulation of self-compacting concrete (BAP) and also to study the influence of waste marble on the durability of self-compacting concrete. For this, six compositions were prepared and tested. The control mixture contains the cement alone as a binder, while in the other mixtures the cement has been partially replaced by the marble waste. The results obtained show that the use of marble waste is very beneficial for improving the resistance of (BAP) to concrete sulphate attacks.

Self-compacting concretes (BAP) are superfluid concretes which, thanks to their properties in the fresh state, allow easy and rapid placement without internal or external vibration. This type of concrete is formulated with a high binder content (450 to 600kg / m³), which represents a great opportunity for the exploitation of industrial waste such as marble waste (MD).

This research also involves studying the durability of self-consolidating mortars. The durability of reinforced concrete structures has become one of the concerns of builders, and for constructions like bridges, dams and sewerage networks, increasingly longer life times are required. When these constructions are subjected to aggressive media, their life pans can be reduced.

Many researchers like **R. Chaid et al 2011** have found that marble powder has a structuring role in the bonding of the cement matrix from a mechanical point of view. This structuring contribution is reflected in terms of durability by a reduction in porosity and better resistance to chemical attack.

Bibliographic research shows that marble whether used as a substitute for cement or sand, can in some cases improve workability and also improve compressive and flexural strength, but under a certain percentage of substitution.

The research work reviewed also shows that marble improves resistance to sulphate attack and improves the resistance of concrete to acid attack.

Characterization tests for cement, sand and marble have been carried out.

Key words : aggregates, waste, recycling, marble, self-consolidating mortar, sustainability.

ملخص

يطرح مكب النفايات العديد من المشاكل (المساحة التي تشغلها مواقع التخزين ، أهمية التكاليف ، التأثير على البيئة) ؛ بالإضافة إلى أن صناعة البناء ليست مشكلة فقط في نهاية دورة حياة هذه المنتجات ولكن أيضاً في البداية. من الضروري إيجاد طريقة لاستعادة وإعادة استخدام هذه النفايات ، ومن ناحية أخرى ، فإن استنفاد الرواسب الطبيعية وصعوبات فتح محاجر جديدة تفرض مصادر أخرى للإمداد. يُنظر الآن إلى إعادة التدوير واستعادة النفايات على أنها حل للمستقبل من أجل سد العجز بين الإنتاج والاستهلاك وحماية البيئة. دراستنا هي جزء من سياسة تثمين المواد الصناعية المحلية في الجزائر ، (SCC والتي يمكن استخدامها في صياغة الخرسانة المضغوطة ذاتياً)

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إثبات إمكانية استخدام الرمل من نفايات الرخام ، ولإثبات إمكانية استخدام الغرامات الدقيقة من نفايات الرخام كإضافة في صياغة الخرسانة ذاتية الصب. (باب). وهي تتكون أساساً من دراسة متانة مدافع الهاون ذاتية الدمج القائمة على نفايات الرخام. يعتمد على الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية والكيميائية للملاط بهدف إمكانية إنتاج خرسانة مقاومة للبيئات العدوانية ، وتتمثل العملية التجريبية في دراسة سلوك عينات الاختبار في الملاط المعرض للمعاملات الكيميائية ، وهي الكبريتات و حامض الكبريتيك لفترة زمنية محددة.

تظهر الأبحاث الأدبية أن الرخام ، سواء تم استخدامه كبديل للأسمنت أو الرمل ، يمكنه في بعض الحالات تحسين قابلية التشغيل وكذلك تحسين قوة الانضغاط والانثناء ، ولكن تحت نسبة معينة. من الاستبدال. يُظهر العمل البحثي الذي تمت مراجعته أيضاً أن الرخام يحسن مقاومة هجوم الكبريتات ويحسن مقاومة الخرسانة للهجوم الحمضي. تم إجراء اختبارات توصيف الأسمنت والرمل والرخام.

الكلمات المفتاحية: الرخام ، النفايات ، إعادة التدوير ، الرخام ، الملاط الذاتي ، الاستدامة.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère.

Affable, honorable et aimable. Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Mon cher papa.

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

À mes chers frères

Mounir et Mahmoud, qui m'ont toujours encouragé et apporté leur soutien moral et matériel.

A ma sœur

Sarah Tu étais toujours présente dans les moments difficiles par ton soutien moral.

A mon cousin

Hachemi qui m'a aidé et encouragé avec des conseils et m'a tout donné pour réussir.

Tous les membres de ma famille, petits et grands :

Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection, et à tous ceux qui me sont chers et que je n'ai pas cité.

Ma chère, binôme Maroua,

Merci pour ta patience, ta tolérance, et pour les bons moments qu'on a partagés durant notre cursus, afin de donner naissance à ce projet.

Tous mes amis (es) et surtout À mes meilleurs amies Imane, Celia et ihcen, Yasmine, Imane, Yasser mon cher ami qui m'a encouragé

Que Dieu le tout puissant vous préserve tous.

Fella

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Je suis très heureuse de pouvoir dédier cet humble travail aux être les plus chers à mon cœur :

Cher à mon père « TAOUNZA Rabah », mon premier encadrant depuis ma naissance et qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie

A mon modèle de sacrifice, d'amour et de générosité, la lumière de mon chemin et ma vie et mon bonheur : ma très chère maman « Fatiha » que je l'aime

A tous les membres de ma famille

A ma unique adorable sœur Radhia et sa petite fille roaya razan et son marie hakim.

A mes chers frères bilal et Mohamed Madjid

A Ma grande mère Bakhta

Mes chères cousines : Cherifa, Zahra, Rima, Nihad, Aida et ma tante salima

A mes fidèle amies et mes perles amies : pour m'avoir supporté durant ces cinq années d'études Nour-elhouda et Madjda et à tous mes amies que je n'ai pas cite leur nom

A mon cher binôme et meilleure amie Fella et son oublier sa famille

À vous tous qui vous m'avez aidé et encouragé par vos conseils et vous m'avez offert tout pour la réussite

Que Dieu le tout puissant vous préserve tous.

Maroua

REMERCIEMENTS

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Ces cinq années d'études nous ont permis de comprendre les significations profondes de cette phrase.

Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions dont les réponses ont nécessité de longues heures de travail, de sacrifices et de partage.

*Tout d'abord, nous remercions **DIEU** le Tout Puissant, de nous avoir donné, la santé, le courage, la patience et la volonté afin d'arriver à la finalité de ce parcours.*

Nous remercions Notre promotrice, Mm N. Bentlemcen, et Co-promoteur Mr W. Yahiaoui qui nous ont suivi tout au long de nos travaux, avec leurs notes constructives et leurs conseils avisés, ainsi que des documents intéressants qui ont eu la gentillesse d'être à notre disposition. Ainsi que pour leur patience et leur disponibilité.

Nous remercions Mr Kanai chef de labo et le technicien supérieur.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour leur contribution scientifique lors de l'évaluation de ce modeste travail.

*Nous remercions aussi nos parents, familles (**Kessai et Taounza**), et amis.*

Nos plus sincères remerciements vont également à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce modeste travail.

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Constituants des mortiers	16
Figure 1.2	Composition des mortiers	16
Figure 1.3	Stade de fabrication de ciment	22
Figure 1.4	Illustration de l'effet filler	24
Figure 1.5	Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	25
Figure 1.6	Le principe de la méthode d'Okamura	27
Figure 1.7	Essai d'affaissement au cône d'Abrams	28
Figure 1.8	Essai de boîte en L	29
Figure 1.9	L'essai de stabilité au tamis	32
Figure 1.10	variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre[34]	33
Figure 1.11	Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de substitution du calcaire dans le béton ordinaire	34
Figure 1.12	Illustration de la microstructure d'un béton (ciment de type CEM I, granulats siliceux, E/C = 0,50). Fractographie au microscope électronique à balayage (photo LERM)	39
Figure 1.13	Modèle holistique de Mehta	40
Figure 1.14	Le schéma de dioxyde de carbone	41
Figure 1.15	Diagramme de Tillmans	42
Figure 1.16	Les attaques des milieux agressifs	43
Figure 1.17	Principaux sels dissouts de l'eau de mer	46
Figure 1.18	Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton	47
Figure 1.19	L'origine des sulfates (interne ou externe)	48
Figure 1.20	Distribution de la portlandite, du gypse et de l'ettringite en fonction de la profondeur dans une pâte de CEM I contenant 10 % de C3A, au contact d'une solution à 10.10–3 mol/L de Na2SO4, d'après Le Bescop et al	48
Figure 1.21	Mécanisme d'expansion proposé par Brunetaud [Brunetaud, 2005]	55
Figure 2.1	Sable de Baghlia	61
Figure 2.2	Sable Boughezoul	61
Figure 2.3	Mélange de 2 sables (s/corrigé)	61
Figure 2.4	Courbe granulométrique des sables	62
Figure 2.5	Déchet de marbre	62
Figure 2.6	Processus de concassage	63
Figure 2.7	Présente la courbe granulométrique de sable de marbre	63
Figure 2.8	Le superplastifiant	65

Figure 2.9	Séquence de malaxage du mortier	65
Figure 2.10	Malaxeur à mortier	66
Figure 2.11	Essai d'étalement pour mortier	66
Figure 2.12	Essai à l'Entonnoir en V pour mortier	67
Figure 2.13	Essai au cône de Marsh pour mortier	67
Figure 2.14	Essai de l'air occlus	68
Figure 2.15	Moule prismatique 4*4*16 cm vide et rempli de MAP	68
Figure 2.16	Confection et Conservation des éprouvettes	69
Figure 2.17	Appareil de flexion	69
Figure 2.18	Appareil de compression	70
Figure 2.19	Appareil de compression/flexion	70
Figure 2.20	L'essai d'absorption d'eau	71
Figure 2.21	Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes	73
Figure 2.22	Organigramme des différents essais réalisés sur le mortier	75

Tableau 1.1	Différentes actions des adjuvants	18
Tableau 1.2	Exemples de compositions de mortier de ciment	19
Tableau 1.3	Classification des ciments selon leurs résistances mécaniques	23
Tableau 1.4	Effet du déchet de marbre	33
Tableau 1.5	agressivité de quelques substances rencontrées plus ou moins fréquemment	51
Tableau 2.1	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment	59
Tableau 2.2	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	60
Tableau 2.3	Caractéristiques physiques et mécaniques des deux sables et du sable corrigé	60
Tableau 2.4	Résultats d'équivalence de sable	61
Tableau 2.5	les caractéristiques physiques de sable de déchet de marbre	64
Tableau 2.6	les caractéristiques physiques de sable de déchet de marbre et sable corrigé	64

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
REMRECIEMENTS.....	8
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	9
INTRODUCTION GENERALE.....	14
1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1. Introduction.....	16
1.2. Généralités sur les mortiers.....	16
1.2.1. Définition	16
1.2.2. Constituant des mortiers.....	16
1.2.2.1. Les liants	16
1.2.2.2. Le sable	17
1.2.2.3. L'eau de gâchage.....	17
1.2.2.4. Les additifs.....	17
1.3. Différents types des mortiers	19
1.3.1. Les mortiers de ciment.....	19
1.3.2. Les mortiers de chaux	19
1.3.3. Les mortiers bâtards	19
1.3.4. Les mortiers fabriqués sur chantier	20
1.3.5. Mortier industriel	20
1.4. Classification des mortiers	20
1.4.1. Classification selon leur domaine d'utilisation	20
1.4.2. Classification selon la nature du liant	21
1.5. Béton autoplaçant.....	21
1.5.1. Définition	21
1.5.2. Domaine d'utilisation.....	21
1.5.3. Propriétés	22
1.5.4. Les constituants.....	22
1.5.4.1. Ciment.....	22
1.5.4.2. L'eau	24
1.5.4.3. Les granulats	24
1.5.4.4. Les ajouts minéraux	24
1.5.4.5. Superplastifiant	25

1.5.5.	Formulation des béton autoplaçants :	26
1.5.6.	Propriétés des BAP à l'état frais	28
1.5.6.1.	Essai d'étalement (slump flow) :	28
1.5.6.2.	Essai de la boîte en L :	29
1.5.6.3.	Essai stabilité eu tamis :	29
1.5.7.	Propriétés des BAP à l'état durci :	30
1.5.7.1.	Résistances mécaniques	30
1.5.7.2.	Résistance à la traction.....	30
1.5.7.3.	Module d'élasticité.....	30
1.6.	Mortier à base de déchets de marbre.....	31
1.6.1.	Historique du marbre.....	31
1.6.2.	Déchet de marbre	32
1.6.2.1.	Définition	32
1.6.2.2.	Composition du marbre.....	32
1.6.3.	Effet de marbre sur le mortier et béton	33
1.7.	Durabilité et vieillissement du béton et mortier	34
1.7.1.	Introduction.....	34
1.7.2.	Béton durable et résistant.....	36
1.7.3.	Les facteurs affectant la durabilité	37
1.7.3.1.	La porosité.....	37
1.7.3.2.	La fissuration.....	37
1.8.	Les milieux agressifs.....	38
1.8.1.	Les attaques chimiques du béton.....	38
1.8.2.	Mécanisme général des attaques chimiques.....	39
1.8.2.1.	Durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs. 39	
1.8.2.2.	Conséquences générales.....	39
1.9.	Principaux milieux agressifs :	40
1.9.1.	Eaux naturelles	40
1.9.2.	Milieux acides	45
1.9.3.	Milieux sulfatiques.....	46
1.9.4.	Milieux des nitrates et des chlorures	50
1.10.	Les différentes catégories d'ettringite	53
1.11.	Mécanismes d'expansion de l'ettringite.....	53

1.11.1.	Théorie colloïdale.....	54
1.11.2.	Expansion uniforme de l'ettringite.....	54
1.11.3.	Expansion par pression de cristallisation	55
1.11.4.	Mécanisme proposé par Brunetaud	55
1.12.	Vieillessement naturel et accéléré.....	57
2. Matériaux et essais		
2.1.	Introduction.....	59
2.2.	Caractéristiques des matériaux utilisés	59
2.2.1.	Ciment.....	59
2.2.2.	Sable.....	60
2.2.3.	Eau de gâchage :.....	64
2.2.4.	Le superplastifiant :.....	64
2.3.	Formulation du mortier	65
2.4.	Essais réalisés sur MAP	66
2.4.1.	Essai d'étalement au Mini-Cône.....	66
2.4.2.	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	66
2.4.3.	L'essai au cône de Marsh.....	67
2.4.4.	L'essai de l'air occlus.....	67
2.5.	Essais à l'état durci.....	68
2.5.1.	Résistance à la flexion.....	69
2.5.2.	La résistance à la compression.....	70
2.6.	Les essais de durabilité.....	71
2.6.1.	Absorption capillaire.....	71
2.6.2.	Porosité.....	72
2.6.3.	Attaques sulfatiques (Na_2SO_4 et MgSO_4).....	73
2.6.4.	Attaques des acides	74
CONCLUSION GENERALE		76
RECOMENDATION.....		77
REFERENCE.....		78

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine du génie civil, le matériau le plus utilisé dans le monde est le béton. Ce matériau manufacturé est une association d'un squelette granulaire composé de sable et de graviers, avec un liant hydraulique, le ciment hydraté.

Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; Les bétons ordinaire (BO), les bétons à haute performance (BHP), les bétons à très haute performance (BTHP), les bétons de fibre métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre.

Lorsque l'on parle du sable, de son extraction et de son utilisation, les chiffres ne sont pas toujours parlants, mais ils peuvent aider à mieux comprendre la mesure du problème. Pour le bâtiment seul, deux-tiers des constructions sur la planète sont constituées de béton, et deux-tiers de ce béton est constitué de sable. Pour rendre la production des matériaux plus propre et moins dépendante des ressources naturelles, des études sur l'utilisation des déchets de marbre, de béton, et autre en tant que poudre fine ou granulats sont menés.

D'un autre côté, l'accumulation des déchets inertes issus des constructions et de l'industrie est devenu un problème majeur. L'industrie du marbre a conduit à des déchets issus des carrières et des marbreries qui nuisent à l'environnement.

A travers ce mémoire, nous nous intéressons au comportement des MAP à base de déchet de sable de marbre. Cette étude consiste à faire une revue bibliographique sur l'effet des déchets de sable de marbre sur le comportement des MAP l'état frais et à l'état durci et son influence sur la durabilité. Ce travail de recherche s'inscrit dans une logique qui vise à résoudre la problématique expliquée ci-dessus et de ce fait, il est présenté selon la manière suivante :

Chapitre I : L'étude élaborée dans ce chapitre vise à passer en revue la problématique générale de ce me mémoire, à savoir, la durabilité des BAP dans les milieux agressifs, dans ce sens, nous avons commencé par des définitions, l'aspect historique sur les mortiers et les mortiers autoplaçants ainsi que les déchets de marbre, les différents milieux agressifs et enfin les différents travaux traitant le sujet.

Chapitre II : Dans ce chapitre nous nous intéressons à la méthode de formulation des MAP ainsi que les méthodes d'expérimentation à l'état frais et à l'état durci, les essais préliminaires de caractérisation sont présentés aussi dans ce chapitre.

ChAPITRE 1
REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse de l'étude bibliographique sur le comportement des mortiers autoplaçants (MAP), et il présente également les méthodes et techniques de formulation, ainsi que l'effet du marbre recyclé sur le comportement des MAP à l'état frais et à l'état durci.

