



Université AbouBekr Belkaid – Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Thème :

**Influence des ajouts sur le comportement mécanique des
mortiers soumis aux attaques acides.**

Présenté par :

OUAHIANI Samira

BENBOUZIANE Sarra

Soutenu le 24/09/2020, devant le jury composé de :

Pr. GHOMARI Fouad

Dr. SAIL Latifa

Pr. BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine

Dr. TALEB Omar

Président

Examinatrice

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Nous remercions DIEU le tout Puissant de nous avoir donné la force, la santé, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Messieurs le **Professeur BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine** et **Dr. Taleb Omar**, pour leurs soutiens, disponibilités et leurs précieux conseils tout au long de ce travail aussi de nous avoir confié ce travail de recherche, avec leurs encouragements, enthousiasmes, patiences, et de leurs confiances durant notre préparation de ce mémoire. Nous les remercions pour le temps qu'ils ont consacré pour nous, ainsi pour leurs orientations au cours de ces années.

Nous tenons à remercier également Monsieur le **Professeur GHOMARI Fouad** de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire.

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à **Dr. SAIL Latifa** pour l'intérêt qu'elle a bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.

Nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel du Laboratoire Eau et Ouvrage Dans Leur Enivremments « EOLE » pour leurs aides et assistance en vue de notre réussite.

Un remerciement particulier et personnel à l'ensemble de nos enseignants qui ont contribué à notre formation.

À nos amis de la promotion ainsi qu'à tout le personnel du département de génie civil de l'université de Tlemcen.

Et finalement, nous tenons à remercier les personnes qui ont bien voulu contribuer de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

C'est grâce au bon Dieu que j'ai pu achever ce modeste travail.

Avec grand respect et gratitude, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma sympathie et dédier ce travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Pour leur amour, soutiens et sacrifices durant tout le long de mes études et pour leur patience, pour avoir tendu chaleureusement leurs bras et pour avoir évincé mes moments de doute.

A mon mari et mes frères,

Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A toutes les familles :

Benbouziane, Belkadi grands(es) et petits(es).

A mon binôme **Ouahiani Samira** qui est avant tout ma meilleure amie avec laquelle j'ai Passé une année formidable où l'on a partagé des moments de joie et de malheur.

A mes amis et ma promotion de génie civil 2019/2020

A tous mes professeurs qui m'ont formé et aidé avec leur exigence et conseil, car sans eux je ne serais pas arrivée à ce niveau.

BENBOUZIANE Sarra



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère.

A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation.

À mon adorable papa.

A celui qui a été toujours là pour moi, à celui qui m'indique la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grandes femmes.

À mon très cher frère Sofiane.

Mon cher frère présent dans tous mes moments d'examens par son soutien moral et ses belles surprises sucrées.

À mon très cher frère Abdel Wahid.

Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

A mon binôme, ma sœur et ma meilleure amie **Benbouziane Sarra** qui a partagée avec moi les travaux de ce projet.

A mes amis (es) : S. Nadjat, F. Zohra, H. Sihem, S. Nadjib

Ouahiani Samira



SOMMAIRE

Liste des figures.....	VI
Liste des tableauxVIII
Liste des notations	IX
Résumé	X
Abstract.....	X
ملخص.....	XII
Introduction Générale.....	XIII
<u>Chapitre 1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers :</u>	
1.1 Les ciments :	
1.1.1 Historique	P 1
1.1.2 Définition	P 2
1.1.3 Principe et méthodes de fabrication	p 2
1.1.4 Caractéristiques des constituants autres que le clinker....	P 7
1.2 Les fibres :	
1.2.1 Historique	P 12
1.2.2 Définition	P 13
1.2.3 Rôle des fibres....	P13
1.2.4 Différents Types de fibres	P 14
1.3 Les mortiers :	
1.3.1 Historique	P 18
1.3.2 Définition	P 18
1.3.3 Rôle des mortiers	P 19
1.3.4 Domaine d'utilisation des mortiers	P 19
1.3.5 Domaine d'application	P 20
1.3.6 Qualité des mortiers	P 20
1.3.7 Types de mortiers	P 21
1.3.8 Constituants des mortiers	P 22
1.4 Conclusion	P 23
<u>Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers :</u>	
2.1 Les mortiers normaux :	
2.1.1 Introduction	p 25
2.1.2 Définition d'acide	p 25

2.1.3 Types des acides.....	p26
2.1.4 La source des acides	p 27
2.1.5 Les attaques acides	p 27
2.1.6 Réactions chimiques	p 31
2.1.7 Les solutions chimiques.....	p 32
2.1.8 Examen visuel	p32
2.1.9 Etude des facteurs cinétiques	p 34
2.1.10 Etudes faites sur le comportement des mortiers soumis à des acides....	p37
2.2 Les mortiers fibrés :	
2.2.1 Introduction.....	p 39
2.2.2 Examen visuel	p 39
2.2.3 Etudes faites sur le comportement des mortiers fibrés soumis à des acides.....	p41
2.3 Conclusion	p 42
<u>Chapitre 3 : Caractérisations des matériaux et des mortiers étudiés :</u>	
3.1 Introduction	p43
3.2 Caractéristiques des matériaux	p 43
3.2.1 sable	p 43
3.2.2 Le Ciment et les ajouts	p 47
3.3 Formulation des mortiers	p52
3.3.1 Composition des mortiers.....	p 53
3.4 Préparation des solutions	p 53
3.5 Procédure expérimentale.....	p 55
3.6 Conclusion	p 56
Conclusion générale et perspectives	p 57
Références bibliographiques	p 59

LISTE DES FIGURES :

Chapitre 1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers :

Figure 1.1 : Schéma de la fabrication du ciment portland	p 3
Figure 1.2 : Four à calcination rotatif incliné ou kiln	p 4
Figure 1.3 : les principales étapes de préparation du cru jusqu'à la cuisson.....	p 5
Figure 1.4 : Processus de la voie humide	p 6
Figure 1.5 : Processus de la voie semi-humide avec filtre presse et tour de préchauffage.....	p7
Figure 1.6: Le haut fourneau.....	p 8
Figure 1.7 : Fumée de silice	p 8
Figure 1.8 : Pouzzolane naturelle	p 9
Figure 1.9 : Cendre volante	p 9
Figure 1.10 : Roche schiste isolée	p 10
Figure 1.11 : Fillers calcaires	p 10
Figure 1.12 : Sulfate de calcium	p 11
Figure 1.13 : Poudre de brique	p 12
Figure 1.14 : Exemples de fibres métalliques	p 12
Figure 1.15 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres	p 14
Figure 1.16 : Les fibres métalliques	p 15
Figure 1.17: Les fibres de verre	p 15
Figure 1.18 : Les fibres de polypropylène.....	p 16
Figure 1.19: Différentes formes géométriques des fibres métalliques	p17
Figure 1.20 : Constituants des mortiers	p 19
<u>Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers :</u>	
Figure 2.1 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage (Photo offerte par : Thomas P. Ryle tt Ltd., ingénieur-conseil en structures).....	p 28
Figure 2.2 : Nature des réactifs CH_3OH et CH_4	p 34
Figure 2.3 : La distribution de vitesse dans des échantillons à deux concentrations différentes	p 35

Figure 2.4 : La distribution de vitesse dans un échantillon de gaz à deux températures différentes.....p 36

Figure 2.5 : La distribution de vitesse dans un échantillon de gaz en présence ou en l'absence d'un catalyseurp 37

Chapitre 3 : Caractérisations des matériaux et des mortiers étudiés :

Figure 3.1 : Courbe granulométrique du sable.....p 45

Figure 3.2 : Évolution de l'enfoncement de la sonde en fonction du dosage....p 48

Figure 3.3 : Les fibres métalliquesp 51

Figure 3.4 : Organigramme résumant le travail expérimental.....p56

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers :

Tableau 2.1 : États d'échantillons soumis aux différentes attaques acides.....	p 33
Tableau 2.2 : Caractéristiques des différents mortiers	p 38
Tableau 2.3 : Résultats d'influence des acides sur le comportement des mortiers.....	p 38
Tableau 2.4 : les résultats de l'immersion des échantillons dans des différents acides.....	p 40
Tableau 2.5 : Résultats d'influence des acides sur le comportement de bétons légers fibrés.....	p 41

Chapitre 3 : caractérisations des matériaux et des mortiers étudiés :

Tableau 3.1 : Essais des masses volumiques apparente et absolue du sable ...	p 44
Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	p 44
Tableau 3.3 : Essai d'équivalent de sable (NFP 18-598)	p 47
Tableau 3.4 : Composition chimique du ciment (en %)	p 47
Tableau 3.5 : Résultats de la hauteur d'enfoncement	p 48
Tableau 3.6: Résultats de l'essai de consistance normalisée	p 49
Tableau 3.7 : Début et fin de prise	p 49
Tableau 3.8 : Les caractéristiques du ciment et de la poudre de brique.	p 50
Tableau 3.9 : Composition minéralogique des déchets de briques	p 50
Tableau 3.10 : Caractéristiques des fibres métalliques.....	p 51
Tableau 3.11 : Caractéristiques chimiques de l'eau	p 52
Tableau 3.12: Les différentes compositions des mortiers	p53

LISTE DES NOTATIONS :

SO_x : Oxydes de soufre

NO_x : Oxydes d'azote

CaCl_2 : Chlorure de calcium

$(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$: Nitrate de calcium

H_2SO_4 : Acide sulfurique

SO_2 : Dioxyde de soufre

SO_4^{2-} : Ion sulfate

H_3PO_4 : Acide phosphorique

Ca^{2+} : Alcalin – terreux

$(\text{Na}^+, \text{K}^+)$: Ions alcalins

H^+ : Ion hydrogène

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hydroxyde de calcium

CO_2 : Dioxyde de carbone

H_2S : Sulfure d'hydrogène

HCl : Acide chlorhydrique

CH_3COOH : Acide acétique

$\text{Ca}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2$: Acétate de calcium

H_2O : Eau

CH_4 : Méthane

CH_3OH : Méthanol

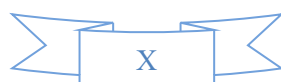
Résumé :

Le présent travail consiste à étudier le comportement des mortiers avec la substitution du ciment par de la poudre de brique d'une part et des fibres métalliques d'autre part et cela dans un environnement agressif. Pour ce faire, on a fait varier le pourcentage des substitutions de 5%, 10% et 15% pour la poudre de brique et de 0,25%, 0,50% et 0,75% pour les fibres métalliques. Ces mortiers seront ensuite soumis à des attaques chimiques dans deux milieux agressifs.

Nous avons utilisé pour ce travail des éprouvettes prismatiques de 160x40x40 mm³. Après 24 heures et après démoulage des éprouvettes, elles ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours pour être immergées par la suite dans deux solutions acide (HCL) et basique Ca(OH)₂ de même concentration 5% pendant une durée de 28 jours. Des essais de mesure de poids pour la perte de masse et de résistance à la compression devaient être effectués à différents âges sur les éprouvettes et ceci pour les deux milieux agressifs.

Les résultats obtenus devraient nous permettre de mettre en évidence l'effet bénéfique de la poudre de brique et des fibres métalliques sur la durabilité aux attaques acides.

Mots clés : Mortier, Poudre de brique, Fibres métalliques, Environnement agressif, Durabilité.



Abstract:

The present work consists in studying the behaviour of mortars with substitution of cement by brick powder on the one hand and metal fibers on one hand, in an aggressive environment. To do this, the percentage of the substitutions was varied by 5%, 10% and 15% for the brick powder and by 0.25%, 0.50% and 0.75% for the metal fibers. These mortars will be subjected to chemical attacks in two aggressive environments.

We used 160x40x40 mm³ prismatic specimens for this work. After 24 hours and after demoulding the test pieces, they were kept in water for 28 days to be subsequently immersed in two acid solutions (HCL) and basic Ca(OH)₂ of the same concentration 5% for a period of time 28 days. Weight measurement tests of mass loss and of compressive strength had to be carried out at different ages on the specimens and this for the two aggressive media.

The results obtained should allow us to demonstrate the beneficial effect of brick powder and metal fibers on durability against acid attacks.

Keywords: Mortar, Brick powder, Metallic fibers, Aggressive environment, Durability.

ملخص :

يتمثل العمل الحالي في دراسة سلوك الملاط وذلك باستبدال الاسمنت بمسحوق الطوب من جهة والألياف المعدنية من جهة أخرى في بيئة ملوثة. للقيام بهذا قمنا بتغيير النسبة المئوية للبدائل 5%، 10% و 15% لمسحوق الطوب و 0.25%، 0.50% و 0.75% للألياف المعدنية. هذا الملاط سوف يتعرض لهجمات كيميائية في بيئتين ملوثتين.

