



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية والمعمارية
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GCA/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : TRAVAUX PUBLICS

Thème

Comportement des mortiers à base de pouzzolane et sédiments fluviaux vis-à-vis aux attaques chimiques

Présenté par :

Mr. AMOURI ABDELKADER BELKACEM

Soutenu le 24/06/2020 devant le jury composé de :

Présidente	: Mme. Nadia BELAS	Professeur	UMAB-Mostaganem
Examineur	: Mr. Omar BELARIBI	MCB	UMAB-Mostaganem
Encadrant	: Mr. Nasr-Eddine BOUHAMOU	Professeur	UMAB-Mostaganem

Année universitaire 2019 - 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicaces

Je m'incline gracieusement devant, ceux qui m'ont mis au monde

*Mes respectueux parents, Ma mère **FATMA** et (défunt) père **CHEIKH**.*

Ont permis à ce travail de voir le jour

A ma femme, pour son soutien et sa patience

*A ma fille, **Hanine***

A mes frères, leurs femmes et enfants

A mes sœurs, leurs maris et enfants

Je tiens à exprimer tout au fond de mon cœur mes reconnaissances à toute La famille.

AMOURI - BENHAMIDA

BELBACHIR - ATTAR - FELLAHI - BAQHDADI BENDAHA

PAPIN - BELDJILLALI - EL ANTRI - ADEL - AKROUT

A tous mes collègues, à la direction des travaux publics de la wilaya de Mostaganem

Je ne saurais, oublier tous ceux qui, quotidiennement, m'ont soutenu moralement et qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail.

AMOURI ABDELKADER BELKACEM

Cette roue sur laquelle nous tournons est pareille à une lanterne magique.
Le soleil est la lampe, le monde, l'écran : Nous sommes les images qui passent.

Omar Khayyam 1048-1131

REMERCIEMENT

Tout d'abord nous nous inclinons avec foi au bon dieu, tout puissant, créateur de l'univers de nous avoir donné cette volonté, courage et clarté pour rédiger ce travail.

Nous exprimons notre gratitude à notre humble professeur Mr. BOUHAMOU Nasr-eddine pour son thème innovant, pour ces conseils et la confiance qui me l'a octroyé.

Notre remerciement chaleureux s'adresse aux membres du jury Mesdames et messieurs,

Membres du jury : Mme. Nadia BELAS d'avoir accepté de présider ma soutenance,

Un grand merci à Mr. Omar BELARIBI d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre projet de fin d'études.

Ainsi Nous tenons également à remercier Mr. Abdelkadir BELGHIT, pour son suivi permanent et rigoureux afin d'aboutir à un travail performant au laboratoire.

Nous tenons à exprimer aussi, nos profonds respects à l'ensemble des enseignantes et enseignants du département du génie civil (travaux publics V.O.A), qui nous ont légués leurs connaissances durant notre cursus universitaire.

Et à la fin de notre parcours je voulais partager un grand salut, plein de réussite pour l'ensemble des étudiants (e) sortants de la promotion Master - travaux publics - (V.O.A) -

- Année Universitaire 2019/2020 -

ملخص

هذا العمل المتواجد بين أيديكم هو مشروع مفيد في المرحلة الأولى ، لأنه بدأ بموضوعين يحملان العديد من المشاكل المشتركة ، الأول يتعلق بجزء من أطروحة تتناول الصلابة والخصائص الميكانيكية للملاط القائم على البوزولان مع إضافة البارلايت من جانب واحد ، والثاني ، وهو جزء من مشروع نهاية لدراستنا الجامعية ، يتمثل في تحليل سلوك الملاط القائم على البوزولان مع إضافة الرواسب النهرية ، يتعرض كلاهما لهجمات كيميائية ثم معرفة مدى صلابتهما و مقاومتها لهته التأثيرات الخارجية لمدة أطول ، بمقارنات أيضاً للإضافات المختلفة لرواسب الأنهار أو البارلايت بالنسب والتركيبات المتدرجة في هذا الملاط القائم على البوزولان والسماح للباحثين المبتكرين بتعزيز و الاستفادة من هذه الموارد الوفيرة. الرواسب النهرية هي المشكلة التي كانت ومازالت تشكل عائق للسدود في الجزائر وجميع أنحاء العالم، مع العلم أن هذه الرواسب المتراكمة في الخزانات لا تستخدم ولا تستغل في مجالات الهندسة المدنية

تختلف مزايا استبدال الإسمنت جزئياً بالرواسب النهرية من حيث معرفة خصائصها الفيزيائية والكيميائية حيث يدفعنا إلى جعلها تحت المجهر ، و نظراً لوجود العديد من العوامل التي تهيئ لهذا ، فهي تساعد على الحد من الكلنكر ونقص انبعاث ثاني أكسيد الكربون. وسيشاركون أيضاً في تعزيز مقاومة الهجوم الكيميائي والاستدامة ، و ديمومة الملاط ، لذلك يجب تقييم اهتمامنا البحثي من خلال مقارنة النتائج المختلفة للاختبارات العملية والمخبرية على الأشخاص الذين لديهم نفس موضوع البحث. إن ديمومة هذا الملاط القائم على البوزولان المضافة إلى راسب الأنهار ستقودنا إلى ثورة اقتصادية وبيئية في بلدنا الجزائر، وبالتالي المساهمة في التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: بوزولان طبيعي ، راسب نهري ، ملاط ، هجوم كيميائي ، مقاومة ميكانيكية ، ديمومة الملاط.

Abstract

The work in your hands is a beneficial project at the initial stage, because it has started two subjects carrying several problems in common, the first concerns a part of a thesis which approaches our work and which deals with durability and mechanical properties a pozzolan-based mortar with the addition of perlite on one side, and the second, which is part of our end-of-studies project, consists of analyzing the behavior of a pozzolan-based mortar and river sediments, both are exposed to chemical attacks to find extent of their hardness and resistance to external influences for a longer period, then also compare the different additions and river sediments or perlite in graduated percentages and combinations in this pozzolan-based mortar and allow innovative researchers to enhance and benefit from these abundant resources. River sediments are the imminent problem of dams in Algeria and all over the world, knowing that these sediments accumulated in reservoirs are neither used nor exploited in the fields of civil engineering.

The advantages of partially replacing cement with river sediments vary in part with their physico-chemical characteristics, since several factors come into play, namely the reduction of clinker and the emission of CO₂. They will also be recognized in the reinforcement of a resistance to chemical attacks and to durability, therefore our research interest must be valued by the comparison of the different results of laboratory tests, and the themes which have the same research subject in the universities.

The durability of this pozzolan-based mortar added to river sediments will lead us to an economic and environmental revolution in our country Algeria, and therefore contribute to sustainable development.

Keywords: natural Pozzolan, river sediment, Mortar, chemical attack, Mechanical resistance, durability.

Résumé

Le travail entre vos mains est un projet bénéfique au stade initial, car il a entamé deux sujets portant plusieurs problématiques en commun, le premier concerne une partie d'une thèse qui s'approche de notre travail et qui traite la durabilité et les propriétés mécaniques d'un mortier à base de pouzzolane avec ajout de la perlite d'un côté, et le second qui rentre dans le cadre de notre projet de fin d'études, consiste à analyser le comportement un mortier à base de pouzzolane et sédiments fluviaux, tous les deux sont exposés à des attaques chimiques pour savoir leur durabilités (durée de vie), puis aussi comparer les différents ajouts et sédiments fluviaux ou perlite en pourcentages gradués et combinaisons dans ce mortier à base de pouzzolane et permettre aux chercheurs innovants de valoriser et bénéficier ces ressources abondantes. Les sédiments fluviaux sont le problème imminent des barrages en Algérie et partout dans le monde, sachant que ces sédiments accumulés dans les retenues ne sont ni utilisés ni exploiter dans les domaines du génie civil.

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les sédiments fluviaux varient en partie avec leurs caractéristiques physico-chimiques du fait que plusieurs facteurs rentrent en jeu à savoir la diminution du clinker et l'émission du CO₂. Ils seront aussi impliqués dans le renforcement d'une résistance aux attaques chimiques et à la durabilité, donc notre intérêt de recherche doit être valorisé par la comparaison des différents résultats d'essais en laboratoire, et les thèmes qui ont le même sujet de recherche dans les universités.

La durabilité de ce mortier à base de pouzzolane additionné de sédiments fluviaux nous mènera à une révolution économique et environnementale à notre pays l'Algérie, et par la suite contribuer au développement durable.

Mots clés : la Pouzzolane naturelle, sédiment fluviaux, Mortier, attaque chimique, Résistance mécanique, durabilité.

SOMMAIRE

DEDICACES	2
REMERCIEMENT	3
- ملخص	4
- Abstract	5
- Résumé	6
SOMMAIRE - LISTE DES TABLEAUX - LISTE DES FIGURES - FORMULES	7
INTRODUCTION GENERALE	13
PROBLEMATIQUE	15
CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	17
1.1. Introduction	18
1.2. Revue Bibliographique des recherches sur l'utilisation du ciment à base de pouzzolane	19
2- LES SEDIMENTS FLUVIAUX	26
2.1. Introduction	26
2.2. les sédiments de dragage	27
2.3. Les Processus de sédimentation au sein d'un barrage	27
2.4. Dépôt des sédiments	28
2.5. Eclaircissement sur la vase	29
2.5.1. Qu'est-ce qu'une vase ?	29
2.5.2. La vase	29
2.5.3. Structure Physico- Chimique de la vase	29
2.6. Intérêt des sédiments pour la fabrication du ciment	29
2.7. les dragages Mécaniques	30
2.8. Caractérisation Physico-chimique de la vase	31
2.8.1. Analyse Granulométrique	31
2.8.2. surface spécifique	31
2.8.3. Teneur en matière organique	31
2.9. Citation de quelques recherches sur l'utilisation des sédiments fluviaux	32
3- LA POUZZOLANE	35
3.1. Introduction	35
3.2. Définition	35
3.3. La Composition Chimique de la pouzzolane	36
3.4. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes	36
3.4.1. les Propriétés de la pouzzolane	37
3.4.2. les caractéristiques des pouzzolanes	37
3.5. Type de pouzzolanes	38
3.5.1. Pouzzolane Naturelle	38
3.5.1. 1. Matériaux D'origine Volcanique (les roches Pyroclastiques)	38
3.5.1. 2. Matériaux D'origine sédimentaire	38
3.5.1. 3. Matériaux D'origine Mixte (roche Hybride)	38
3.5.2. Pouzzolane Artificielle	38
3.5.2. Pouzzolane calcinés naturelle	38
3.6. Citation de quelques recherches sur l'utilisation de la pouzzolane	39

4- LA DURABILITE	41
4.1. Introduction	41
4.2. Qualité de la durabilité	41
4.3. Durabilité et économie	42
4.4. Béton Durable et Béton Résistant	42
4.5. Principales Techniques Expérimentales	42
1-Techniques macroscopiques	42
2-Techniques microscopiques	43
4.6. Facteurs Influençant La Durabilité	43
4.6. 1. La perméabilité du béton	44
4.7. Les attaques chimiques des bétons	44
4.7.1. Actions des acides	44
4.7.2. Sources des acides	45
4.7.3. Actions des sulfates	45
4.8. Autres propriétés de durabilité	45
4.9. Revue Bibliographique sur la durabilité	45
CONCLUSION	49
CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU MORTIER A BASE DE POUZZOLANE ET LA PERLITE	50
Introduction générale	51
IDENTIFICATION DES MATERIAUX	53
1.1. Introduction	54
1.2. Matériaux utilisés	54
1.2.1. Ciment	54
1.2.2. Pouzzolane Naturelle	54
1.2.3. Perlite	55
1.2.3.1. Localisation du gisement de la perlite de Hammam Bouhrara (Tlemcen)	55
1.2.3.2. Analyse spectrales des ajouts pouzzolaniques	56
1.2.3.2. 1.Essai Frattini	57
1.2.4. Eau de gâchage	58
1.2.4.1. Analyse Chimique des milieux agressifs (eau de mer, eau de sebkha)	58
1.2.4.1.1. Eau de Mer	58
1.2.4.1.2. Eau de Sebkha	59
1.2.5. Le sable	60
- Compacité et Porosité des granulats	62
1.3. Formulation et Préparation des Mortiers	63
1.3.1. Formulation des mortiers	63
1.3.2. Préparation des mortiers	64
1.4. Méthodes D'essais	64
1.4.1. Les Essais à L'état Frais	64
1.4.1.1. Essai de Consistance et Temps de Prise	64
1.4.1.2. Essai de Maniabilité sur mortiers (Flow Test)	65
1.4.2. Les Essais à L'état Durci	66

1.4.2.1. Essai de la Résistance à la compression et la traction des mortiers	66
1.4.3. Essai de Durabilité	67
1.4.3.1. Mesure de la variation du poids	67
CAMPAGNE EXPERIMENTALE	68
1.5. Les essais sur les différents Mortiers à l'état Frais	68
1.5.1. Essai de Consistance et Temps de Prise	68
1.5.2. Essai de Maniabilité des mortiers frais	71
1.6. Les essais sur les différents Mortiers à l'état Durci	73
1.6.1. Essais Mécaniques	73
1.6.1.1. Résistance à la compression des mortiers à l'état durci	75
1.6.1.2. Résistance à la traction des mortiers à l'état durci	75
1.6.2. Essais de durabilité	77
1.6.2.1. Variation de la masse des mortiers	77
1.6.2.1.1. Variation de la masse des mortiers conservés Dans l'eau douce	77
1.6.2.1.2. Variation de la masse des mortiers conservés dans la solution 5% de NaCl	78
1.6.2.1.3. Variation de la masse des mortiers conservés dans la solution (5% Na ₂ SO ₄ +5% MgSO ₄)	79
1.6.2.1.4. Variation de la masse des mortiers conservés dans l'eau de Sebkhah	80
1.6.2.1.5. Variation de la masse des mortiers conservés dans l'eau de mer	81
- 1 ^{er} cas : l'action du Na ₂ SO ₄	83
- 2 ^{ème} cas : l'action du MgSO ₄	83
CHAPITRE III : BILAN	84
- Evaluation de l'activité pouzzolanique	85
- Les caractéristiques physiques à l'état frais des pâtes et mortiers	85
- Les études de durabilité (la variation de la masse)	86
CONCLUSION	87
CHAPITRE IV : IDENTIFICATION ET MATERIAUX UTILISES	88
1.1. Introduction	89
IDENTIFICATIONS DES MATERIAUX UTILISÉS	91
1.2. Ciment	91
1.3. la Vase	93
1.3.1. Les Caractéristiques physiques de la vase	96
1.4. Pouzzolane Naturelle	97
1.5. Les sables.	98
CONCLUSION GENERALE	99
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	100

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU MORTIER A BASE DE POUZZOLANE ET LA PERLITE

Tableau II.1.1	Dosage des mortiers.	53
Tableau II.1.2.1.a	Composition chimique du ciment CPA-CEM I 42,5 (en %)	54
Tableau II.1.2.1.b	Composition minéralogique du clinker (en %)	54
	La composition chimique de la pouzzolane naturelle	
Tableau II.1.2.2	(Gisement de Bouhamidi Béni-Saf).	55
Tableau II.1.2.3	Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara.	56
Tableau II.1.2.4	Analyse chimique de l'eau de gâchage.	58
Tableau II.1.2.4.1.1	Composition chimique de l'eau de mer méditerranéenne	59
Tableau II.1.2.4.1.2	Composition chimique de l'eau de sebkha d'Es Senia à Oran	60
Tableau II.1.2.5	Caractéristiques physiques des sables utilisés.	62
Tableau II.1.3.1	Les formulations des Mortiers	63
Tableau II.1.3.2	Conduite des opérations du malaxage.	64
Tableau II.1.5.1	Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment pouzzolaniques.	68
Tableau II.1.5.2	Influence de la pouzzolane naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50.	71

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION ET MATERIAUX UTILISES

Tableau IV 1.2.a	Composition chimique du ciment utilisé	92
Tableau IV 1.2.b	Composition minéralogique du clinker	92
Tableau IV 1.2.c	Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5	93
Tableau IV 1.3.a	Caractéristiques chimiques de la vase calcinée	95
Tableau IV 1.3.1	Caractéristiques physiques de la vase calcinée du Barrage de Chorfa.	96
Tableau IV 1.4.a	Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.	97
Tableau IV 1.4.b	Caractéristiques physiques de la Pouzzolane Naturelle de Béni-Saf.	97
Tableau IV.5.1	Caractéristiques Physiques des sables utilisés	98

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Figure I.2.1	Le dépôt des Sédiments Dans les retenues.	26
Figure I.2.3.a	Mécanismes de déposition (Sédimentation, décantation).	27
Figure I.2.3.b	évolution de la concentration dans le temps (Migniot 1989)	28
Figure I.2.7	Exemple de drague aspiratrice à élinde modulable (VIS).	30
Figure I.2.8.2	Perméabilimètre (Appareil Blaine)	31
Figure I.3.1	matériaux pouzzolanique (en vrac)	35
Figure I.3.2	Matériaux pouzzolanique (rougeâtre)	35
Figure I.3.3	une roche naturelle constituée par Des scories (projections) volcaniques basaltiques	36
Figure I.3.5	la carte géologique (Gites et Gisements minéralogique du nord de l'Algérie)	39