1.2. Généralités sur les mortiers

1.2.1. Définition

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction.

En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant. Les caractéristiques souhaitées dictent le dosage [1].

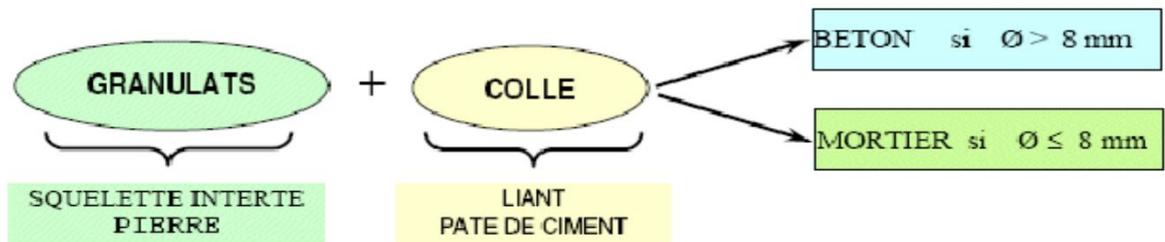


Figure 1.1: Constituants des mortiers

1.2.2. Constituant des mortiers

Un mortier est constitué par le mélange de : $(\text{Sable} + \text{Liant}) + \text{Eau} = \text{Mortier}$

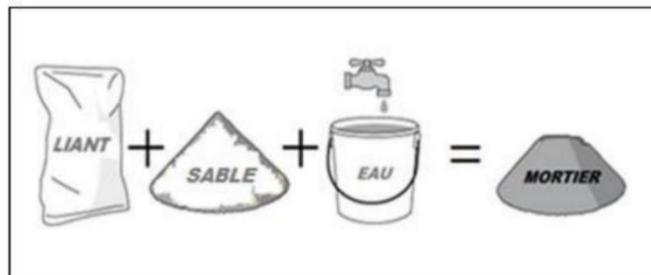


Figure 1.2: Composition des mortiers

1.2.2.1. Les liants

Un liant hydraulique est un liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau et est aussi capable de le faire sous l'eau, ce que l'on nomme hydraulicité. Il est utilisé dans la

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

construction et dans l'industrie routière afin de répartir la pression uniformément sur toute la surface des particules

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [2].

Généralement, on peut utiliser :

Les ciments normalisés (gris ou blanc).

Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ...).

Les liants à maçonner.

Les chaux hydrauliques naturelles.

Les chaux éteintes.

1.2.2.2. Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques.

On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière [3], Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres.

Le diamètre maximum des grains de sable [4] utilisés pour les mortiers est :

Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).

Fins : jusqu'à 1,6 mm

Moyens : jusqu'à 3,15 mm

Gros : jusqu'à 5 mm

1.2.2.3. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre on fait des plusieurs tests pour s'assurer la propreté et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis).

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442[3]. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [3].

1.2.2.4. Les additifs

a) Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

(environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les super plastifiants (haut réducteur d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs accélérateurs) et les hydrofuges [4].

Tableau 1.1: Différentes actions des adjuvants

Action	Rôle	Domaine d'emploi
La prise	Il diminue le temps de prise ou durcissement du ciment. Accélérateurs de prise	Bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, travaux sous l'eau.
	Il augmente le temps de prise. Retardateur de prise	Bétonnage par temps chaud, avec coffrage glissant.
L'ouvrabilité	A teneur en eau égale, il augmente l'ouvrabilité du béton et mortier. plastifiants	Travaux génie civile, bétonnage avec coffrage glissant.
	A même maniabilité, il augmente les résistances. Plastifiants reducteurs d'eau	Travaux génie civile, bétonnage avec coffrage glissant.
	Il provoque un fort accroissement de maniabilité. Superplastifiants	Fondation, dalles, raideurs, béton pompé.
Les résistances aux agents extérieurs	Il entraîne la formation de microbulles d'air uniformément. Entraîneur d'air	Béton exposé au gel, béton routiers.
	Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers. Hydrofuge de masse	Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité.

b) Les ajouts :

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le méta kaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois [4]. Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes

Les cendres volantes

Le laitier de haut fourneau

Les pouzzolanes

La fumée de silice

Les fillers

Le gypse

1.3. Différents types des mortiers

Les mortiers se partagent en différents types [5] :

1.3.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1 :3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables [5][6].

Tableau. 1.2: Exemples de compositions de mortier de ciment [5]

Utilisation	Pose de briques et blocs	Mortier de chape
Matériaux		
Ciment	50Kg	50Kg
Sable	120 à 130 kg	180Kg
Eau	50 litres	50litres
Nature du mélange à	Onctueux	Pâteux

1.3.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement et résistent moins que les mortiers de ciment [5].

1.3.3. Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment [6.7].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.3.4. Les mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sable peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables [8].

1.3.5. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins [9] :

Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.

Mortiers d'imperméabilisation.

Mortier d'isolation thermique.

Mortier de jointoiement.

Mortier de ragréage.

Mortier de scellement, mortier pour chapes.

Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.

Mortier de réparation.

1.4. Classification des mortiers

Les mortiers peuvent être classés selon le domaine d'utilisation ou selon la nature du liant [10].

1.4.1. Classification selon leur domaine d'utilisation

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes :

Mortier de pose.

Mortier de joints.

Mortier pour les crépis.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Mortier pour le sol.

Mortier pour les stucs.

Pierres artificielles.

Support pour les peintures murales

Mortier d'injection.

Mortier pour les mosaïques.

Mortier de réparation pour pierres.

1.4.2. Classification selon la nature du liant

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en :

Mortier de ciment portland.

Mortier de chaux.

Mortiers bâtards.

Mortier à base de ciment de maçonnerie.

1.5. Béton autoplaçant

1.5.1. Définition

De nombreux termes définissent ce béton : béton autonivelant, béton autocompactant (SCC en anglais), ou béton hyperfluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton autoplaçant.

Le béton autoplaçant BAP est un béton très fluide, homogène, très déformable, stable (une bonne stabilité liée a la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement) et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité [11].

1.5.2. Domaine d'utilisation

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [12]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

Densités de ferrailage importantes ;

Formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;

Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;

Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;

Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.5.3. Propriétés

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité (En usine de préfabrication, une très légère vibration peut être appliquée, l'essentiel de la compaction s'effectuant sous le seul effet gravitaire). Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation et au ressuage. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogue à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais. La fluidité du BAP permet sa mise en place aisée par pompage [12].

1.5.4. Les constituants

1.5.4.1. Ciment

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier.

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton auto plaçant, est soit le ciment Portland CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [13].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

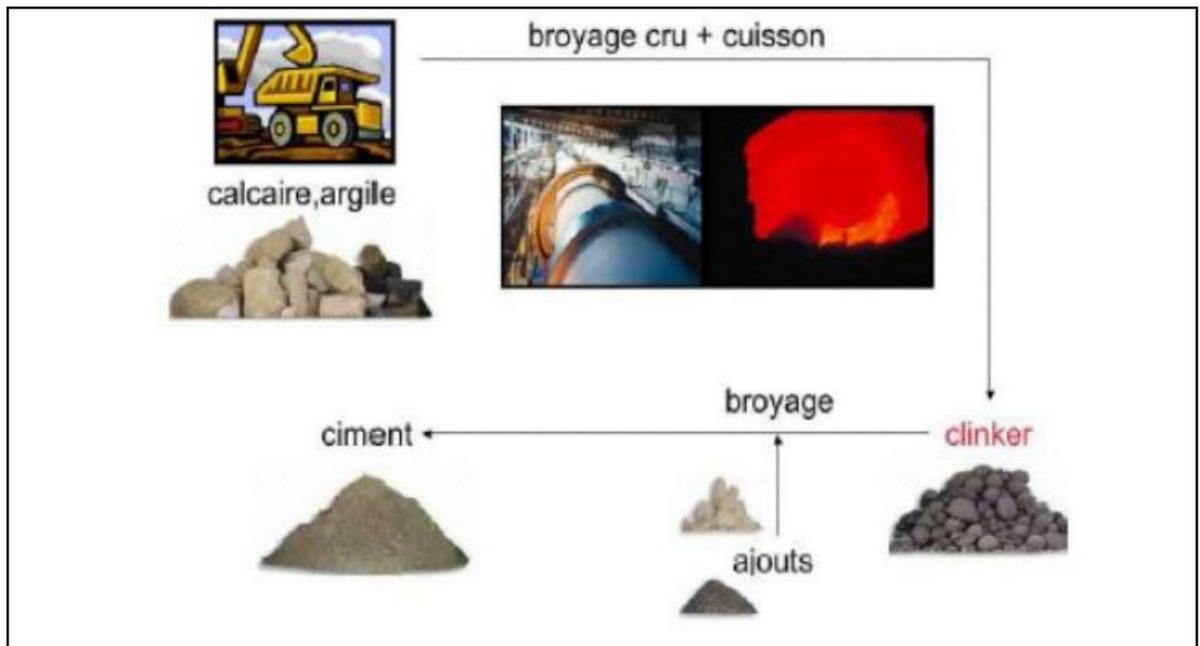


Figure 1.3 : Stade de fabrication de ciment

Les différents types de ciment courant sont [14] :

CEM I : Ciment Portland

CEM II : Ciment Portland compose

CHF-CEM III : Ciment de haut-fourneau

CPZ-CEM IV : Ciment pouzzolanique

CLC-CEM V : Ciment au laitier et aux cendres.

Les ciments sont essentiellement constitués de clinker. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C [13]. Auquel on peut ajouter les autres constituants suivants :

- Calcaires.
- Laitiers granulés de haut fourneau.
- Cendres volantes.
- Fines calcaires.
- Pouzzolanes naturelles.
- Schistes calcinés.
- Fumées de silice.

Tableau 1.3 : Classification des ciments selon leurs résistances mécaniques

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32,5	/	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5R	$\geq 13,5$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

42,5	$\geq 12,5$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5R	≥ 20	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20	$\geq 52,5$	/
52,5R	≥ 30	$\geq 52,5$	/

1.5.4.2. L'eau

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplaçant du béton. Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats [15].

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

1.5.4.3. Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, comme pour un béton ordinaire. On rencontre des granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières et les granulats concassés obtenus par l'exploitation des roches de carrières [16].

- Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés [17].
- Pour empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm
- La proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées, Le rapport G/S est de l'ordre 1 [17].

1.5.4.4. Les ajouts minéraux

A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques. Soit-il existé sous forme de produits naturels qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels sous forme de déchets ou de sous-produits [16].

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite, ...), des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice, des déchets de brique. Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP. Les cendres volantes ou les laitiers permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un BAP donc des résistances mécaniques plus élevées [11].

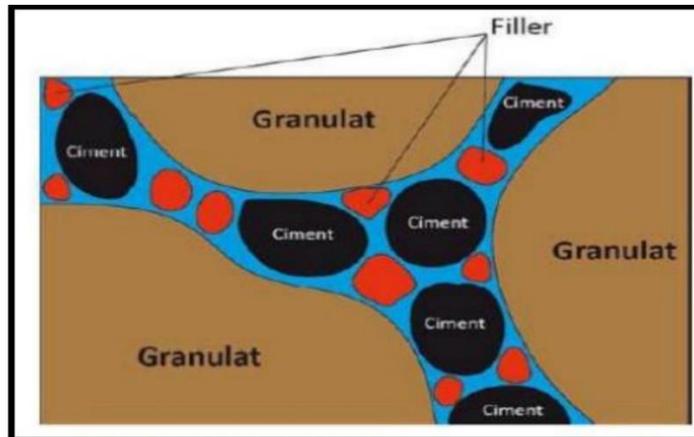


Figure 1.4 : Illustration de l'effet filler

1.5.4.5. Superplastifiant

Sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants ; L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure I.2). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [18].

Le mode d'action des super plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit :

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

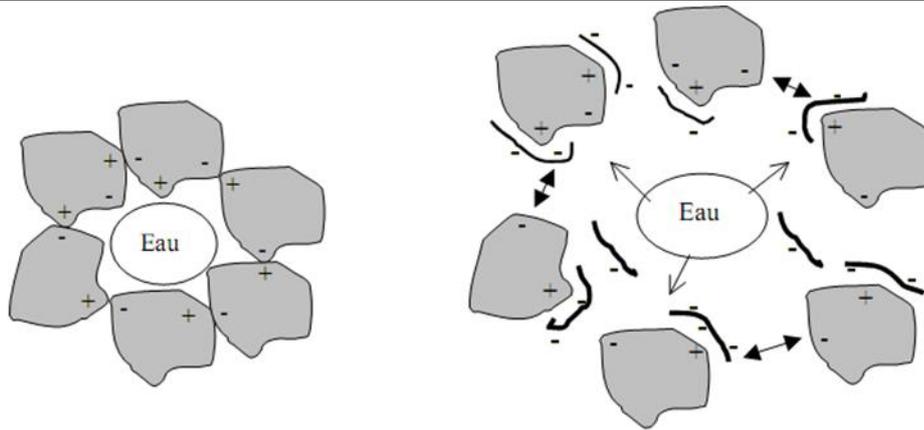


Figure 1.5 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment

1.5.5. Formulation des béton autoplaçants :

La formulation des BAP est un domaine de recherche très vaste, la fluidité c'est le paramètre le plus important dans le BAP et qui est également son plus grand inconvénient car la dispersion des particules les plus fines (ciment, addition) par un superplastifiant conduit à une matrice tellement fluide qu'elle se sépare des inclusions granulaires les plus grosses (sable, gravillon) [19]. Toutes les méthodes de formulation ne sont pas adaptées aux BAP, par ce que l'écoulement du béton dépend des matériaux utilisés.

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde : approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Les méthodes de formulation des bétons autoplaçants proposées sont toutes basées sur les constats suivants [20] :

Lors de l'écoulement en milieu confiné, ce sont les gros gravillons qui sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formulateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant.

Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en superplastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc le blocage. Au contraire une variation du dosage en superplastifiant a peu d'influence sur la viscosité mais un surdosage peut entraîner des problèmes de ressuage.

La formulation des bétons autoplaçants est plus élaborée que celle d'un béton ordinaire. Pour concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires (pour des résistances mécaniques égales). En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des additions

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

minérales) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines particules (inférieures à 80 microns) [21].

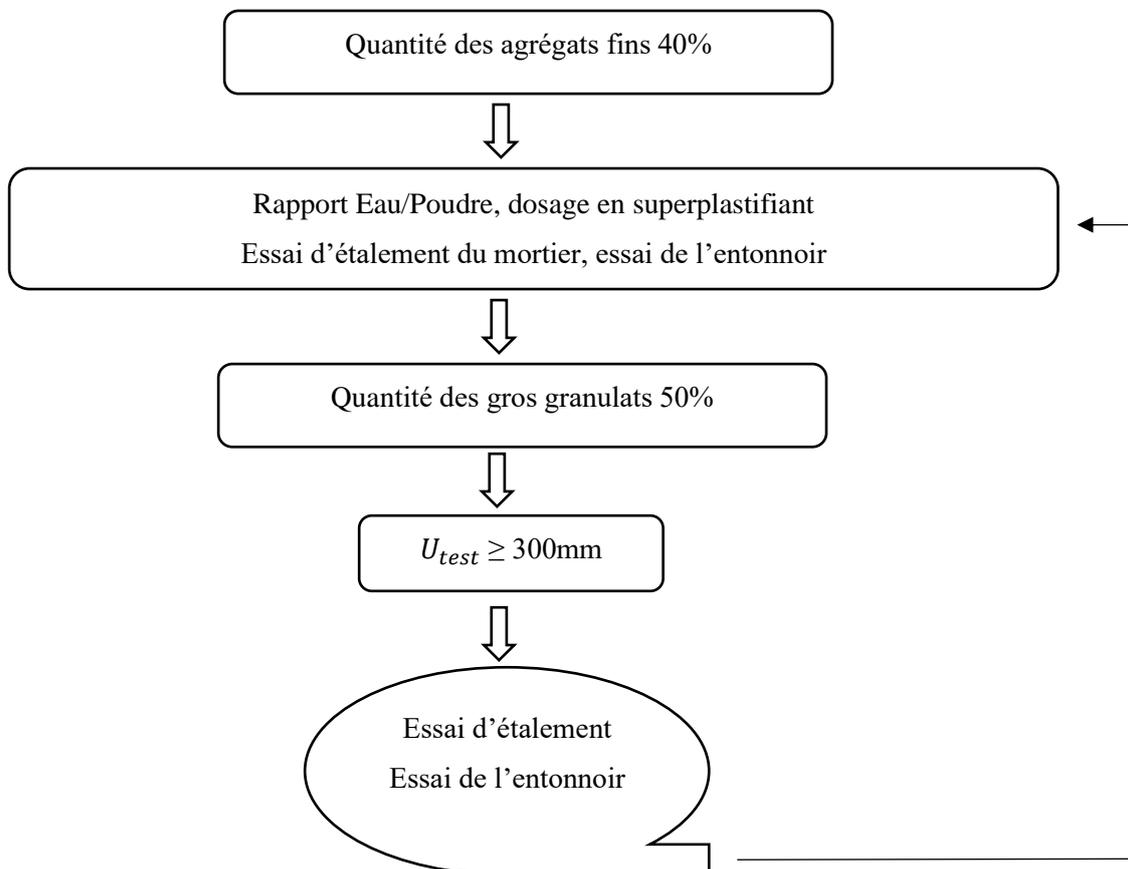
La formulation des BAP par l'approche Okamura qui été développée à l'Université de Kochi Tokyo, se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Cette méthode consiste premièrement à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite à procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton les meilleures performances [22].