استخدمنا قوالب الاختبار بحجم $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. بعد 24 ساعة من إزالة القوالب، تم الاحتفاظ بها في الماء لمدة 28 يومًا ليتم غمرها لاحقًا في محلولين الأول حامضي (HCL) و آخر قاعدي (Ca (OH)_2) بنفس تركيز 5% لفترة زمنية 28 يومًا. يجب إجراء اختبارات لقياس الوزن لفقدان الكتلة ومقاومة الانضغاط فيختلف أعمار القوالب وهذا بالنسبة للوسيطين الملوثين. النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بإثبات التأثير الايجابي لمسحوق الطوب والألياف المعدنية على المتانة ضد التأثيرات الحمضية.

الكلمات المفتاحية: ملاط ، مسحوق لبنة، ألياف معدنية، بيئة ملوثة، متانة.

Introduction générale

Introduction Générale :

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires tels que le béton et le mortier. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau cimentaire. La conception d'un matériau cimentaire est extrêmement liée à l'environnement dans lequel il va être exposé durant sa durée de vie.

Le problème de la formulation des bétons ou des mortiers s'est singulièrement compliqué durant ces années. L'étude de la composition d'un béton ou d'un mortier, de nos jours consiste à l'incorporation ou à la substitution du ciment par des additions minérales ou bien par les différents types de fibres. Il s'agit de définir le mélange optimal dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un mortier dont les qualités soient celles recherchées pour la construction des ouvrages.

Le but de notre travail est l'influence des ajouts sur le comportement mécanique des mortiers soumis aux attaques agressifs.

Ce travail s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre concerne un état de l'art sur les ciments, tout en évoquant leurs compositions, fabrications, classes et types ainsi que les caractéristiques des différents mortiers, leurs compositions, leurs fabrications, ainsi que l'influence des milieux agressifs sur ces mortiers.

Dans le deuxième chapitre, on parle de l'effet des solutions des milieux agressifs sur les mortiers.

Le troisième chapitre regroupe les résultats des essais de caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés ainsi que le programme expérimental.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

Chapitre 1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

1.1 Les ciments :

1.1.1 Historique :

Le mot ciment vient du latin "caementum", qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens d'origine a été conservé en s'appliquant aux seuls liants hydrauliques, c'est-à-dire capables de durcir au contact de l'eau.

Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire. Les Romains améliorent ce liant en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Ce liant rend possible la construction de grands ouvrages tels les arènes, les thermes, les amphithéâtres ou les aqueducs, dont certains sont encore parfaitement conservés vingt siècles plus tard.

C'est au XVIII^e siècle que sont produites les premières chaux hydrauliques proches des ciments modernes, principalement du fait des progrès réalisés dans les procédés de cuisson. En 1759, l'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques.

Le Français Louis Vicat découvre en 1817 les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il publie ses travaux sans prendre de brevets.

C'est l'Anglais Joseph Aspdin qui fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie.

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

En Belgique, une première cimenterie voit le jour en 1872 (Messieurs Dufosse et Henry établirent la première usine de production de ciment Portland du pays à Cronfestu). Dès la fin du XIX^e **siècle**, le béton moderne à base de ciment Portland devient un matériau de construction largement répandu.

De nombreux perfectionnements sont apportés au cours du XX^e **siècle** à la fabrication du ciment, notamment avec la production des ciments spéciaux, sans toutefois modifier les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés fondamentales du ciment Portland [1].

1.1.2 Définition :

Le ciment est une poudre minérale très fine qui durcit sous l'action de l'eau, de ce fait le ciment est appelé un liant hydraulique. Lorsqu'on ajoute la pâte (ciment, air et eau) aux granulats (sable, gravier, pierre...) elle agit comme une colle qui lie ensemble les granulats pour former une masse semblable à la pierre [2].

Un ciment est dit naturel lorsqu'il résulte de la simple cuisson à température modérée (500 à 1 200 °C) d'une marne ou d'un calcaire argileux (ciment prompt, ciment romain, et les premiers ciments Portland sont des ciments naturels). Il est dit artificiel lorsqu'il résulte de la cuisson à plus haute température (1 450 °C) d'un mélange moulu de calcaire, de marne ou d'argile [3].

1.1.3 Principes et méthodes de fabrication :

La fabrication du ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes (figure 1.1) :

- Préparation du cru
- Cuisson

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

- Broyage et conditionnement

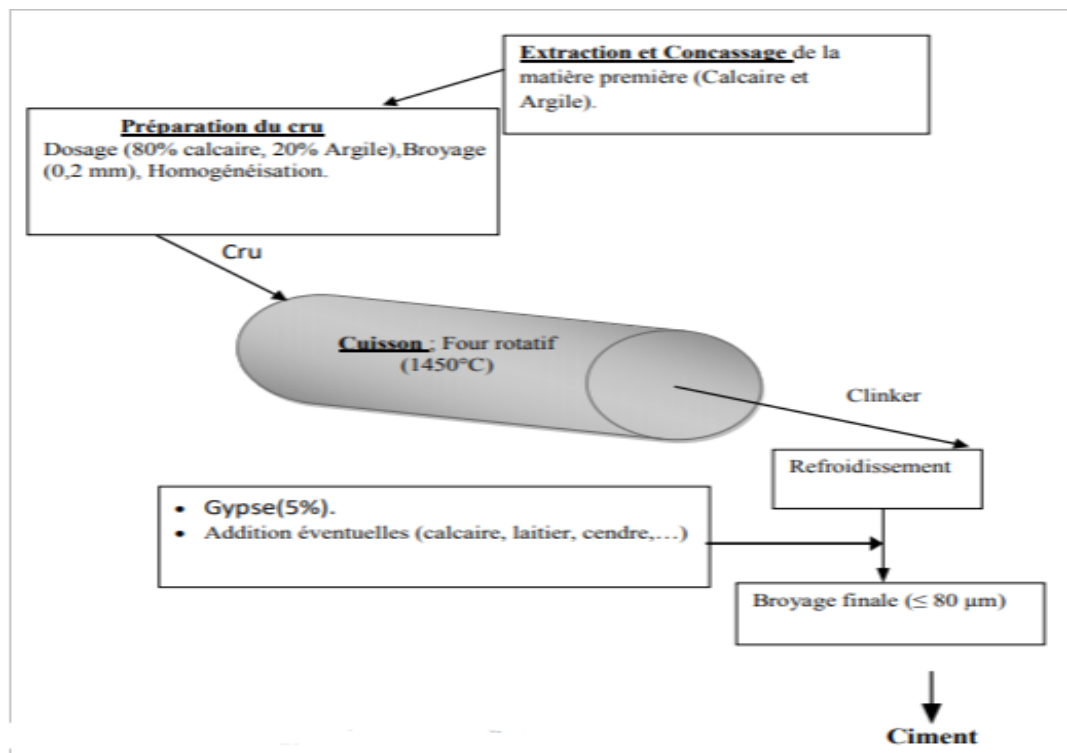


Figure 1.1 : Schéma de la fabrication du ciment portland [1]

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement des matériaux :

- fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne)
- fabrication du ciment par voie semi-humide (dérivée de la voie humide)
- fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée)
- fabrication du ciment par voie semi-sèche (dérivée de la voie sèche)

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est fournie par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces matériaux se trouvent dans la nature sous forme de

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1 450 °C) dans un four à calcination (figure1.2). Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

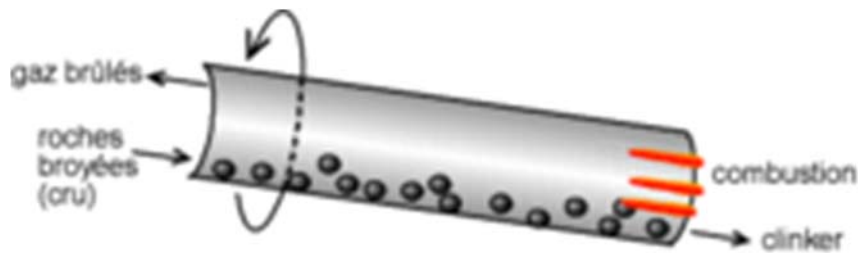


Figure 1.2 :Four à calcination rotatif incliné ou kiln [3]

Un mélange d'argile et de calcaire est introduit dans un four tubulaire rotatif légèrement incliné chauffé par une flamme aux environs de 2 000 °C. Cette flamme est alimentée par différents combustibles solides, liquides ou gazeux. Au contact des gaz chauds la matière s'échauffe progressivement. À l'entrée la température de l'ordre de 800 °C provoque la déshydratation des argiles et la décarbonations du calcaire pour produire la chaux (CaO). Puis la chaux se combine d'une part à l'alumine et l'oxyde de fer pour former des aluminates et aluminoferrites de calcium, et d'autre part, à la silice pour former du silicate bi calcique (bélite). La température augmentant tandis que la matière progresse vers la flamme, les aluminates (1 450 °C) et aluminoferrites (1 380 °C) fondent : cette phase de fusion favorise la formation de silicate tricalcique à partir du silicate bi calcique et de la chaux restante. C'est l'hydratation au cours de cette phase qui donne l'essentiel de sa résistance au béton de ciment Portland [4].

La figure 1.3 montre les principales étapes de préparation du cru jusqu'à la cuisson.

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

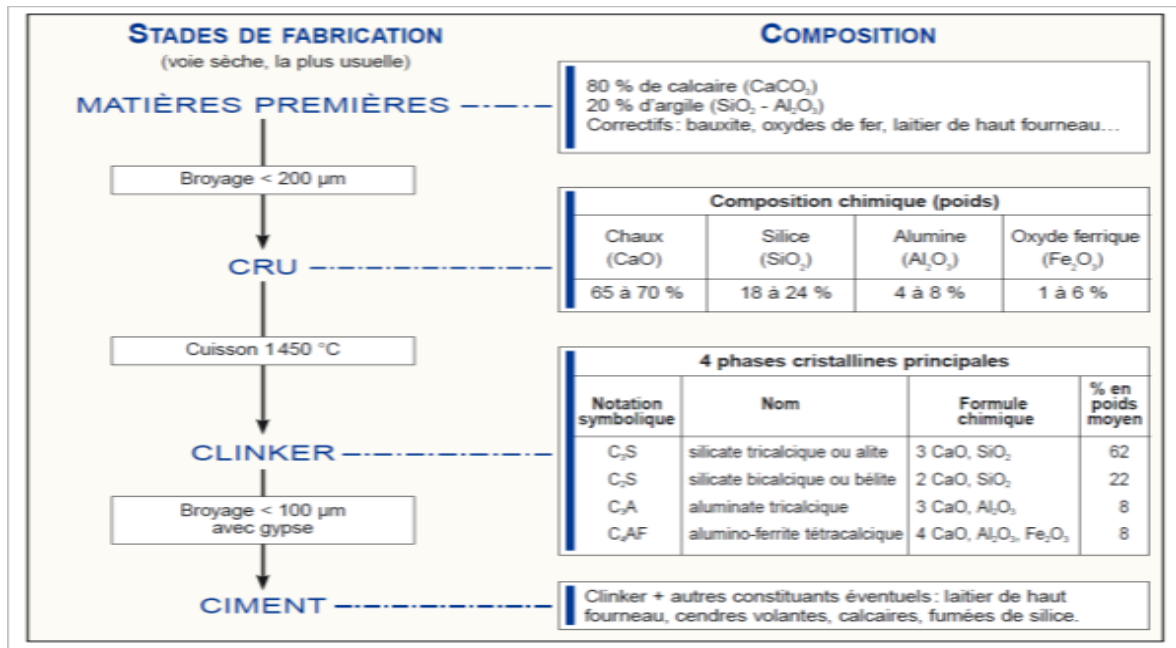


Figure 1.3 : les principales étapes de préparation du cru jusqu'à la cuisson [4]

Il existe des phases communes à tous les processus :

- l'extraction de la matière première, constituée de calcaire et d'argile.
- la pré homogénéisation, qui consiste à homogénéiser les différents minéraux provenant de la carrière avec des ajouts minéraux secondaires. On obtient ainsi le "cru" qui a la composition idéale pour obtenir une matière finale avec la composition recherchée.
- la cuisson, réalisée dans un four rotatif horizontal, qui porte à haute température le cru et le transforme en un produit fini appelé clinker [5].