Figure I.4.2	Durabilité et recyclabilité du béton	41
CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU MORTIER A BASE DE POUZZOLANE ET LA PERLITE		
Figure II.1.1	Organigramme récapitulant du travail mené.	52
Figure II.1.2.2.a	Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage	54
Figure II.1.2.2.b	Poudre de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf broyer à 80 µm.	54
Figure II.1.2.3.a	Scories de la perlite de Hammam Boghrara avant broyage	55
Figure II.1.2.3.b	Poudre de la perlite de Hammam Boughrara broyer à 80 µm.	55
Figure II.1.2.3.1	Localisation du gisement de Hammam Boughrara .	56
Figure II.1.2.3.2	Superposition de L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) de la pouzzolane naturelle de et de la perlite.	56
Figure II.1.2.3.3	Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphe de frattini	57
Figure II.1.2.4.1.2	Carte géologique du bassin de la Grande Sebkhha (ORAN).	59
Figure II.1.2.5.a	Courbe granulométrique du sable de mer de Terga.	60
Figure II.1.2.5.b	Courbe granulométrique du sable Concassé de Kristel	61
Figure II.1.2.5.c	Courbe granulométrique du sable corrigé.	61
Figure II.1.5.1.a	Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs pouzzolaniques	69
Figure II.1.5.1.b	Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des différentes Teneurs pouzzolaniques	70
Figure II .1.5.2	Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques.	72
Figure II.1.6.1.1.a	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux.	73
Figure II.1.6.1.1.b	Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (j varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.	74
Figure II.1.6.1.2.a	Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturé en chaux.	75
Figure II.1.6.1.2.b	Evolution du rapport de la résistance à la traction par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (j varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.	76
Figure II.1.6.2.1.1	Evolution de la variation de la masse des mortiers Immergés dans l'eau douce.	77
Figure II.1.6.2.1.2	Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans la solution 5% NaCl .	78
Figure II.1.6.2.1.3	Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans la solution (5 % Na ₂ SO ₄ + 5 % MgSO ₄).	79
Figure II.1.6.2.1.4	Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans l'eau de sebkhha	80
Figure II.1.6.2.1.5.a	Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans l'eau de mer.	81
Figure II.1.6.2.1.5.b	Le gain en masse des échantillons du mortier à 300 jours.	82

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION ET MATERIAUX UTILISES

Figure IV.1.1	Organigramme récapitulant du travail a mené	90
Figure IV .1.2.a	les phases de fabrications du ciment	91
Figure IV .1.2.b	Micrographie des quatre Phases principales de clinker	92
Figure IV .1.2.c	Appareil de Vicat Manuel	93
Figure IV .1.3.d	Schéma de fonctionnement de l'Appareil de Vicat	93

Figure IV .1.3.a	Vase à L'état Initial	94
Figure IV .1.3.b	Four de calcination utilisé (+ 1200°C).	94
Figure IV .1.3.c	Vase Concassée	95
Figure IV .1.3.d	Vase Tamisée	95
Figure IV .1.3.e	Vase après calcination (produit final)	95
Figure IV .1.3.1	Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa [Laboratoire LAFARGE, Sig].	96
Figure IV .1.4.a	Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage	97
Figure IV .1.4.b	Poudre de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf broyée à 80 µm.	97
Figure IV .1.5	Courbe granulométrique du sable corrigé	98

Les formules

Formule {F1}	L'évolution de la concentration	$C = C_s + n_1 \times \log_{10}(h)$	28
Formule {F2}	la loi de Stokes	$V = C \cdot d^2$	28
Formule {F3}	C est une constante égale à	$C = \frac{\rho_p - \rho_f}{18 \mu} \cdot g$	28
Formule {F4}	L'indice d'activité :	$I = \frac{Rc_{28} \tau}{Rc_{28} \tau_{25 PA}}$	36
Formule {F5}	évaluation de l'activité pouzzolanique	$\text{Max} [CaO] = \frac{350}{[OH] - 15}$	57
Formule {F6}	Module de finesse	$P1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2}$	62
Formule {F7}	La compacité	$C = \frac{M_{Vapp}}{M_{Vabs}} \times 100 (\%) ; \text{la porosité } P = 1 - C (\%)$	62
Formule {F8}	l'étalement D	$D = \frac{D1 + D2 + D3 + D4}{4} - 100 (\%)$	65
Formule {F9}		$\Delta E (\%) = \frac{D2 - D1}{D1}$	65
Formule {F10}	La variation du poids	$\Delta M (\%) = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$	67

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ce modeste travail est un projet qui a pour but de créer un défi celui du souci de la durabilité des matériaux conçus pour faire face aux attaques chimiques. C'est l'un des préoccupations des chercheurs et leur objectif primordial à atteindre. Notre premier point essentiel au début de ce travail entame au comportement d'un mortier composé de différents pourcentages par la substitution partielle du ciment à base de pouzzolane et ajout du sédiment fluviaux, car d'une part leurs utilisations vont apporter une amélioration dans les propriétés mécanique des matériaux cimentaires (mortier et béton). Et D'autre part leurs rôles c'est de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière économique et à résoudre les problèmes du point de vue environnemental. Notre deuxième point de travail c'est de reprendre et apprécier une partie de la thèse, celui de Hamadache [18] similaire à notre objectif, ce dernier a discuté sur le phénomène de la durabilité d'un mortier à base de pouzzolane avec ajout de la perlite sur les différents combinaisons et pourcentages d'ajout, dont il a exposé le problème de la Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des mortiers pouzzolaniques face à des attaques chimiques.

Faire une critique et une comparaison par un universitaire sortant afin d'étaler sa connaissance du point vue essais effectués et méthodologie de travail exécuté est un succès.

En première étape, il y a eu lieu d'entamer à Cette étude qui consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout de ces composants substitué à divers pourcentages (5%, 10%, 15%, 20%, 30%) d'effectué des essais au laboratoire et voir leurs effets sur les propriétés physico-chimique du ciment confectionné et son comportement vis-à-vis des attaques chimiqu.

Quand on développe le phénomène d'agents agressifs, sa nature complexe a conduit de nombreuses théories concernant son mécanisme à se propager, la difficulté étant de relier les réactions chimiques aux variations des propriétés mécaniques des échantillons.

Il vaut mieux comprendre l'attaque chimique afin de pouvoir écrire un schéma intacte régissant ses mécanismes et confectionné un matériau dont les propriétés mécanique et physico-chimique seront adapté à ces milieux agressifs.

Dans ce contexte, nous avons introduit une approche de notre thème. Cette approche pourrait être utilisée pour optimiser la variation des matériaux d'ajout (les sédiments fluviaux et la perlite) par les propriétés chimiques et mécaniques pendant cette attaque, et rendre plus clair les mécanismes de dégradation, pour ensuite développer des matériaux cimentaires capable de résister aux attaques chimiques avec une durabilité satisfaisante.

PROBLEMATIQUE

PROBLEMATIQUE

À la lumière de cette étude bibliographique, nous avons pu faire le point sur deux problématiques essentielles :

1. La première concerne les énormes quantités de sédiments présents dans les barrages en Algérie notamment celui de Chorfa de la wilaya de Mascara, qui est soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout des dernières années sa capacité a chuté d'une dizaine de millions de m³ ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³.

Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval, ... La valorisation des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la résolution des questions liées au largage des vases.

La valorisation de ces sédiments de dragage dans la confection des bétons semble être une alternative bien fondée par rapport aux caractéristiques prometteuses de ces matériaux pour leur devenir. Plusieurs travaux ont été menés dernièrement pour étudier la possibilité de valoriser les sédiments de dragage dans le génie civil notamment dans les matériaux cimentaires et voir son impact sur les propriétés mécaniques et sur la résistance dans les milieux agressifs des mortiers et bétons, soit en substitution d'une partie du ciment soit en addition au béton, mais rares sont les études détaillées réalisées sur les performances des bétons à base de mélanges de vases et de pouzzolane naturelle encore moins sur leur durabilité.

2. La seconde concerne la substitution ou il faut s'assurer des pourcentages des teneurs en ajouts de la pouzzolane naturelle de 10%, 20% et 30% même chose pour la vase de 10%, 20% et 30% ainsi que pour les mortiers ternaires de 5% PZ+5% V, 10%PZ+10% V et 15%PZ+15% V.

Ainsi par cette contribution il nous sera possible de répondre à plusieurs objectifs :

Est-ce qu'on peut avoir une efficacité des mortiers à base de pouzzolane par ajouts, et évaluer le pourcentage voulu pour une performance atteinte sur les propriétés physico-chimique, Résistance mécaniques et durabilité vis-à-vis des attaques chimiques ?

Est-ce que l'influence des ajouts est positive ou négative sur les objectives de projet de recherche ?

CHAPITRE I:

Recherches bibliographiques

1.1. Introduction:

Ce présent chapitre comprend au départ une recherche bibliographique qui englobe un ensemble de travaux de recherches sur l'utilisation de ciment à base de pouzzolane, qui présentent une approche et une appréciation relativement similaire à notre thème de projet de fin d'études qui se préoccupe au comportement d'un mortier à base de pouzzolane et sédiments fluviaux face aux attaques chimie .l'utilisation des ajouts minéraux au mortier est toujours l'intérêt des chercheurs innovant qui vont donner une progression relatif à la résistance physico- chimique du mélange et sa durabilité, notre début c'est d'avoir un mélange de différents intervenant du mortier (de la pouzzolane naturelle, sédiment fluviaux, sable normalisé, eau de gâchage et ciment portland CPA CEM I 42,5) ,dans le but de valoriser les résultats physico-chimique et mécanique obtenu au laboratoire ,ainsi de l'exposé à des attaques chimiques et constater par la suite si ces mortiers peuvent aboutir à une durabilité acceptable .

En effet, ce phénomène est le sujet préoccupant de notre temps, car L'attaque chimique telle que l'attaque sulfatique (Na_2SO_4 et MgSO_4) est la clé fondamentale de notre plan de travail qui est sujet d'importance croissante, en raison de sa propagation dans le domaine de génie civil et par les dommages colossal au niveau des constructions en béton. Ce qui nous impose à faire face à la résistance aux attaques chimiques et la durabilité du mortier ou béton à long terme.

La durabilité du mortier est une priorité en génie civil, car elle détermine la durée de service des structures de manière significative. En raison de l'exposition du mortier à des influences externes, les propriétés mécaniques et physiques du mortier peuvent être menacées.

A ce effet, nous allons suivre l'évolution des résistances mécaniques (traction par la flexion et la compression) des mortiers confectionné, la maniabilité, le temps de prise, etc. Qui sont élaborés avec de différents pourcentages d'ajouts.

1.2. Revue bibliographique des recherches sur l'utilisation du ciment à base de pouzzolane

En 2018, Hamdi [1], a entamé une étude expérimentale sur les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout pouzzolane dans le ciment. L'étude consiste à préparer un ciment avec la pouzzolane, en remplaçant un certain pourcentage de clinker par cinq pourcentages de l'ajout [0%, 5%, 10%, 20%, 30%] du poids de ciment. Afin d'étudier les caractéristiques du ciment à base de pouzzolane et le comportement mécanique du mortier. Les caractéristiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté sont (Composition chimique, poids spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés par ces ciments, telles que, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolane et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Le travail de recherche mené par Kerbouche et al [2], consiste à l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : pouzzolane naturelle (ajout actif), fillers calcaire (ajout inerte) et fumée de silice (ajout très actif) sur les propriétés mécaniques des mortiers élaborés selon les différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux pour les ciments binaires et les couples optimaux pour les ciments ternaires les plus performants. Les résultats de ce travail montrent que le taux de 10% de fillers calcaire (FC) améliore la résistance des mortiers binaires au jeune âge (2 jours), par contre les taux de 30% de pouzzolane naturelle (PZN) et 10% de fumée de silice (FS) contribuent positivement à long terme (90 jours). Concernant les mortiers ternaires les couples (10-30% PZN / 10% FC) et (10-30% PZN / 10% FS) semblent les plus efficaces car ils développent des résistances comparables à celle du mortier contrôle à long terme (90 jours).

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. Ce pendant malgré, les avantages techniques, économiques et écologiques rapportés par l'utilisation des ciments composés, ces derniers restent associés à des inconvénients. Il est donc nécessaire de savoir si des ciments à plusieurs composants (ternaires) ont des effets synergiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles.

Pour palier au déficit de la production nationale (Algérie) en ciment, l'incorporation d'additions minérales au ciment portland permet d'obtenir un liant moins coûteux. A cet effet la valorisation des déchets industriels (laitier, cendre volante) ou naturels (boues de dragages fluviaux)

représente une voie économiquement rentable. Pour cela Benkaddour et al [3] ont étudié l'effet de la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée du barrage de Fergoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Les résultats ont été analysés sur des mortiers avec et sans ajouts. L'étude a montré une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance aux agressions chimiques par rapport au mortier sans ajout.

Les mêmes chercheurs [4] ont choisi d'analyser l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhmidi) et la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée de barrage Ferrgoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis aux milieux acides des mortiers confectionnés. Les résultats obtenus ont révélé que les mortiers avec ajouts présentaient de bonnes performances mécaniques et une amélioration des résistances aux agressions chimiques par rapport aux mortiers témoins.

Le travail qui a été mené par Bessenouci [5] consiste à valoriser des pouzzolanes naturelles de (Bou Hamidi et saint pierres) en tant que composants de base dans les matériaux de construction et à mettre en relief leur avantage thermique. Il est économiquement intéressant d'utiliser la pouzzolane en substitution d'une partie du clinker comme ajouts hydrauliquement actives, et dans les compositions de bétons légers sous forme de mélange de granulats de pouzzolane, qui offrent des résistances mécaniques conformes aux normes en vigueur. Dont les recommandations sont :

1. les performances des contraintes à la compression pour les bétons à base de granulats de pouzzolane conduit à l'utilisation du béton de structure et habillage dans le bâtiment.
 - a. il peut être utilisé comme cloison de séparation dans l'habitat.
 - b. la grande légèreté des éléments, le constitue comme qualité très appréciable pour la main D'œuvre et permet des économies sur les transports et les engins de manutention.
 - c. une meilleure isolation thermique, le conduit à des économies très importantes sur la Consommation d'énergie.
2. Il est possible d'approcher les performances mécaniques d'un béton de référence, c'est à- dire d'un béton sans pouzzolane, des essais complémentaires sont nécessaires pour assurer une large utilisation de ce matériau, ainsi que le contrôle de sa durabilité.

Bessenouci et al [6] se sont intéressé essentiellement à l'analyse thermomécanique de la pouzzolane, suivi par l'expérimentation de différents échantillons de bétons légers à différentes compositions et dosages en ciment. La modélisation physico-mécanique et thermo-énergétique des milieux poreux est adoptée pour la prédiction de la conductivité thermique apparente. L'expérimentation des échantillons du béton léger à base de pouzzolane, soumis par la suite aux essais

et sollicitations mécaniques de résistance. Ces chercheurs ont pu évaluer et apprécier les performances de ce matériau. Les mesures expérimentales de la conductivité thermique apparente ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons pour être confrontées aux valeurs théoriques. L'utilisation de la pouzzolane dans les compositions du béton léger sous forme de granulats constitue l'essence du squelette granulaire de ce béton, qui lui offre une résistance mécanique conforme aux normes en vigueur. Les résultats expérimentaux obtenus, montrent l'intérêt et les performances du béton léger pouzzolanique. Désormais, ce matériau de construction jouit de qualités thermique et mécanique intéressantes. Son utilisation dans l'habitat et les ouvrages d'art offre des avantages appréciables à la fois économique, écologique, Thermique, et énergétique.

L'attaque sulfatique externe est l'une des causes de détériorations les plus agressives qui affecte la durabilité des structures en béton. Cette problématique est très courante dans les régions du Sud-Est Algérien, où les concentrations des sulfates sont très élevées dans les eaux souterraines, et dans les sols. A cet effet Aziez [7] a évalué le couplage entre la température et les attaques sulfatiques externes (ESA) sur des matériaux cimentaires. Les mortiers de forme cubique de 40 mm de côté ont été préparés et immergés dans une solution de 5% $MgSO_4$ à différentes températures 5, 20 et 50 °C pendant 24 mois.

Trois types de ciments : (1) ciment portland résistant aux sulfates (SRPC), (2) ciment Portland au laitier (PSC) et (3) ciment Portland à base de pouzzolane (PPC) ainsi que deux types de sable (siliceux et calcaire) ont été utilisés dans ce travail. La détérioration des échantillons a été évaluée à partir de six (06) paramètres : changement de la masse, résistance à la compression, porosité accessible à l'eau, vitesse d'impulsion aux ultrasons, absorption capillaire, diffraction des rayons X et le pH de la solution. Aucun dégât n'a été observé dans les échantillons exposés à la solution de sulfate à 50 °C. En revanche, des dommages ont été observés dans les mortiers avec sable siliceux exposés à 5°C et 20°C. Les résultats montrent que la température élevée n'accélère pas nécessairement la dégradation due à l'attaque de sulfate de magnésium. L'analyse DRX indique que la thaumasite [P1] et le gypse sont les principaux produits provoquant la détérioration des matériaux cimentaires à 5°C. Les ciments Portland résistants au sulfate (SRPC) sont sensibles à l'attaque de sulfate à basse température. Le type de sable a un effet remarquable sur la performance des mortiers. Les échantillons avec du sable calcaire ont montré une meilleure résistance contre les attaques de sulfate de magnésium [5].