Le principe de base de cette approche s'appuie sur les points suivants :

La teneur des granulats est limitée à 50% de leurs compacités, réduisant ainsi le phénomène de blocage,

Le volume du sable représente 40% du volume total de mortier,

L'optimisation de la pâte, notamment, du rapport E/L (eau / liant) et du dosage en superplastifiant se fait d'une manière empirique sur mortier en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-funnel.



CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Figure 1.6: Le principe de la méthode d'Okamura

1.5.6. Propriétés des BAP à l'état frais

Les BAP sont caractérisés par les propriétés suivantes :

La fluidité : elle caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant sans aucune tendance à la ségrégation et avec une viscosité élevée.

L'homogénéité : le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses, et remplir les moindres recoins de coffrage en gardant son homogénéité [23].

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques [24] :

La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;

La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;

La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

Les essais utilisés en France (et, plus généralement, en Europe) pour quantifier ces caractéristiques sont respectivement [24] :

1.5.6.1. Essai d'étalement (slump flow) :

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux cotés perpendiculaires les valeurs sont relevées en millimètres [25].

Les valeurs d'étalement préconisées pour un BAP, sont généralement fixées de 60 à 75 cm

Ainsi trois classes d'étalement ont été définies.

SF1 l'étalement compris entre 550 et 650mm

SF2 l'étalement compris entre 660 et 750mm

SF3 l'étalement compris entre 760 et 800mm



CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Figure 1.7 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams

1.5.6.2. Essai de la boîte en L :

L'essai de la boîte en L (Figure I.5) fait partie des essais de caractérisation de la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. Il vérifie que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0,8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation [25].

Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

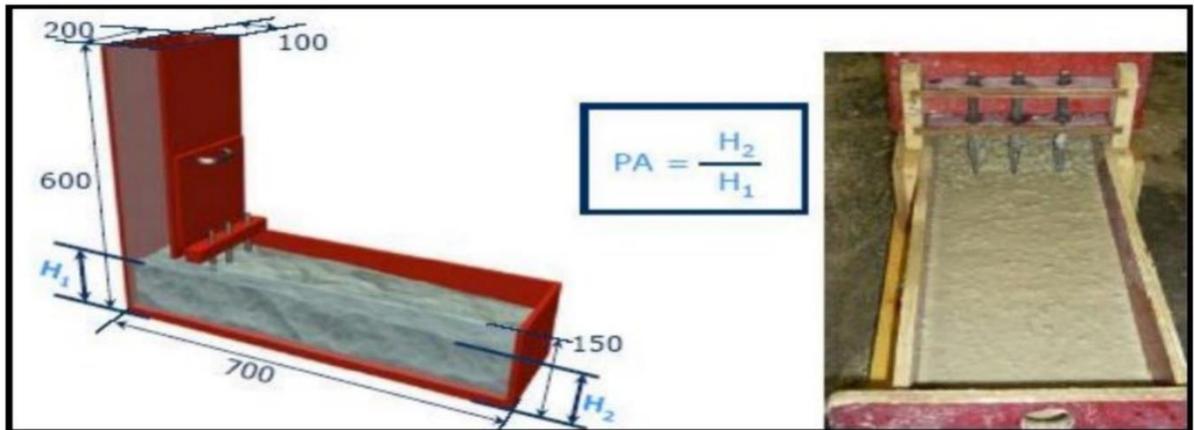


Figure 1.8 : Essai de boîte en L

1.5.6.3. Essai stabilité eu tamis :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.

On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5mm, une masse de 4,8Kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance [25].

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

0% < PLAITANCE < 15% : stabilité satisfaisante,

15% < PLAITANCE < 30% : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),

PLAITANCE > 30% : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

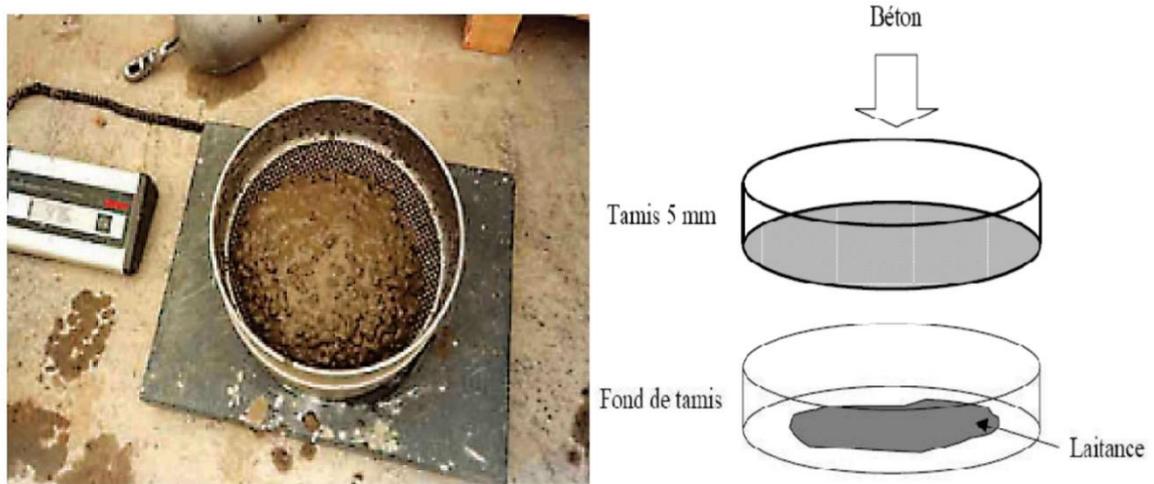


Figure 1.9 : L'essai de stabilité au tamis

1.5.7. Propriétés des BAP à l'état durci :

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré.

1.5.7.1. Résistances mécaniques

Le paramètre influençant la résistance à la compression d'un béton : est le rapport Eau/Ciment (qui conditionne la porosité) et la résistance propre du ciment.

Les BAP se caractérisent de rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. La résistance tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport de E/P [26].

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur ou bien des éprouvettes 10 x 10 x 10 cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée [27].

1.5.7.2. Résistance à la traction

Il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre [26], ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction.

1.5.7.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un BV. D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Persson a montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al (cité dans [13]) constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [25].

1.6. Mortier à base de déchets de marbre

1.6.1. Historique du marbre

Le marbre est utilisé depuis l'Antiquité comme matériau pour la sculpture et pour l'architecture. La consistance ferme et dense du marbre lui permet de prendre un beau poli, et sa translucidité associée au haut indice de réfraction des cristaux de calcite, principal composant des vrais marbres, permet à la lumière de pénétrer dans la superficie de la pierre avant d'être réfléchi, conférant à ce matériau (et surtout aux marbres blancs) une luminosité spéciale [28].

Le terme « marbre » est dérivé du grec « marmaros », qui signifie « pierre resplendissante ». Dans l'histoire de l'art ce terme peut désigner une très grande variété de roches, de compositions, de duretés et de textures très différentes. Toute pierre de consistance ferme et capable de prendre un beau poli a souvent été appelée « marbre », mais les plus courants restent les vrais marbres au sens géologique [29].

La réalisation des premiers objets en marbre remonte à l'époque néolithique (âge de la pierre polie) : dans les Cyclades, où le marbre (de vrais marbres au sens géologique) est particulièrement abondant (surtout dans les îles de Paros et Naxos). Les exemples les plus connus sont de petites idoles et des sculptures plus grandes, datées à partir de la fin du IV millénaire av. J.-C. et le III millénaire av. J.-C. (3200-2000 av. J.-C.), caractéristiques de la production artistique de la civilisation des Cyclades.

Quelques variétés de marbres originaires du Péloponnèse (comme le « porphyre vert antique ») furent utilisées par la civilisation minoenne.

Dans l'Égypte ancienne, à partir de l'époque prédynastique, différentes variétés de granits, diorites, gneiss, basaltes, schistes, des calcaires divers et notamment l'albâtre égyptien, furent travaillées pour la réalisation de vases rituels. À partir de la IIe dynastie égyptienne commence l'emploi de la syénite, une roche granitique qui fut utilisée pour le revêtement des pyramides de Khephren et de Mykérinos [28].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.6.2. Déchet de marbre

1.6.2.1. Définition

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires [30].

La production marbrière en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne. Les produits marbrières algériennes sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre "Enamarbre" qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas [31].

La production de marbre en blocs (2018), par les filiales de l'entreprise Enamarbre est de 200.000m².

1.6.2.2. Composition du marbre

Le marbre est une roche métamorphique créée après la métamorphose de roches telles que le calcaire, la calcite, la dolomie et la serpentine sous haute pression et à haute température. Le marbre est principalement composé de carbonate de calcium (environ 50% de CaCO₃) et d'un peu d'oxyde acide SiO₂. Le marbre appartient donc à la roche cristalline alcaline. Dans l'industrie de la pierre, le marbre comprend tous les types de roches carbonatées ou de carbonates de magnésium et les roches métamorphiques pertinentes qui ont des propriétés similaires à celles du marbre [32].

Le marbre contient surtout de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont facilement rayés par le canif, ce qui sert à les distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Le calcaire, la dolomie et le marbre servent également dans la construction sous forme d'agrégats et de pierre à bâtir ainsi que dans les produits d'asphalte [33].

1.6.3. Effet de marbre sur le mortier et béton

Beaucoup de chercheurs de nombreuses études sur l'effet de marbre en tant que substitution dans la matrice cimentière ou dans le sable à l'état frais et durci. Les avis sont divers. L'effet du marbre dépend du type de substitution (poudre, sable ou agrégat) et du pourcentage.

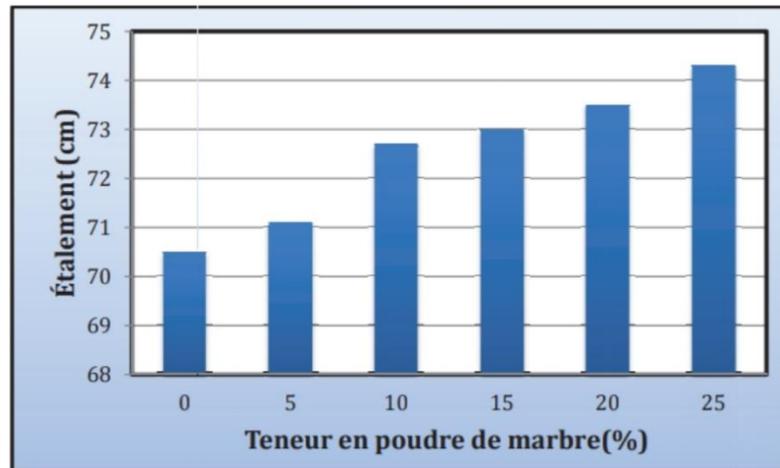
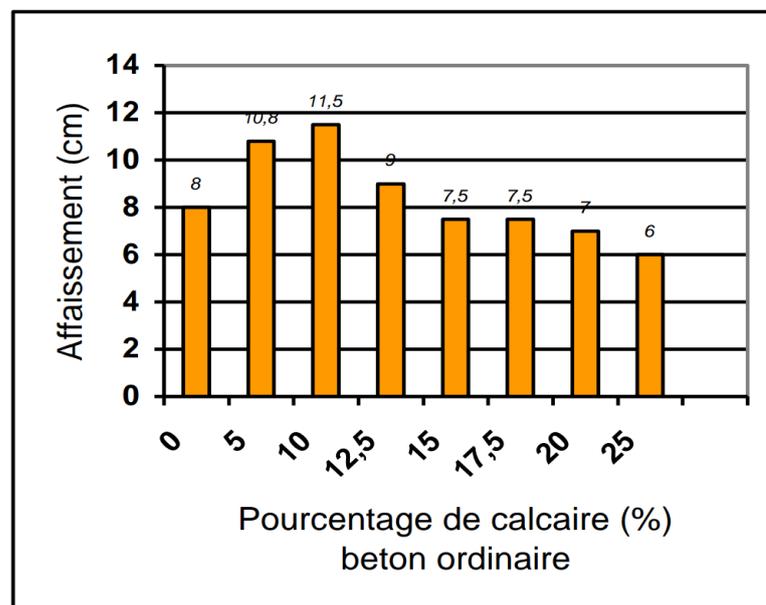


Figure 1.10 : variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre [34]

Selon Monica et al [35], la substitution de sable naturel par les déchets de sable de marbre améliore l'ouvrabilité du béton, alors que Binici et al [36], ont montré que la substitution de sable naturel par le sable de déchet de marbre à 15% diminuait l'ouvrabilité des bétons.

Rebih et Al ont montré que le calcaire, au-delà de 10%, pouvait avoir une influence négative sur l'affaissement [37].



CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Figure 1.11 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de substitution du calcaire dans le béton ordinaire [37]

Selon Rebih, l'affaissement augmente dû à la substitution de la partie fine de sable par les fines calcaires qui remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonné d'un autre le caractère argileux du marbre fait qu'il absorbe beaucoup d'eau ce qui diminue l'ouvrabilité.

Tableau 1. 4 : Effet du déchet de marbre

Auteurs	Utilisation	Ouvrabilité	Résistance à la compression
Boukhelkhal et al (2012) [34]	Poudre de marbre (20%)		
Monica et All (2013) [35]	Sable (50%)		
Binici et Al (2007) [36]	Sable (15%)		
Rebih et Al (2015) [37]	Calcaire		
Binici et Al (2008) [38]	Gros agrégats (100%)	-	
Hebboub et Al (2011) [39]	Sable (75%)		
Tennich et Al (2015) [40]	Fillers (20%)		

1.7. Durabilité et vieillissement du béton et mortier

1.7.1. Introduction

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée [41].

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique.

Du point de vue chimique, le matériau béton constitue un système très complexe formé d'un squelette granulaire plus ou moins inerte, solidarisé par des hydrates (C-S-H, hydroxyde de calcium, aluminates...) dont la porosité est irriguée par une phase liquide interstitielle fortement basique, de pH de l'ordre de 13. La composition et la structure microporeuse du matériau sont illustrées par la figure I.12[42].

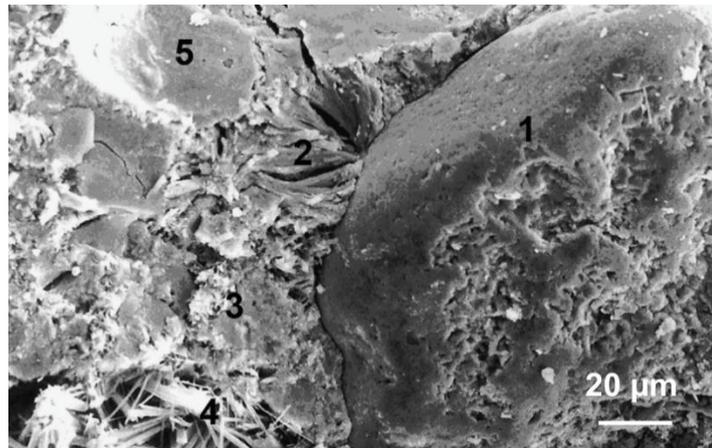


Figure 1.12 : illustration de la microstructure d'un béton (ciment de type CEM I, granulats siliceux, E/C = 0,50). Fractographie au microscope électronique à balayage (photo LERM) [42]

1 : granulat siliceux de surface plus ou moins rugueuse ;
2 : portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en cristaux massifs précipités au contact du granulat (empilement de cristaux de structure hexagonale vus perpendiculairement au plan principal) ;
3 : C-S-H microgranuleux, microporeux ;
4 : aiguilles d'ettringite non expansive dans un pore ;
5 : empreinte lisse d'un granulat déchaussé. La porosité (nano porosité des C-S-H et porosité capillaire (espaces intergranulaires, vides aux interfaces liant/granulats)) conditionne le transfert des agents agressifs dans le matériau par diffusion, perméation et capillarité. Le lecteur se reportera avantagement au chapitre 3 où sont traitées en détail les questions relatives à la structure poreuse des bétons et à leurs propriétés de transfert [42].

Par définition Le matériau béton est un matériau évolutif, même sur de très longues durées. Son évolution dépend très fortement des conditions initiales, c'est à dire de sa formulation, de sa fabrication et de sa mise en œuvre et aussi de son environnement qui peut être plus ou moins agressif.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Toutefois, les équilibres chimiques plus ou moins établis à long terme peuvent être perturbés sous l'influence du milieu extérieur, en particulier par l'action d'agents agressifs externes dont il sera principalement question ici. Face à ces agents agressifs plus acides (eaux pures, sels, acides...), le béton, matériau fortement basique (pH de l'ordre de 13), se trouve en déséquilibre thermodynamique. À leur contact, des réactions susceptibles de conduire à des dégradations plus ou moins importantes peuvent se produire.

1.7.2. Béton durable et résistant

La porosité caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance.

Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc. Serait-ce aussi le plus durable ?

Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. On peut traiter la question comme la durabilité du béton face au gel-dégel, à l'alcali-réaction, aux environnements agressifs. Une façon pratique d'y parvenir est de toujours partir de la résistance aux efforts de compression pris comme critère global et de discuter de la durabilité en deux temps :

Toutes choses égales par ailleurs, en comparant des bétons qui ne diffèrent que par leur résistance. Puis à résistance constante, en examinant les paramètres spécifiques de la durabilité.

Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité, à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu, d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un premier critère de qualité qui doit être complété par d'autres conditions. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables. A résistance égale, il existe des différences parfois importantes, entre les bétons. Au simple critère de résistance, il faut ajouter d'autres considérations. D'abord, la résistance (et ainsi la porosité) n'est qu'un critère de premier ordre qui doit être complété par d'autres mesures comme, par exemple, la perméabilité ou la diffusion, la distribution des tailles de pores. En effet, un autre facteur majeur est la dimension des pores. A porosité égale, les agents agressifs pénètrent d'autant plus difficilement que les pores sont fins.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Or, la finesse des pores dépend du rapport E/C, du ciment (CHF-CEM III/A, CLC-CEM V/A et B, CLK-CEM III/C comparés au CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A des additions minérales (cendres volantes, laitiers), de l'exposition du béton (dessiccation, carbonatation) et même de la dimension et de la nature des granulats [43].

1.7.3. Les facteurs affectant la durabilité

1.7.3.1. La porosité

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides qu'il contient. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores V_p , et le volume total V_t . La porosité comprend tous les pores du matériau [45]. Généralement, on distingue trois types de pores :

Les pores interconnectés : ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.

Les pores aveugles : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière.

Les pores isolés : ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

Le béton courant peut avoir un taux de porosité de l'ordre de 10 à 12% dues à la présence des différents types de pores dans la texture même des hydrates, et de capillaire qui se développent dans la structure es grains, les capillaires qui sont dimensionnellement les plus importants ne dépassent pas un diamètre de quelques microns, les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits. Et bien sûr il est bien connu l'influence de la porosité sur la résistance.

Donc, pour réaliser des bétons de hautes performances, aussi bien que d'un point de vue mécanique que vis-à-vis d'agression d'ordre physico-chimique, il est indépassable de limiter la porosité. Cette dernière dépend principalement de deux facteurs qui sont :

La diminution de la teneur eau, le rapport E/C ou/ et le rapport E/L doit être le plus faible possible. Une granulométrie comportant des éléments fins, afin de remplir les vides qui se trouvent entre les gros granulats [44].

1.7.3.2. La fissuration

Il faut souligner ici le caractère non préjudiciable de la plupart des fissures qui, correctement maîtrisées par des armatures ou des qui en déterminent l'emplacement et en limitent l'ouverture, n'ont pas d'influence sur la durabilité du béton, le savoir-faire et la maîtrise en matière de béton armé prévoit le dimensionnement des ouvrages et les dispositions propices à empêcher ou contrôler efficacement la fissuration potentielle. Cependant, les fissures non contrôlées à caractère fortuit sont susceptibles de jouer négatif [44].

Les principales causes de fissuration sont les suivantes :

Retrait de la pâte de ciment

Conditions thermiques et hygrométriques

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Causes mécaniques

La pâte de ciment subit différentes phases de déformation aux stades successifs de l'hydratation à savoir pré-prise, prise et durcissement.

Chacune des phases est liée à un mécanisme prépondérant qui génère un gradient de température ou d'humidité dans le béton.

Les facteurs qui influent sur les trois phases de déformation peuvent être groupés en quatre catégories principales, qui concernent plus particulièrement :

La composition du béton, l'interdépendance des constituants, la cinétique d'hydratation ;

La mise en œuvre du béton : fabrication, mise en place, vibration, cures ;

La géométrie de l'ouvrage ;

Le milieu environnant.

Le soin apporté à la formulation du béton, et à sa mise en œuvre, et la prise en compte des conditions extérieures permettront, dans la quasi-totalité des cas, de garantir sa durabilité [44].

1.8. Les milieux agressifs

1.8.1. Les attaques chimiques du béton

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée [46].

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [47].

Différents types des attaques chimiques du béton est comme suit [46] :

- 1) Les attaques sulfuriques :
- 2) Attaque par les acides :
- 3) Les dégradations dues à l'eau de mer
- 4) Attaque par les ions chlorures
- 5) La carbonatation
- 6) L'alcali-réaction
- 7) La lixiviation

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.8.2. Mécanisme général des attaques chimiques

1.8.2.1. Durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs

Deux processus majeurs sont mis en jeu lors des attaques chimiques du béton :

- Dissolution et hydrolyse des composés hydratés ;
- Précipitation de composés pouvant avoir un caractère nocif ou non.

L'attaque du béton au contact d'une eau pure ou d'une solution plus moins chargée en ions agressifs se produit généralement selon ces mécanismes de dissolution/précipitation régis par des équilibres thermodynamiques. Dans un solvant polaire tel que l'eau, les interactions fortes entre les dipôles du solvant et les ions d'un composé ionique entraîne la dissolution et la dissociation plus ou moins complète de ce dernier suivant un processus de solvation des ions [42].

Les substances nuisibles sous forme gazeuse ou solide n'agissent qu'en présence de l'humidité, étant donné que les réactions nuisibles ne peuvent se produire qu'en solution.

Le plus souvent, les substances nuisibles entrent en contact avec le béton sous forme dissoute [48].

1.8.2.2. Conséquences générales

Les dégradations chimiques provoquées dans les bétons sont issues des réactions d'hydrolyse ou de dissolution [42]. L'hydrolyse entraîne la décomposition des certains sels par l'eau qui est elle-même décomposée. Suivant la perméabilité de béton, le pH et la capacité de renouvellement de l'eau, la réaction peut conduire à un lessivage plus ou moins rapide de la chaux se traduisent par une perte de masse, un accroissement de la porosité et la destruction progressive de liant. Ou bien par une précipitation de composés, nocifs ou non qui va se manifester par : gonflement, fissuration, perte de résistance [48].

La dissolution des hydrates, accompagnée ou non de la précipitation de composés nouveaux, a deux effets majeurs [42] :

D'une part, un accroissement de la porosité du béton qui a pour conséquence une augmentation de sa perméabilité et de sa diffusivité. L'augmentation de porosité se traduit également par une dégradation plus ou moins importante des caractéristiques mécaniques : module d'Young, résistances ;

D'autre part, selon la nature, la solubilité et les conditions de précipitation des composés néoformés, un gonflement et une fissuration plus ou moins importants du matériau : ce peut être le cas, par exemple, de l'ettringite due à une agression par des sulfates d'origine externe.

Les actions chimiques sont couplées aux actions environnementales ainsi qu'aux contraintes mécaniques liées au fonctionnement de l'ouvrage L'approche « holistique », schématisée par la figure 1.13, a été proposée par P.K. Mehta [42] pour prendre en compte tous les aspects de la durabilité.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

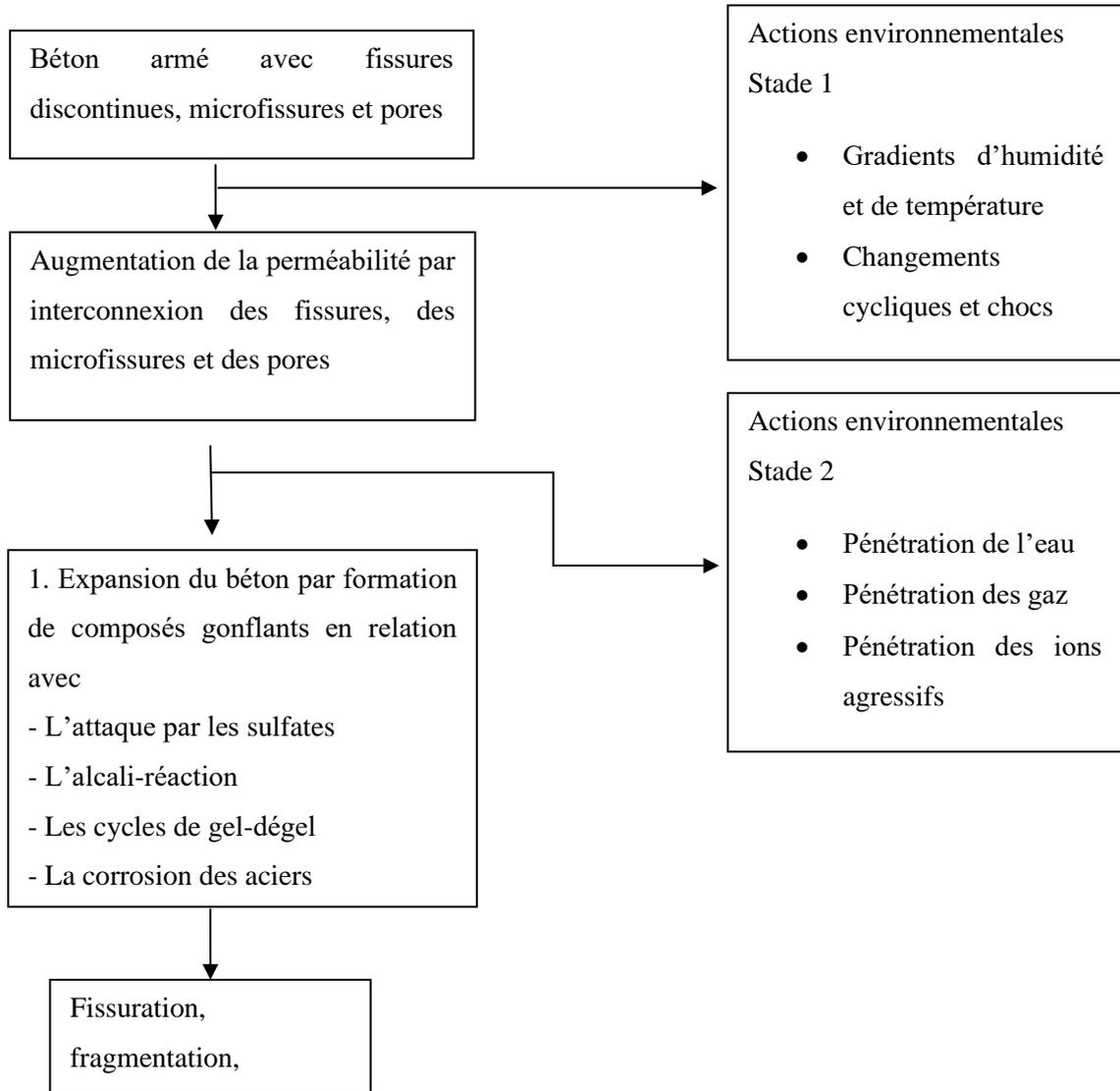


Figure 1.13: Modèle holistique de Mehta (d'après [42])

Couplage environnement/contraintes mécaniques/actions physico-chimiques

Les conséquences générales sont un accroissement de la porosité et de la fissuration, une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité, des pertes de raideur et de résistances mécaniques.

1.9. Principaux milieux agressifs :

1.9.1. Eaux naturelles

1) Paramètres d'agressivité

L'agressivité d'une eau naturelle dépend de trois paramètres interdépendants qui sont le pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif [42].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

- a) Le pH : Le pH d'une eau traduit son caractère acide ou basique. Elle sera acide ($\text{pH} < 7$) si elle contient du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou organiques ou encore des sels d'acides forts et de base faible NH_4NO_3 par exemple dont l'hydrolyse génère des protons H^+ (ou H_3O^+) responsables de l'acidité. Elle sera basique si elle contient des carbonates, des bicarbonates ou des ions hydroxydes OH^- .
- b) La dureté : La dureté peut être définie par le titre ou degré hydrotimétrique TH qui correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux de l'hydrogène et des métaux alcalins :

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Autres cations métalliques Fe, Al, Mn, Sr}]$$

La dureté peut être définie également par le titre alcalimétrique complet (TAC) qui indique la teneur en hydroxydes libres (OH^-), carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) alcalins ou alcalino-terreux.

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$$

- c) Le dioxyde de carbone : Le dioxyde de carbone agressif représente une partie du dioxyde de carbone dissous dans toute eau naturelle. Le schéma suivant l'explique :

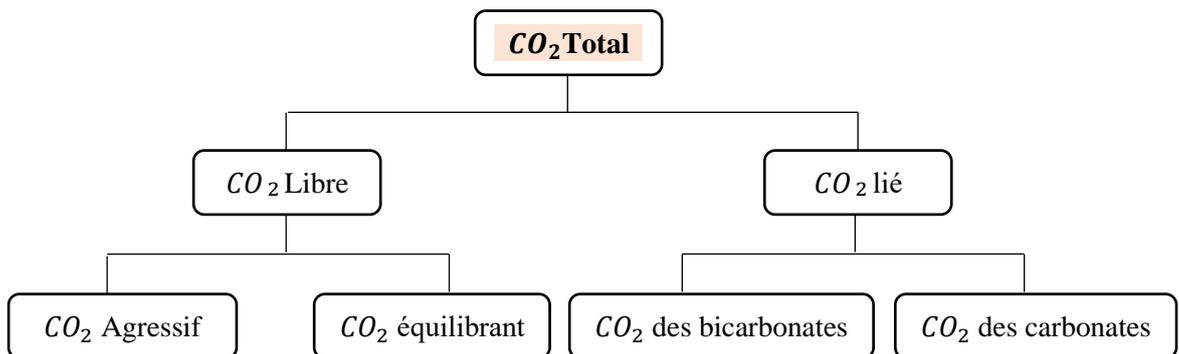


Figure 1.14 : Le schéma de dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone équilibrant représente la quantité de dioxyde de carbone libre nécessaire pour maintenir les bicarbonates en solution, selon la réaction :



Si la teneur en dioxyde de carbone libre est inférieure à celle du dioxyde de carbone équilibrant, l'équilibre se déplace vers la droite : il y a précipitation de carbonate. Une telle eau n'est pas corrosive, mais au contraire, incrustante.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

L'utilisation d'abaques, par exemple celui de Tillmans (figure 1.15), permet de classer une eau suivant son activité dissolvante ou incrustante.

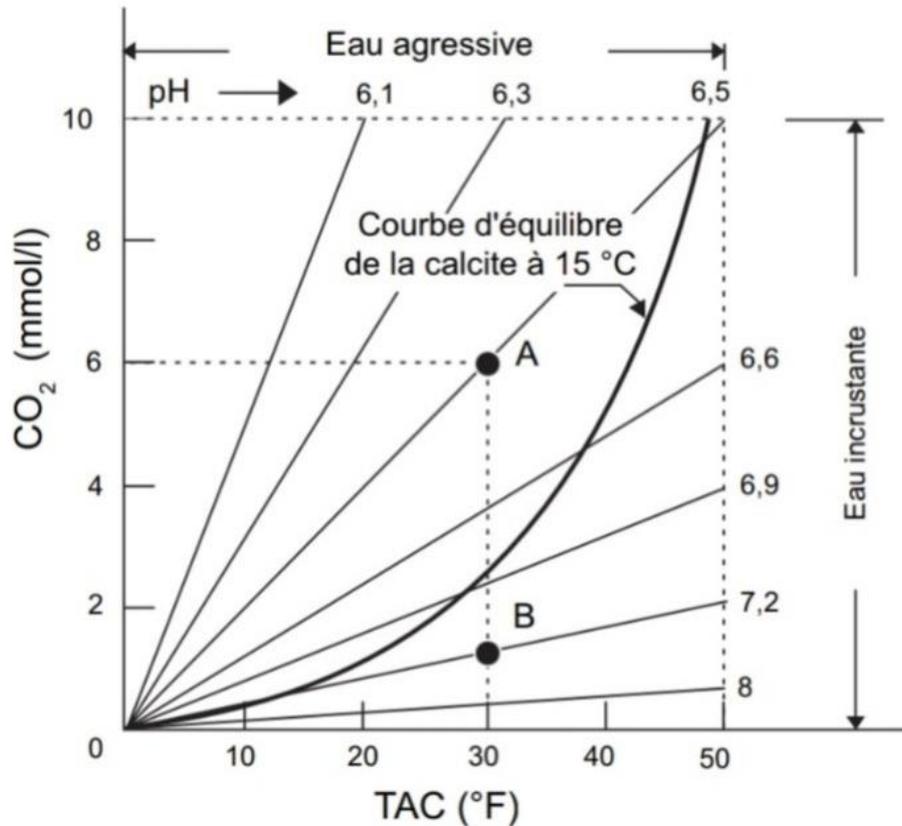


Figure 1.15 : Diagramme de Tillmans [42]

Le diagramme donne la courbe d'équilibre calco-carbonique des eaux à la température de 15 °C. On porte en ordonnées la concentration en CO_2 libre total et en abscisses le TAC en degrés français. Le TAC représente la concentration globale en anions CO_3^{2-} , HCO_3^- et OH^-

La courbe d'équilibre partage le diagramme en deux zones : les eaux, situées à gauche de la courbe, sont agressives, alors que celles situées à droite sont incrustantes. Pour une eau de TAC = 30 °F, le point A présente une eau agressive de pH = 6,5. Cette eau peut dissoudre la calcite et déplacer son point figuratif jusqu'à ce que l'équilibre calco-carbonique soit atteint. Pour la même valeur du TAC, le point B correspond à une eau incrustante de pH = 7,2. Le CO_2 libre total est inférieur au CO_2 équilibrant et les bicarbonates se transforment en carbonates qui précipitent jusqu'à obtention d'un nouvel état d'équilibre.