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

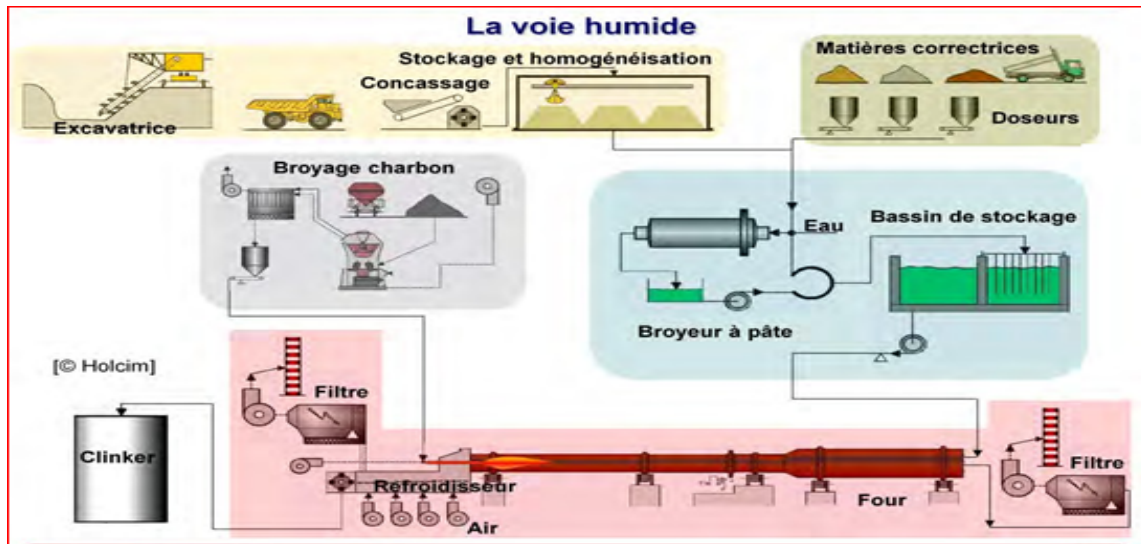


Figure 1.4 : Processus de la voie humide [5]

Le processus le plus ancien des quatre est celui de la voie humide (figure 1.4) :

- La craie constituant la matière première est extraite en carrière et peut être très humide, elle est concassée et homogénéisée.
- Les matières de correction, nécessaire à l'obtention de la composition désirée, sont dosées et ajoutée à la craie au niveau du broyeur à pâte.
- Dans ce broyeur, on ajoute également de l'eau et la pâte obtenue est filtrée à travers des tamis. La partie la plus grossière retourne dans le broyeur et la partie fine est stockée dans un bassin.
- La pâte, qui contient de l'ordre de 30 à 35 % d'eau, est ensuite pompée depuis le bassin et injectée dans un four très long (qui peut atteindre 220 m). Dans ce four, la pâte va avancer à contre-courant des gaz provenant de la combustion de charbon, de coke et aujourd'hui par des déchets provenant d'autres industries.
- Au fur et à mesure de son avancement dans le four, la pâte va se transformer en clinker, qui va être trempé dans le refroidisseur, avant d'être stocké en silo.
- Les gaz provenant de la combustion sont filtrés et rejetés [5].

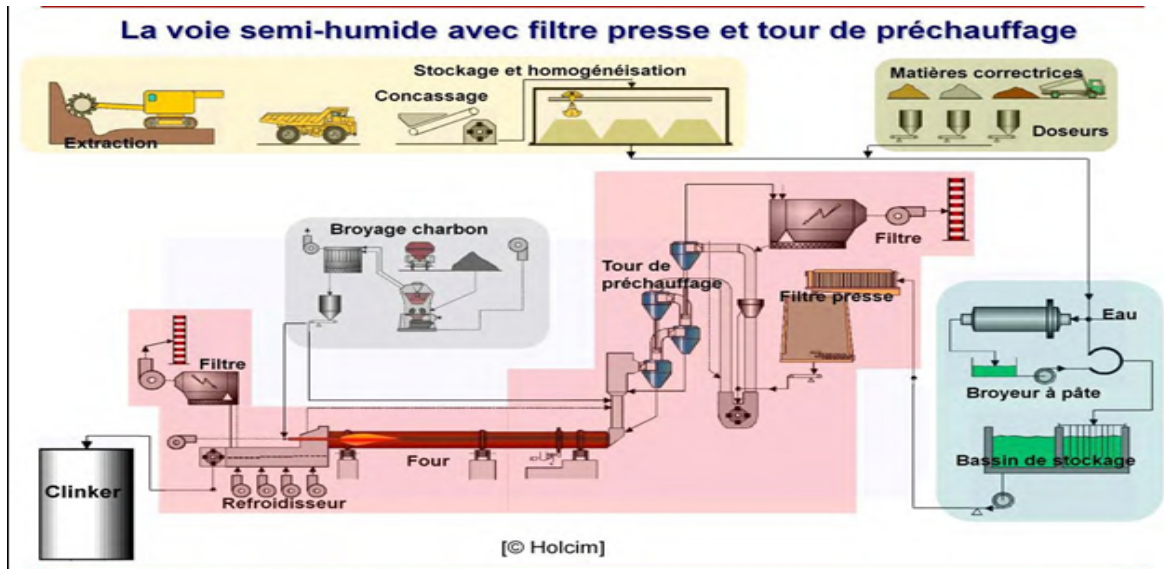


Figure 1.5 : Processus de la voie semi-humide avec filtre presse et tour de préchauffage

Dans le processus semi-humide (figure 1.5), on retrouve les mêmes étapes de préparation des matières premières, excepté le fait que la pâte va être filtrée à travers un filtre presse puis introduite dans une tour de préchauffage.

- Dans cette tour, les pâtes, qui ne contiennent plus que 17 à 21 % d'eau, rencontrent les gaz issus du four dans des cyclones et se transforment petit à petit en une farine par déshydratation.
- Cette farine entre ensuite dans un four rotatif, plus court que celui présent dans le processus de la voie humide, puisqu'il n'est plus nécessaire à ce niveau d'éliminer l'eau de la pâte [5].

1.1.4 Caractéristiques des constituants autres que le clinker : les ajouts minéraux

✓ **Laitier granulé de haut fourneau (S)** : Ce sont des sous-produits de fabrication de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke. Obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau (figure 1.6); il

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

contient au moins 2/3 en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après activation [6].

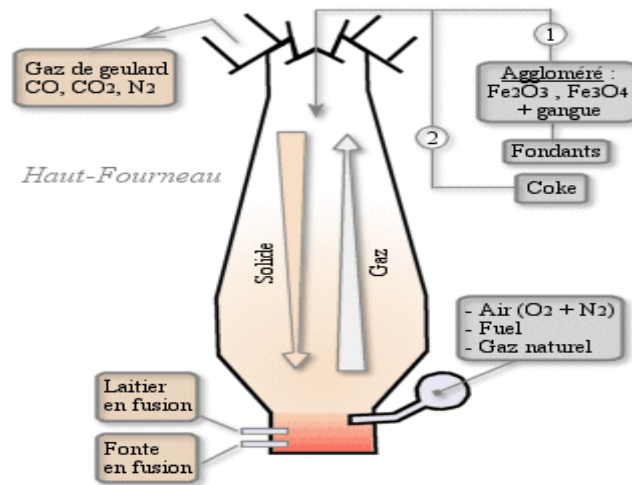


Figure 1.6 : Le haut fourneau [7]

✓ **Fumée de silice (D)** : Elle provient de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production du silicium et de l'alliage du ferrosilicium (figure 1.7). Elle est formée de particules sphériques. Sa taille est 100 fois plus petite qu'un grain de ciment [6].



Figure 1.7 : Fumée de silice [8]

✓ **Matériaux pouzzolaniques (P; Q)** : Est une substance d'origine volcanique (Pierre ponce) composée essentiellement de SiO_2 ; réactif, de Al_2O_3 , de Fe_2O_3 et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques (figure 1.8).

Elles sont naturellement actives (P) ou activées thermiquement (Q) [6].



Figure1.8 : Pouzzolane naturelle [9]

✓ **Cendres volantes siliceuse (V) ou calcique(W)** : Elles sont recueillies dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon et sont généralement utilisées pour la finesse de leurs particules, ce qui accroît leur réactivité (figure 1.9). Elles sont aussi obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé [6].

Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse (V) ou calcique (W) [6].



Figure 1.9 : Cendre volante [10]

✓ **Schiste calciné (T)** : Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four à une température d'environ 800°C. En raison de son mode de fabrication, il contient des phases de clinker et des oxydes à caractère pouzzolanique (figure 1.10). Ils acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bi calcique (C_2S) et de l'aluminate mono calcique (CA) ainsi que de petites quantités de chaux libre (CaO_L), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques [6].



Figure 1.10 : Roche schiste isolé [11]

✓ **Filler calcaire (L; LL)** : Il s'agit de calcaire finement broyé dont la quantité de carbone organique est limitée :

1. L : $\leq 0,20\%$
2. LL : $\leq 0,50\%$

Et obtenu après un broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$) supérieure à 75% (figure 1.11). Ces additions ne participent pas à la création de résistances mécaniques du ciment durci [6].



Figure 1.11 : Fillers calcaires [12]

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

- ✓ **Additifs** : Sont des constituants minéraux ou organiques ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés finales du ciment hydraté. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1% en masse de ciment. Pour les additifs organiques, la proportion de l'extrait sec doit être inférieure ou égale à 0.5% en masse de ciment [6].
- ✓ **Constituants secondaires** : Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker. Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment [6].
- ✓ **Sulfate de calcium** : Le sulfate de calcium (figure 1.12), généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise [6].



Figure 1.12: Sulfate de calcium [13].

Poudre de brique (chamote) Le déchet de brique a été récupéré de l'unité briquetterie de Bouzegza, la chamotte doit subir une opération de broyage jusqu'à l'obtention d'une poudre fine de 200 μ m [14].

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges (figure 1.13). Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes ou

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions [15].



Figure 1.13 : Poudre de brique [16]

1.2 Les fibres :

1.2.1 Historique :

Le paramètre numérique le plus fondamental décrivant la fibre est son élanement qui est défini comme le rapport entre la longueur et le diamètre (l/d) équivalent à la fibre [17].

Les fibres métalliques regroupent les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe (figure 1.14). Ils restent encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil [17].



Figure 1.14 : Exemples de fibres métalliques [17]

1.2.2 Définition :

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (560mm) et dont l'épaisseur est comprise entre 0.005-0.75mm, les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont dispersées dans toute la masse du béton [18].

1.2.3 Rôle des fibres :

Les fibres ont en général le rôle de renforcé ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposent à la propagation des microfissures (figure 1.15). Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par les améliorations relatives à [17] :

- La cohésion du béton frais ;
- La déformabilité avant rupture ;
- La résistance à la traction par flexion ;
- La ductilité et la résistance post fissuration ;
- La résistance aux chocs ;
- La résistance à la fatigue ;
- La résistance à l'usure ;
- La résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
- La tenue au feu ;

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

- La résistance à l'abrasion.

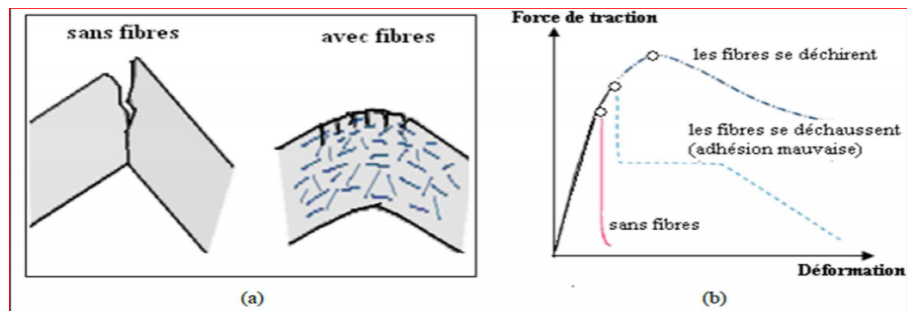


Figure 1.15 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [17]

1.2.4 Différents types de fibres

Chaque type de fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propre : Dimensions (diamètre, longueur...), forme (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), Résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres [18].

✓ **Les fibres métalliques**

Les fibres métalliques (figure 1.16) caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leur forme et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités) [18].



Figure 1.16: Les fibres métalliques [18]

✓ **Les fibres de fonte amorphe**

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 3mm de largeur, et contribuent à la limitation des fissures sous chocs [18].

✓ **Les fibres de verre**

Sous leur forme habituelle, elles sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration (figure 1.17), sous la forme de fibre de faibles diamètres, le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton [18].



Figure 1.17 : Les fibres de verre [18]

✓ Les fibres de polypropylène

Sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954, ces matériaux de synthèse (figure 1.18) ont connu une extension dans l'industrie textile ou ils apportent les avantages suivants [18] :

- ✓ Disponibilité à prix relativement faible ;
- ✓ Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs ;
- ✓ Augmentation notable de la résistance aux chocs ;
- ✓ Limitent l'ouverture des fissures. Ces fibres sont fréquemment utilisées dans les bâtiments, en particulier dans la réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façade, de tuyaux et pieux.



Figure 1.18: Les fibres de polypropylène [18]

✓ Choix du type de fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie [18].

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres, sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) [18].

Leur géométrie est très variable (figure 1.19). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice [18].

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment [18]

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire, en plus de l'adhérence avec la matrice, les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant alors une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème, mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent [18].