L. Benamara et al [9]. Les précipitations, sous formes d'averses, provoquent l'érosion rapide des versants. Les particules solides fines qui sont transportées par les cours d'eau, arrivent jusqu'aux niveaux des barrages où elles décantent. Ainsi, de crue en crue le barrage s'envase ; ce qui diminue sa durée de vie. La solution adoptée a été le dévasement, mais devant la grande quantité de produit rejetée simplement en aval du barrage, le problème d'environnement est apparu.

L'utilisation de cette vase récupérée, dans la fabrication d'un ciment pouzzolanique, contribue à la résolution de ces problèmes. L'étude montre que l'ajout de 30 % de vase calcinée au ciment portland ordinaire (CPA) permet d'obtenir un ciment pouzzolanique. En effet, la quantité de pouzzolane artificielle ajoutée rentre en réaction avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former un silicate de calcium hydraté (CSH) et la géhlénite.

Dans cette étude qu'ils ont menée des précieux résultats ont été ressortis à savoir:

1. la résistance mécanique augmente avec le pourcentage en ciment ajouté et avec l'âge de conservation.
2. le mélange à 30 % de vase calcinée à 750 °C constitue le ciment pouzzolanique honorable puisqu'il conduit à des résistances en compression égales à 85 % de celles obtenues avec le ciment seul.
3. D'après leur analyse chimique effectuée sur le mélange (vase calciné à 750°C et ciment =3/7) et après conservation, des produits sont formés la tobermorite (CSH) et la géhlénite (C₂ASH₈).
4. une étude sur la durabilité pour mieux valoriser ces matériaux et dans des milieux agressifs d'un béton à base d'un liant pouzzolanique composé de vase calcinée et de ciment portland doit être exigée.

Laoufi et al [10] ont aussi conclu que la pouzzolane naturelle améliore la résistance des mortiers dans un environnement acide. Mots clés : Pouzzolane naturelle, attaque chimique, durabilité, acide sulfurique, perte de masse.

Samai [11] a réalisée une étude qui s'articule sur la comparaison de l'évolution des résistances résiduelles, en flexion et en compression mécanique et la perte de masse de quatre formulations de mortiers avec des pourcentages différents de pouzzolane naturelle. Il s'agit de trois formulations des mortiers avec ajout de pouzzolane et la formulation d'un mortier de sans ajout (témoin). Les résultats obtenus montrent le bon comportement des mortiers à haute température environ 400 °C alors que la diminution de la résistance en compression est négligeable par rapport à la résistance à la flexion qui est très influencée par l'augmentation de la température. L'effet de l'ajout de pouzzolane sur la perte de masse n'a été visible qu'à la première température (200 °C), car l'évaporation se produit à une température voisine de 100 °C.

Aouididi [12] a démontré d'après ces résultats expérimentaux obtenus que la quantité d'ajout en pouzzolane et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Chaib et al [13] ont conclu d'une manière générale que l'utilisation de la Pouzzolane (ajout actif) fait réduire la consommation du clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement tel que :

- Réduire l'émission du CO₂ des opérations de production de ciment.
- Maîtriser l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie complet.

Les résultats tirés de ce travail de recherche confirment que les taux de 20% et 30% de pouzzolane contribuent positivement à l'amélioration de la durabilité de la construction. Il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Aichoube et al [14] ont étudié les effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés physico-mécaniques et de durabilité des ciments à base de calcaire (CPJ CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie d'Oued-Sly à Chlef. Les conclusions tirées sont :

- Le remplacement de 10 à 30 % du ciment par la pouzzolane naturelle augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant.
- Le temps de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.
- L'expansion à chaud augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle d'une façon relativement linéaire et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme NA 442 qui est d'environ 10 mm.
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge.
- Les résistances sont comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier contrôle à l'âge de 90 jours.
- L'activité pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir de 28 jours.

✚ Ceci montre que l'activité des pouzzolanes naturelles est très lente.

- A 90 jours, les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle ont des résistances à la flexion qui dépassent celle du mortier contrôle. Ainsi, la résistance à la flexion d'un mortier contenant 25% de pouzzolane naturelle dépasse la résistance du mortier contrôle de 13%.

Houhou et al [15] ont effectué une analyse des caractéristiques physico-chimiques des pâtes pures en fonction du taux d'ajout en pouzzolane et sa finesse. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'hydratation des liants à la pouzzolane s'effectue d'autant plus lentement que la teneur en pouzzolane est importante.
- L'addition progressive de la pouzzolane fait augmenter sensiblement le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- L'augmentation de la finesse de mouture a contribué à une légère augmentation de la consistance normale.
- Les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane.

- Les temps de début et de fin de prise sont raccourcis du fait de l'augmentation de la surface spécifique de l'ajout.

Senhadji [16] a utilisé de plusieurs ajouts pouzzolaniques (la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, la fumée de silice et le méta kaolin) pour la confection des mortiers. Il a indiqué que ces ajouts pouzzolaniques diminuent la maniabilité car leur demande en eau est supérieure à celle du mortier de ciment pure. Afin d'obtenir des consistances voisines de celles d'un mortier normalisé de CEM I, il a maintenu le rapport E/L constant en ajustant la maniabilité par l'utilisation d'un super plastifiant.

Mansour et al [17] ont prouvé que les avantages de l'enduit de calcaire (LF) et de la pouzzolane naturelle (NP) en tant que remplacement partiel du ciment Portland sont bien établis. Avantages économiques et environnementaux en réduisant le CO₂ sont bien connues. Cependant, les deux documents supplémentaires présentent certains défauts. L'ajout de LF au ciment Portland provoque une augmentation de l'hydratation aux premiers âges induisant une résistance précoce élevée, mais il peut réduire la résistance ultérieure en raison de l'effet de dilution. D'autre part, le NP contribue à l'hydratation après 28 jours, améliorant la force aux âges moyens et ultérieurs. Par conséquent, un ciment mélangé ternaire (OPC – LF – NP) avec de meilleures performances pourrait être produit. Dans cet article, des prismes de mortier dans lesquels le ciment Portland a été remplacé par jusqu'à 20% de LF et 30% de NP ont été testés en résistance à la flexion et à la compression à 2, 7, 28 et 90 jours. Certains échantillons ont été testés sous des solutions de sulfate et d'acide et pour la perméabilité aux ions chlorure. Les résultats montrent que l'utilisation de ciment mélangé ternaire améliore le jeune âge et les résistances à la compression et à la flexion à long terme.

L'objectif principal de l'étude menée par Hamadache [18] était de fournir davantage de données sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle et la perlite située dans la région de l'ouest de l'Algérie comme substituant au ciment pour confectionner des mortiers avec différents pourcentages d'ajouts pouzzolaniques. L'utilisation de ces deux matériaux a permis d'évaluer leurs effets sur la corrosion dans les milieux agressifs comme l'attaque sulfatique et chlorure. Le mortier témoin sans pouzzolane a servi de référence. Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de la pouzzolane naturelle. Les matériaux cimentaires ont des caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques et thermiques qui évoluent au cours du temps ce qui explique la complexité de leur comportement.

Un autre travail différent de ceux des chercheurs cités précédemment [19], consiste à étudier l'effet des ajouts de minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers en verre recyclés. Une méthodologie spécifique basée sur la substitution progressive du volume de ciment (10, 20, 30%) par des adjuvants minéraux dont le volume absolu de phases solides et l'ouvrabilité sont maintenus

constants a été utilisée. L'agrégat choisi pour réaliser les mélanges de mortier est du sable recyclé issu du broyage des vitrages connu par leur réactivité vis-à-vis de la réaction alcaline-silice. Les adjuvants minéraux utilisés sont différents par leur nature minéralogique, leur composition chimique et leur granularité. Pour cette étude, deux ajouts minéraux (laitier granulé de haut fourneau et pouzzolane naturelle de Beni-Saf) ont été considérés. Les différents résultats ont montré que l'incorporation de laitier granulé de haut fourneau et de pouzzolane naturelle de Beni-Saf dans des mortiers de verre recyclés fragiles améliore leur comportement mécanique et leur ductilité.

Belas et al [24] ont montré que l'utilisation des additions minérales, comme substitutions au ciment, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi, est une pratique inconnue par les constructeurs de notre pays. L'addition minérale utilisée est la pouzzolane naturelle qui se trouve en quantités considérables dans l'ouest algérien (Béni-Saf) et qu'il faut nécessairement valoriser. Pour cela ils ont confectionné trois bétons à base de pouzzolane (20, 25 et 30%), dont nous avons mesuré les résistances à la compression à différentes échéances, et un béton témoin de référence pour la comparaison. Et ils ont fait ressortir les points suivants:

1. la pouzzolane de Béni-Saf étant est un produit naturel et ne passe pas par des processus industriels d'énergie coûteuse, est beaucoup moins chère que le ciment, qui lui, passe par des processus très onéreuse.
2. la substitution de 20 % de pouzzolane de Béni-Saf au ciment Portland confère au béton, dans lequel elle est incorporée, donne des performances mécaniques égales sinon surpassent à long terme, donc selon leurs résultats c'est le dosage idéal.
3. il était possible d'approcher les performances mécaniques d'un béton de référence, c'est à-dire d'un béton sans pouzzolane pour le confirmer et le développer par des essais complémentaires à ces résultats.
4. à l'état frais: les teneurs en air occlus des quatre bétons ont donné les résultats tels que l'introduction de la pouzzolane dans ces bétons, ont données des modifications due à la différence de finesse entre le ciment et la pouzzolane.
5. à l'état durci (résistances à la compression): le béton à base de ciment pouzzolanique pour un dosage à 20 % de pouzzolane donne, à long terme, des performances mécaniques pratiquement analogues à celles du béton témoin. Cela prouve que l'effet pouzzolanique joue un rôle pour ce béton (l'activité pouzzolanique est le principal paramètre responsable de l'augmentation des résistances).

LES SEDIMENTS FLUVIAUX

2.1. Introduction:

Les cours d'eau transportent les particules solides résultant de l'érosion et les déposent dans d'autres sites en fonction de leurs dimensions, de la vitesse de l'écoulement et de la nature des parois du cours d'eau ; les particules les plus grosses sont déposées plus en amont que les particules fines (sédimentation, décantation).

Une solution a été adoptée en Algérie pour prolonger sa durée de vie, c'est le dévasement. Cette solution s'est avérée très onéreuse en plus de sérieux problèmes causés par le rejet des vases en aval du barrage sur l'environnement jusqu'à l'embouchure du cours d'eau. L'utilisation de cette vase récupérée, dans la fabrication d'un ciment pouzzolanique, contribue à la résolution de ces problèmes [36].

La composition des sédiments est variée. Elle dépend de la constitution des éléments de nature minérale, de l'eau et des matières organiques ainsi que leurs influences sur les propriétés géotechniques du sédiment.

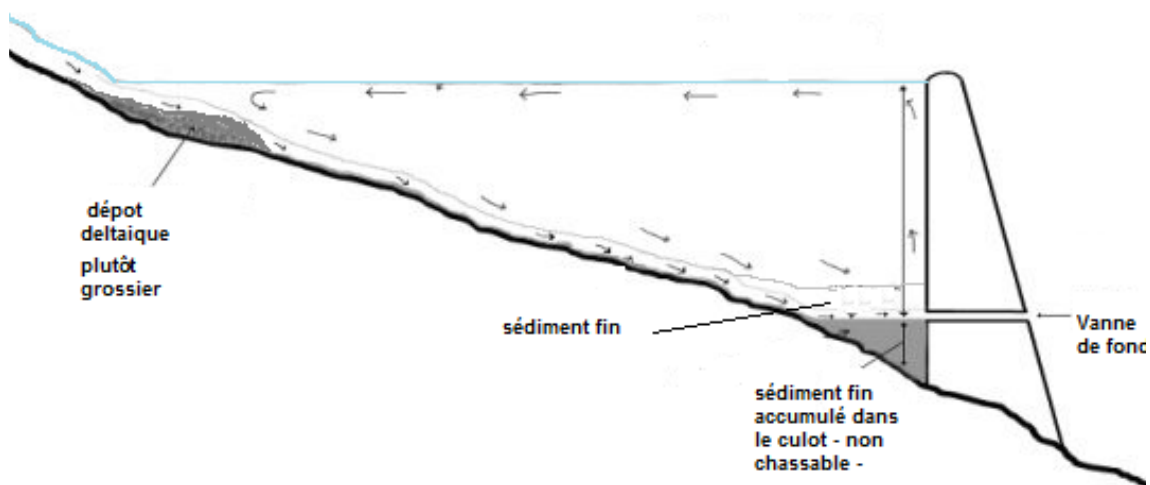


Figure I.2.1. : Le dépôt des Sédiments Dans les retenues

2.2. Les Sédiments De Dragage (la Vase):

On distingue 2 origines aux sédiments:

Origine endogène: les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes {P3} comme les plantes aquatiques, les cadavres d'animaux.

Origine exogène: il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [36].

2.3. Les Procéssus De Sédimentation Au Sein D'un Barrage:

La sédimentation des particules dans un système dilué présente un comportement différent du tassement-consolidation des suspensions concentrées. Dans le cas d'une suspension diluée, on observe successivement les quatre étapes suivantes :

- La période de floculation.
- La période de sédimentation à vitesse croissante (loi de Stokes).
- Le tassement du sédiment à vitesse décroissante.
- La consolidation très lente du sédiment.

Il est communément considéré que les « Vases » correspondent à la fraction inférieure à 63 μm .

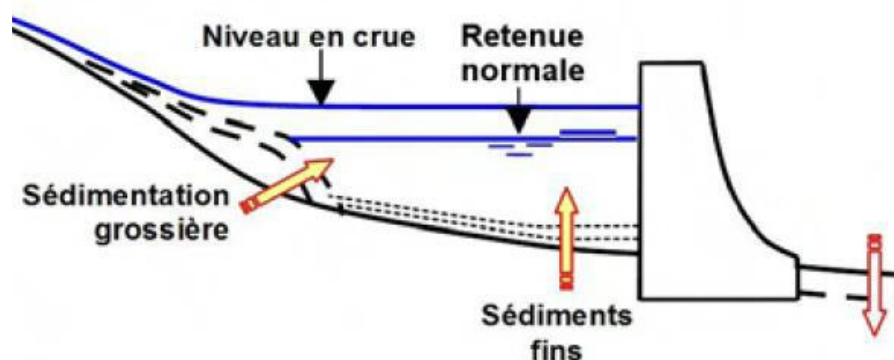


Figure I.2.3.a : Mécanismes de déposition (Sédimentation, décantation).

{P3}Un macrophyte est un végétal aquatique d'eau douce visible à l'œil nu. D'algues macroscopiques ou en colonies macroscopiques, des bacillariophytes ou des Characées.

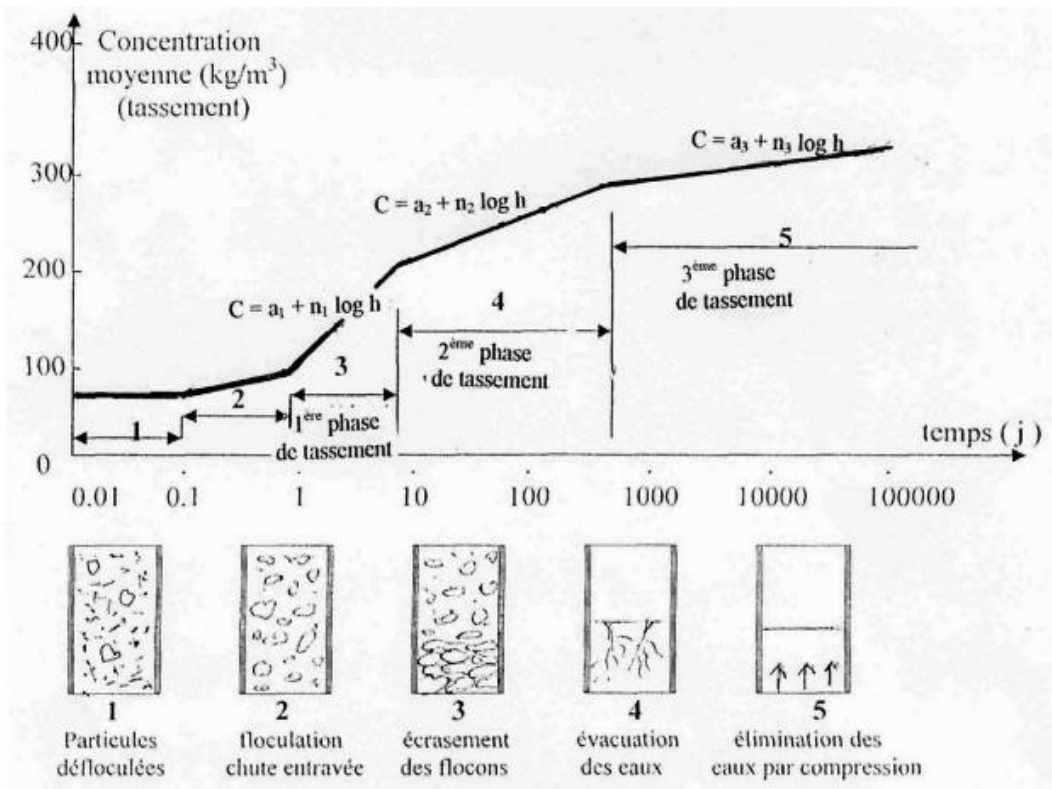


Figure I.2.3.b : évolution de la concentration dans le temps (Migniot 1989)

✚ L'évolution de la concentration suit une loi simple établie par le Laboratoire Central Hydraulique de France (LCHF) :

$$C = C_s + n_1 \times \log_{10}(h) \dots\dots\dots \{F1\}$$

Avec h = profondeur en cm.