2) Eaux agressives :

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée [49]. Comme exemple d'eau agressive, nous avons :

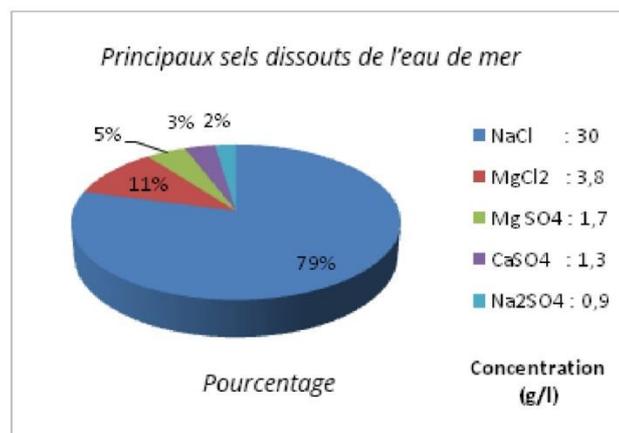
a) L'eau de mer :

Les principaux éléments nocifs contenus dans l'eau de mer sont le chlore, sous forme de chlorures de sodium et de magnésium (environ 30g/l), le sulfate, sous forme de sulfates de magnésium, de calcium et de potassium (environ 3.7g/l), les micro-algues (très variables) [44].



Figure 1.16 : Les attaques des milieux agressifs

On sait que ce sel se complète cristallise avec une très grande quantité d'eau ce qui entraîne une augmentation de volume des mortiers et de béton ceux-ci gonflent et se désagrègent et fissurent [44].



CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Figure 1.17 : Principaux sels dissouts de l'eau de mer

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- Agressions chimiques dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissouts dans l'eau de mer et dans certains cas à la pollution des eaux ;
- Agressions climatiques dues aux variations de température ;
- Agressions biologiques de micro-organismes [50].

b) Les eaux acides :

L'acidité de l'eau est, en générale, mesurée par son PH. L'ion hydrogène contenu dans l'eau de gâchage n'est pas à proprement parler nocif pour le béton, car il peut être très largement neutralisé par le ciment qui contient une réserve importante de produit basique. Les eaux acides peuvent être nocive à cause de l'anion qui est lié à l'ion H^+ , en générale Cl^- ou SO_4^{2-} , mais parfois tout autre (acide humique, acide lactique, etc.) [44].

c) Les eaux de recyclage :

Les eaux de recyclages sont, en générale, soit des eaux qui ont déjà été utilisées pour gâcher du béton, soit des eaux de lavage du matériel (malaxeurs, camions, etc.).

Elles peuvent parfois avoir été additionnées d'eaux de pluie ou de ruissellement. Elles sont surtout chargées en éléments fins qui proviennent du ciment, des additions et des granulats ou en composés chimiques qui proviennent du ciment, (sulfates, etc.) et des adjuvants.

Lorsque ces eaux restent conformes aux spécifications de la norme, elles sont utilisables sans danger. Une eau non conforme peut être amenée à conformité par un traitement approprié et notamment à l'aide de bassins de décantation. Les matières en suspensions peuvent, néanmoins, déroger sans risque à la limite maximale de 4% prévue dans la norme pour les autres eaux[44].

d) Les eaux de rejets industriels :

Dans certains cas, ces eaux peuvent contenir des impuretés qui vont faire intervenir des réactions complexes avec le ciment : c'est le cas des usines alimentaires ou de la plupart des rejets organiques et chimiques. Elles ne devraient donc être utilisées qu'après une vérification approfondie de leur non- nocivité [44].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.9.2. Milieux acides

La solution interstitielle du béton est basique (pH de 13), lorsqu'en contact avec une solution acide (pH inférieur à 7), l'équilibre chimique des hydrates comme la portlandite et les silicates de calcium hydraté C-S-H se déstabilise, ce qui influe sur la stabilité de la matrice cimentaire [51]. La durabilité d'un matériau cimentaire dans un milieu acide dépend de plusieurs facteurs tels que:

- Type de ciment, composition et l'utilisation des ajouts cimentaires.
 - Type de granulats : gravier, sable, calcaire...
 - La durée et les conditions de cures.
 - L'acidité, type et le pH du milieu agressif.
- a) Sources des acides :

Les milieux acides les plus fréquents sont [52] :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires ;
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un PH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

b) Mécanisme d'attaque :

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) moins soluble dans l'eau.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.2 décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [52].

1.9.3. Milieux sulfatiques

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité.

L'action des sulfates sur le béton fait intervenir un certain nombre de phénomènes physico-chimiques complexes, dépendant de nombreux paramètres (type de sulfate, type de ciment, formule du béton, classe d'exposition...). Les réactions chimiques auxquelles elle conduit ainsi que leurs conséquences physiques (augmentation de la porosité, expansion...), peuvent provoquer des dégradations plus ou moins importantes. Bien que les cas réels d'ouvrages atteints soient relativement restreints, l'action des sulfates est généralement considérée comme un risque sérieux [42].

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition XA, environnements chimiquement agressifs.

Le béton doit présenter une résistance chimique, lorsqu'il est exposé à des attaques chimiques [53].

Dans la norme EN 206-1, les conditions environnementales sont exprimées sous forme de classes d'exposition. Selon leur teneur en sulfates, les sols naturels et les eaux souterraines entrent dans les classes d'exposition XA1, XA2 ou XA3. Les classes d'exposition comprennent certaines valeurs limites recommandées [54].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

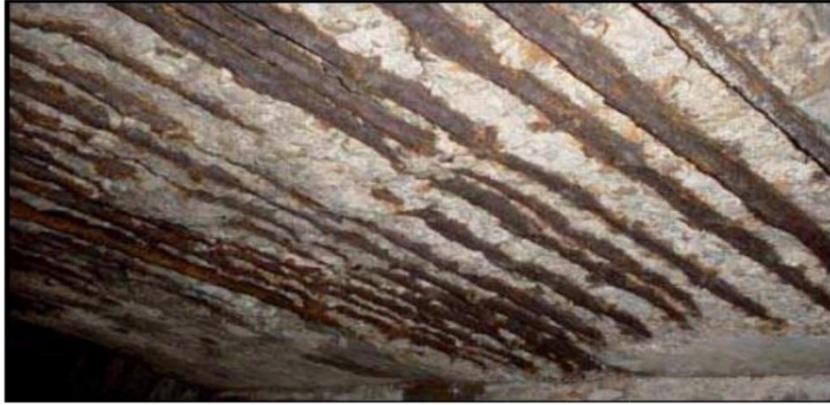


Figure 1.18 : Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton

a) Sources des sulfates :

Les sulfates peuvent avoir différentes origines [42] :

- ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, héli-hydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$, langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2).

Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes. Leur concentration y est habituellement assez faible, elle varie en moyenne entre 0,01 % et 0,05 % de sol sec.

Toutefois, il n'est pas rare de rencontrer des valeurs beaucoup plus élevées (supérieures à 5%) dans certaines régions où le sous-sol contient du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)[55].

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO_4^{2-} dont la solubilité est en général élevée.

Dans les environnements industriels (industrie chimique, fabrication des engrais, photographie, ...), la pollution des eaux souterraines peut conduire à des concentrations très supérieures aux limites d'agressivité généralement admises. Enfin, l'eau de mer représente aussi une source en sulfates inépuisable [55].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

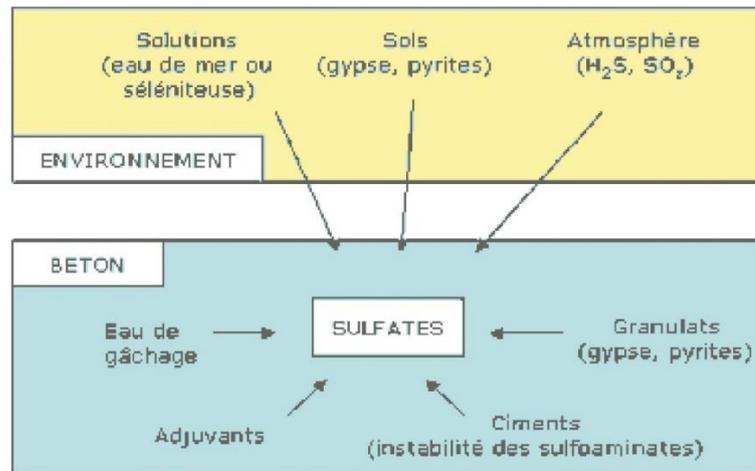
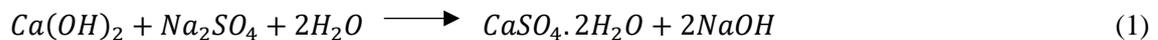


Figure 1.19: L'origine des sulfates (interne ou externe)

b) Mécanismes d'attaques :

Deux mécanismes principaux, indissociables, sont mis en jeu. Le premier mécanisme correspond au passage en solution (lixiviation) des ions calcium de l'hydroxyde de calcium, $Ca(OH)_2$, et des C-S-H. Il constitue un aspect majeur, parfois sous-estimé, du processus de dégradation dont la conséquence est un accroissement de la porosité du matériau. L'accroissement de porosité se traduit par une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité qui accélère le transfert des ions agressifs dans le matériau. Ce premier mécanisme peut être schématisé par les réactions qui se produisent avec le sulfate de sodium :



Les deux réactions conduisent à la libération des ions Ca^{2+} et à la formation de gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ qui précipite si le produit des ions $[Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}]$ excède le produit de solubilité du composé.

La portlandite est dissociée suivant la réaction : $Ca(OH)_2 \longleftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$.

Les ions calcium des C-S-H, dont le rapport C/S diminue, passent progressivement en solution, le terme ultime de la réaction étant un gel de silice hydraté.

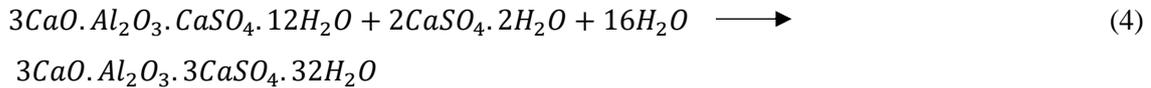
Le second mécanisme, en relation avec le premier, correspond à la formation de sels tels que l'ettringite, trisulfoaluminate de calcium hydrate de formule chimique

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$. La précipitation de ce sel dans des conditions spécifiques décrites plus loin, peut conduire à des gonflements et des fissurations plus ou moins importantes du béton. Elle résulte de la réaction du gypse plus ou moins dissocié en ions SO_4^{2-} et Ca^{2+} , issus des réactions (1) et (2), avec les aluminates de calcium du liant : aluminates anhydres, essentiellement

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

l'aluminate tricalcique C_3A et, à un degré moindre, l'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF , aluminates hydratés de type : C_4AH_{13} et monosulfoaluminate de calcium

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$. Les réactions avec le C_3A et avec le monosulfoaluminate peuvent s'écrire schématiquement :



La figure 1.20, établie à partir des travaux de Le Bescop et al [42]. Réalisés sur des pâtes de ciment au contact de solutions très faiblement concentrées en sulfate.

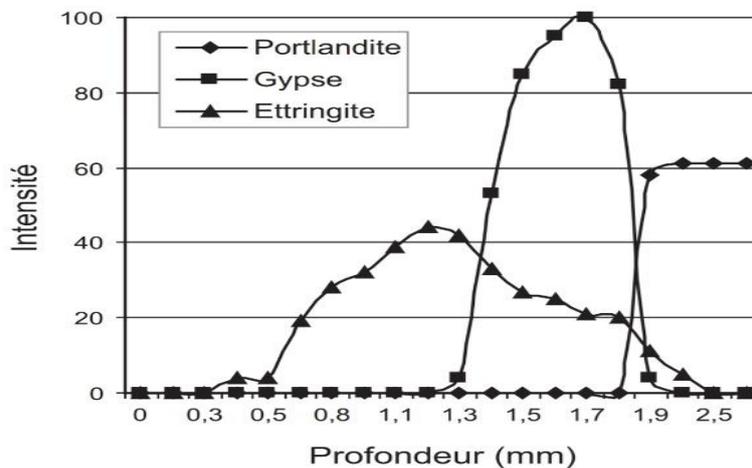


Figure 1.20 : distribution de la portlandite, du gypse et de l'ettringite en fonction de la profondeur dans une pâte de CEM I contenant 10 % de C_3A , au contact d'une solution à $10 \cdot 10^{-3}$ mol/L de Na_2SO_4 , d'après Le Bescop et al [42]

Les courbes qui représentent l'évolution de l'intensité relative du pic principal de diffraction des rayons X (DRX) de la portlandite, du gypse et de l'ettringite en fonction de la profondeur dans le matériau, font apparaître trois zones successives se recouvrant plus ou moins et progressant au cours du temps :

- Une zone de dissolution totale de la portlandite limitée par un front de dissolution abrupt ;
- Une zone assez large de précipitation de l'ettringite qui s'étend un peu au-delà du front de dissolution de $Ca(OH)_2$;
- Une zone intermédiaire assez étroite de précipitation du gypse, limitée par le front de dissolution de la portlandite et se superposant à la zone de précipitation de l'ettringite.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

On a démontré que l'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre l'ion sulfate et l'aluminate de calcium hydraté, et/ou les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durcie.

Les produits qui résultent de ces réactions sont l'hydrate de sulfoaluminate de calcium communément appelé ettringite et l'hydrate de sulfate de calcium mieux connu sous le nom de gypse. Les volumes de ces solides sont beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance ; il en résulte des contraintes qui peuvent détériorer la pâte et finalement désintégrer le béton [56].

1.9.4. Milieux des nitrates et des chlorures

a) Les nitrates :

Le nitrate d'ammonium est très soluble dans l'eau et réagit dans un premier temps avec la pâte de ciment par des réactions d'échange d'ions avec la formation d'un sel de calcium soluble [$Ca(NO_3)$] et un dégagement gazeux d'ammoniac (NH_3) et dans un second temps avec celle d'un nitro aluminate de calcium [57]. En effet ce dégagement de NH_3 est compensé par une mise en solution de la chaux pour maintenir la constante d'équilibre de la réaction chimique :



Les sels d'ammonium, nitrate, chlorure, acétate, phosphate et sulfate, sont très agressifs.

La réaction conduit à la formation de nitrate de calcium très soluble et à un dégagement gazeux d'ammoniac. La réduction de basicité due au dégagement d'ammoniac empêche la réaction d'atteindre l'équilibre. La conséquence est un lessivage progressif de la chaux de la portlandite et des C-S-H qui peut conduire à une dégradation des propriétés mécaniques du béton. La réaction avec les aluminates conduit à la formation d'un nitro-aluminate de calcium $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(NO_3)_2 \cdot 10H_2O$ [42].

b) Les chlorures :

Indépendamment de leur effet bien connu sur la corrosion des aciers, et excepté le chlorure d'ammonium très agressif, ils peuvent être légèrement agressifs vis-à-vis du béton s'ils sont en forte concentration.

Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit au gâchage à partir des constituants de base lors de la confection du béton, soit plus tardivement si l'ouvrage est exposé à des embruns marine ou

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

des sels. La pénétration des ions chlore par diffusion ou par capillarité à l'intérieur du béton, fait augmenter la vitesse de corrosion [58].

Les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre partie se combine avec le C₃A sous forme de monochloroaluminate de calcium ($3CaO, Al_2O_3, CaCl_2, 10H_2O$) [59].

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite selon la réaction 1 :



Le chlorure de calcium réagit avec l'aluminate tricalcique (C₃A) du ciment selon les relations 2 ou 3 pour former le monochloroaluminate de calcium ($3CaO, Al_2O_3, CaCl_2, 10H_2O$), ou le trichloroaluminate de calcium ($3, CaO, Al_2O_3, 3, CaCl_2, 10H_2O$) :



Les chlorures existent sous deux formes dans le béton : les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle et les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores [60].