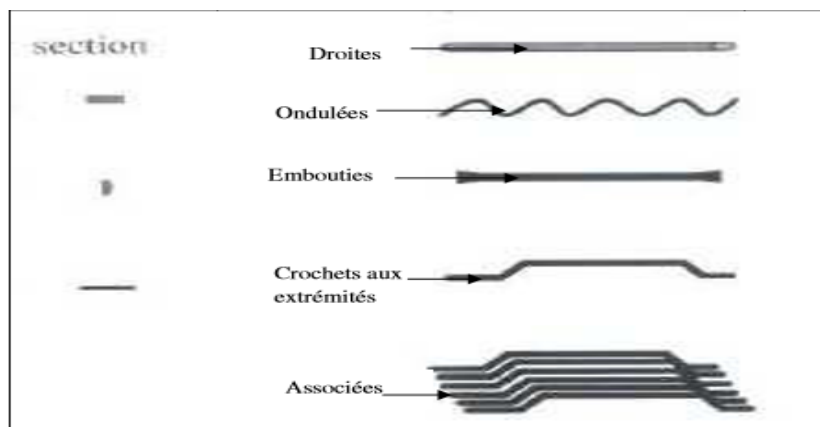


Figure 1.19: Différentes formes géométriques de fibres métalliques [18]

1.3 Les mortiers

1.3.1 Historique :

Jusqu'au début du XIX^e siècle la manière de faire le mortier a presque toujours été abandonné aux ouvriers.

En comparant les mortiers des anciens et surtout ceux qui ont été faits par les Romains, aux mortiers des temps modernes on suppose alors que les premiers étaient meilleurs.

Plusieurs constructeurs annoncent alors avoir trouvé le secret des mortiers romains mais d'autres supposent avec raison qu'il n'a subsisté à travers le temps que les constructions faites avec de bonnes chaux dans de bons mortiers. On le voit, le terme innovation technique a, à la fin du XVIII^e siècle, une signification particulière. Celle-ci est en effet généralement attachée à une découverte archéologique (On redécouvre Pompéi) qui est à la fois source et caution. Antoine-Joseph Lorient par exemple invente un mortier dont il annonce avoir déduit le procédé des diverses interprétations qu'il a cru pouvoir donner aux ouvrages de Vitruve, de Plin et des autres auteurs anciens qui traitent des mortiers. L'antiquité est un matériau manipulé [19].

1.3.2 Définition :

Le mortier est 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 (figure 1.20). En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, liant (ciment ou chaux), d'eau et d'adjuvant et éventuellement d'ajout [20].

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable [21].

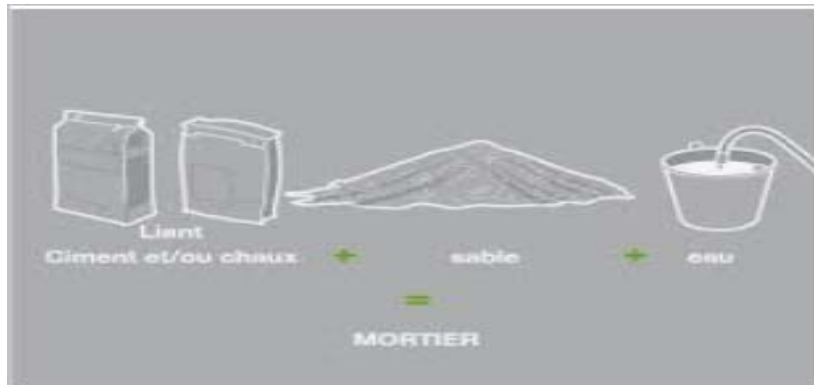


Figure 1.20 : constituants des mortiers [20]

1.3.3 Rôle des mortiers :

Le mortier a pour rôle de solidariser les éléments entre eux, d'assurer la stabilité de l'ouvrage, de combler les interstices entre les blocs de construction [22].

1.3.4 Domaine d'utilisation des mortiers :

En général, les variétés de mortier sont liées directement par son domaine d'application qui est très vaste, une typologie des mortiers à partir de son utilisation permet de citer les catégories suivantes [17] :

- ✓ Mortier de pose ;
- ✓ Mortier de joints ;
- ✓ Mortier pour les crépis ;
- ✓ Mortier pour le sol ;
- ✓ Mortier pour les stucs ;
- ✓ Pierres artificielles ;

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

- ✓ Support pour les peintures murales ;
- ✓ Mortier d'injection ;
- ✓ Mortier pour les mosaïques ;
- ✓ Mortier de réparation ;
- ✓ Mortier auto plaçant ;
- ✓ Mortier fibré.

1.3.5 Domaine d'application :

Les mortiers envisagés concernent :

- ✓ **Mortiers de maçonnerie** : Mortiers de gros et de petits éléments, utilisés tant pour la maçonnerie extérieure qu'intérieure, au contact du sol et/ou de l'eau, y compris le jointoiement.
 - ✓ **Mortiers de pose** : Mortiers pour la fixation et la liaison de petits éléments de revêtements de sol et de parois (p.ex. carrelage).
-
- ✓ **Mortiers d'enduit** : Enduits pour parois intérieures et extérieures de ses liants. Exemples : mortier de ciment-chaux, mortier de chaux plâtre.

1.3.6 Qualité des mortiers :

- ✓ **Plasticité et ouvrabilité** : Les mortiers doivent répondre aux besoins du chantier. Pour améliorer la plasticité et l'ouvrabilité, l'introduction d'adjuvants p.ex. Plastifiants ou entraîneurs d'air est admise [17].
- ✓ **Compacité et imperméabilité** : Les mortiers fortement sollicités de même que ceux qui doivent être imperméables à l'eau seront compactés au maximum par tout moyen approprié, notamment talochage et/ou pervibration. L'introduction d'hydrofuges est admise [17].

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

✓ **Résistance à la compression** : Les mortiers sont classés suivant leur résistance à la compression mesurée sur les prismes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ à l'âge de 28 jours en quatre catégories [17].

1.3.7 types des mortiers :

✓ **Mortier fibré** : Se compose de différents types de sables majoritairement siliceux, de ciments spéciaux (ciments de classe CEM I), de fibres synthétiques ainsi que d'adjuvants. L'ajout de fibres dans le mortier permet d'augmenter la densité du matériau. Le mortier fibré est plus compact et plus résistant. Ainsi, Il bénéficie d'une meilleure résistance à la compression et il est moins sujet aux risques de fissurations lors de la phase de retrait. Il endure mieux les chocs et les agressions extérieures (pluies acides, pollution) et Il offre peu de prise à la corrosion, qui résulte de la carbonatation du béton et des ions chlorure [20].

✓ **Mortier normal** : Est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme (pour déterminer la consistance de la pâte de ciment) EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN"

✓ **Mortier de béton équivalent** : La méthode MBE permet de sélectionner rapidement parmi différents adjuvants celui qui répond le mieux aux exigences d'efficacité, de maintien rhéologique et de délai de décoffrage. Cette dernière a été développée dans le cadre du projet national Calibré tout en permettant de réaliser facilement des essais sur mortiers plutôt que sur bétons [23].

✓ **Mortiers thermiquement équivalents (MT)** : Les réactions chimiques intervenant dans la prise des bétons sont thermoactives. Pour obtenir des mortiers comparables à des bétons donnés, on peut donc essayer de conserver une même histoire thermique, en fabriquant des mortiers dégageant la même chaleur d'hydratation et ayant la même chaleur spécifique massique. Pour

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

arriver à ce résultat, il suffit de conserver les quantités de ciment et d'eau et de remplacer le gravier par une même masse de sable. La masse de sable du mortier est alors égale à la somme des masses de sable et de gravier du béton (Dierkens, 2005) [23].

✓ **Mortiers classiques du béton (MB)** : Certains auteurs (Turcry, 2004) ont montré qu'il existe aussi une bonne corrélation entre les comportements à l'état frais du BAP et de son mortier. Les compositions des mortiers de bétons (MB) sont établies à partir de la composition initiale du béton. Il suffit tout simplement d'enlever les quantités de graviers [23]

1.3.8 Constituants des mortiers :

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- Liant (ciment ou chaux) ;
- Sable ;
- Eau ;
- Adjuvants.

✓ **Le Liant** : On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être du ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson généralement, on peut utiliser [23] :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc) ;
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt...) ;
- Les liants à maçonner ;
- Les chaux hydrauliques naturelles ;
- Les chaux éteintes ;

✓ **Le sable** : C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. 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. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les “engrais solubles”, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol [23].

✓ **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 et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours au gâchage mais l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [23].

✓ **Les adjuvants** : Sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient certaines propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les super plastifiants (hauts réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges [23].

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons évoqué des généralités en ce qui concerne les éléments constitutifs des mortiers (ciments, fibres, additifs) et pour chaque

Chapitre1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers

constituant nous avons parlé de son histoire, sa définition, son rôle, ses types et sa caractérisation.

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

2.1 Les mortiers normaux:

2.1.1. Introduction :

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, eau de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, 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.

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un PH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures [1].

2.1.2 Définition d'acide :

L'acide est un composé chimique, soit minéral, soit organique, accepteur au sens large de doublets électroniques, et généralement défini par des réactions-types dans différents solvants, en particulier en libérant l'ion hydronium dans le solvant eau.

Les acides réagissent souvent avec dégagement d'énergie avec d'autres

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

composées chimiques, les bases ou les alcalis des Anciens, eux donneurs de doublets électroniques, qui ont en particulier le pouvoir de générer, en tout ou partie, l'ion hydroxyle dans l'eau.

Les acides peuvent se présenter sous forme :

- Solide : acide citrique, acide tartrique ;
- Liquide : acide sulfurique, acide nitrique, acide acétique ;
- Gazeuse : les halogénures d'hydrogène qui dissous dans l'eau, donnent des solutions d'acides halogénohydriques [2].

2.1.3 Types des acides :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques.

✓ Les acides organiques : les acides propénoïque, acétique, lactique, formique, citrique.

Les acides organiques contiennent un groupe d'acide (COOH) auquel se rattache une chaîne présentant un nombre variable d'atomes de carbone [3].

- La plupart (env. 80-90%) des acides sont organiques ;
- Le plus souvent solide à l'état pur non dissous ;
- En général acide faible au pH2-6 ;
- Principal danger : corrosif [4].

✓ Les acides inorganiques : les acides phosphorique, sulfurique, chlorhydrique, ...

- Ne contiennent généralement pas de carbone ;
- Souvent liquides à l'état pur non dissous ;
- Seul 10 à 20% des acides sont minéraux ;
- Plus dangereux que les acides organiques ;
- Principal danger : corrosif [4].

2.1.4 La source des acides :

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- 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 atmosphériquement, se condensent sous formes d'acides 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 3 et 5 peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton [5].

2.1.5 Les attaques Acides :

2.1.5.1 Définition :

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui selon Grube et al [6], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.

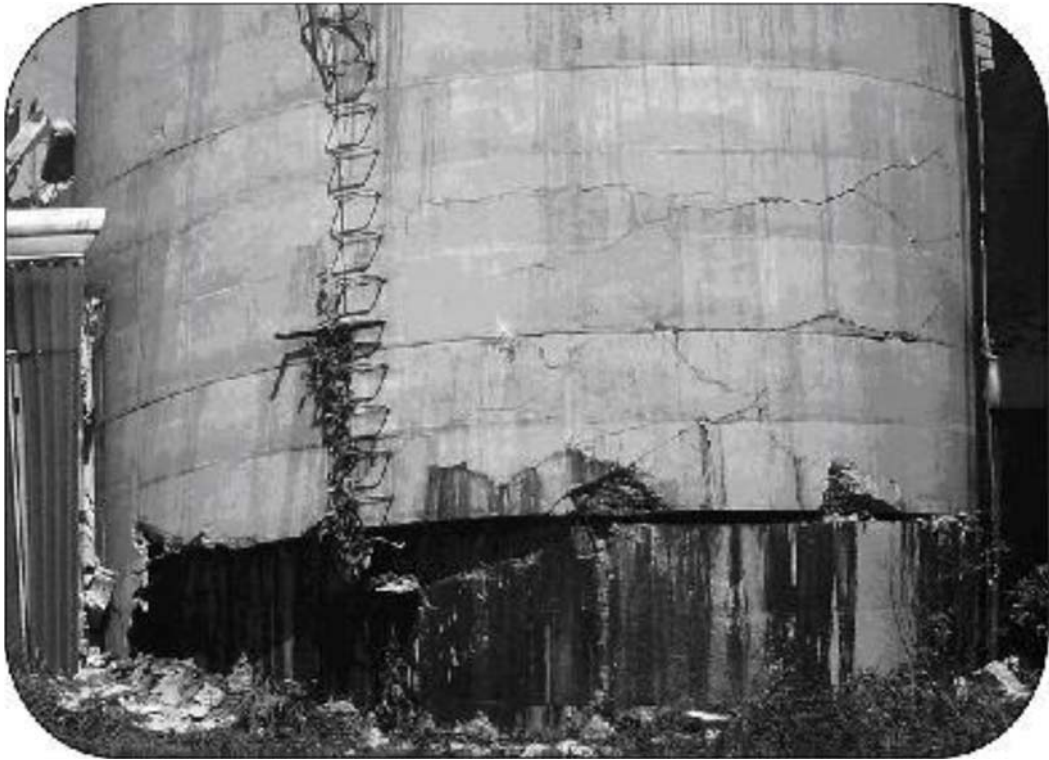


Figure 2.1 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage (Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures) [6]

2.1.5.2 Les différents types des acides :

- Les pluies acides (cas extrême des eaux douces): les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium)

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO_x également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales [7].