C_s = concentration de la surface de dépôt.

C = concentration du dépôt.

Pendant le tassement, n_1 tend à diminuer et la consolidation est modélisée par des segments de droites d'équation : $C = a_i + n_i \times \log_{10}(h)$.

2.4. Dépôt des sédiments :

Dès qu'une particule est mise en suspension, elle commence aussitôt à sédimenter.

Sa vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes : $V = C \cdot d^2 \dots \{F2\}$

D'où C est une constante égale à : $C = \frac{\rho_p - \rho_f}{18 \cdot \mu} \cdot g \dots\dots\dots \{F3\}$

V représente la vitesse de sédimentation

μ La viscosité du fluide

ρ_f Sa masse volumique.

ρ_p Celle de la particule.

d est le diamètre de la particule.

2.5. Éclaircissement sur La Vase :

2.5.1. Qu'est-ce qu'une vase ?

Le nom de vase (mot emprunte au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent **une phase minérale** dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, **une phase organique** et **une phase liquide** [59].

2.5.2. La vase :

Se sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2mm, dont la matière organique M.O est comprise entre 2 et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques. Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires [59].

Dans notre travail, la vase est valorisé en tant que substituant au clinker après un traitement thermique (calcination à 750 °C).

La valorisation de la vase comme un substituant de clinker présente les avantages suivants :

- élimination et valorisation d'un déchet ;
- réduction de la consommation thermique (énergie de combustible) ;
- réduction des émissions de CO₂

2.5.3. Structure physico-chimique de la vase :

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres.

IL y a quatre éléments principaux constitues de la vase :

1. **La matrice minérale** (quartz, feldspaths ou carbonates).
2. **La fraction argileuse** (kaolinite, illite ou smectite).
3. **la fraction organique** (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et Humiques).
4. **Une certaine quantité d'eau**, présente sous différentes formes [59].

2.6. Intérêts des sédiments pour la fabrication du ciment :

Les sédiments sont des véritables atouts car ils peuvent permettre l'économie de la phase de broyage. En revanche, comme il a été rappelé, il est important de connaître précisément la composition minéralogique des sédiments. Celle-ci peut avoir un rôle de correcteur de la minéralogie des matériaux issus des carrières sources.

A l'heure actuelle, les sédiments peuvent constituer un gisement Potentiel pour limiter l'extraction de matières premières. Ils ne sont plus à considérer comme un déchet couteux à éliminer mais comme une réelle ressource [36].

2.7. Les Dragages Mécaniques

Les opérations de curage sont peu fréquentes parce qu'elles sont techniquement difficiles à mettre en œuvre (profondeur d'extraction, volume de sédiment important) et coûteuses (amenée/repli de drague spécifique, acheminement du matériel en altitude) [36].

Au regard de l'homogénéité des matériaux à extraire (sédiments fins, absence de macro déchets), les techniques de curage hydraulique sont particulièrement adaptées (drague aspiratrice stationnaire avec une élinde modulable pour intervenir au-delà des 30 mètres avec des variations du niveau d'eau) {P4}.

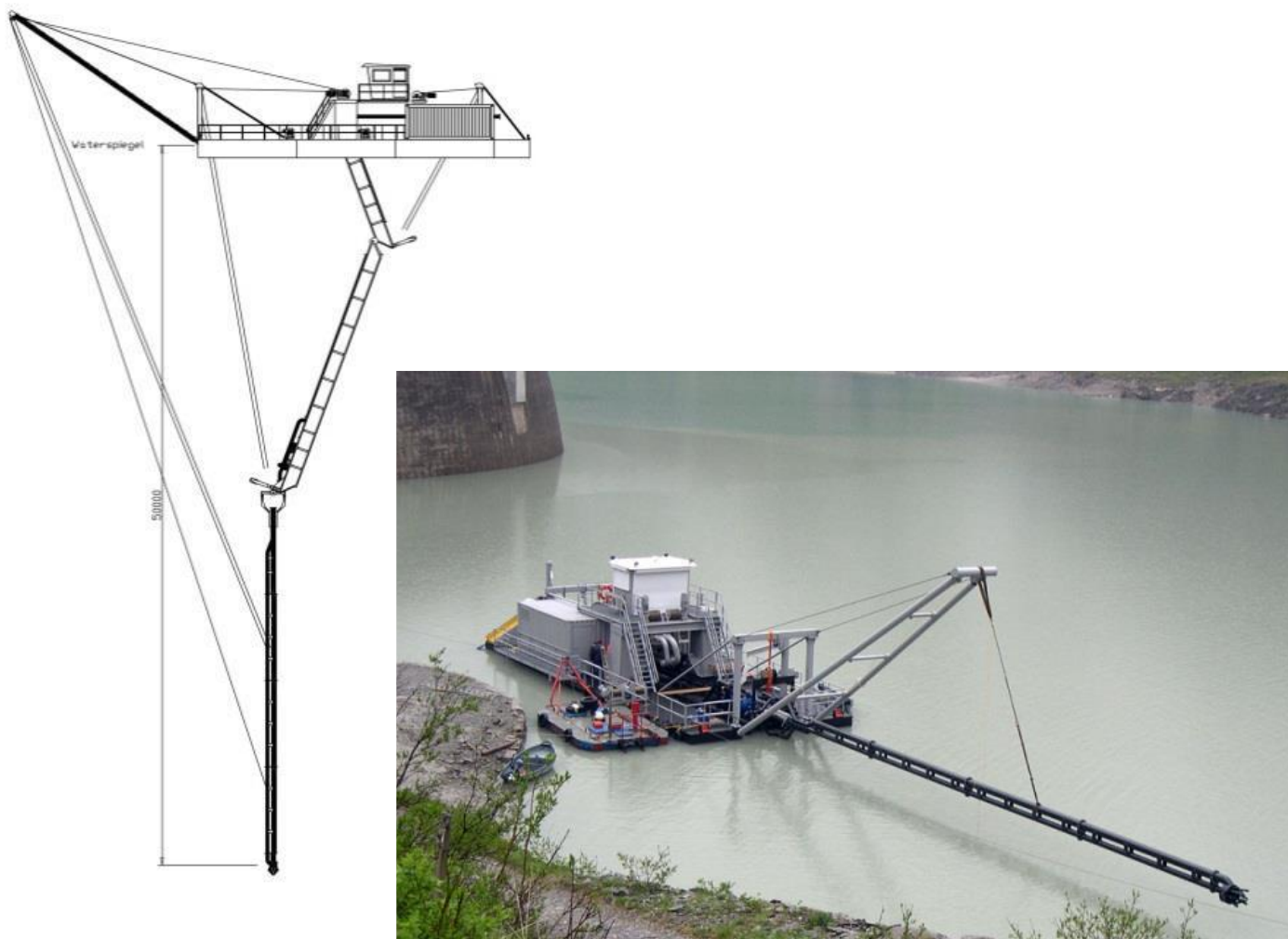


Figure I.2.7.: Exemple de drague aspiratrice à élinde modulable (VIS)

{P4} La drague à élinde traînante (aussi appelé drague aspiratrice en marche) est un navire qui aspire les matériaux présents au fond de l'eau à l'aide d'un ou plusieurs tubes (élinde)

2.8. Caractérisation Physico-chimique de la vase :

2.8.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été amenée selon deux techniques distinctes : une première mesure par tamisage pour la détermination de la fraction granulaire supérieure à 20 μm , puis une analyse complémentaire granulomètre Laser qui nous a permis une caractérisation plus précise de la fraction fine.

2.8.2. Surface spécifique

La surface spécifique est le rapport entre la surface d'un solide et sa masse ou son volume. La valeur de la surface spécifique d'un matériau dépend de la méthode de mesure utilisée.

✚ Principe de la surface spécifique par perméabilimétrie (Appareil Blaine)

- Le perméabilimètre Blaine permet de mesurer l'aire massique d'une poudre. D'ailleurs cette technique est couramment employée pour déterminer la « finesse Blaine », sous forme de surface massique, des ciments ou de certaines additions pour le béton hydraulique en appliquant la norme NF EN 196-6 [54] relative à cet essai.



Figure I.2.8.2 : perméabilimètre (Appareil Blaine)

2.8.3. Teneur en matière organique

Pour toute valorisation des sédiments pressentis, la teneur en matière organique est un paramètre très influent, plus la teneur est élevée, plus des caractéristiques indésirables à la valorisation sont à prévoir. La détermination de la proportion de matière organique s'avère donc importante.

✚ Principe de la teneur en matière organique

- La teneur en matière organique a été déterminée à partir de la mesure du pourcentage pondéral de matière organique après calcination à 550°C sur une durée de 4h selon la norme NF EN 12879 [71]. Il s'agit donc d'une estimation à partir de la matière volatilisée par calcination de la matière sèche.

2.9. Citation de quelques recherches sur l'utilisation des sédiments fluviaux.

Belaribi [25] a contribué à la valorisation de la vase traitée du barrage de Chorfa et de Fergoug, (située à l'ouest algérien) en tant que substituant minéral partiel au ciment CPA CEMI 42.5 dans la composition des mortiers et des bétons autoplaçants. Il s'agit de comparer l'influence de l'incorporation de cette vase calcinée à celle de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (situé, également à l'ouest algérien) dans les BAP sur leurs caractéristiques physico-mécaniques et sur leur durabilité à court, moyen et long terme. Certains sédiments traités acquièrent des propriétés pouzzolaniques et peuvent être utilisés en tant qu'ajouts ou substitués au ciment. Ceci peut faire de la technologie des bétons une voie privilégiée pour leur valorisation. L'étude est menée sur quatre BAP, le premier à base de 20 % de pouzzolane naturelle de Béni-Saf (BAP-PZ), le deuxième et le troisième incorporant 20 % de la vase calcinée issue des sédiments de dragage du barrage de Fergoug (BAP-VF) et de celui de Chorfa (BAP-VC) et enfin un BAP témoin sans ajouts pour le besoin de comparaison. Les résultats de son étude lui a permis, et ce suite à la caractérisation physico-chimique et minéralogique de la fraction solide des vases extraites du barrage de tirer certains conclusions qui sont comme suit :

- 1- Il a constaté que la vase traitée du barrage de Chorfa peut apporter une contribution aux études menées sur les sédiments de dragage entrant comme ajout minéral substituable partiellement au ciment avec des pourcentages pouvant atteindre les 30% semble réalisable.
- 2- une analyse DRX effectuée sur le sédiment brute lui a révélé que la présence de kaolinite dans la vase, après calcination à 750°C la kaolinite c'est transformer en méta kaolin, ce dernier est un matériau considéré pouzzolanique depuis 1963.
- 3- le dosage en super plastifiant doit être ajusté au pourcentage de substitution en vase calcinée, et ce pour le maintien de l'ouvrabilité, qui est considérée l'un des dénominateurs commun entre les différents BAP de cette étude au même titre que le rapport $E/L_{\text{équi}}$, le squelette granulaire et le volume de pâte.
- 4- Les BAP à base de vase calcinée lui ont affiché des bonnes performances mécaniques caractérisés par des résistances à la compression très satisfaisantes (les résistances sont similaires au BAP témoin pour BAPV- 30% et meilleures pour les BAP de 10% et 20 % de substitution).
- 5- La grande finesse de la vase et sa structure poreuse ont été un obstacle pour des taux de substitution supérieurs à 30%, d'où la nécessité d'explorer d'autres adjuvants plus performant afin de palier à ce problème.
- 6- D'autre part, l'ensemble des BAP à base de vase calcinée présentent de faibles porosités avec des tailles de pores n'excédant pas les 10 nm ce qui est un facteur positif pour qualifier la durabilité des BAP de cette étude.

✚ Les résultats de cette étude doivent être soutenus par d'autres essais de durabilité afin de pouvoir qualifier plus explicitement l'effet des sédiments traités à caractère pouzzolanique dans les BAP.

Bouhamou et al [26] ont menés une recherche qui a porté sur l'influence de vase calcinée dans les bétons auto plaçant, ces nouveaux bétons innovants ont des avantages inouïs, mais du fait d'une formulation complexe, ces derniers présentent des déformations différées mal comprises à ce jour; notamment le phénomène du retrait. La démarche de l'étude était en premier lieu est d'évaluer l'activité pouzzolanique de cette nouvelle matière, sa caractérisation à l'état frais, en deuxième lieu, faire une substitution au ciment et confection d'un béton auto plaçant; après quoi ils ont entamé les expériences de caractérisation du béton obtenu à l'état frais et durci.

Les principales conclusions auxquelles ils sont parvenus sont :

- La réaction pouzzolanique commence à être perceptible à long terme en améliorant les résistances en compression et traction.
- Une substitution de 10% de ciment est une teneur optimale pour donner les meilleures performances mécaniques suivi du 15% et 20 % respectivement.
- Le retrait et la perte de masse sont moins élevés pour un taux optimal de 20 % de substitution en raison d'une amélioration de la microstructure, rendant la matrice plus compacte et minimisant la diffusivité suivi aussi de 15 % et 10 % .

En final ils ont déduit qu'une substitution de 15 % du ciment par la vase est le taux le plus intéressant qui s'avère optimal, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les deux critères d'amélioration de résistance et réduction du retrait.

Belas et al [27] se sont penchés sur la gestion et le devenir des boues de dragage. Cette gestion qui commence toujours par une phase de caractérisation a pour objet de déterminer les propriétés qui permettent de préciser les vocations ultérieures du produit.

Dans un esprit de développement durable et pour une bonne gestion de l'environnement, plusieurs domaines pour l'utilisation de la vase en tant que matière première et non plus comme déchet ont été ciblés notamment le génie civil Le but de cette étude est d'utiliser cette même vase comme substitution d'une partie de ciment en vue d'obtenir un ciment composé et de faire des essais pour déterminer quelques caractéristiques (physiques et mécaniques) du béton dont il est composé. Des essais à l'état frais et durci ont été menés sur des bétons contenant 10%, 15% et 20% de vase par rapport au dosage en masse du ciment. Les premiers résultats sont encourageants et promettent un avenir meilleur pour la vase.

Hadj Sadok [28] a apporté sa contribution dans l'objectif de valoriser ces déblais de dragage. Deux parties ont été prévues ; La première partie consiste à optimiser et caractériser la réaction pouzzolanique d'un éco-mortier à base de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment ; en caractérisant leurs performances physiques, chimiques, rhéologiques et mécaniques. L'influence de la température de cure sur les différents types de mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage a été mise en évidence dans cette étude. Les différents types de mortiers ont été portés à plusieurs basses températures de cure sèche 10, 20 et 40°C ; avec des échéances allant de 3 jusqu'à 180 jours. Les meilleurs résultats du comportement mécanique des mortiers confectionnés ont été observés à des températures de cure de 20°C et 40°C. Avec une accélération de l'activité pouzzolanique à 90 jours pour la cure à 40°C et 180 jours à 20°C le développement des résistances à la compression est relativement supérieur à celui des résistances du mortier témoin. Une autre partie portera essentiellement sur l'analyse de cycle de vie (ACV) des sédiments dragués dans son environnement depuis l'extraction des sédiments jusqu'au traitement des déchets. Les résultats de cette étude sont comparés par rapport à d'autres études effectuées en Algérie. L'évaluation environnementale du processus expérimentale a montré que les mortiers, les pâtes et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

LA POZZOLANE

3.1. Introduction :

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages.



Figure I.3.1: matériaux pouzzolanique (en vrac)

3.2. Définition :

Roche basaltique, la pouzzolane est un **matériau extrêmement durable**, qui ne craint aucune intempérie et ne se décompose pas, elle est constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes sont classées en trois catégories :

- ✚ **Les constituants actifs:** phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- ✚ **Les constituants inertes:** phase cristallisée autre que les zéolites.
- ✚ **Les constituants nocifs:** substances organiques et argiles gonflantes. (Selon le Pr. Massaza).