Les mécanismes de dégradation mis en jeu sont essentiellement les suivants [42] :

Dans le cas des chlorures de sodium et potassium : lixiviation du calcium de la portlandite et des C-S-H et formation de monochloroaluminate de calcium ;

Dans le cas des chlorures de calcium et de magnésium : lixiviation du calcium de la portlandite et des C-S-H et formation d'oxychlorures expansifs accompagnés de brucite Mg (OH)₂ et de monochloroaluminate de calcium dans le cas de MgCl₂.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Tableau 1.5 : agressivité de quelques substances rencontrées plus ou moins fréquemment [42]

Substance	Agressivité	Remarques
Essence, kérosène, huiles légères	Néant	Béton compact, imperméable recommandé + éventuellement traitement de surface
Huiles minérales	Néant	Sauf si présence d'acides gras
Huiles végétales : olive, cacahuète, lin, margarine...	Modérée	Dégradation lente possible
Huiles végétales : cacao, noix de coco, ricin, moutarde...	Modérée à forte	Dégradation en particulier si exposition à l'air
Graisses animales	Modérée	
Déchets d'abattoir	Modérée à forte	Dégradation due à la présence d'acides organiques
Solvants : alcools éthylique et méthylique, éther, acétone, trichloréthylène...	Néant	Béton imperméable recommandé et traitement de surface éventuel
Sulfure de carbone	Modérée	Dégradation lente possible
Glycérine	Modérée	Dégradation lente possible
Ammoniac liquide	Néant	Sauf si présence de sels d'ammonium
Ammoniac vapeur	Modérée	Dégradation lente possible en milieu humide + corrosion des aciers
Lait	Néant	Sauf ranci (acide lactique)
Bière	Modérée	Présence possible d'acides organiques dus aux produits de fermentation (lactique, acétique...)
Cidre	Modérée	Dégradation lente possible (acides organiques)
Fumier, purin...	Modérée	Dégradation lente possible (porcheries, étables...)
Vin	Néant	Traitement de surface par acide tartrique
Sucre sec Solution	Néant Modérée	Traitement de surface Dégradation lente
Urée	Néant	
Urine	Modérée	Développement de substances acides au cours du vieillissement (porcheries, étables...)
Fourrage	Modérée	Dégradation lente due aux acides de fermentation : acétique, lactique, butyrique
Gaz d'échappement automobile	Modérée	Due à la formation d'acides carbonique, nitrique et sulfureux en présence d'humidité
Chlore gazeux	Modérée à fort	Formation d'HCl en milieu humide, attaque acide + corrosion des armatures

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

1.10. Les différentes catégories d'ettringite

Selon les conditions de sa formation, l'ettringite peut être expansive ou non expansive et il y a lieu d'insister fortement sur le fait que la présence de ce composé, même en quantité importante, n'est pas le signe automatique d'une agression par les sulfates. Différentes catégories d'ettringite doivent être distinguées dont la nomenclature, adoptée par le groupe de travail AFGC-RGCU GranDuBé Mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons [42], est la suivante :

- a) Ettringite de formation primaire qui est un produit normal de l'hydratation des ciments dû à la réaction du C₃A avec le régulateur de prise (gypse, hémi-hydrate, anhydrite auxquels il faut ajouter les sulfates contenus dans le clinker proprement dit). Cette ettringite n'a aucun effet délétère. Il s'agit de celle, également, qui est à l'origine du durcissement des ciments spéciaux de type sur sulfaté ou sulfoalumineux ;
- b) Ettringite de formation secondaire pouvant générer des gonflements, en relation avec un apport de sulfates externes dans les bétons formulés avec des ciments non résistants aux sulfates (ciments à teneur élevée en C₃A et en C₃S) ;
- c) Ettringite de formation secondaire ne provoquant pas d'expansion résultant de phénomènes de dissolution/recristallisation dus à la percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré. Cette ettringite n'a pas de caractère expansif en elle-même mais peut accompagner des phénomènes d'expansion. C'est aussi celle qui est observée dans les fissures provoquées par l'ettringite de formation différée dans les bétons ayant subi un échauffement.

1.11. Mécanismes d'expansion de l'ettringite

Différentes théories ont été proposées pour expliquer le mécanisme suivant lequel l'ettringite provoque l'expansion du béton [42].

- a) Théorie des pressions de cristallisation qui suggère que la pression engendrée par la précipitation d'un sel quelconque est reliée au taux de sursaturation C/C_s de la solution par la relation :

$$p = (RT/V_s) * [\log(C/C_s)] \quad (5)$$

Où :

V_s = volume molaire du sel,

C = concentration du sel dans la solution,

C_s = concentration du sel à la saturation,

R = constante des gaz parfaits

Et T = température absolue.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

- b) Théorie de la double couche électrique de Mehta [42] où les forces d'expansion sont dues à la répulsion électrostatique entre les particules d'ettringite « colloïdale » chargées négativement, accompagnée d'une forte absorption des molécules d'eau polaires.
- c) Gonflement par effet stérique étudié par Cottin et Li [42] basé sur le fait que le volume des hydrates étant toujours supérieur au volume des anhydres dont ils sont issus, le composé néoformé, s'il ne dispose pas de l'espace nécessaire à sa formation, créera cet espace par augmentation du volume apparent du système.

Mais, tout bien considéré, les trois théories sont moins différentes les unes des autres qu'il n'y paraît et elles peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- L'intensité de la force développée par la croissance d'un cristal dépend du degré de sursaturation de la solution, comme indiqué par l'équation 5 ci-dessus ;
- Le cristal ne croîtra pas là où il doit exercer une pression pour se développer s'il a la possibilité de croître dans des espaces libres (pores, fissures) ;
- Pour un cristal se développant dans un port, dans certaines conditions d'équilibre, des pressions peuvent s'exercer sur les parois du port si son rayon est inférieur à une certaine dimension (environ 100 nm). Les contraintes générées localement s'exercent sur des domaines de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres, c'est-à-dire dans des espaces relativement restreints et confinés [42].

1.11.1. Théorie colloïdale

Le principe de cette théorie élaborée par Metha [Metha 1973], repose sur des forces de gonflement provenant de l'environnement électrique des particules d'ettringite précipitée, qui peuvent développer des forces d'attraction et de répulsion. Les particules colloïdales d'ettringite, de surface spécifique très élevée et chargées négativement attirent les molécules d'eau polaires qui les entourent ce qui provoque un phénomène rapide de gonflement [61].

1.11.2. Expansion uniforme de l'ettringite

Cette théorie proposée par Taylor [Taylor, 1993] suppose qu'après la phase d'échauffement du béton, une grande quantité de monosulfoaluminate de calcium hydraté se trouve concentrée sur les C-S-H. En effet, ces derniers possèdent une grande surface spécifique et une forte interaction avec les ions de la solution interstitielle. Barbarulo [Barbarulo 2002] estime que des ions aluminates sont également absorbés par les C-S-H, et qu'on retrouve à la fin de la période d'échauffement des feuillettes de C-S-H enrichies en SO_3 et Al_2O_3 . Après retour à la température ambiante, et dans des conditions d'apport suffisant en eau, les ions sulfates sont libérés par les C-S-H ce qui conduit à une précipitation d'ettringite. Etant donné la répartition homogène des C-S-H dans la pâte de ciment, cela se traduit par une expansion homogène de la pâte produisant à la fois des fissures dans la pâte et aux interfaces pâte/granulats.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Cette théorie a été critiquée par quelques auteurs, surtout par Diamond [Diamond, 2004] qui suggère qu'il faut prendre en compte la participation des granulats dans le mécanisme de dégradation. En effet, les travaux menés par Yang et al [Yang et al 1999], dans lesquels ils ont étudié l'impact de la nature des granulats sur le développement de la RSI, montrent des symptômes aux interfaces pâte/granulats des mortiers fabriqués à base de granulats siliceux, ce qui n'est pas le cas dans les mortiers à base de granulats calcaires [61].

1.11.3. Expansion par pression de cristallisation

Cette théorie suppose que l'ettringite cristallise dans les fissures et les grands pores du béton et que la croissance des cristaux va générer des pressions qui vont engendrer des gonflements. Une telle théorie a été proposée par Diamond [Diamond 1996]. Le gonflement engendré est en relation avec la pression de cristallisation qui dépend du taux de sursaturation de la solution interstitielle, et elle est exprimée par la relation suivante :

$$p = (RT/Vs) * (\ln C / Cs)$$

Où :

R est la constante des gaz parfaits,

T est la température absolue,

Vs est le volume de la solution interstitielle,

C est la concentration de la solution interstitielle

Et Cs est la concentration de la solution à la saturation.

Cette pression peut atteindre des grandes valeurs dépassant la résistance du béton à la traction qui est de l'ordre de 3 à 6 MPa.

Avec les ciments Portland et en présence d'une quantité suffisante de C₃A, toutes les conditions sont réunies pour que, au contact de sulfates, il se produise à l'échelle microscopique, des sursaturations extrêmement élevées provoquant la précipitation rapide de l'ettringite. La pression de cristallisation de cette ettringite est considérable et serait donc suffisante pour générer des fissurations[61].

1.11.4. Mécanisme proposé par Brunetaud

Suite aux travaux réalisés, Brunetaud [Brunetaud, 2005] propose un mécanisme de dégradation décomposé en quatre phases distinctes schématisées dans la Figure 1.21[62].

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

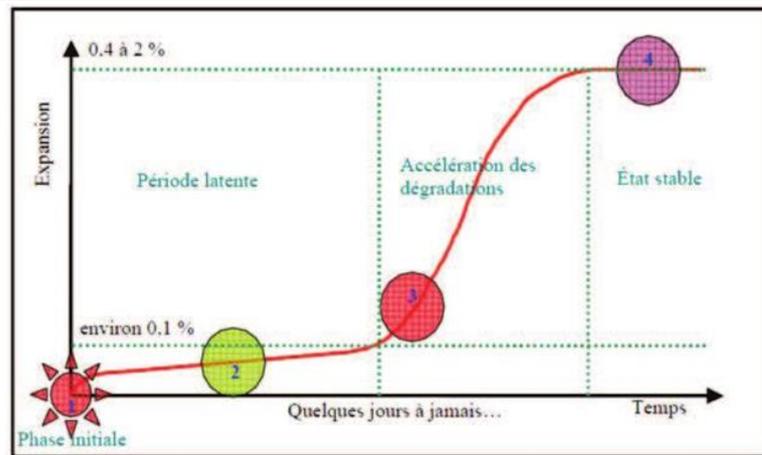


Figure 1.21 : Mécanisme d'expansion proposé par Brunetaud [Brunetaud, 2005]

a) Phase initiale :

Cette phase correspond à la phase de solubilisation de l'ettringite. Elle dépend essentiellement de la teneur en alcalins et de la température. Avant la précipitation de l'ettringite, les concentrations des ions constitutifs de l'ettringite devront augmenter avec la température et la teneur en alcalins. Le monosulfoaluminate de calcium hydraté peut être amené à devenir la seule phase sulfoaluminate stable durant cette phase et les ions excédentaires (principalement sulfates, et probablement aussi aluminates) se retrouvent en solution et peuvent donc être absorbés par les C-S-H.

La quantité d'ions absorbés sur les C-SH sera principalement fonction de leur concentration (donc indirectement de la température et de la teneur en alcalins) et de la durée de cette phase, c'est-à-dire de la durée de l'échauffement. Cette phase initiale s'arrête à la fin de l'échauffement [62].

b) Phase latente :

Cette phase vient juste après le retour à la température ambiante. Elle correspond à une période d'apparente inactivité de la pathologie. Un faible gonflement lent est remarqué, ainsi qu'une absence de modification majeure du module d'élasticité et de la masse volumique du matériau. Durant cette phase, les mécanismes qui régissent les expansions sont identiques à ceux proposés par la théorie de l'expansion uniforme de la pâte de ciment. Brunetaud estime que l'ettringite pourrait se situer dans les C-S-H de la porosité capillaire comme le propose Taylor. Il insiste également dans ses explications sur les grains de Hadley qui débutent leurs formations par un décollement entre le grain de ciment anhydre et son auréole de C-S-H.

En effet, il montre que l'intérieur de la coquille des grains de Hadley qui contient, à la fin de l'échauffement de l'AFM, représente la première zone où l'ettringite peut être observée. Il suggère que ce grain de Hadley est une zone particulièrement favorable à la formation d'ettringite secondaire du fait que tous les éléments permettant la DEF sont concentrés dans ces grains. La

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

répartition des grains de Hadley étant relativement homogène dans la pâte de ciment hydratée, le gonflement de ces grains peut donc générer un gonflement tout aussi homogène. Cette expansion homogène de la pâte va provoquer l'apparition de vides autour des inclusions qui ne gonflent pas comme les granulats. Ainsi, selon le mécanisme proposé par Brunetaud, la fissuration des interfaces pâte/granulats va marquer la fin de la période de latence. De plus, cette fissuration va se traduire par une première baisse du module dynamique. Pour des bétons à base de granulats siliceux, la première fissuration significative correspond systématiquement à une expansion d'environ 0,1% [62].

c) Phase d'accélération des dégradations :

Cette phase est une conséquence de la modification de la répartition des efforts engendrée par les premières fissurations significatives des interfaces pâte/granulats. Ces interfaces s'ouvrent et commencent à se remplir de cristaux d'ettringite à l'aspect comprimé. L'ettringite initialement contenue dans la pâte de ciment se dissout et migre pour précipiter dans la nouvelle porosité libre créée par l'expansion uniforme de la pâte, et notamment dans les fissures aux interfaces pâte/granulats. Ce phénomène est connu sous le nom de mûrissement d'Ostwald. L'auteur conclut que l'ettringite qui se développe aux interfaces pâte/granulats est la source de l'accélération des dégradations et donc de l'endommagement du béton [62].

d) Phase de stabilisation :

Cette phase intervient soit parce que le matériau arrive enfin à résister au gonflement, soit parce que les C-S-H ont totalement vidé leur réserve d'ions sulfate. Cependant, il est montré que l'expansion se poursuit tout de même et que cette progression résiduelle de l'expansion est probablement la conséquence du mûrissement d'Ostwald sans apport d'ions des C-S-H. Brunetaud conclut et synthétise la présentation des mécanismes qu'il propose en conciliant les deux grandes théories (expansion uniforme de la pâte et pression cristalline) de la manière suivante : les expansions significatives des matériaux atteints de RSI sont dues à la pression cristalline localisée de l'ettringite elle-même étant la conséquence d'une expansion uniforme préalable de la pâte de ciment[62].

1.12. Vieillissement naturel et accéléré

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage. Certains alliages de la série 6XXX, en durcissant, peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température **ambiante** [63].

Vieillissement Accéléré

Le vieillissement accéléré est réalisé à travers différents tests normalisés pour trois raisons principales [Feller1994]. Ces tests normalisés permettent avant tout d'établir un classement des

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

matériaux ou d'un ensemble de matériaux (ou système) dans un temps relativement court en fonction de leur stabilité chimique ou leur durabilité physique. Les tests de vieillissement sont aussi réalisés pour estimer ou « prédire » de manière statistique la fiabilité potentielle à long terme du système sous des conditions spécifiques d'utilisation. Enfin, lors des tests, les processus de dégradation sont accélérés à l'échelle du laboratoire dans le but d'identifier les mécanismes de dégradation (réactions chimiques par exemple) et leurs impacts sur les propriétés physiques du système. Ces tests accélérés fournissent des informations sur la tendance globale de la dégradation du système qui peut être, soit un processus qui s'amplifie dans le temps, soit une période d'initiation avant une dégradation progressive ou bien un mécanisme en plusieurs étapes distinctes et observables avant que la défaillance n'ait lieu. L'objectif final est bien évidemment de développer des techniques de vieillissement capables de reproduire en accéléré les mécanismes de dégradation constatés sur le terrain afin de prolonger la durée de vie utile du système [64].

Conclusion :

L'étude élaborée dans ce chapitre vise à passer en revue la problématique générale de ce mémoire, à savoir, la durabilité des BAP dans les milieux agressifs, dans ce sens, nous avons commencé par des définitions, l'aspect historique sur les mortiers et les mortiers autoplacants ainsi que les déchets de marbre, les différents milieux agressifs et enfin les différents travaux traitant le sujet.

CHAPITRE 2
MATÉRIAUX ET
ESSAIS

2. MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons notre travail pratique effectué au niveau du laboratoire géo matériaux et génie civile. On s'intéresse à la présentation des matériaux utilisés pour réaliser les différents essais expérimentaux, Il est connu que la connaissance des caractéristiques de ces matériaux est impérative à toute recherche.

Les matériaux utilisés sont :

- Ciment (CEM II/A 42.5)
- Sable (de bougezoul, et de baghlia)
- Sable de marbre
- Adjuvant (superplastifiant)

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.1. Ciment

Le type de ciment utilisé dans notre travail de recherche est un ciment type CEM II/A 42.5, provenant de la cimenterie de LA FARGE, ses caractéristiques chimiques et physiques sont regroupées dans les tableaux ci-dessous

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment

Composition chimique (%)									
Ca O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mg O	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	Cl ⁻
61.53	18.66	4.59	2.85	1.80	2.16	0.15	0.67	7.87	0.016
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
67.85		2.24		7.33		8.67			

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Rc à 28 jours (MPa)	ρ_{abs} (Kg/m ³)	ρ_{app} (Kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)	Début de prise	Fin de prise
50,5	3030	1036	4642	1h15min	3h35min

2.2.2. Sable

Le sable utilisé est un mélange de deux sables : le premier sable provenant de Baghlia et le deuxième provenant de Boughezoul

1. **Sable de Baghlia "grossier" :** C'est un sable roulé de forme arrondie, de classe granulaire (0/5) mm, présenté dans figure 2.1.
2. **Sable Boughezoul :** C'est un sable fin de classe granulaire (0/2.5) mm. Présenté dans figure 2.2

Tableau 2.3: Caractéristiques physiques et mécaniques des deux sables et du sable corrigé

Sable	S/Boughezoul	S/Baghlia	S/Corrigé
Classe granulaire (mm)	0/2,5	0/5	Mélange
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1470	1440	1660
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2530	2530	2640
Coefficient d'absorption (%)	-	-	1,5
Module de finesse	1,54	3,67	2,8
Composition (%)	50	50	100

Les résultats de l'essai sur le sable utilisé figurent au tableau 2.4

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

Tableau 2.4 : Résultats d'équivalente de sable

Type de sable	Esv %	Esp %	Nature et qualité du sable
S/Boughezoul	70	66	Sable légèrement argileux de propreté admissible
S/Baghlia	86	86	Sable très propre



Figure 2.1 : sable de Baghlia



Figure 2.2 : sable Boughezoul

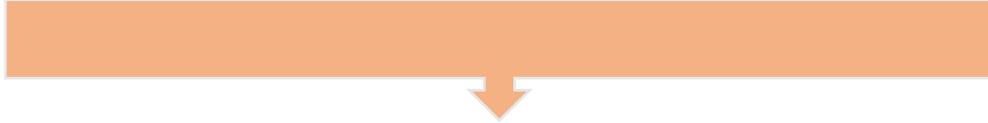


Figure 2.3 : mélange de 2 sables (s/corrigé)

Les courbes granulométriques des 2 sables ainsi que du sable corrigé sont données dans la figure 2.4.