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion due à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite.

- Les acides minéraux : Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl_2 et au nitrate de calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, sels très solubles, sont très agressifs vis à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton [7].

- les acides organiques : On les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigreries, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...).

Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Ils peuvent dans certains cas avoir un effet colmatant sur le béton : c'est le cas par exemple, de l'acide tartrique (cuves à vin) ou de l'acide oxalique. Les acides organiques tels

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

que les acides acétiques, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment.

Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Toutefois, leur neutralisation par les ions alcalins (Na^+, K^+) et alcalino-terreux (Ca^{2+}) entraîne la permanence de la dissociation de l'acide et corrélativement une augmentation de son agressivité par production cumulée d'ions H^+ .

Des dégradations importantes du béton ont pu être observées en milieu agricole dans des silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mise à nu des aciers...).

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ.

Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H peuvent aussi être attaqués. Les granulats calcaires sont également vulnérables.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant du CO_2 libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO_2 n'est pas agressif parce qu'une partie de ce CO_2 est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Quoique, les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H_2S par des bactéries anaérobies. Ce composé n'est pas en lui-même un agent des trusteurs, mais il est dissout par le mince film d'humidité recouvrant la surface du béton et

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique.

L'attaque apparaît donc au-dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer [7].

2.1.6 Réactions chimiques :

L'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) sont des acides inorganiques, et l'acide acétique (CH_3COOH) est un acide organique. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour les bétons et mortiers que les acides organiques.

Les acides inorganiques forment avec le $Ca(OH)_2$ contenu dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau [8].

Concernant les acides inorganiques, nous avons :



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique \longrightarrow chlorure de calcium + eau



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique \longrightarrow sulfate de calcium + eau

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

Les acides organiques attaquent également le béton, en transformant le $Ca(OH)_2$ en sels facilement à difficilement solubles.



Hydroxyde de calcium + acide acétique \longrightarrow acétate de calcium + eau

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

2.1.7 Les solutions chimiques :

2.1.7.1 Acide chlorhydrique (HCl) :

L'acide chlorhydrique est une solution aqueuse ayant pour solutés des ions de type oxonium (plus précisément des ions hydratés d'hydrogène H_3O^+) et des ions chlorures (Cl^-). Cette solution est obtenue par dissolution du (HCl) à une concentration de 38% dans l'eau (H_2O). Le HCl est un acide fort et très corrosif qui s'ionise totalement en solution aqueuse.

2.1.7.2 Hydroxyde de sodium (NaOH) :

L'hydroxyde de sodium, appelé également soude caustique, est un corps chimique composé minéral de formule chimique NaOH, qui est à température ambiante un solide ionique. Fusible vers $318^\circ C$, il se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches ou d'aspect translucide, corrosives et très hygroscopiques. Il est très soluble dans l'eau. Les propriétés chimiques de l'hydroxyde de sodium sont surtout liées à l'ion hydroxyde HO^- qui est une base forte [9].




2.1.7 Examen visuel :

Les échantillons de mortier qui seront confectionnés, démoulés après 24h et conservés dans l'eau pendant 28 jours, sont soumis à l'attaque acide.

Le tableau 2.1 présente l'état des échantillons soumis aux différents types des attaques acides [8].

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

Tableau 2.1 : États d'échantillons soumis aux différentes attaques acides [8].

	Acides	Concentration	Etats des échantillons immergés pendant 28 jours
MORTIERS AVEC POUZZOLANE ET FINES CALCAIRES	HCl	5%	
	H ₂ SO ₄	5%	
	CH ₃ COOH	5%	

2.1.8 Etude des facteurs cinétiques :

Par définition, chaque réaction chimique a sa propre durée de réaction. La vitesse d'une réaction chimique est influencée par cinq facteurs :

- La nature des réactifs : influence la vitesse d'une réaction, la phase dans laquelle se trouvent les réactifs, ainsi que le nombre et la force des liaisons qu'ils contiennent seront les facteurs qui influenceront la vitesse.

Exemple : Une molécule de méthane (CH_4) contient moins de liaisons chimiques qu'une molécule de méthanol (CH_3OH) (figure 2.2). Elle réagit plus rapidement puisqu'elle est plus facile à briser.

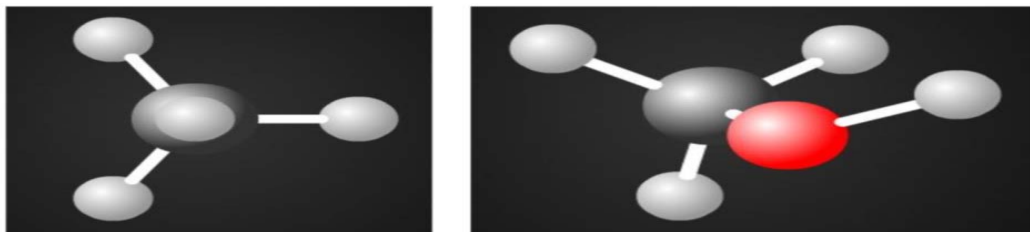


Figure 2.2 : Nature des réactifs CH_3OH et CH_4 [10]

- La concentration des réactifs : influence la vitesse d'une réaction. Généralement, une augmentation de la concentration augmentera la vitesse de réaction.

Exemple : Le graphique ci-dessous (figure 2.3) représente la distribution de vitesse dans des échantillons à deux concentrations différentes. On observe que l'énergie d'activation et la vitesse moyenne des particules ne sont pas influencées par une modification de concentration. La différence de concentration ne fait que changer la hauteur de la courbe. Ainsi, plus la concentration est élevée et plus de particules possèdent une énergie supérieure à l'énergie d'activation. La réaction se déroule alors plus rapidement.

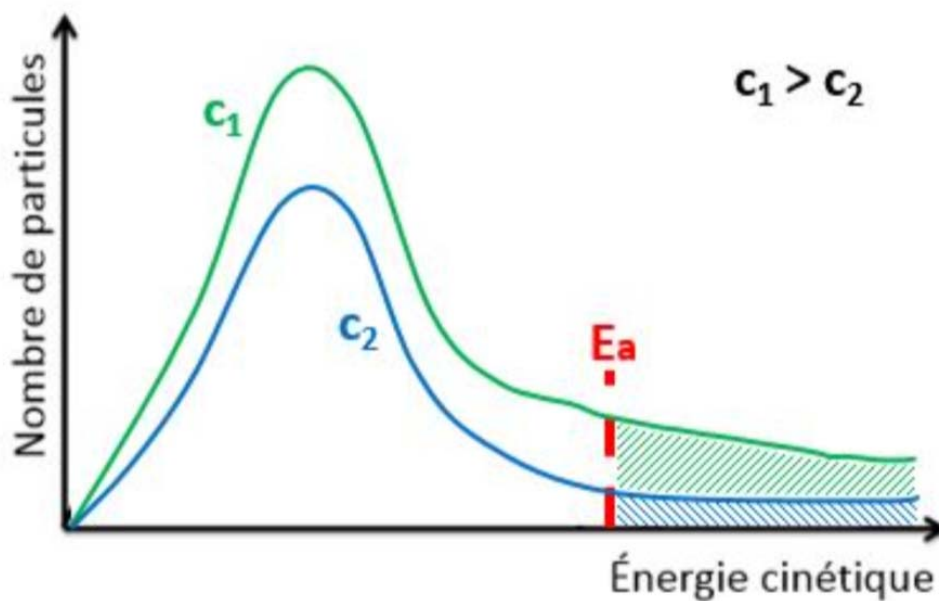


Figure 2.3 : La distribution de vitesse dans des échantillons à deux concentrations différentes [10]

- La surface de contact des réactifs : influence la vitesse d'une réaction. Une plus grande surface de contact permet davantage de collisions entre les réactifs, et par conséquent augmente la vitesse de la réaction.
- La température d'un système : influence la vitesse d'une réaction. En général, une hausse de température se traduit par une augmentation de la vitesse de réaction.

Exemple : le graphique ci-dessous (figure 2.4) représente la distribution de vitesse dans un échantillon de gaz à deux températures différentes. On observe qu'une augmentation de température aplatit la courbe de distribution et la déplace vers la droite. La vitesse moyenne des particules est alors plus grande à des températures plus élevées. Aussi, davantage de particules possèdent une énergie supérieure à l'énergie d'activation lorsque la température est plus élevée. La réaction se déroule alors plus rapidement.

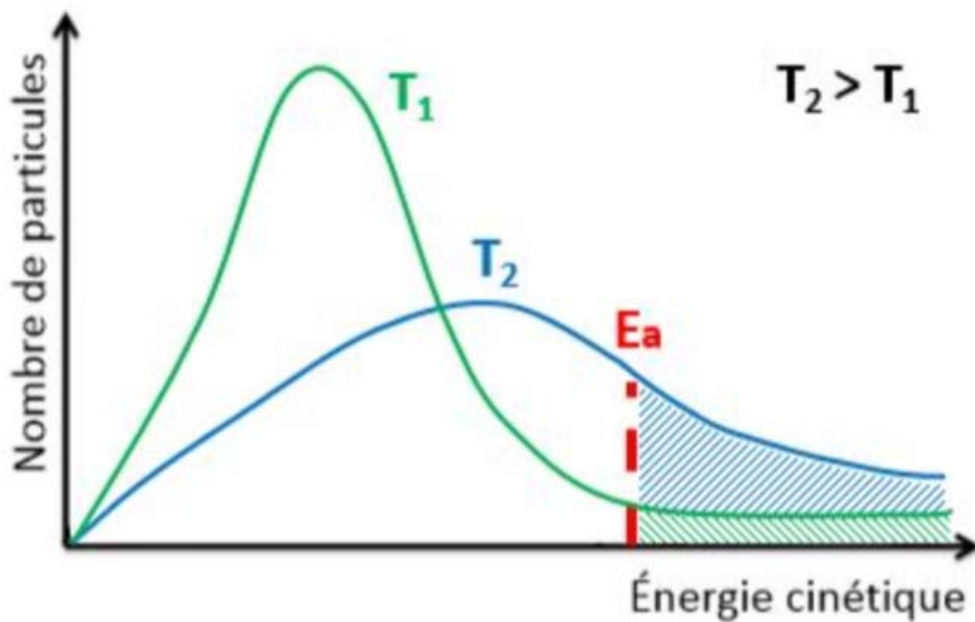


Figure 2.4 : La distribution de vitesse dans un échantillon de gaz à deux températures différentes [10]

- L'effet d'un catalyseur : Un catalyseur est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction sans y prendre part directement. Il abaisse la quantité d'énergie nécessaire pour amorcer la réaction.

Exemple : Le graphique ci-dessous (figure 2.5) représente la distribution de vitesse dans un échantillon de gaz en présence ou en l'absence d'un catalyseur. On peut constater que l'énergie d'activation nécessaire à la réaction est diminuée en présence d'un catalyseur. Ainsi, davantage de particules possèdent une énergie supérieure à l'énergie d'activation. La réaction se déroule alors plus rapidement [10].

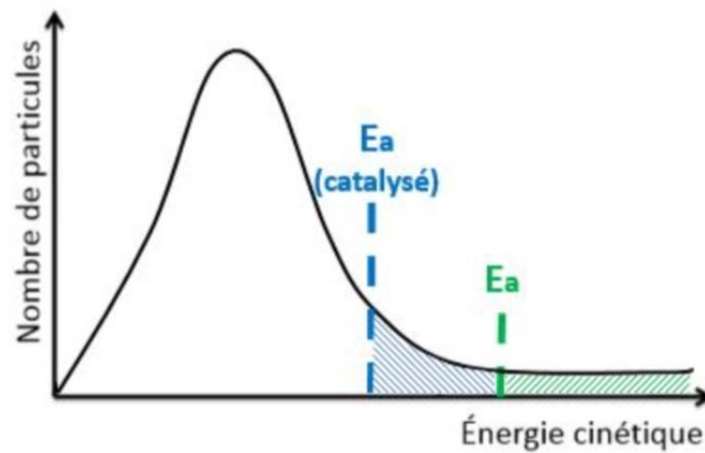


Figure 2.5 : La distribution de vitesse dans un échantillon de gaz en présence ou en l'absence d'un catalyseur [10]

2.1.9 Etudes faites sur le comportement des mortiers soumis à des acides :

Mouli et al. (2010) ont étudié la résistance des mortiers à base de pouzzolane et de fines calcaires aux attaques acides et à la pénétration des ions chlorures [8] ; les mortiers considérés dans cette recherche sont présentés sur le tableau 2.2. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes ont été immergées dans deux solutions, 5% d'acide chlorhydrique (HCl), 10% d'hydroxyde de sodium (NaOH) et les résultats qu'ils ont obtenus sont consignés dans le tableau 2.3.