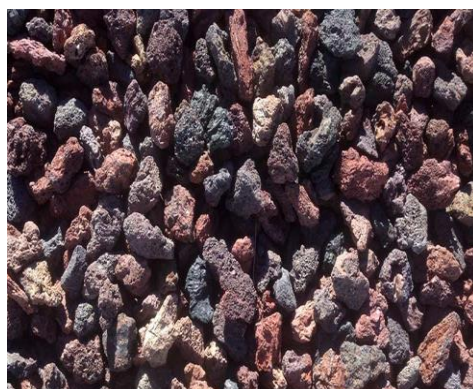


Figure I.3.2: Matériaux pouzzolanique (rougeâtre)

3.3. La composition chimique de la pouzzolane:

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO).

Une composition chimique en moyenne :

45% de silice, 15% d'alumine, 15% d'oxyde de fer.

Elle contient également, de la chaux, du sodium, du potassium, et de nombreux oligoéléments.



Figure I.3.3: une roche naturelle constituée par Des scories (projections) volcaniques basaltiques

3.4. Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

✚ Un matériau à une caractéristique d'une pouzzolane si :

- Sa composition chimique vérifiée : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$ (selon ASTM C 618)
- Son indice d'activité I est : $0,67 < I < 1$ (Laoufi 2002)
- Sa teneur en verre $> 34\%$ [41].

a. L'indice d'activité :

C'est une caractéristique importante. Elle est calculée en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans vase (T) et celle du mortier contenant 25% de vase (25 PA) en substitution par le biais de la formule suivante [41]:

$$I = \frac{Rc_{28T}}{Rc_{2825PA}} \dots\dots\dots\{F4\}$$

b. La teneur en verre :

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour cela, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice-Chaux). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques cette différence doit être au moins supérieure ou égale à 34% pour que les pouzzolanes soient acides et contiennent une phase vitreuse [41].

3.4.1. Les Propriétés de la pouzzolane :

La pouzzolane présente dans certaines circonstances, une meilleure performance du ciment Portland comme par exemple:

- **faible développement de chaleur:** en fait, car il y a une quantité moindre de mâchefer Portland est inférieure à la teneur en aluminat tricalcique, du silicate tricalcique, qui sont les composants du clinker qui produisent une plus grande chaleur d'hydratation.
- **une plus grande résistance à l'attaque du sulfate:** en effet, comme il y a une moindre quantité de clinker de Portland est inférieure à la teneur en aluminat tricalcique, qui est l'élément sensible du ciment à l'action des sulfates (ettringite) [P3].
- **une plus grande résistance au délavage à l'eau:** en fait, car il y a une quantité moindre de clinker Portland est inférieure à la teneur en chaux. En outre, étant donné que la pouzzolane réagit avec la chaux, il y aura une réduction supplémentaire de la quantité d'hydroxyde de calcium libre. L'hydroxyde de calcium libre en présence d'eau agressive infiltre la création d'une structure poreuse et donc plus accessible aux agents extérieurs, par conséquent une teneur en chaux inférieure détermine une matrice de ciment plus compacte et une plus concrète durable.

3.4.2. Les Caractéristiques de la pouzzolane :

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

a- Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

b- Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

3.5. Types de pouzzolanes :

3.5.1. Pouzzolane naturelle :

C'est un produit d'origine volcanique essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites. [32]

3.5.1.1. Matériaux d'origine volcanique (Les roches Pyroclastiques) :

Les roches pyroclastiques résultent des éruptions volcaniques explosives qui projettent les particules minuscules du magma fondu dans l'atmosphère [41].

3.5.1.2. Matériaux d'origine sédimentaire :

Les argiles et les terres de diatomées sont des roches sédimentaires capables de se combiner avec la chaux. Les premières proviennent du changement de roches magmatiques tandis que les dernières se forment à partir des squelettes siliceux des micro-organismes (diatomées) déposés en eaux douces ou de mer.

3.5.1.3. Matériaux d'origine mixte (roche hybride) :

Se sont des dépôts stratifiés d'une roche friable (Sacrofanite) composée de matériaux d'origine différente (volcanique, sédimentaire et organique). [41]

3.5.2. Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler. [32]

3.5.3. Pouzzolane calcinés naturelle

En plus de pouzzolane naturel, dans la construction de la pouzzolane naturelle calcinée il est également utilisé. Ces pouzzolanes sont constituées par des matières volcaniques, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement [100].

Même cette pouzzolane, finement broyée, est caractérisée par une réaction pouzzolanique et est donc utilisée dans le domaine de la fabrication des ciments.

UNI EN 197-1 [98] identifie pouzzolane avec les abréviations suivantes:

- **P** pour le naturel.
- **Q** pour le calciné naturel.

Il est donc préférable d'envisager une épaisseur d'enrobage supérieur à 20 mm dans le cas des mélanges pouzzolanique, afin de pouvoir prolonger la durée de vie d'un béton à la pouzzolane.

2. les dégradations dans un milieu acide ne seront effectivement à redouter pour un béton. La pouzzolane naturelle présente un remède à ce problème. Là encore, la perméabilité demeure le facteur essentiel, le taux de la portlandite constituera un indicateur de durabilité primordiale. Ainsi le choix d'utiliser la pouzzolane comme substituant au ciment est avantageux du point de vue économique et écologique, et offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers voir aussi celle des bétons.

Logbi et al [22] Ont conclu que Le remplacement du ciment par 15% de pouzzolane naturelle de Beni saf, ou 20% de laitier de blast fourneau d'El-hadjar améliore les performances mécaniques du mortier à un âge précoce et long que le mortier sans ajout, mais 10% des charges de calcaire de Ghardaïa n'ont un effet positif qu'à un âge précoce. Pour la durabilité, les trois ajouts ont développé un effet bénéfique sur la résistance mécanique sous le libre aquifères d'eau, tandis que leurs effets sont différents sur l'absorption capillaire.

Habert et al [23] ont documenté l'effet potentiel des minéraux secondaires sur le développement de la résistance des mortiers pouzzolaniques. L'effet sur l'activité pouzzolanique a été testé par des mesures de résistance sur mortiers normalisés à 1,7 et 28 jours. Une amélioration de la résistance de tous les ciments mélangés a été constatée tout en déstabilisant les minéraux d'altération secondaire. Cette étude ouvre donc de nouvelles perspectives pour une meilleure utilisation des matériaux pouzzolaniques naturels dans l'industrie du ciment.

[P3] La détérioration provoquée par l'attaque des sulfates est due à la formation des minéraux : ettringite, thaumasite ou de gypse. Cette formation provoque des gonflements, ainsi de l'écaillage, de la fissuration, de l'expansion et d'autres formes d'endommagement (Bellman, Moser, & Stark, 2006).

La formation de thaumasite ou le silico-aluminate de calcium hydraté est une forme des minéraux gonflants qui se forment dans les pores capillaires du béton. Il se décompose sous forme d'aiguille dont la longueur est comprise entre 0,5mm et 1,5mm [74], dans des conditions de basses températures (4°C - 5 °C) et avec un taux d'humidité élevé. Dans quelques cas, on trouve la présence concomitante de thaumasite et d'ettringite (Regourd, 1978 ; Louarn, 1993). La formation de la thaumasite nécessite un apport de silice réactive (libre ou pouvant facilement être libérée par des minéraux en voie d'altération), de carbonates, en plus des sulfates.

LA DURABILITE

4.1. Introduction:

En Algérie et partout dans le monde, les chercheurs des matériaux de construction essayent par tout moyen d'avoir une combinaison de mortier ou béton qui fait face aux multiples contraintes qui les dégradent et de mettre leur durabilité en jeu c'est-à-dire une durée de vie, qui ne répond pas à la longévité des structures en béton requis. Les attaques chimiques font partie de cette menace.

Pour cela, La durabilité des matériaux cimentaires est à la fois liée aux propriétés intrinsèques du matériau et à celles de son environnement de service, c'est-à-dire aux conditions physiques et chimiques auxquelles il est exposé. Elles sont souvent attachées à leurs capacités de résister à n'importe quelle attaque chimique et faire face à toutes pénétrations d'agents agressifs, et qui par la suite endommagent et bouleversent les propriétés physiques mécaniques à long terme. Leurs porosités peuvent être définies comme étant une capacité à assurer une durée de service requise, surtout pour les ouvrages importants en Génie civil (ponts, barrage, etc.). Pour cela, et pour mieux les préserver contre les éventuelles dégradations et les conséquences qui engendrent surtout la diminution de leur durabilité avec le temps. Une prise en compte préventive des attaques chimiques qui peut affecter la durabilité des ouvrages est impérative lors de la conception et de l'élaboration de ces ouvrages.

A cet effet, on a posé cette problématique concernant le comportement d'un mortier à base de pouzzolane et sédiments fluviaux vis-à-vis aux attaques chimiques

4.2. Qualité de la durabilité :

La qualification de la durabilité est déterminée par des critères appropriés et ciblés, basés sur des essais de laboratoire selon les normes en vigueur. L'ensemble des Résultats obtenus permettent ainsi de conclure, si l'utilisation de la pouzzolane avec ajout des sédiments fluviaux améliore les performances des mortiers de point de vue durabilité.



Figure I.4.2: Durabilité et recyclabilité du béton

4.3. Durabilité et économie :

La durabilité est un objectif à atteindre par les chercheurs, on peut dire que même c'est le métier de ces derniers qui sera justifié par des essais aux laboratoires et combinaison de mortier par des différents matériaux non exploités qui peuvent donner des résultats surprenants, dans le but d'atteindre à un mortier ou béton au moindre coût et avec une durabilité selon nos espérances.

Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité [29].

a. Règle 1 :

L'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.

b. Règle 2 :

La communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements.

Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif.

4.4. Béton Durable Et Béton Résistant :

La porosité est le paramètre de premier ordre qui 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 [29].

4.5. Principales Techniques Expérimentales :

Les techniques d'analyse utilisées dans le cadre d'une étude de la durabilité des bétons peuvent être divisées en deux catégories : macroscopiques et microscopiques.

1- Techniques macroscopiques :

- Variation de la masse : un gonflement se traduit par un gain de masse tandis qu'une perte de matière par ruine fait chuter brutalement la masse.
- La mesure de l'allongement (expansion) : c'est le paramètre qui démontre sans équivoque l'existence d'un gonflement. N'est mesurable que sur les échantillons équipés de plots, C'est-à-dire les mortiers.

- Mesure de la vitesse de propagation du son : permet d'évaluer de manière non destructive l'évolution des propriétés mécaniques du béton puisque la vitesse est corrélée au module dynamique. Une chute du module dynamique traduit un endommagement global du béton.
- Porosité à l'eau : c'est le premier paramètre qui gouverne la résistance et la perméabilité des bétons. Cette mesure permet donc d'identifier à priori les bétons les plus durables.
- La mesure de la résistance à la compression et à la traction : mesure les propriétés mécaniques des bétons et des mortiers, notamment leur évolution au cours de l'exposition à l'environnement agressif.
- Contrôle visuel de la fissuration : évalue le degré d'endommagement de l'échantillon testé, aide au diagnostic de l'altération [29].

2- **Techniques microscopiques :**

- La microscopie électronique à balayage (MEB) avec microsonde EDS : identifie les modifications de la microstructure et de la micro texture des bétons et des mortiers. Cet outil permet de réaliser le diagnostic de l'altération.
- Analyse thermogravimétrique (ATG) : mesure quantitative des composants majeurs des matériaux. Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons auto plaçant.
- La diffraction aux rayons X (DRX) : analyse des différents minéraux qui composent les bétons La DRX reste assez limitée en quantitatif, elle permet d'identifier les phases bien cristallisées comme la portlandite, le monosulfoaluminate (l'AFm), le gypse, l'ettringite (l'AFt) non colloïdale et d'autres phases minérales hydratées de la pâte de ciment. [29]

4.6. **Facteurs Influençant La Durabilité :**

La durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle et la comparaison des BAP avec les bétons vibrés nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif.

Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations

mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique [79].

4.61. La perméabilité du béton

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité représente le premier indicateur de la durabilité de béton [79].

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : l'eau, pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène.

Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes manières, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte.

A proprement parler, la perméabilité concerne l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. Cependant, le mouvement des différents fluides dans le béton ne se fait pas seulement par écoulement à travers le réseau poreux, mais aussi par des mécanismes de diffusion et d'absorption, de telle sorte que, en réalité, nous sommes plutôt concernés par ce que l'on pourrait appeler la pénétrabilité du béton. Quoiqu'il en soit, nous utiliserons l'expression couramment acceptée de « perméabilité » du béton pour décrire globalement tout mouvement des fluides dans et au travers du béton.

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles.

4.7. Les Attaques Chimiques Des Bétons :

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De part 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. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone [79].

4.7.1. Actions des acides :

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium..

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- .

4.7.2. Sources des acides :

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- 1- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- 2- 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.
- 3- 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 de la dégradation de la surface exposée du béton.

4.7.3.Actions des sulfates :

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 équivalente [79].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut rencontrer des concentrations élevées (>5%).

4.8. Autres propriétés de durabilité

Ce sont plus particulièrement **les cycles de gel-dégel** qui engendrent des dégradations progressives dans le béton. Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers des zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un nouveau cycle de gel. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des bétons.

4.9. Revues bibliographiques sur la durabilité.

La durabilité est définie par la norme NF X 50-501 comme « L'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint ». La prédiction (ou l'évaluation) de la durée de vie, que ce soit en

phase de conception des ouvrages neufs ou en phase de maintenance des ouvrages existants, répond à des enjeux économiques et réglementaires forts, tant pour l'exploitation que pour la programmation des actions de maintenance ou de renouvellement. Pour évaluer la durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de ces dégradations des matériaux, peut être limitées par :

- 1 - La pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures.
- 2 - Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali- réaction, attaques sulfatiques.
- 3 - Les cycles de gel- dégel qui entraînent gonflements et fissuration du béton par gel interne et un écaillage des surfaces aux sels de déverglaçage.

Kaid et al [21] ont essayé l'application d'une approche basée sur la performance sur la durabilité du béton fabriqué avec une pouzzolane naturelle algérienne. L'évaluation de la durabilité du béton a été basée sur la comparaison des indicateurs de durabilité avec un béton de référence généralement trouvé en Algérie. Les propriétés mesurées comprenaient des indicateurs généraux (porosité de l'eau, perméabilité aux gaz, absorption capillaire et teneur en Portlandite) et des indicateurs spécifiques liés aux phénomènes de dégradation susceptibles de se produire en Algérie: corrosion induite par la carbonatation et les chlorures, et attaques chimiques par les sulfates et les acides. Pour les dégradations spécifiques, les indicateurs mesurés comprenaient les profondeurs de carbonatation, les coefficients de diffusion du chlorure, la perméabilité au chlorure, les profils d'expansion et de sulfate, et la profondeur de la lixiviation due à l'attaque du nitrate d'ammonium. Les résultats ont montré que les indicateurs généraux de durabilité étaient presque équivalents pour tous les types de béton testés, soulignant l'importance d'utiliser des indicateurs spécifiques pour chaque type d'exposition. Les résultats d'indicateurs spécifiques de corrosion et d'attaques acides ont montré que l'augmentation de la teneur en pouzzolane conduisait à une résistance plus élevée du béton. Ainsi, il est possible d'améliorer la durabilité des bétons typiques actuellement fabriqués en Algérie en utilisant des matériaux locaux.

M. R. Khelifa [29] il a remarqué que les bétons les moins résistants aux différentes expositions sulfatées sont ceux à base de ciment CEM II/A 42,5, c'est-à-dire le CEM II/59 et le CEM II/49. Les bétons CEM I/59 et CEM I/49, qui sont à base de ciment CEM I 42,5 PM-ES résistent aux sulfates et se comportent sans signe d'altération face aux différentes ambiances étudiées. La plus faible résistance aux sulfates est celle du béton CEM II/59 comparée à celle du béton CEM II/49, Ils sont à base du même ciment mais c'est la différence du rapport E/C qui modifie leur comportement. Celui de

rapport E/C = 0,59 se dégrade plus vite et de manière plus importante que celui de rapport E/C = 0,49, c'est probablement, l'effet de la porosité.

Il a aussi affirmé [29] que le brouillard salin n'est pas un protocole discriminant pour l'étude de la durabilité de nos bétons vis-à-vis à l'attaque sulfatique externe. Ainsi 1 % de gaz SO₂, qui est déjà une quantité très élevée par rapport à une valeur réellement mesurée dans l'atmosphère, est peut être un trop faible pourcentage pour un protocole d'accélération d'une attaque sulfatique externe d'origine atmosphérique. L'immersion séchage à 105°C teste plutôt la résistance à la précipitation des sels et non pas la réaction sulfatique externe de nos bétons. Ce protocole ne vise donc pas les objectifs de notre étude. L'immersion complète et l'immersion / séchage à 60°C sont les deux protocoles qui ont endommagé au moins un béton par une attaque sulfatique externe. L'endommagement du béton CEM II/59 exposé à l'immersion / séchage à 60°C a été plus rapide que dans le cas de l'exposition à l'immersion complète. Par contre, l'endommagement a été plus prononcé dans le deuxième cas.