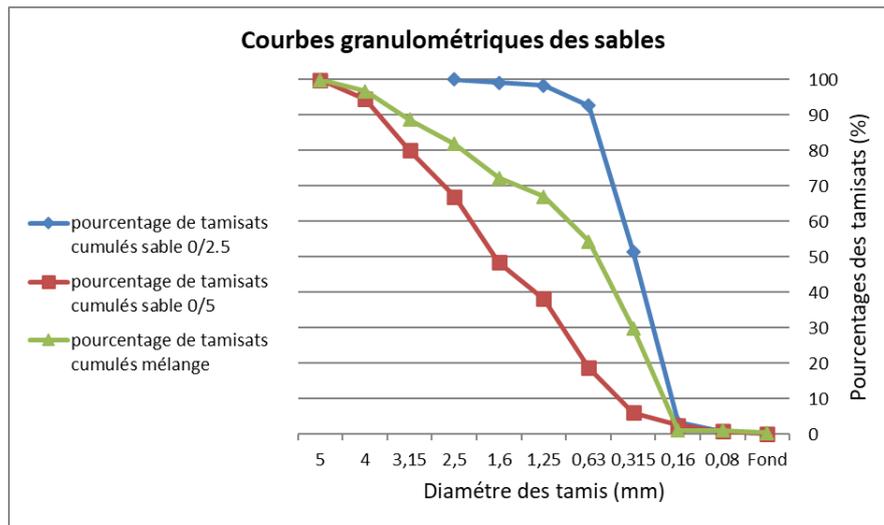


Figure 2.4 : Courbe granulométrique des sables

3. Sable de déchet de marbre :

Le marbre utilisé (Figure II.5) a été obtenu au laboratoire, Les déchets de marbre ont subi un concassage manuel à l'aide d'un marteau à des pierres puis un concassage mécanique à l'aide d'un concasseur à mâchoire.

Nous avons tamisé le produit concassé avec un tamis de 5mm pour obtenir un sable de classe granulaire 0/5.



Figure 2.5 : déchet de marbre



Figure 2.6 : Processus de concassage

La figure 2.7 présente l'analyse granulométrique du déchet de marbre et les caractéristiques de sable de marbre sont données dans le tableau 2.5

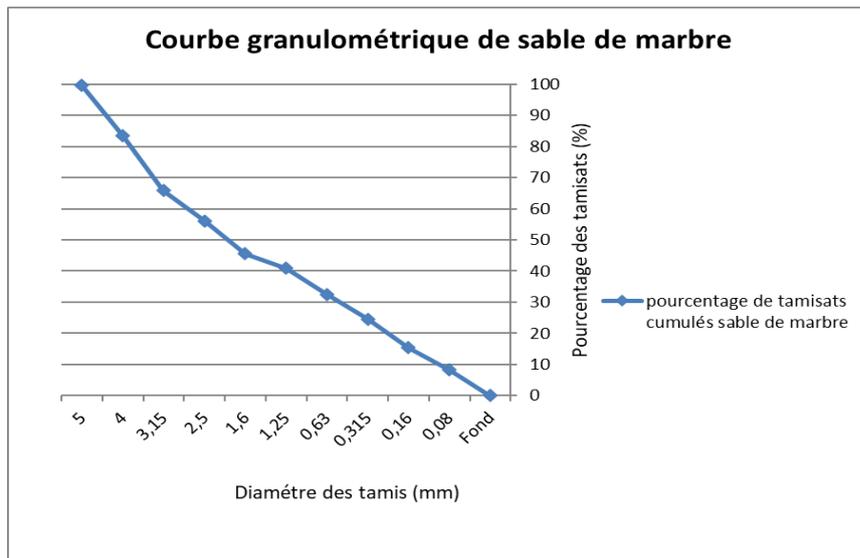


Figure 2.7 : Courbe granulométrique de sable de marbre

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

Tableau 2.5 : les caractéristiques physiques de sable de déchet de marbre

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (g/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Module de finesse
1,58	2,66	0,5	3,3

Nous avons utilisé le sable de marbre avec les pourcentages 0%, 15%, 30%, et 50% avec le sable corrigé le tableau (II.6) suivant présente les caractéristiques des pourcentages.

Tableau 2.6 : les caractéristiques physiques de sable de déchet de marbre et sable corrigé

Les sable	0%	15%	30%	50%
Masse volumique absolue (g/m ³)	2,64	2,643	2,646	2,65
Coefficient d'absorption (%)	1,5	1,35	1,2	1

2.2.3. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est l'eau de robinet fournie au laboratoire de génie-civil, pour le façonnage des différents mélanges et des éprouvettes.

2.2.4. Le superplastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau conforme à la norme EN 934-2, nommé MEDAFLOW 30 confectionné par la société Granitex. Il se présente sous forme d'un liquide marron avec une plage de dosage comprise entre 0,5% à 2% en masse de poudre. Sa densité est de 1,81, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 1g/l et il possède 30% d'extraits secs.



Figure 2.8 : le superplastifiant

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

2.3. Formulation du mortier

La méthode que nous avons choisie pour la formulation est la méthode japonaise d'Okamora. L'objectif de la formulation est de définir le mélange optimal des différents constituants afin d'aboutir à un mortier aux propriétés souhaitées.

En fixant les rapports $E/L=0,38$ et $S/M=0,50$, Le pourcentage de superplastifiant est variable. Le rapport $Sp \times L$ sera ajusté par l'essai d'étalement (le diamètre D de la galette doit être compris entre 270mm et 330mm), et par l'essai de l'entonnoir en V (le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2sec et 10sec).

Les proportions des constituants du mortier (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide d'une feuille de calcul Excel. La méthode de malaxage est expliquée comme suit :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité),
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau),
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

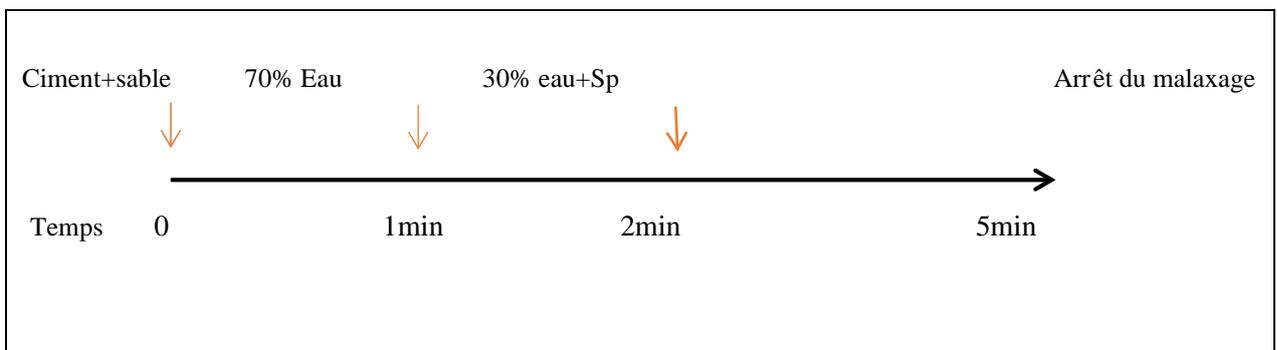


Figure 2.9 : Séquence de malaxage du mortier



Figure 2.10 : Malaxeur à mortier

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

2.4. Essais réalisés sur MAP

2.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

Cet essai (Cf norme NF EN 206-1) est réalisé à l'aide d'un mini cône qui est placé au centre d'une plaque en acier horizontale lisse puis rempli avec du mortier. Une fois le moule soulevé le mortier s'écoule, on calcul les deux diamètres perpendiculaires pour retenir la moyenne, la figure 2.11 présente le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



Figure 2.11 : Essai d'étalement pour mortier [21]

2.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) caractérise la capacité de passage du mortier à travers un orifice. (Figure 2.12), consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.



Figure 2.12 : Essai à l'Entonnoir en V pour mortier [21]

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

La valeur d'étalement doit être comprise entre 270 et 330 mm et le temps d'écoulement entre 2 et 10s pour un MAP.

2.4.3. L'essai au cône de Marsh

L'essai consiste à mesurer la fluidité des différents MAP à travers le temps d'écoulement, l'essai consiste à remplir le cône de Marsh à un certain niveau avec la fermeture de l'orifice de 10mm de diamètre. On lance le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que le remplissage soit à ras du récipient d'un volume de 1 litre placé au-dessous du cône.



Figure 2. 13 : Essai au cône de Marsh pour mortier

2.4.4. L'essai de l'air occlus

L'essai est conforme à la norme NF EN 12 350-7[32] consiste à mesurer le pourcentage d'air dans le mortier en suivant ces étapes :

- ✓ Remplir le récipient à ras,
- ✓ Positionner et fixer le couvercle, fermer la soupape principale et ouvrir le robinet A et le robinet B.
- ✓ De l'eau est introduite dans le robinet A jusqu'à ce qu'il ressorte du robinet B, une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle.
- ✓ Ajuster à l'aide du bouton correcteur, lancer l'analyse grâce au bouton de piston. Le pourcentage d'air total est lu directement en %.

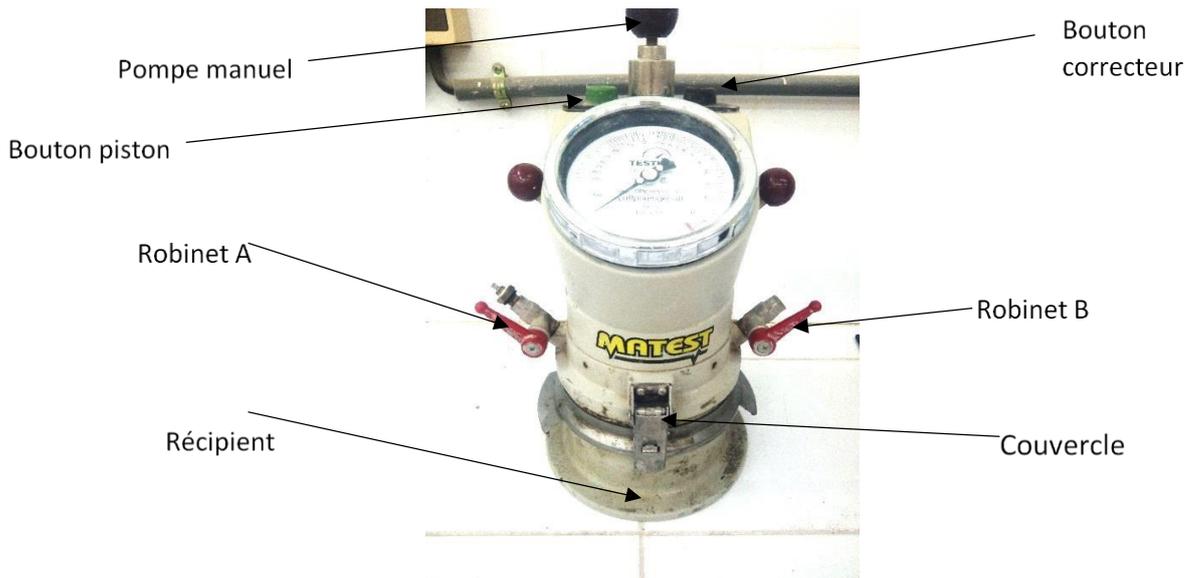


Figure 2.14 : Essai de l'air occlus [32]

2.5. Essais à l'état durci

Pour cet essai, les éprouvettes sont confectionnées dans des moules prismatiques de $4*4*16\text{ cm}^3$, les moules sont d'abord nettoyés, puis un lubrifiant est étalé pour faciliter le démoulage, ensuite les moules sont remplis avec du mortier (figure 2.17). Il faut que les moules soient bien arasés à l'aide d'une règle métallique.



Figure 2.15 : Moule prismatique $4*4*16\text{ cm}$ vide et rempli de MAP

Les moules sont conservés dans des endroits humides pendant 24h jusqu'au démoulage. Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20°C jusqu'à la date prévue de l'essai.



Figure 2.16 : Confection et Conservation des éprouvettes [32]

2.5.1. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion des mortiers est mesurée trois éprouvettes de $4*4*16\text{cm}^3$. Le prisme sera centré entre les deux appuis (l'un fixe et l'autre mobile) de l'appareil. La lecture sur l'écran de l'appareil de la force de flexion et de la contrainte sont effectuées. La résistance à la flexion est la moyenne de trois mesures de chaque pourcentage. Les essais seront effectués conformément à la Norme EN 196-1[32].



Figure 2.17 : Appareil de flexion

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

2.5.2. La résistance à la compression

Les essais de résistance en compression sont effectués sur les six demi-prismes obtenus suite à l'essai de flexion testés sur les faces latérales du moulage, sous une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ selon la norme EN 196-1.

Nous effectuerons la lecture de la charge d'écrasement P et de la contrainte sur l'écran de l'appareil. La résistance à la compression est la moyenne de six mesures.



Figure 2.18 : Appareil de compression



Figure 2.19 : Appareil de compression/flexion

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

2.6. Les essais de durabilité

2.6.1. Absorption capillaire

Cet essai consiste à mesurer le coefficient d'absorption, l'essai sera réalisé conformément à la norme EN 13057 sur des éprouvettes de forme $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$.

Les éprouvettes seront séchées jusqu'à une masse constante dans une étuve ventilée à $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Les faces latérales des éprouvettes seront surfacées par une résine de type époxy, pour assurer l'écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée. Ensuite immergées dans l'eau d'une nappe de hauteur 3 maximal 5mm., les éprouvettes seront sorties de la nappe, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis relancer dans la nappe. L'absorption est mesurée après un intervalle de temps précisé suivants : 1mn, 5mn, 10 mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h.



Figure 2.20 : L'essai d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par l'équation suivante : norme C1585-11

$$I = \frac{M_x - M_0}{A \cdot \rho}$$

Avec : I : Coefficient d'absorption capillaire (mm)

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g)

M_0 = masse initiale de l'éprouvette (g)

A : section de l'éprouvette (cm^2)

ρ : masse volumique de l'eau = 1 g/cm^3

Le coefficient de sportivité est déterminé par l'équation suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}}$$

Où : A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm^2

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

Q : le volume d'eau absorbé en cm³

t : temps écoulé en (s),

S : coefficient de sportivité du spécimen en cm/s^{1/2}

On trace Q/A en fonction de t, puis on trace la régression linéaire entre Q/A et t, puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sportivité (s) des grands pores et des petits pores.

2.6.2. Porosité

L'essai de porosité accessible à l'eau notée ε (%) sera effectué selon la norme NF P18-495.

La porosité accessible à l'eau s'agit de la détermination l'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. Pour déterminer la masse sèche, les éprouvettes seront séchées dans une étuve à une température de 55°C jusqu'à une masse constante, avant et après 24h à l'étuve ne dépasse pas 0.1%.

L'échantillon sera placé dans une enceinte fermée (dessiccateur), sous une pression constante pendant 4h. Ensuite l'eau sera introduite progressivement jusqu'à remplissage des éprouvettes, nous déconnecterons la pompe. L'échantillon sera maintenu dans la saturation pendant 18h± 2h, Après la saturation, les éprouvettes seront sorties du récipient et pesées dans l'air avec une balance pour déterminer la masse de l'éprouvette saturé « Meau »

La porosité accessible à l'eau, ε , est exprimée en pourcentage, est donnée par l'équation

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

Où : Meau : la masse du spécimen immergé dans l'eau

Mair : la masse du spécimen pesé a l'air

Msec : la masse du spécimen à sec

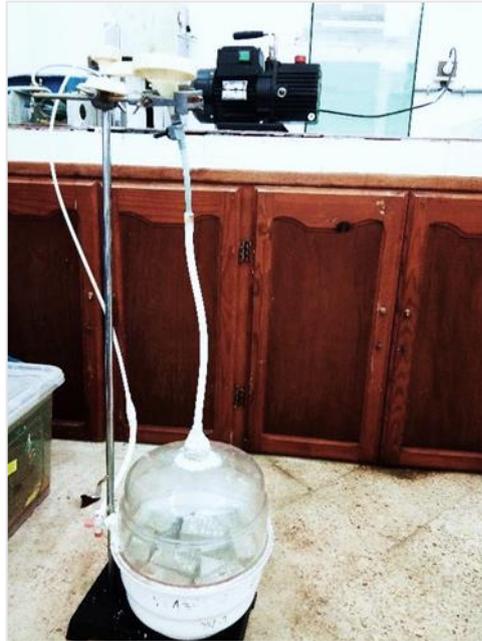


Figure 2.21 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes

2.6.3 Préparation des éprouvettes pour les attaques chimiques :

Les éprouvette son prépare on fixe :

S/M=0.5, E/C= 0.38, SP=0.9% est Variation du marbre : 0%, 15%,30% et 50%

Les éprouvettes seront émergées dans l'eau, après démoulage, pendant 28 jours à une température de 20 °C. ces éprouvettes seront ensuite introduites dans une solution chimique très agressive de sulfate et d'acide.