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

Tableau 2.2 : Caractéristiques des différents mortiers [8].

Notation	(%)	Type d'ajout
MZ0	0	Aucun
MZ15	15	Pouzzolane
MZ30	30	Pouzzolane
MF15	15	Calcaires
MF30	30	Calcaires

Tableau 2.3 : Résultats d'influence des acides sur le comportement des mortiers

HCl	MZ0	ET	MF
	Attaque par l'acide		
	MZ 15	ET	MZ30
	Certaine résistance		
NaOH	Aucun effet néfaste sur les matériaux à matrice cimentaire, quel que soit la concentration.		

Laoufi et al. (2016) ont fait une évaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique [10]. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes ont été immergées dans une solution à 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) et les résultats qu'ils ont obtenus ont montré que plus le taux de pouzzolane est grand plus la résistance à la solution acide est meilleure.

2.2 Mortiers fibrés:

2.2.1 Introduction :

Le béton est un matériau composite dont la matrice est fissurable et fragile. Pour améliorer ses performances mécaniques (ductilité, résistance en flexion...) on peut aujourd'hui faire le choix d'ajouter des fibres au béton.

Le renforcement par des fibres a pour objectif majeur d'améliorer le comportement vis-à-vis à la traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter une rupture quasi-fragile. Le béton armé de fibres peut être utilisé pour améliorer les performances des éléments de structure en béton comme les poutres, en termes de réduction des fissures....

Les fibres présentent des caractéristiques physiques et mécaniques différentes selon leur nature. Les fibres habituellement utilisées dans les composites cimentaires sont d'origine métallique, minérale, fibre pétrochimique.

Sous certaines conditions, le béton peut être confronté à des milieux agressifs, ces environnements agressifs peuvent changer certains facteurs physiques et chimiques et causer un danger significatif pour le béton. Les environnements acides ou sulfatiques susceptibles d'être agressifs pour le béton peuvent se décrire de la manière suivante :

Attaque acide : dissolution de la chaux hydratée avec formation de gypse.













Attaque sulfatique : réaction entre les aluminates du ciment et le gypse pour former de l'ettringite [12].

2.2.2 Examen visuel :

Le tableau 2.4 présente les résultats de l'immersion des échantillons dans des différents acides :

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers

Tableau 2.4 : Les résultats de l'immersion des échantillons dans différents acides [13].

Comportement des bétons légers fibrés à base de granulats pouzzolaniques vis-à-vis des milieux acides	Acides	Concentration	Solution d'acides	Débris de béton	Etats d'échantillons Immergés dans l'acide
	HCl	5%	Une couleur verte vif de la solution. 		Couche flottante très polluée sur la surface. La corrosion et la dégradation des fibres dans les éprouvettes. 
H ₂ SO ₄	5%	Saturation de la solution par des fines blanchâtres. 		Rugosité de la surface. Un gonflement des éprouvettes. 	
CH ₃ COOH	5%	La couleur est devenue brun foncé. 		La corrosion à la dégradation des fibres métalliques. 	
NaOH	10%	La couleur est restée claire. 		Les surfaces deviennent plus lisses. Aucune modification dans la forme. 	

2.2.3 Etudes faites sur le comportement des mortiers fibrés soumis à des acides :

Mohammed Belhadj et al. (2017) ont étudié le comportement des bétons légers fibrés à base de granulats pouzzolaniques vis-à-vis des milieux acides [13], les bétons considérés dans cette recherche sont à base de granulats pouzzolaniques avec une concentration de fibre de 0.51%. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes ont été immergées dans deux solutions, 5% d'acide chlorhydrique (HCl), 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) et les résultats qu'ils ont obtenus sont consignés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Résultats d'influence des acides sur le comportement de béton légers fibrés [13].

HCL	Une évolution de la résistance en compression jusqu'à l'âge de 60 jours, au-delà de cet âge on remarque une nette diminution de la résistance.
H_2SO_4	Une nette amélioration de la résistance en compression jusqu'à l'âge de 60 jours ; au-delà une diminution de la résistance est notée

Mohammed Belhadj et al. (2019) ont aussi fait une évaluation de la durabilité du Béton pouzzolanique fibré dans des milieux acides [12], le béton considéré dans cette recherche est un béton pouzzolanique avec une concentration de fibres de 0.51%. Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes ont été immergées dans une solution de 5% d'acide chlorhydrique (HCl) et les résultats qu'ils ont obtenus ont montré qu'il y a une évolution de la résistance en fonction de l'âge jusqu'à 28 jours et ensuite une diminution de la résistance.

2.3 Conclusion :

Le béton est un matériau très demandé et son utilisation ne cesse pas de croître au cours des années à venir. Nous avons parlé dans ce chapitre, des milieux agressifs et les études faites sur le comportement des mortiers, mortiers fibrés et bétons soumis aux attaques acides. Toutefois, la durabilité d'un ouvrage en béton est un des facteurs importants dans le domaine du génie civil.

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques physiques et chimiques des différents matériaux utilisés ainsi que les traitements appliqués pour chaque type d'essais entrant dans la composition des mortiers à confectionner et cela par des essais au laboratoire. Ces matériaux sont purement locaux.

3.2 Caractéristiques des matériaux :

Les matériaux que nous avons utilisés dans le cadre de ce travail sont : Le ciment CEM II/A 42,5 de la cimenterie de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent, le sable de Sidi Abdeli qui appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) à Tlemcen, les ajouts en fillers calcaires $<80 \mu\text{m}$ de l'ENG, la poudre de brique $<80 \mu\text{m}$ de la briqueterie de Bendi-Mered sise à Remchi et l'eau de la ville de Chetouane.

3.2.1 Le sable :

3.2.1.1 Introduction :

Nous avons déterminé les masses volumiques apparente et absolue du sable Conformément à la norme NA 255.

- **Masse volumique apparente :**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et le volume des vides.

- **Masse volumique absolue :**

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

Les résultats des masses volumiques obtenus pour le sable, sont récapitulés sur le tableau 3.1 :

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

Tableau 3.1 : Essais des masses volumiques apparente et absolue du sable

Classe granulaire	La masse volumique apparente (Kg /m ³) $\rho_{app} = M/V_{app}$	La masse volumique absolue (Kg/m ³) $\rho_{abs} = M / V_{abs}$	
		Méthode de l'éprouvette Graduée	Méthode du ballon
Sable	1500,23	2500	2650

Le sable utilisé a donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NA 255. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³.

3.2.1.2 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique du sable est faite conformément à la norme NA 2607.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable ainsi que sa courbe granulométrique sont présentés respectivement sur le tableau 3.2 et la figure 3.1.

Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Ouverture des tamis	Refus (g)	Refus cumulés(g)	% des refus cumulés $Pr = (Mc/M) * 100$	% des tamisât cumulés $Pt = 100 - Pr$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	40,3	40,3	4,1	95,9
3,15	32	72,3	7,3	92,7
2,5	52	124,3	12,6	87,4
2	141,8	266,3	27	73
1,6	89,3	355,4	36	64

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

1,25	46,4	401,8	40,7	59,3
1	57	458,8	46,5	53,5
0,8	33,2	492	49,9	50,1
0,63	19	511	51,8	48,2
0,5	54	565	57,2	42,8
0,4	41,4	606,4	61,4	38,6
0,315	55,6	662	67,1	32,9
0,25	35	697	70,6	29,4
0,2	76,6	773,6	78,4	21,6
0,16	25	798,6	80,9	19,1
0,125	22,6	821,2	83,2	16,8
0,1	19,6	840,8	85,2	14,8
0,08	16,6	857,4	86,9	13,1
0,063	22,5	879,9	89,2	10,8
0,0065	107	986,9	100%	0

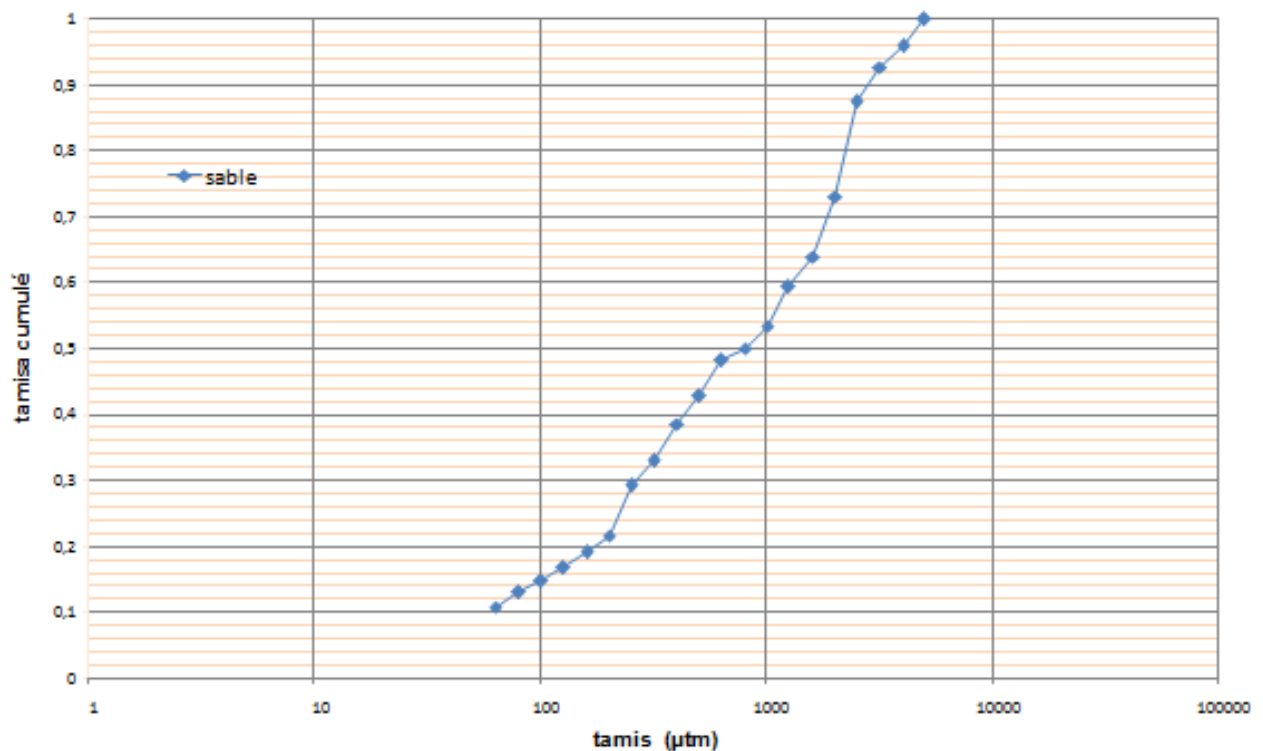


Figure 3.1 : Courbe granulométrique du sable.

$$MF = \frac{1}{100} \sum (14,8 + 32,1 + 48,3 + 57,2 + 73,1) = 2,30$$

Le module de finesse est entre **2.2 – 2.8** → Donc notre sable est un **sable préférentiel**.

L'analyse granulométrique a montré que le sable est assez riche en éléments fins avec une teneur de 10% de fines et un module de finesse de 2,30.

3.2.1.3 Coefficient d'absorption du sable :

L'absorption de l'eau par le sable a été déterminée selon la norme NF P18-555, tout en humidifiant le sable par une petite quantité d'eau par la suite on la sèche à l'aide d'un séchoir et après avoir terminé on met le sable dans un cône afin de déterminer son affaissement.

$$\text{Coefficient d'absorption} = \frac{M_{sec} - M_{sable}}{M_{sec}} * 100 = \frac{500 - 489,4}{500} * 100$$

$$\text{Coefficient d'absorption (\%)} = 2.12$$

3.2.1.4 Essai d'équivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable a été déterminée conformément à la norme NF P 18-598 qui permet de mesurer leurs propriétés. Cet essai est en général utilisé pour les sables destinés au béton. L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité lavante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon.

On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée, exprimé en pourcentage et ceci conformément à la norme suscitée.