Donc l'immersion séchage à 60°C est le protocole qui nous a permis d'avoir la réponse la plus rapide, tout en étant globalement cohérent avec le test d'immersion complète. Ce protocole peut donc constituer à priori une alternative d'accélération du vieillissement par rapport à une simple immersion.

Un protocole alternatif composé d'une phase d'immersion / séchage à 60°C ne dépassant pas 100 jours suivie d'une immersion complète pourrait représenter un bon compromis entre bonne accélération et importante dégradation.

Les mortiers ayant subi des dégradations causées par l'attaque sulfatique externe sont ceux utilisant le CEM II/A 42,5 (i.e, CEM II/59 et CEM II/49) et exposés à l'immersion complète. Dans tous les autres cas, aucune dégradation liée à une attaque sulfatique n'a été observée [29].

Une fissuration longitudinale longeant les bords des mortiers utilisant le CEM I 42,5 (i.e, CEM I/59 et CEM I/49) a été observée dans le cas de l'immersion / séchage à 60°C. L'absence de variation de masses, d'allongements, d'évolution du module dynamique au cours des six mois, tend à conclure que ce n'est pas une attaque sulfatique externe qui est responsable de cette fissuration.

Belaribi.O [25] a comparé l'effet de l'incorporation de la vase calcinée des barrages de Chorfa et de Fergoug par rapport à celui de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur la résistance des bétons vis-à-vis des attaques acides (HCl et H₂SO₄), sulfates (Na₂SO₄ et MgSO₄) et de la carbonatation accélérée et naturelle. Les principales conclusions qu'il a tirées, sont les suivantes :

- ✱ l'incorporation de la vase calcinée dans les BAP améliore la résistivité de ces bétons envers l'attaque de l'acide sulfurique. Le BAP VC et le BAP VF présente des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures de celles du BAP T.

- ✱ L'examen visuel a permis de mettre en évidence l'état de chaque béton avant et après attaque H_2SO_4 et HCl . Les photos ont montré le faible taux de perte en forme des échantillons de BAP VC, BAP VF et de BAP PZ, par contre elles ont montré, la disparition de la moitié (voire plus) des échantillons de BAP T.
- ✱ le BAP-VC présente les meilleures résistances au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution $MgSO_4$.
- ✱ Les photos prises pour les bétons immergés dans la solution Na_2SO_4 n'ont pas permis d'enregistrer des signes extérieurs de dégradation des différents échantillons étudiés. Tandis que nous avons pu identifier des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes de BAP-T.
- ✱ La présence de la vase dans la pâte des BAP réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons par rapport à celui des BAP à base de pouzzolane naturelle.

Safer .O [79] a travers les études qu'il a menées sur la durabilité de différents bétons, mortiers et pâtes de ciment, il a constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition minérale utilisée dans la pâte de ciment, les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et la résistance chimique en vers la carbonatation, les attaques sulfatiques et acides de ces matériaux cimentaires.

CONCLUSION

Comme nous l'avons exprimé dans ce chapitre, qu'il y avait une nécessité de faire un rappels bibliographiques et un ensemble des recherches qui ont été élaborer et valoriser par des chercheurs ou des universitaires afin de développer ces différents préoccupations de la durabilité des béton et la résistance à des attaques chimiques ,commençant par l'utilisation du mortier à base de la pouzzolane naturelle et celui des ajout minéraux tel que la perlite , la vase calciné (sédiments fluviaux) ou autres.

Ainsi on a exposé le phénomène de l'envasement des barrages qui est important en Algérie. L'envasement des barrages-réservoirs a provoqué des pertes considérables de la capacité utile d'un réservoir et même des ressources abondante qui peuvent s'additionné aux mortiers.

Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser à l'extraction de ces sédiments fluviaux et valoriser leur transformation durant leur production, en les incorporant avec des mortiers ou béton par l'emploi d'approches empiriques ou semi-empiriques. Permettant, ainsi de prévoir des formules scientifiques pour ajouts à la pouzzolane, ainsi que des solutions aux difficultés des attaques chimiques qui nous entoure et durabilité face aux milieux agressifs pour être préventives ou curatives pour atténuer l'ampleur du phénomène.

CHAPITRE II:

Comportement du mortier à base de pouzzolane et la perlite

INTRODUCTION GENERALE:

Dans ce chapitre intitulé Identifications des Matériaux utilisés et campagne expérimentales qui est inspiré du travail M. Hamadache [18], nous allons citer et expliquer les étapes qui ont été suivies, débutant par les essais qui ont été effectués, en ce qui concerne l'identification des divers matériaux utilisés et détermination de leurs caractéristiques physiques et chimiques entrant dans la composition du mortier, dans le but de concevoir une combinaison de mortier de ciment à base de pouzzolane et de la perlite dans le souci de l'exposer à des attaques chimiques et valoriser les résultats physico-chimiques et résistance mécanique obtenus.

Ce travail expérimental étudie une partie de la durabilité d'un mortier vis-à-vis aux attaques chimiques (eau de mer, eau douce, chlorure de sodium, acide sulfurique, etc.) Avec la possibilité de substitution partielle du ciment par ajout en pourcentage gradué de pouzzolane et de perlite) dans le mortier. Cette étude consiste à préparer un mortier par remplacement du ciment par un ajout pouzzolanique et perlite substitué à divers pourcentages (10%PZ, 20%PZ, 30%PZ, 10%P, 20%P, 30%P, 5%PZ+5%P, 10%PZ+10%P, 15%PZ+15%P). Dans cette étude, nous voulons faire varier ce pourcentage dans le mortier par la méthode de substitution afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques et durabilité du mortier.

Ces mortiers après une période de confection dans des différents pourcentages, ils sont préparés à l'état frais pour essais, puis à l'état durci par leur confection dans des éprouvettes prismatiques (5cm x 5cm x 5cm), puis des éprouvettes cylindriques de diamètres 50 mm et longueur 100 mm, ainsi les conservés dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et dans des récipients adéquats, et qui doivent être retirés de l'eau au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté, ils seront soumis aux différents essais au laboratoire.

- Laboratoire Matériaux LABMAT de L'ENP D'Oran

NB : Les étapes qui ont été suivies sont présentées sous forme d'organigramme

Dans la Figure II.1 Et qui détaille les démarches de notre travail.

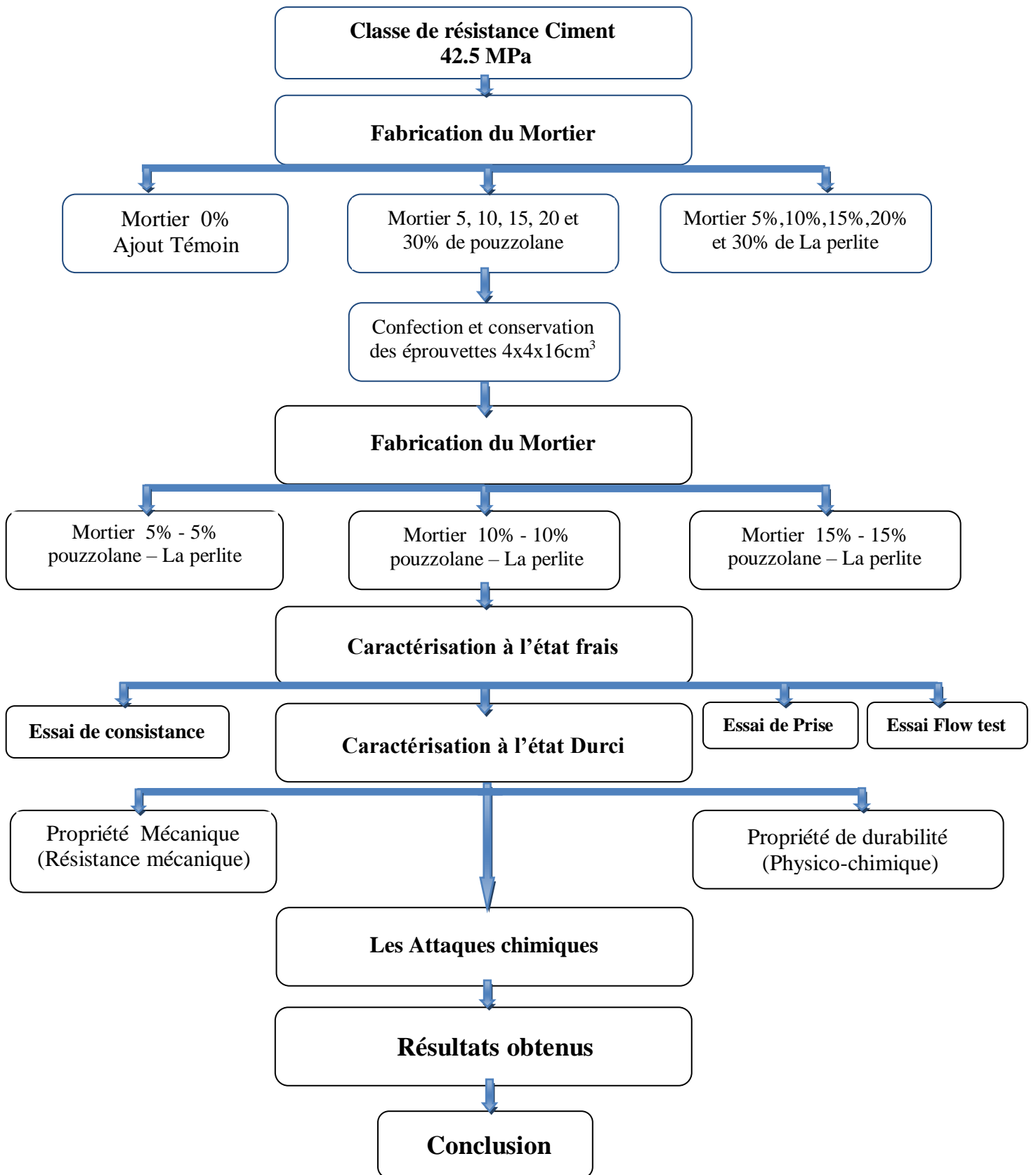


Figure II.1 : Organigramme récapitulant du travail mené.

IDENTIFICATIONS DES MATERIAUX

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous vous présenterons le travail de Hamadache [18], ainsi les matériaux qui ont été utilisés, commençant par la préparation du mortier au Ciment portland CEM I 42,5 selon les normes adéquates. (Le rapport eau/ciment = 0,50).

Le mortier est un matériau de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux et assurer la stabilité des ouvrages, il faut faire rappeller sur les composants du mortier à confectionner et ces quantités approprié présenté dans le Tableau II.1.1 :

Tableau II.1.1 Dosage des mortiers.

Matériaux	Quantité
Ciment portland CEM I 42,5 selon la Norme algérienne NA 442.	450 g ± 2 g.
Sable normalisée selon la norme EN 196-1.	1350 g ± 5 g.
Eau de gâchage.	225 ml ± 1 g.
Les ajouts : pouzzolane naturelle de Béni-Saf.	En pourcentage gradué
La perlite	En pourcentage gradué

NB : vue que notre travail au laboratoire de l'université de Mostaganem ainsi qu'au laboratoire des travaux publics de l'ouest LTPO ont été interrompus, par cause de la pandémie du coronavirus (covid19), nous étions obligée de revoir notre objectif et avec notre professeur, dont il nous a proposer un travail similaire et qui s'approche de notre thème sauf sur l'ajout (des sédiments fluviaux remplacé par la perlite) présenté par Hamadache [18], (departement génie civil Ecole Nationale Polytechnique M-A d'Oran.

A cet état de fait , et pour mieux achever notre projet de fin d'études on va essayé de rédiger son travail qui consisté à préparer un mortier par remplacement d'un pourcentage de ciment par un ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentage (10%PZ, 20%PZ, 30%PZ, 10%P, 20%P, 30%P, 5%PZ+5%P, 10%PZ+10%P, 15%PZ+15%P) et faire une comparaison sur la méthodologie de travail puis un critique sur les resultats obtenus ainsi de les comprendre.

1.2. Matériaux utilisés :

1.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans tous ces essais est un ciment **CPA-CEM I 42,5** provenant de la cimenterie de Lafarge à Msila, livré dans un sac de 50 kg. selon la Norme algérienne NA442 , la résistance minimale garantie à 02 jours est de 08 MPa et à 28 jours est de 43,0 MPa.

Les compositions chimiques du ciment et minéralogiques du clinker sont données dans les tableaux II .1.2.1.a et II .1.2.1.b

Tableau II.1.2.1.a : Composition chimique du ciment CPA-CEM I 42,5 (en %) (Hamadache 2018)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO libre
62,8	21,44	4,05	4,70	2,71	0,41	0,13	0,9	1,20

Tableau II .1.2.1.b : Composition minéralogique du clinker (en %)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51,30	22,80	2 ,80	14,30

La surface spécifique de Blaine (S.S.B) du ciment est de 3710 cm²/g, selon la norme N.A 231 [54].

La masse volumique absolue (ρ) du ciment anhydre est de 3,20 g/cm³.

1.2.2. La Pouzzolane Naturelle :

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte absolue de 236 m.

La pouzzolane naturelle broyées jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80 μ m puis utilisée dans tous les essais, étuvées pendant 24 heures à une température de 50°C afin d'éliminer leur humidité.



Figure II .1.2.2.a : Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage



Figure II .1.2.2.b : Poudre de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf broyer à 80 μ m.

Tableau II .1.2.2 : La composition chimique de la pouzzolane naturelle
(Gisement de Bouhamidi Béni-Saf).

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
12,36	42,95	16,32	9,49	0,01	1,39	3,00	4,20	0,00	10,75

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle est de 4330 cm²/g

La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle est de 2,60 g/cm³

1.2.3. La Perlite :

La perlite est un matériau d'aspect granuleux ou poudreux, extraite du gisement de Hammam Boghrara situé à Tlemcen, Algérie (**Figure II .1.2.3.a**). C'est un sable siliceux d'origine volcanique contenant de l'eau qui est expansé industriellement par un traitement à la chaleur (1 200 °C). Elle est composée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer, d'oxyde de titane, de chaux, de magnésie, d'oxyde de sodium et de potassium. La perlite est utilisée sous forme d'une poudre tamisée à 80 µm dans tous les essais (**Figure II .1.2.3.b**).



Figure II .1.2.3.a : Scories de la perlite de Hammam Boghrara avant broyage



Figure II .1.2.3.b : Poudre de la perlite de Hammam Boghrara broyer à 80 µm

1.2.3.1. Localisation du gisement de la perlite de Hammam Boghrara :

La perlite est extraite du gisement de Hammam Boghrara situé à Tlemcen, Algérie. En trouve cette forme des roches volcanique siliceuse comme représenté dans la figure ci après.

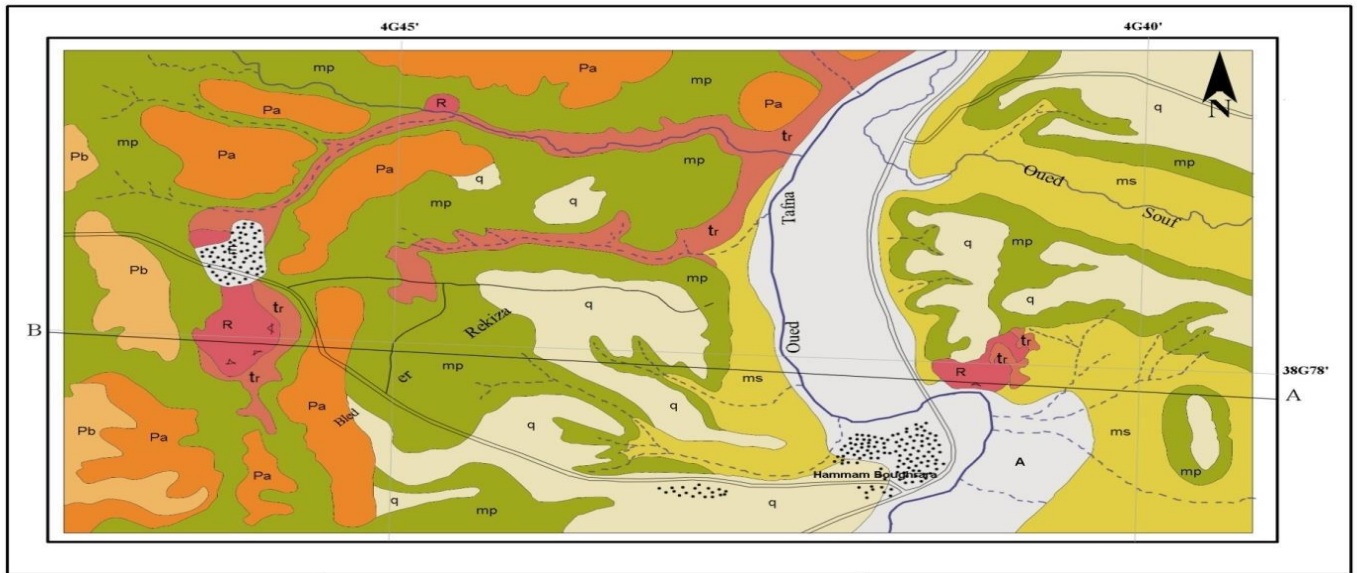


Figure II .1.2.3.1 : Localisation du gisement de Hammam Boughrara (TLEMCEM).