2.6.3. Attaques sulfatiques (Na_2SO_4 et MgSO_4)

Le principe de base des essais consiste à immerger des éprouvettes de forme $(4*4*16)$ cm³ en béton ou mortier dans une solution sulfatique.

Il faut savoir que l'eau a un PH neutre (7), et que le béton est basique, en incorporant la poudre de MgSO_4 dans l'eau, les réactions chimiques qui vont en découler, font que le PH de la solution augmente. Donc, des mesures régulières du PH de la solution doit être effectuée et dès que les mesures du PH donne des valeurs entre 8.5 et 8.8, soit, la solution doit être changée complètement ou bien le PH est réajusté par un apport de MgSO_4 , ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium. Selon la norme ASTM C1012-95a, nous devons incorporer 50g de la poudre de MgSO_4 dans 1L d'eau. Le volume d'eau nécessaire est égal à 5 fois le volume des éprouvettes.

Les mesures à faire :

- Mesures d'allongement aux échéances : 1, 2, 3, 4, 8, 13 semaines, ensuite 4, 6, 9 et 12 mois

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

- Mesures de porosité à 28j, 56j, 90j, 180j
- Mesures de perte de masse aux échéances : 1, 2, 3, 4, 8, 13 semaines puis 4, 6, 9 et 12 mois
- Mesures de la résistance à la compression et à la flexion à 7j, 28j, 56j, 90j, 180j

REMARQUE : Cette procédure est la même utilisée pour le Na_2SO_4

2.6.4. Attaques des acides

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide chlorhydrique (HCl). Cette solution d'acide chlorhydrique sera préparée dans des récipients résistants à l'acide.

Le HCl a un PH bas, il est présenté sous forme de solution ayant une concentration massique de 1.19kg/L. Un calcul basé sur les concentrations massiques permet de doser correctement le HCl. Les échantillons testés sont de forme prismatique de $4*4*16 \text{ cm}^3$. La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides sera évaluée physiquement (variation de masse) et visuellement (l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide).

L'organigramme ci-dessous récapitule la procédure expérimentale.

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des MAP C'est une étape nécessaire avant de dépoter un protocole expérimental

Conclusion :

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la méthode de formulation des MAP ainsi que les méthodes d'expérimentation à l'état frais et a l'état durci, les essais préliminaires de caractérisation sont présentés aussi dans ce chapitre.

L'organigramme ci – après détaille notre programme expérimental :

CHAPITRE 2 : Matériaux et essais

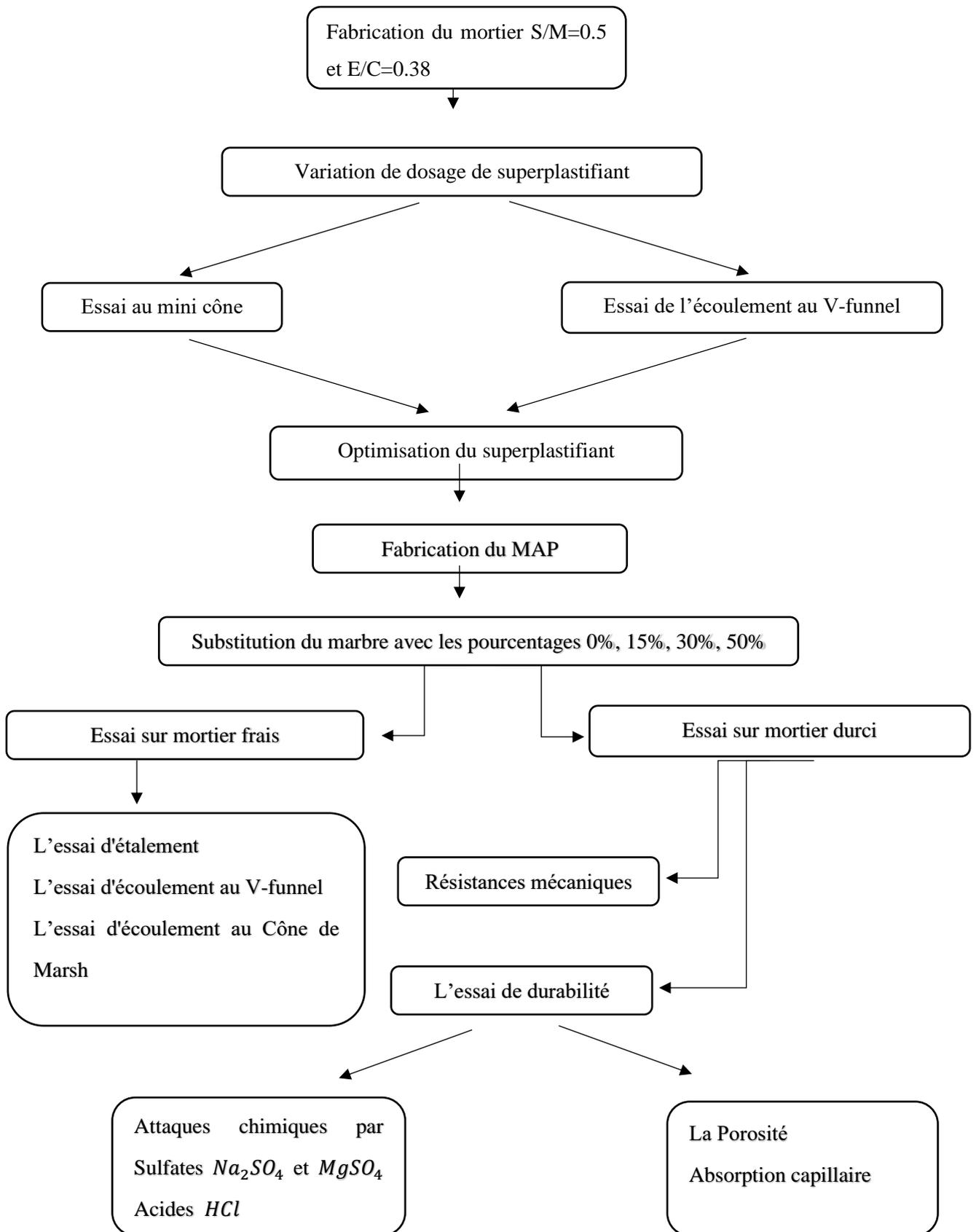


Figure 2.22 : Organigramme des différents essais à réaliser sur le mortier

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche repose sur la valorisation des déchets de marbre dans la formulation, sur le comportement, et la durabilité des mortiers autoplaçants à l'état frais et à l'état durci. Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les essais de caractérisation des matériaux sont aussi importants que les essais sur le MAP.
- ✓ Les essais à l'état frais permettent de déterminer la fluidité et l'ouvrabilité des MAP.
- ✓ Les essais de mini cône et de V-funnel effectués sur mortier sont importants pour déterminer le dosage optimal en superplastifiant.
- ✓ A l'état durci, les essais mécaniques et de durabilité donnent une idée sur les résistances maximales des MAP.
- ✓ Le sable de déchet de marbre joue un rôle important dans l'amélioration du mortier autoplaçant (l'ouvrabilité, et les résistances à la compression/traction), et présente des avantages environnementaux.
- ✓ La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour les bétons et les mortiers. En présence des différentes attaques chimiques qui peuvent altérer le béton. Il s'avère que les attaques du béton par les sulfates provoquent des fissurations et des éclatements et les attaques aux acides provoquent des dissolutions et des érosions et tous ces mécanismes peuvent compromettre l'aptitude au service des ouvrages concernés.

RECOMMANDATIONS

Cette recherche a ouvert la porte à des recherches nouvelles qui doivent s'intéresser à la valorisation des déchets dans la confection des bétons et des mortiers autoplaçants.

A la lumière de notre recherche, nous recommandons quelques perspectives suivantes :

- Etudier un MAP à base des déchets recyclés, il serait également intéressant de réaliser des essais expérimentaux, il est souhaitable que des essais soient effectués dans des bonnes conditions.
- Etudier les performances des MAP à bases des déchets à l'état durci.
- Elargir l'étude de la durabilité des MAP à base des déchets et propriétés de ce type du mortier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K. Yahiaoui and M. Sadki, "Propriétés de mortier autoplaçant à base de différents types de sables," Université Ziane Achour - Djelfa, 2017.
- [2] "cours-sur-le-mortier-beton." . <https://www.4geniecivil.com/2015/10/cours-sur-le-mortier-beton.html>
- [3] S. Soumia, "Formulation d ' un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis à températures élevées," Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [4] B. Kh, "Faculté des Sciences de l ' Ingénieur Mémoire de Magister Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d ' ajouts de déchets de briques réfractaires," BOUGARA-BOUMERDES, 2014.
- [5] A. H. & B. BILAL, "Caractérisation de l'ouvrabilité des mortiers et des bétons," l'Université de Guelma, 2013.
- [6] H. M. EL FETEH, "MORTIERS SPECIAUX ET MORTIERS INNOVANTS: ETAT DE L'ART. MORTIERS TRADITIONNELS: MANIPULATIONS," l'Université de Guelma, 2014.
- [7] "Cours : chapitre IV : LES MORTIERS."
- [8] C. L. Rabiaa, "Etude de l'influence d'un adjuvant entraîneur d'air sur la rhéologie des mortiers," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [9] A. Abdulrahman, "Caracterisation experimentale des mortiers a base des dechets de briques," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018.
- [10] H. A. et S. Souhila, "Etude expérimentale d'un mortier et d'un béton à base de ciment CRS (Performance, Caractérisation)," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [11] M. B. SARAH, "Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [12] D. Lozach, "G11 : Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, tome 2," Paris. [Online]. Available: <http://www.infociments.fr>.
- [13] H. Fares, "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée Hanaa Fares To cite this version : HAL Id : tel-00447159," Matériaux. Université de Cergy Pontoise, 2009.
- [14] D. Lozach, "G10: Les constituants des bétons et des mortiers tome 1," Paris, 2005.
- [15] B. SARA, "Contribution à la modélisation du retrait des bétons, Application au béton autoplaçant," UNIVERSITE CONSTANTINE 1.
- [16] H. M. REDHA, "FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS," UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2011.
- [17] M. A. Z. Eddine, "Formulations et caractérisations des bétons autoplaçant," HOUARI BOUMEDIENE USTHB / ALGER.
- [18] S. Nasri, "Caractérisation aux moyens des essais non- destructifs (NDT) et essai direct d'un béton auto plaçant(BAP) a base de matériaux locaux (effet de la nature du sable).," Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [19] P. Diederich, "Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton," 2010. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [20] M. B. S. Eddine, "Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux," UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE.
- [21] W. Yahiaoui, "Durabilite du beton autoplaçant en climat chaud," Blida, 2018.
- [22] M. Farih, "Influences Des Agents De Viscosite Sur Les Parametres Rheologiques Intrinseques Des Mortiers Des Bétons Autoplaçants," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [23] A. DEBBIH, "PERFORMANCES D'UN BETON AUTOPLACANT A BASE DE GRANULATS RECYCLES, LAITIER ET LA POUZZOLANE NATURELLE," UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA.
- [24] F. CUSSIGH, "c2217 Bétons auto-plaçants (BAP)," *Tech. L'INGÉNIEUR paris*, p. 12.

- [25] D. Riad, "INFLUENCE DES ADDITIONS MINERALES SUR LE COMPORTEMENT AU JEUNE AGE ET A LONG TERME DES BETONS AUTOPLAÇANTS TRAITES THERMIQUEMENT," Université 8 Mai 1945 – Guelma.
- [26] B. Mehdi, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT A HAUTE TEMPERATURE DES BETONS AUTOPLAÇANTS," Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2017, 2017.
- [27] M. B. & B. H. EDDINE, "ETUDE COMPARATIVE DE DURABILITE ENTRE LES BETONS AUTOPLACANTS ET LES BETONS ORDINAIRES," l'Université 08 Mai 1945 de Guelma.
- [28] "Marbre." . <https://fr.wikipedia.org/wiki/Marbre>
- [29] "-historique-marbre." . <https://fr.wikipedia.org/wiki/Marbre#Histoire>
- [30] M. S. Sabrina, "COMPORTEMENT DES BETONS A BASE DE GRANULATS RECYCLES," UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE.
- [31] S. M. S. DIA Mouhamadou Bassirou, "Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie," l'Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [32] G. Kenza, "EFFETS DU SABLE DU MARBRE RECYCLE SUR LE COMPORTEMENT DES MORTIERS AUTOPLACANTS," Université de Blida 1, 2019.
- [33] "mineraux-proprietes-calcaire-dolomie-marbre." . <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-calcaire-dolomie-marbre.jsp>
- [34] A. Boukheikh, "Influence De La Poudre De Marbre Sur Les Propriétés Des Bétons Autoplaçants," no. Laboratoire de recherches de génie civil, 2012.
- [35] M. M. C. Dhoka, "' Green Concrete : Using Industrial Waste of Marble Powder , Quarry Dust and Paper Pulp ,'" *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 2, no. 10, pp. 67–70, 2013.
- [36] H. Binici, H. Kaplan, and S. Yilmaz, "Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete," *Sci. Res. Essays*, vol. 2, no. 9, pp. 372–379, 2007.
- [37] G. Y. Zaitri R1, Bederina M1, Dif F2, "Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés," Université Ammar Thélidji de Laghouat, Algérie.
- [38] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, and H. Kaplan, "Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 208, no. 1–3, pp. 299–308, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.120.
- [39] H. Hebhou, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, and E. Ghorbel, "Use of waste marble aggregates in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1167–1171, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037.
- [40] M. B. O. Mohsen Tennich , Abderrazek Kallel, "Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 65–70, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.052.
- [41] M. mokhtar & ben brahim Oussama, "Durabilité du Béton Autoplaçant à base de sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques," Université Ziane Achour de Djelfa.
- [42] J.-P. O. & A. VICHOT, *La durabilité des bétons*. france, 2004.
- [43] M. R. Khelifa, "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants," Université d'Orléans, 2009. Français. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00464699>.
- [44] M. K. Sara and M. B. Zakia, "INFLUENCE DES MILIEUX DE CONSERVATION SUR LA DURABILITE DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS," UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES, 2017.
- [45] B. Khalil, "« Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité »,," Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018.
- [46] F. Taieb, "Durabilité d'un béton exposé à un milieu Agressif (acide sulfurique) influence du rapport G/S," Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [47] G. F. el Z. Berdaia Rachid, "Etude de la résistance aux attaques chimiques sur le béton autoplaçants à base de divers types de sable," Université Ziane Achour de Djelfa.

- [48] O. Mehena, "Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien .," Université M'Hamed Bougara- BOUMERDES, 2009.
- [49] C. DERACHE, *La durabilité des bétons*. paris.
- [50] "les-travaux-maritimes-risque-de-corrosion-et-dattaques." <https://www.infociments.fr/travaux-maritimes-et-fluviaux/les-travaux-maritimes-risque-de-corrosion-et-dattaques>
- [51] H. Ikram and L. O. El Kheir, "Etude de la résistance des mortiers Aux attaques acides," Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [52] O. Belaribi, "Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzoloane," 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/123456789/937>.
- [53] M. A. S. BENOSMAN, "Performances mécaniques et durabilité des matériaux cimentaires modifiés par ajout de polymère (PET)," UNIVERSITE D'ORAN, 2011.
- [54] K. Hermann, "Dégâts du béton dus aux sulfates origine et prévention," *Bull. du Cim*.
- [55] L. Divet, *Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite*. paris.
- [56] CNRC, "Le béton en milieux sulfatés," Canada, 1974.
- [57] N. DALILA and A. MERIEM, "Influence d'attaques par (HNO₃+NH₄NO₃) et (MgSO₄) sur les résistances mécaniques en compression sur les mortiers A base des ciments pouzzolaniques," UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES, 2016.
- [58] D. Mounsif, "Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis," Université Mohamed Khider – Biskra.
- [59] G. Zoubeida, "L'Effet De La Degradation Chimique Sur Le Comportement Mecanique Des Betons," Université Hadji Mokhtar - Annaba, 2013.
- [60] M. T. Brahim, "ETUDE DE LA DIFFUSION DES CHLORURES DANS LES BETONS LOCAUX," UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID - TLEMEN, 2009.
- [61] M. Al Shamaa, "Etude du risque de développement d'une réaction sulfatique interne et de ses conséquences dans les bétons de structure des ouvrages nucléaires," Université Paris, 2012.
- [62] N. Leklou, "Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne," UNIVERSITE PAUL-SABATIER TOULOUSE III, 2008.
- [63] F. Hichem, "Effet de vieillissement naturel sur les propriétés mécaniques de deux tôles AlMgSi," UNIVERSITE CONSTANTINE 1, 2012.
- [64] V. Guiheneuf, "Approche multi-physique du vieillissement des matériaux pour application photovoltaïque," Université Paris-Est, 2017.