Les résultats de l'équivalent de sable obtenus sont résumés sur le tableau 3.3

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

suivant :

Tableau 3.3 : Essai d'équivalent de sable (NF P18-598)

Essais (cm)	Hauteur totale h_4	Hautur du sable h_5	Hauteur h'_5	ESV $(100 \cdot h_5 / h_4)$	ESP $(100 \cdot h'_5 / h_4)$
1 ^{er} essai	11,6	9,8	9,8	84,48	84,48
2 ^e essai	11,7	9,8	9,7	83,76	82,90
			La moyenne des essais	84,12	83,69

D'après les résultats du tableau 3.2 notre sable est classé comme étant un sable très propre avec absence des fines argileuses.

3.2.2 Le ciment et les ajouts :

✓ Le ciment

Pour cette étude nous avons utilisé un ciment portland composé CEM II/A 42.5 correspondant à la norme [NA 442/2000] provenant de la cimenterie de BENISAF (Ain-Temouchent), la composition chimique du ciment est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 : Composition chimique du ciment (en %)

ELEMENT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO Libre	Perte au feu
TENEUR	27.97	5.43	3.05	56.37	0.71	2.53	0.75	3.11

Les Masses Volumiques (Absolue et Apparente) :

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme **EN 196-1**, Nous avons utilisé la méthode de mesure

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

au pycnomètre pour le calcul de la masse volumique absolue. Les résultats sont présentés sur le Tableau 3.8.

✓ Essai de consistance :

Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 196-3**. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.5 :

Tableau 3.5 : Résultats de la hauteur d'enfoncement

	Eau/Poudre	Masse d'eau(Me) (g)	Hauteur d'enfoncement (mm)
Ciment	0,26	130	35
	0,27	135	31
	0,28	140	10
	0,32	160	4

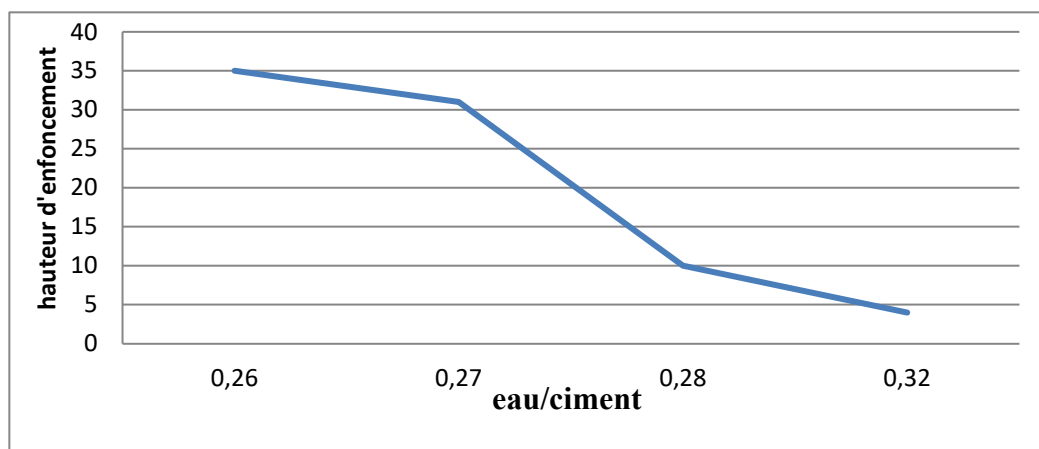


Figure 3.2 : Évolution de l'enfoncement de la sonde en fonction du dosage

La compacité C de la poudre est déterminée par la formule suivante :

$$C = \frac{1000}{1000 + M_v * \frac{M_e}{M_p}}$$

Avec : M_v : la masse volumique absolue du ciment ;

M_e : la masse de l'équivalent de la consistance trouvée ;

M_p : la masse de la poudre de ciment.

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

$$C = \frac{1000}{1000 + 3100 * \frac{0.160}{0.500}} = 0,5$$

Tableau 3.6 : Résultats de l'essai de consistance normalisée

Compacité	Consistance (%)
0.50	32

✓ Essai de prise du ciment : (NA230, NF EN 196-3)

Nous avons réalisé l'essai de l'aiguille Vicat à l'aide de la méthode expérimentale normalisée qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise.

Les résultats concernant le début et fin de prise du ciment sont présentés dans le tableau 3.7 suivant :

Tableau 3.7 : Début et fin de prise

Début de prise (min)	180
Fin de prise (min)	285

✓ La finesse de mouture (finesse de Blaine - NA231, NF EN196-6) :

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 2800 à 5000 cm²/g.

- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = K * \frac{\sqrt{e^3 * \sqrt{t}}}{\rho_{abs} * (1 - e) * \sqrt{\mu}}$$

REMARQUE :

Les mêmes essais ont été réalisés pour l'ajout (poudre de brique) et les résultats obtenus sont résumés sur le tableau 3.8 suivant :

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

Tableau 3.8 : Les caractéristiques du ciment et de la poudre de brique

Composition	Ciment CEM II/A 42.5	Poudre de brique
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3598	4269,92
Masse volumique absolue (kg /m ³)	3100	2400
Masse volumique apparente (kg/ m ³)	810,8	772,8
Début de prise (min)	180	-
Fin de prise (min)	285	-
Consistance (%)	32	-

✓ Poudre de brique :

Dans cette étude, nous avons utilisé le déchet de brique de la briqueterie de Bendi-Mered sise à Remchi (Wilaya de Tlemcen) comme un ajout minéral dans les mortiers. Ils sont broyés à une fraction granulaire de 80 microns.

La composition minéralogique de cette poudre de brique est présentée sur le tableau 3.9 suivant :

Tableau 3.9 : Composition minéralogique des déchets de briques

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P.F
Teneurs des déchets de briques (%)	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.00

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

✓ Les fibres :

La famille des **fibres métalliques** est composée de l'acier, de l'inox (acier inoxydable) et de la fonte (amorphe) (figure 3.3) [1].

Leurs caractérisations sont présentées dans le tableau 3.10 :

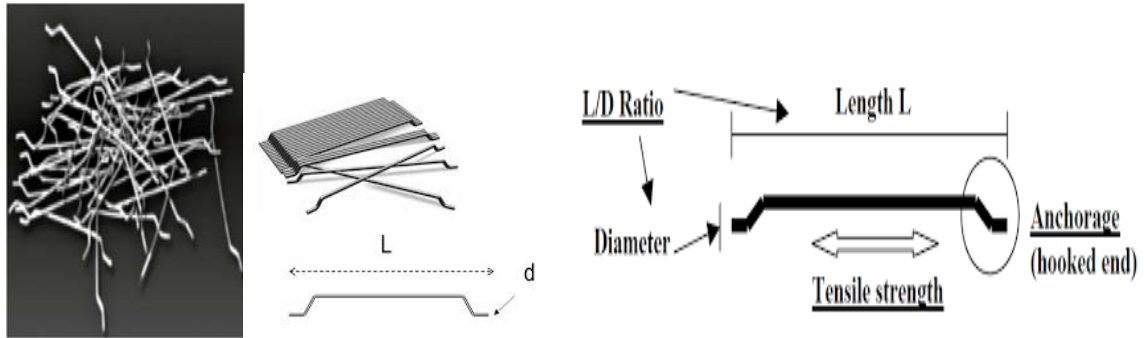


Figure 3.3: Les fibres métalliques

Tableau 3.10 : Caractéristiques des fibres métalliques

Longueur (mm)	50 ± 10%
Diamètre fibre (mm)	1 ± 10%
Rapport d'aspect	50
Format	A crochet
Section transversale	Circulaire
Tension à la rupture à la traction (MPa)	1100 – 2700
Allongement à la rupture	< 4%

✓ Eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle de la commune de Chetouane (Tlemcen). Ces caractéristiques chimiques sont résumées dans le tableau 3.11 :

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

Tableau 3.11 : Caractéristiques chimiques de l'eau

Odeur	Inodore
pH (acide)	<7
Matière humique	Plus pales

Cation	mg/l	Méq/l	Anions	mg/l	Méq /l
Calcium	110.621	5.520	CHLORURES(CL)	99.400	2.800
Magnésium (mg)	42.282	3.477	SULFATES(SO ₄)	312.740	6.515
Sodium(Na)	-	-	CARBONATES(CO ₃)	NEANT	NEANT
Potassium(K)	-	-	BICARBONATES(HCO ₃)	473.515	7.760
Balance cations	-	-	BALANCE ANIONS	885.655	17.075

3.3 Formulation des mortiers :

L'étude s'appuie sur l'évaluation et la qualification de la durabilité des mortiers à base de l'addition minérale (poudre de brique) et des fibres métalliques vis-à-vis les milieux agressifs. L'attaque à l'acide chlorhydrique (HCL) est réalisée par un essai selon la norme ASTM C 267-96 (ASTM C 267-96, 01).

Les échantillons des mortiers normaux ont été confectionnés, selon la norme (NF EN196.1), avec une substitution d'une partie du ciment par 5%, 10% et 15% de poudre de brique et 0,25%, 0,50% et 0,75% de fibres métalliques. Le ciment utilisé est le ciment Portland CEM II/ 42.5 de Béni Saf (Algérie), sable de granulométrie comprise entre 0.08 et 4 mm de la carrière de l'ENG (Algérie).

Le taux de l'eau de gâchage a été maintenu constant pour l'ensemble des

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

gâchées : E/C=0.5.

3.3.1 Composition des mortiers :

Les formulations des mortiers sont reportées sur le tableau 3.12:

Tableau 3.12: Les différentes compositions des mortiers.

Constituant Mortier	Fibres Métalliques		Poudre de brique		CEMII	Sable	E/C
	%	(g)	%	(g)	(g)	(g)	/
0%	/	/	/	/	450	1350	0.5
0,25% FM	0,25	1.125	/	/	448.875	1350	0.5
0,50% FM	0,50	2.25	/	/	447.75	1350	0.5
0,75% FM	0,75	3.375	/	/	446.625	1350	0.5
5%PB	/	/	5	22.5	427.5	1350	0.5
10% PB	/	/	10	45.0	405.0	1350	0.5
15% PB	/	/	15	67.5	382.5	1350	0.5

AVEC :

0% : Mortier normalisé CEMII.

0.25% FM : Mortiers qui ont 0.25% de Fibres métalliques substitués au ciment.

0.50% FM : Mortiers qui ont 0.50% de de Fibres métalliques substitués au ciment

0.75% FM : Mortiers qui ont 0.75% de de Fibres métalliques substitués au ciment.

5% PB : Mortiers qui ont 5% de Poudre de brique substituée au ciment.

10% PB : Mortiers qui ont 10% de Poudre de brique substituée au ciment.

15% PB : Mortiers qui ont 15% de Poudre de brique substituée au ciment.

3.4 Préparation des solutions :

On commence par calculer les volumes des solutions agressives (HCl et Ca(OH)₂) nécessaires à la préparation des solutions de 5l et 14l à 5% pour chaque solution.

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

- **Solution d'acide HCl 5% :**

$$\frac{m_{(acide)}}{m_{(acide)}+m_{(eau)}} = 0.05$$

$$m_{(acide)} = \frac{0.05}{0.95} m_{(eau)}$$

$$v_{(eau)} = 5 \text{ l.}$$

Densité de l'eau=1

$$m_{(eau)} = v_{(eau)} * \text{Densité de l'eau} = 5 * 1 = 5 \text{ kg} = 5000 \text{ g}$$

$$m_{(acide)} = \frac{0.05}{0.95} * 5000 = 263,158 \text{ g}$$

HCl ==> 37 %

$$37 \text{ g} \quad \longrightarrow \quad 100 \text{ g}$$

$$263.158 \text{ g} \quad \longrightarrow \quad X?$$

$$X? = 711.238 \text{ g}$$

$$\rho_{(acide)} = \frac{m_{(acide)}}{v_{(acide)}} \quad \longrightarrow \quad = \frac{m_{(acide)}}{\rho_{(acide)}}$$

$$\rho_{(acideHCl)} = 1.184 \text{ g/cm}^3$$

$$v_{(acide)} = \frac{711.238}{1.184} = 600.71 \text{ ml}$$

Alors solution finale :

$$v_{(finale)} = v_{(eau)} + v_{(acide)}$$

$$v_{(finale)} = 5000 + 600.71$$

$$v_{(finale)} = 5600.71 \text{ ml}$$

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

- Solution basique Ca(OH)₂ 5% :

1l → 2g.

14 l → Y ?

Donc : Y=48g

$$M_{(\text{Ca}(\text{OH})_2)} = 48\text{g}$$

3.5 Procédure expérimentale :

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions 160x40x40 mm³ ont été confectionnées puis démoulées après 24 heures que l'on a immergés dans l'eau distillée pendant 28 jours. A ce niveau notre programme expérimental s'est arrêté puisque le laboratoire a été fermé suite à la situation actuelle que nous vivons le Covid 19.