R Rhyolite massive de Miocène terminal (**La perlite**)

La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le **Tableau II .1.2.3 .**

Tableau II .1.2.3 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
3,16	76,40	13,43	2,92	0,01	4,33	0,82	0,37	0,008	8,75

La surface spécifique de Blaine de la perlite est de 4060 cm²/g

La masse volumique absolue de la perlite est de 2,43 g/cm³

1.2.3.2. Analyses spectrales des ajouts pouzzolaniques :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et de la perlite de gisement de Hammam Boughrara a été faite au laboratoire de physique à l'université de Laghouat [18]

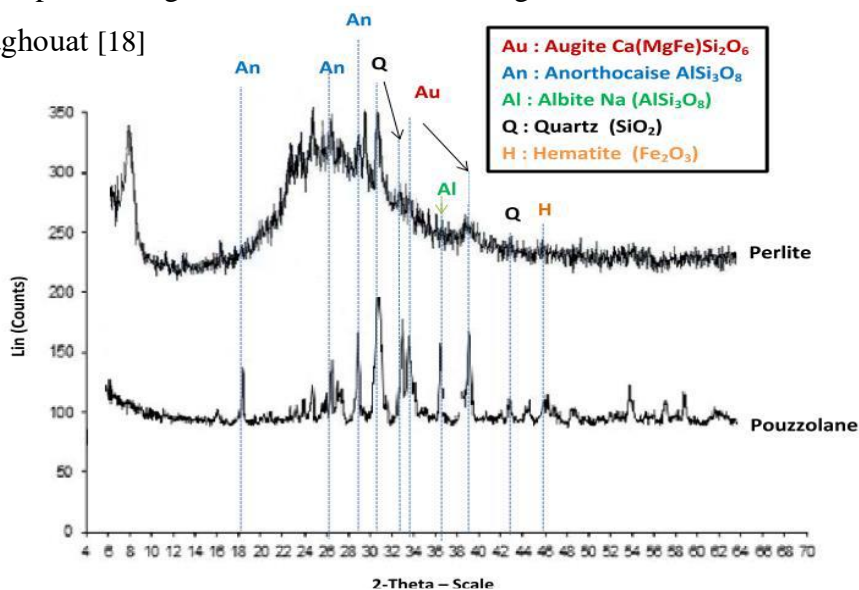


Figure II .1.2.3.2 : Superposition de L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) de la pouzzolane naturelle de et de la perlite.

D'après [18], Cette figure montre que les résultats de l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) de la pouzzolane et la perlite révèlent la forte présence de quartz, suivie d'alumine puis d'oxyde de fer et de calcite et quelques traces de magnésium.

1.2.3.2.1. Essai de Frattini :

Le test préliminaire d'évaluation de l'activité pouzzolanique des matériaux de substituant au ciment est plus nécessaire avant de faire la confection des mortiers ou bétons. Le degré d'activité pouzzolanique des ajouts de perlite, pouzzolane naturelle en utilisant le test de Frattini qui implique titration chimique pour déterminer la Ca^{2+} et OH^- dissous, les concentrations dans une solution contenant CEM-I et la pouzzolane de test.

a. Mode opératoire :

La procédure spécifiée dans la norme EN 196-5 [64] a été utilisée. Vingt grammes d'échantillons d'essai ont été préparés constitués de 80% CEM-I et 20% de la pouzzolane d'essai mélangées avec 100 ml d'eau distillée. Après la préparation, les échantillons ont été laissés pendant 8 jours dans une bouteille en plastique scellée dans un four à 40°C. Au bout de 8 jours, les échantillons ont été filtrés à travers du papier filtre nominale (Whatman n°542) dont le diamètre des pores est de 2,7 µm, puis laissés refroidir à la température ambiante dans des entonnoirs Buchner scellés. Le filtrat a été analysé pour : $[OH^-]$ par titrage du HCl dilué avec orange de méthyle indicateur, et pour $[Ca^{2+}]$ par ajustement du pH à 12,5, suivie par titrage avec 0,03 mole par litre, en utilisant une solution d'EDTA Patton et l'indicateur de Reeders.

En utilisant la formule donnée dans la norme EN 196-5 [64] pour tracer la courbe de solubilité de la chaux :

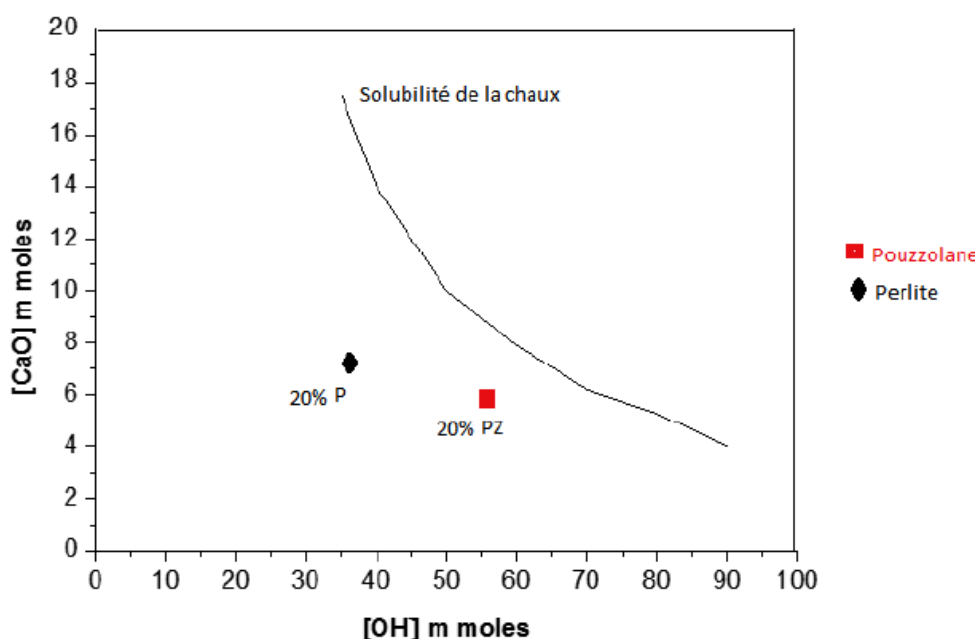
$$Max [CaO] = \frac{350}{[OH] - 15}$$


Figure II .1.2.3.3 : Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphique de Frattini

- Les résultats sont présentés sous forme graphique dans la figure II .1.2.3.3, de $[Ca^{2+}]$, exprimée en équivalent CaO, dans 1 mmol/l sur l'axe y en fonction $[OH]$ dans 1 mmol/l sur l'axe x.

La courbe de solubilité de $Ca(OH)_2$ est tracée le contrôle de l'échantillon de 100% CEM-I est comparativement à veiller à ce que ce résultat se trouve sur la courbe de saturation même.

Les résultats des tests se trouvant sous cette ligne indiquent la suppression de Ca^{2+} de la solution qui est attribué à l'activité pouzzolanique. Les résultats couchés sur la ligne fournissent à titre indicatif de zéro l'activité pouzzolanique et les résultats dessus de la ligne ne correspondent à aucune activité pouzzolanique. Il convient de noter que cette procédure suppose qu'aucune autre source de calcium soluble est présente dans le système, en tant lixiviation du calcium à invalider cette approche.

1.2.4. Eau de gâchage :

L'eau joue un rôle important, il sert à hydrater le ciment, il facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi il contribue à son ouvrabilité. La norme NF EN 206-1 (NF P 18-325)

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles.

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des mortiers est l'eau potable du robinet, sa composition chimique est illustrée dans le Tableau II .1.2.4

Tableau II .1.2.4 : Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Les Composants	Symbole	Teneur (mg /l)
Chlorures	Cl	127
Sulfates	SO ₄	190,23
Magnésium	Mg	54
Calcium	Ca	86
Sodium, Potassium et Nitrates	Na, K, NO ₃	0
Dioxyde de carbone	CO ₂	2,43
Bicarbonates	CO ₃ H	138
Matières organiques		0,12
PH=7,50		

1.2.4.1. Analyse chimique des milieux agressifs (l'eau de mer et l'eau de sebkha):

1.2.4.1.1. L'eau de mer :

La composition chimique de l'eau de mer en pourcentage de masse des différents éléments chimiques est représentée dans le Tableau II.1.2.4.1.1 [18].

Tableau II.1.2.4.1.1 : Composition chimique de l'eau de mer méditerranéenne

Éléments chimiques	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Résidu sec	Conductivité 25°C	pH
	mg/L									mmhos	
Teneur	41	12	1078	4	1935	90	10	1	7800	13,2	7,5

D'après ces résultats de la composition chimique de l'eau de mer méditerranéenne à Mostaganem au-dessus, il a remarqué que le **NaCl**, est le sel qui domine le plus élevé dans ces analyses.

1.2.4.1.2. l'eau de sebka :

Localisation géologique effectuée dans le bassin de la Grande Sebka d'Oran est représentée dans la Figure II .1.2.4.1.2.

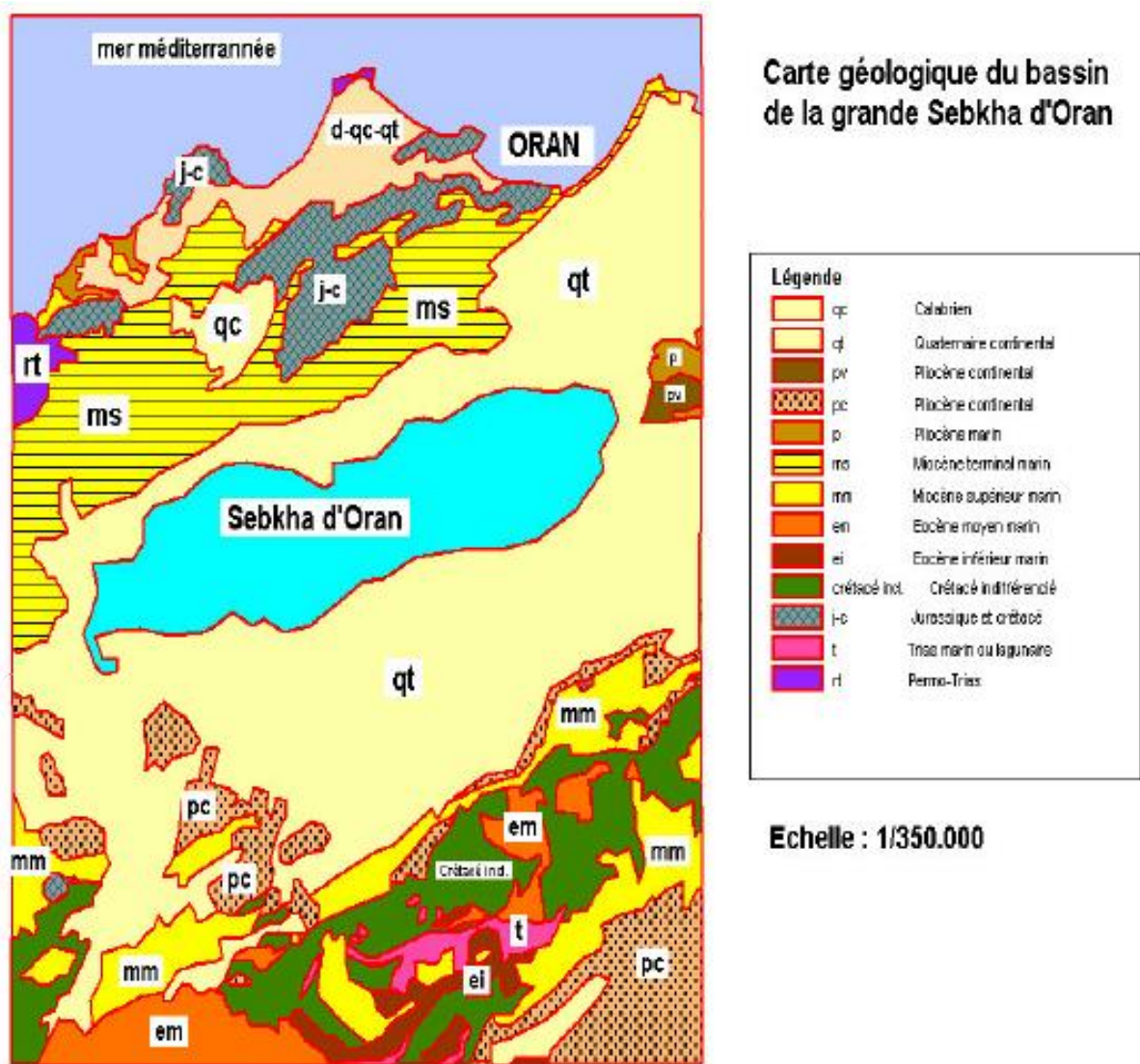


Figure II .1.2.4.1.2 : Carte géologique du bassin de la Grande Sebka (ORAN).

L'analyse chimique de l'eau de sebkha est illustrée dans le Tableau II.1.2.4.1.2

Tableau II.1.2.4.1.2 : Composition chimique de l'eau de sebkha d'Es Senia à Oran .

Éléments chimiques	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Résidu sec	Conductivité 25°C	pH
	mg/L									mmhos	
Teneur	62	10	3683	7	5750	97	13	1	9900	17,2	7,5

D'après ces résultats, il a remarqué que le **Na Cl**, est le sel qui domine le plus dans ces analyses.

1.2.5. Le sable :

Le sable joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. En vue de son utilisation dans la confection des mortiers et bétons, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire tels que l'analyse granulométrique, l'essai de la masse volumique absolue et apparente. Avant d'exposer les différentes caractéristiques de son sable, il a fait rappeller à quelques spécifications des normes françaises NF P 15-403 [55] concernant les sables.

Le sable qui l'a utilisé dans tous les confections est un sable corrigé de 40 % Sable de mer de Terga et de 60 % Sable de carrière. Les courbes granulométriques représentées dans les Figures II .1.2.5.a et II .1.2.5.b.

a. Analyse granulométrique du sable de mer de Terga

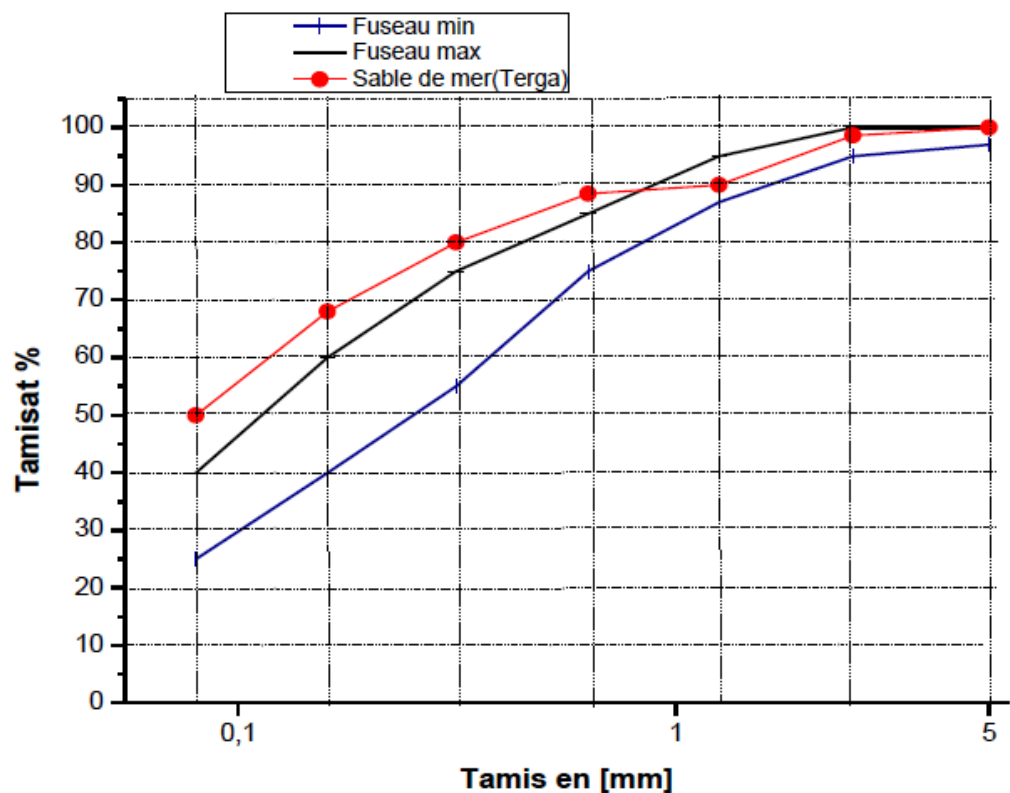


Figure II .1.2.5.a : Courbe granulométrique du sable de mer de Terga.