Après 28 jours de maturation dans l'eau, les éprouvettes devraient être pesées pour déterminer **M1** puis elles devraient être immergées dans les différentes solutions qui sont évaluées selon la (norme ASTM C 267-96) 5% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort et 5% hydroxyde de chaux (Ca(OH)₂) solution basique pour pouvoir prendre par la suite les mesures de perte de masse aux périodes de 2 ; 7 ; 14, 21 et 28 jours. Le reste des mortiers restés sont immergées dans l'eau potable pour eux aussi pour des périodes de 2, 7, 14, 21 et 28 jours.

Le jour de chaque essai, les éprouvettes sont nettoyées avec de l'eau puis on les laisse sécher et après une demi-heure, on évalue :

- La résistance à l'attaque chimique selon la variation de masse (PM) donnée par la formule suivante :

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

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

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés

- Les résistances mécaniques à la compression devraient elles aussi déterminées selon l'organigramme de la figure 3.4.

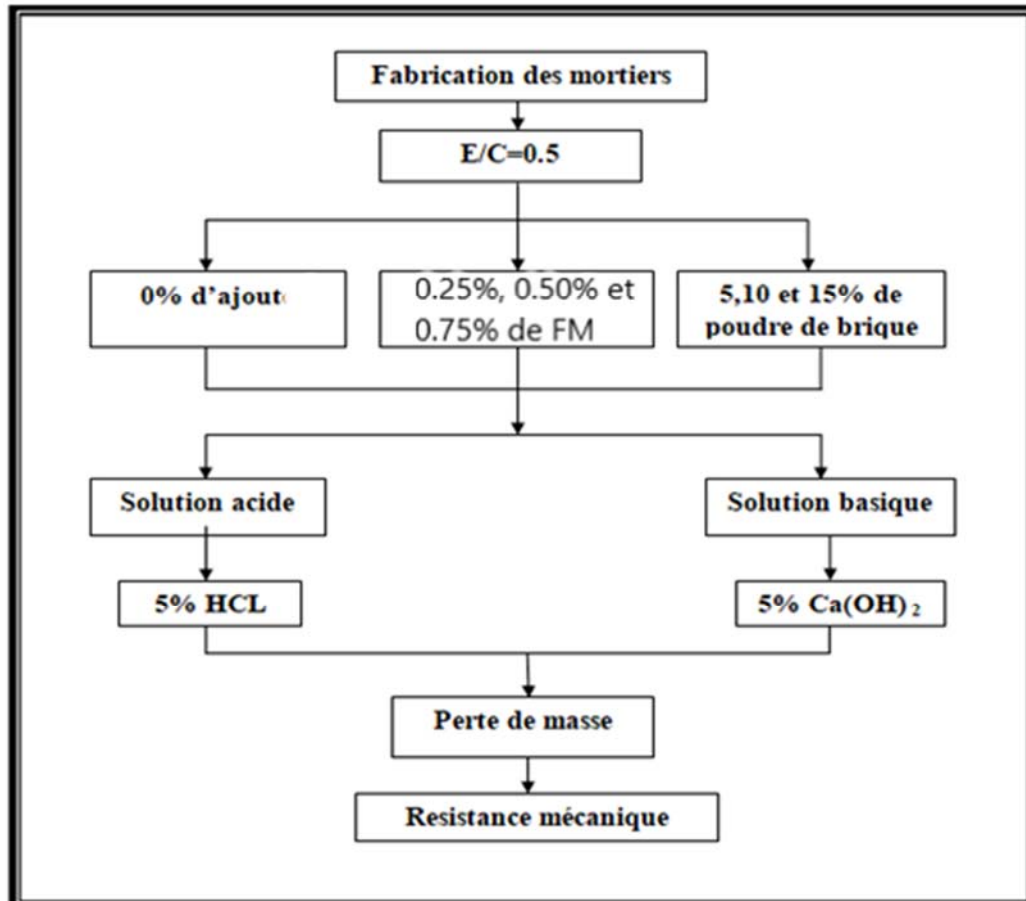


Figure 3.4 : Organigramme résumant le travail expérimental

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait plusieurs études expérimentales sur différents matériaux, par différentes méthodes des essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués le plus par au sein de notre laboratoire qui nous ont donné une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui normalement devrait être étudiés du point de vue mécanique et durabilité.

Conclusion générale et perspectives :

Dans ce travail, nous avons dans un premier temps donné un aperçu général sur les différents matériaux disponibles localement pour la formulation de mortiers, comme, les différents types de ciment ainsi que, les différents types des additions minérales telles que la poudre de briques en terre cuite et les fibres métalliques. Nous avons aussi présenté les différents types de mortiers et leurs utilisations.

L'introduction des fibres assure l'amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux élaborés. L'étude d'un mortier consiste souvent à rechercher conjointement deux qualités essentielles, la résistance mécanique et l'ouvrabilité.

Dans cet ordre d'idées, cette recherche se fixe principalement comme objectif de faire une étude sur le comportement des mortiers à base de poudre de brique d'une part et de fibres métalliques d'autre part.

D'après les résultats de la littérature on constate que la présence des fibres modifie la porosité de la matrice du mortier. Toutefois, l'éprouvette avec fibres est plus poreuse que celle sans fibres et que cette porosité augmente par l'augmentation du taux de fibres d'une part et de la nature des fibres d'autre part. Par ailleurs, l'on constate une amélioration de la résistance à l'attaque par HCl par substitution totale des additions minérales et en particulier la poudre de brique. Aussi, les mortiers à base de poudre de brique présentent les meilleures résistances aux milieux agressifs par rapport aux mortiers sans ajouts.

Les résultats obtenus concernant le ciment tel que surface spécifique Blaine, masses volumiques apparentes et absolues, consistance et temps de début et fin de prise sont conformes aux exigences citées par les normes en vigueur. De même pour les granulats les résultats obtenus en ce qui concerne les masses

Conclusion générale & perspectives

volumiques apparentes et absolues, absorption d'eau, analyse granulométrique, équivalent sable, foisonnement du sable sont dans les intervalles préconisés par les normes.

Perspectives :

- Etude des mortiers à base des ajouts (poudre de brique + fillers calcaires) aux attaques chimiques.
- Comportement des bétons aux milieux agressifs (HCl + H₂SO₄ 5% de concentration).

Chapitre 1 : Généralités sur les ciments, fibres et mortiers :

Web Références :

[1] : HISTORIQUE DU CIMENT. ORIGINE DE L'UTILISATION DU CIMENT, CONSULTE LE 16MAI2020

[3] : CIMENT — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[4] : WIKIPEDIA PRINCIPES ET METHODES DE FABRICATION, CONSULTE LE 16MAI2020

[7] : HAUT FOURNEAU — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[8] : FUMEE DE SILICE (SILICA FUME), CONSULTE LE 16MAI2020

[9] : POUZZOLANE — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[10] : CENDRE VOLANTE — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[11] : ROCHE SCHISTE ISOLE-CONTROVERSEE, CONSULTE LE 16MAI2020

[12] : FILLER DU CALCAIRE-PRODUITS-CARBOCIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[13] : SULFATE DE CALCIUM — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 16MAI2020

[16] : POUDRE DE BRIQUE, CONSULTE LE 16MAI2020

[19] : MORTIER (MATERIAU) — WIKIPEDIA, CONSULTE LE 25MARS2020

[20] : 1AN COM1: LES MORTIERS, CONSULTE LE 25MARS2020

[21] : CHAPITRE IV : LES MORTIERS INTRODUCTION - UNIVERSITE DE SETIF, CONSULTE LE 16MAI2020

[22] : MORTIER : TYPES, COMPOSITION, UTILISATION, PRIX - OOREKA, CONSULTE LE 16MAI2020

Références bibliographiques :

[2] : ELHAMDOUNI I., 2010/ 2011, CONTROLE DES DOSEURS AU SEIN DE

Références bibliographiques

HOLCIM (REM), PROJET DE FIN D'ETUDES, UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH, FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUE FES.

[5]: BOURROUBEY C., 2018/2019, INFLUENCE DE LA PERLITE NATURELLE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN MASTER, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM, FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE.

[6]: FICHES TECHNIQUES TOME1 LES CONSTITUANTS DES BETONS ET DES MORTIERS, COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON, G10, CONSULTE LE 16MAI2020.

[14] : MEDAR M.A., DJADI B., 2015/2016, VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LA FABRICATION DES GRANULATS LEGERS : APPLICATION DANS LES MATERIAUX ISOLANTS, MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES.

[15] : HAFFAF I., LAMOURI O., 2018/2019, ETUDE DE LA RESISTANCE DES MORTIERS AUX ATTAQUES ACIDES, UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID TLEMEN, FACULTE DE TECHNOLOGIE.

[17] : NASSAH D., 2016/2017, INFLUENCE DE LA QUANTITE DE FIBRES NATURELLES (ALFA) ET COMMERCIALES (POLYPROPYLENE) SUR LES PROPRIETES PHYSICOMECANIQUES DES MORTIERS FIBRES, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES.

[18] : DJELOUACHI H., 2016/2017, INFLUENCE DES FIBRES VEGETALES SUR LES PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES D'UN BETON, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR.

Références bibliographiques

[23] : BRIXI N.K., LE 24 JUIN 2014, ETUDE DU RETRAIT DES BETONS AUTOPLACANTS, MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID - TLEMSEN, FACULTE DE TECHNOLOGIE.

Chapitre 2 : Effets des milieux agressifs sur les mortiers :

Web références :

[1] : [HTTPS://WWW.INFOCUMENTS.FR/BETONS/RESISTANCE -AUX-AGENTS-AGRESSIFS](HTTPS://WWW.INFOCUMENTS.FR/BETONS/RESISTANCE_AUX-AGENTS-AGRESSIFS) CONSULTE LE 04/05/2020

[2] : DEFINITION D'ACIDE-WIKIPÉDIA CONSULTE LE 15/05/2020

[10] : <HTTP://WWW.ALLOPROF.QC.CA/BV/PAGES/C108.ASPX> CONSULTE LE 06/05/2020

Références bibliographiques :

[3] : ACIDES ORGANIQUES ET ACIDE GRAS A CHAINE MOYENNE, 2009, 9 EME JOURNEE PRODUCTIONS PORCINES ET AVICOLES, PDF.

[4] : ACIDE- SUPERDRECKSCHT, PDF, 2013.

[5] : ATTAQUE CHIMIQUE DES BETONS, CSTC-ARTONLINE-2004-NO9.PDF.

[6] : GRUBE H., RECHENBERG W., SEPTEMBRE 1989 ,« DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES IN ACIDIC WATER ».CEM. CONCR. RES., VOL. 19, N°5, P 183.

[7] : DEBIH A., 2016, DURABILITE D'UN BETON EXPOSE A UN MILIEU AGRESSIF (ACIDE SULFURIQUE), INFLUENCE DE LA FORME DES GRANULATS (CONCASSES-ROULES) (MEMOIRE DE MASTER UNIVERSITE MOHAMMED BOUDIAF –MSILA.

[8] : MOULI M., SENHADJI Y., BENOSMAN A.S., KHELAFI H., 2010, RESISTANCE AUX ACIDES ET LA PENETRATION DES IONS CHLORURES DES MORTIERS AVEC POUZZOLANE ET FINES CALCAIRES, LABORATOIRE MATERIAUX, ORAN (ALGERIE),

N°8.

[9] : ADEL A., KEDDOU A., 2016, ETUDE DE LA DURABILITE D'UN BETON LEGER RENFORCE PAR DES FIBRES (PFE UNIVERSITE BELHADJ BOUCHAIB D'AIN-TEMOUCHENT.

[11] : LAOUFI L., SENHADJI Y., BENAZZOUK A., LANGLET T., MOULI M., LAOUFI I., BENOSMAN A.S., 2016, EVALUATION DE LA DURABILITE DE MORTIERS POUZZOLANIQUES EXPOSES A UNE ATTAQUECHIMIQUE, SCI. 7 (5) 1835-1845, ISSN : 2028-2508.

[12] : MOHAMMED BELHADJ A.H., MAHI A., DERBAL R., 2019, EVALUATION DE LA DURABILITE DU BETON POUZZOLANIQUE FIBRE DANS DES MILIEUX ACIDES, 24^e CONGRES DE MECANIQUE, BREST (FRANCE).

[13] : MOHAMMED BELHADJ A. H., MAHI A., DERBAL R., AOUANE R., 2017, COMPORTEMENT DES BETONS LEGERS FIBRES A BASE DES GRANULATS POUZZOLANIQUES VIS-A-VIS DES MILIEUX ACIDES, 23^e CONGRES DE MECANIQUE, LILLE (FRANCE).

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des mortiers étudiés :

Web référence :

[1]: FIBRE MÉTALLIQUE : DEFINITION DE LA FIBRE MÉTALLIQUE, CONSULTE LE 16MAI2020.

Référence bibliographique :

ALGERIAN STANDARD, 1992, PUBLISHING AND DISTIBUTION BY ABOU HAMOU MOUSSA. ALGIER: 192.