1,8 < **MdF=1,865** < 2,2 sable fin, On le corrige avec un sable concassé.

b. Analyse granulométrique du sable concassé de Kristel

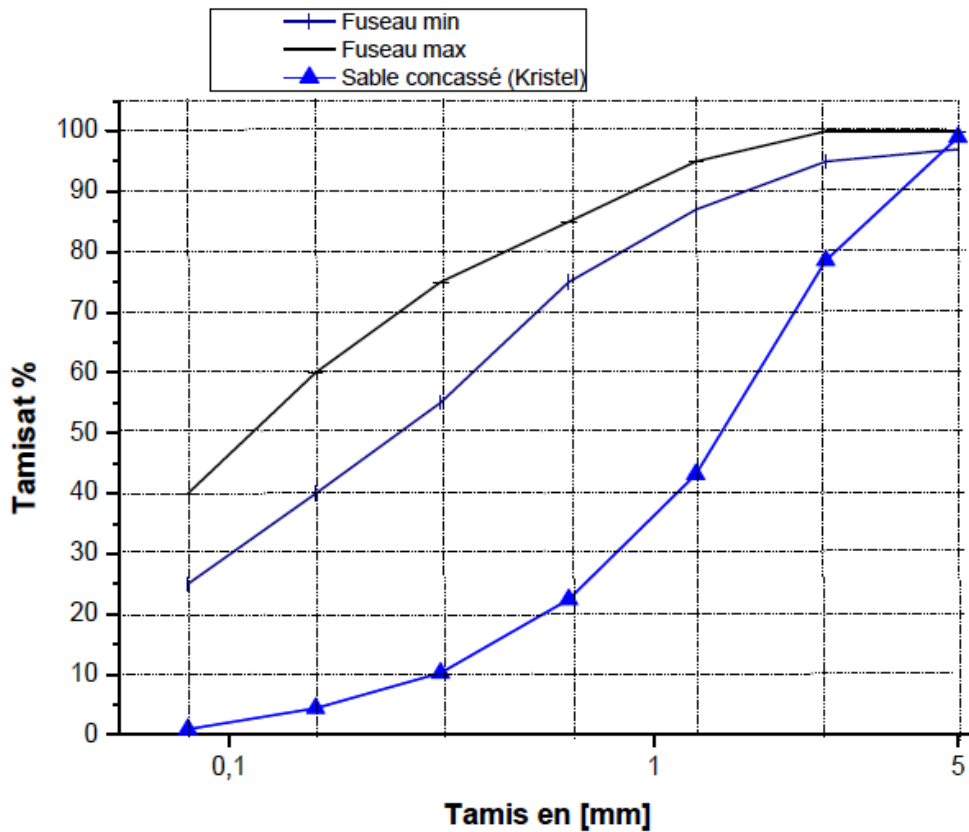


Figure II .1.2.5.b : Courbe granulométrique du sable Concassé de Kristel

c. Analyse granulométrique du sable corrigé

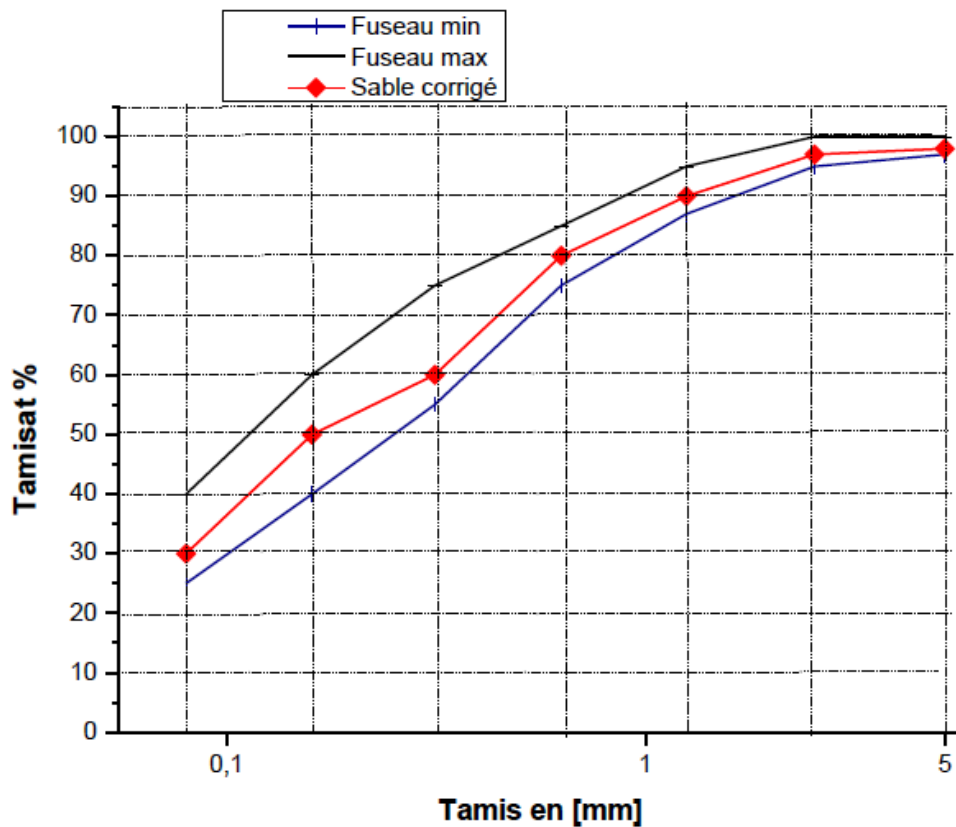


Figure II .1.2.5.c : Courbe granulométrique du sable corrigé.

Tableau II.1.2.5 : Caractéristiques physiques des sables utilisés.

Caractéristiques	Sable concassé de Kristel	Sable de mer de Terga	Sable corrigé
Masse Volumique absolue (g/cm ³)	2,67	2,55	2,60
Masse Volumique apparente (g/cm ³)	1,59	1,89	1,62
Module de finesse (MF)	3,420	1,865	2,320
Compacité (%)	60	74	62
Porosité (%)	40	26	38

Module de finesse : Selon la norme NF P 18-304, le module de finesse d'un sable est égal au 1/100^e de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5.

Le module de finesse d'un sable est un paramètre qui détermine la finesse du sable. Un sable grossier (2.8 < Mdf < 3.2) favorise l'obtention d'une bonne résistance mais risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation, quant au sable fin (1.8 < Mdf < 2.2) il facilite la mise en œuvre du béton au détriment de la résistance.

MdF₁=3,420 (Sable concassé de Kristel).

MdF₂= 1,865 (Sable de mer de Terga) et MdF=2,8

$$P1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} = \frac{2,8 - 1,865}{3,42 - 1,865} \times 100 = 60 \% \dots\dots\dots \{F6\}$$

P2 = 100 - 60 = 40 %.

Compacité et porosité des granulats:

La compacité **C** est définie par le rapport du volume de matière pleine au volume total, alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité selon la norme NFP18-554 [56].

$$C = \frac{M_{Vapp}}{M_{Vabs}} \times 100 (\%) ; P = 1 - C (\%) \dots\dots\dots \{F7\}$$

M_{Vapp} : Masse volumique apparente.

M_{Vabs} : Masse volumique absolue.

La compacité selon la norme NFP18-554 pour les granulats courants est de l'ordre de 55 % à 65%.

Il a utilisé le sable corrigé pour préparer des mortiers par une formulation empirique.

1.3. Formulation et préparation des mortiers :

1.3.1. Formulation des mortiers :

Selon Hamadache [18], le mortier de ciment utilisé est le Portland CEM I 42,5 préparé en trois différentes combinaisons à savoir :

- commençant par un mortier normal sans ajouts (ni pouzzolane ni perlite) mortier témoin.
- Un mortier de ciment à base de la pouzzolane avec des différents pourcentages d'ajouts.
- Un mortier de ciment à base de la perlite avec les différents pourcentages d'ajouts.
- Un mortier de ciment avec une combinaison entre la pouzzolane et la perlite avec les différents pourcentages d'ajouts.

Pour chaque liant, il a réalisé des mélanges du mortier conformément à la norme ASTM C1012.

Les mortiers sont confectionnés en séries d'éprouvettes de dimensions de (50mm x 50mm x 50mm) et des éprouvettes cylindriques de dimensions (Diamètre 50mm et longueur 100 mm).

La composition des mélanges de matériaux pour confectionner les éprouvettes des mortiers est donnée dans le Tableau II.1.3.1. Avec E/L égale 0,5.

Tableau II.1.3.1 : Les formulations des Mortiers

Désignation du mortier		Pouzzolane naturelle (g)	Perlite (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (L)	Rapport E /L
M ₀	Mortier normal	0	0	450	1350	225	0,50
M _{10pz}	Mortier avec ciment binaire	45	0	405	1350	225	0,50
M _{20pz}		90	0	360	1350	225	0,50
M _{30pz}		135	0	315	1350	225	0,50
M _{10p}	Mortier avec ciment binaire	0	45	405	1350	225	0,50
M _{20p}		0	90	360	1350	225	0,50
M _{30p}		0	135	315	1350	225	0,50
M _{5pz+5p}	Mortier avec ciment ternaire	22,5	22,5	405	1350	225	0,50
M _{10pz+10p}		45	45	360	1350	225	0,50
M _{15pz+15p}		67,5	67,5	315	1350	225	0,50

1.3.2. Préparation des mortiers :

Cette opération influe d'une façon notable sur le produit final. La préparation du mortier a été effectuée selon les étapes suivantes :

- Le sable et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau dont les proportions : 450 ± 2 g du ciment, 1350 ± 5 g du sable et de l'eau.
- Les rapports E/C d'un tel mortier sont compris entre 0 et 50, avant d'être utilisé pour les différents essais mécaniques, ce mortier est malaxé pendant 3 minutes.

Introduire le sable en premier dans la cuve du malaxeur (type Hobart normalisé), et verser ensuite le ciment, après ça, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement l'eau pendant les 30s suivantes.
- Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 60 secondes supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Les opérations de malaxage selon la norme EN196–1 sont récapitulées dans le Tableau II.1.3.2.

Tableau II.1.3.2. Conduite des opérations du malaxage.

Opérations	Introduire du sable	Introduire du ciment		Introduction de l'eau		Raclage de la cuve	
Durée			30 s	30 s	60 s	15 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse rapide

1.4. Méthodes d'essais :

Les méthodes des essais de cette étude formée à deux types d'essais : à l'état frais et à l'état durci.

1.4.1. Les essais à l'état frais :

1.4.1.1. Essai de consistance et temps de prise :

Le principe d'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler).

Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ($S= 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment à consistance normalisée. En effet, pour chaque liant utilisé, il y'a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite « normale ».

La détermination de cette teneur en eau est en fait un préalable à la mesure de la prise. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois pour la détermination de la consistance normale ainsi qu'à la mesure du temps de début de prise selon la norme EN 196-3 [63].

- Matériel utilisé :

C'est le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($\Phi = 1,13$ mm).

L'appareil de VICAT est composé d'un moule tronconique ($h=40$ mm $d_1= 70$ mm et $d_2= 80$ mm)

On utilise cet appareil pour l'essai de consistance.

- D'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10$ mm,
- Balance précise à 0,1 g près,
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

1.4.1.2. Essai de maniabilité sur mortiers (Flow Test) :

Pour chaque type de mortier formulé, il a mesuré sa maniabilité grâce à la table d'étalement conformément à la norme ASTM C 1437 [65].

La maniabilité du mortier a été déterminée à l'aide de l'étalement d'une quantité de mortier emplissant un tronc de cône de 100mm à la base. Après avoir ôté le moule et appliqué 15 coups à la table à chocs, le diamètre de la galette nous renseigne sur l'ouvrabilité du mortier.

Il a mesuré le diamètre du mortier le long des quatre lignes tracées dans le dessus de la table (D1, D2, D3 et D4).

$$l'étalement D = \frac{D1+D2+D3+D4}{4} - 100 \text{ (\%)} \text{ Avec : } D1, D2, D3 \text{ et } D4 \text{ en mm ... \{F8\}}$$

L'étalement est déterminé par la formule suivante : $\Delta E \text{ (\%)} = \frac{D2-D1}{D1} \dots\dots \{F9\}$

D'où :

D1 : diamètre de la galette avant les chocs en cm.

D2 : la valeur moyenne des quatre différents diamètres de la galette après les chocs en cm.

La maniabilité est la qualité essentielle du mortier permettant la facilité de leur mise en place.

La teneur en eau est le paramètre le plus important pouvant affecter la maniabilité, un manque ou un excès d'eau entraîne une baisse dans les qualités intrinsèques du béton.

En effet la maniabilité dépend :

- De la granulométrie et du rapport eau/ciment, en particulier, plus le rapport eau/ciment est élevé, plus la granulométrie ne doit être fine pour obtenir une grande maniabilité.
- Du temps et des conditions d'humidité des granulats : le béton frais durcit avec le temps ceci dit qu'une partie de l'eau du béton est absorbée par les granulats, s'ils ne sont pas saturés, sa perte est plus grande lorsque les granulats sont secs.
- De même qu'une quantité de l'eau peut être perdue par évaporation, notamment si le béton ou le mortier sont exposés au soleil, au vent ou si une partie de l'eau est utilisée par les réactions chimiques initiales du ciment.
- De la température ; pour un béton ou un mortier fabriqué au laboratoire, lorsque la température est élevée, la teneur en eau doit être augmentée si l'on veut maintenir la maniabilité initiale constante.

Le moulage est réalisé en introduisant le mortier en deux couches successives égales, chacune étant suivie de 60 coups à la table à chocs. Les éprouvettes sont conservées pendant 24 heures à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, recouvertes d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau. Elles sont ensuite démoulées et conservées à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sous l'eau saturée de chaux, de sorte que l'eau de cure ne dissout pas la chaux contenue dans le mortier durci.

1.4.2. Essai à l'état durci :

1.4.2.1. Essai de la résistance à la compression et à la traction des mortiers :

Il a réalisé des essais de compression simple et de traction sur tous ses matériaux à chaque échéance (7,14, 28, 56, 90, 120,.....,300 jours).

La norme ASTM C 109/C 109M, décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai effectué sur éprouvettes 50mm x 50mm x 50 mm pour la résistance à la compression.

Chaque éprouvette a été soumise à la compression. La résistance dite résistance normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours.

C'est cette résistance qui définit la classe du ciment.

Il a réalisé des essais de la résistance à la traction sur les éprouvettes (40mm x 40mm x 160mm) à chaque échéance. Une fois l'éprouvette retirée de son milieu de conservation, il l'essuie avec un tissu sec et on la laisse pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire , il la place dans la cellule d'écrasement de l'appareil en appliquant un taux de chargement à une vitesse de déplacement relative entre la platine supérieure et inférieure correspondant à une vitesse de chargement sur le spécimen de (900 à 1800N/s).

1.4.3. Essai de durabilité :

Les essais de durabilité consacrés surtout sur la variation du poids par des éprouvettes des mortiers cubiques et cylindrique avec différents pourcentage de substituent pouzzolane naturelle et de perlite. Ces éprouvettes été immergées dans les milieux suivants :

- Solution de chlorure de sodium **5% NaCl**,
- solution de mélange acide sulfurique (**5 % Na₂SO₄+5% MgSO₄**),
- l'eau de Sebkhah,
- l'eau de mer
- l'eau douce

Par différentes échéances : 7j, 14j, 28j, 56j, 90j, 130j, 150j, 200j, 250j jusqu'à 300 jours.

1.4.3.1. Mesure de la variation du poids :

Le suivi de variation du poids est effectué sur les éprouvettes cubiques de 50x50x50 mm³ pour le mortier selon la norme ASTM C267-1 [70].

En utilisant une balance de précision 0,01 g. Une fois l'éprouvette retirée de son milieu de conservation, il l'a essuyé avec un tissu sec et il l'a laissé pendant 30 minutes à l'air libre de laboratoire, on effectue la pesée, on enregistre l'indication et ensuite on la remet à l'immersion dans son milieu de conservation.

La variation du poids (ΔM) est évaluée comme suit :

$$\Delta M (\%) = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \dots\dots\dots \{F10\}$$

D'Où : **M1** = le poids conditionné moyen de l'ensemble des trois Spécimens avant immersion,

M2 = le poids moyen de l'ensemble de trois échantillons après Immersion.

Remarque : Un résultat avec un signe plus (+) indique un gain en poids, et avec un signe moins (-) indique une perte en poids.

La mesure de poids est réalisée sur trois éprouvettes cubiques (50mm x 50mm x 50mm) de chaque mortier à chaque échéance en prenant la moyenne des trois mesures.

CAMPAGNE EXPERIMENTALE

1.5. Les Essais Sur Les Différents Mortiers à L'état Frais :

1.5.1. Essai de consistance et de Temps de prise :

Les essais de consistance et de prise ont été réalisés au laboratoire (LAB.MAT) avec différents essais effectués sur les pâtes de ciment confectionnés selon les différentes teneurs d'ajouts de pouzzolane naturelle et de perlite substituées en fonction des poids.

Les résultats sont donnés dans le tableau II.1.5.1 et représentés dans les figures II.1.5.1.a et b.

Tableau II.1.5.1 Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment pouzzolaniques

Désignation des pâtes de ciment	Ciment CEMI (%)	Pouzzolane naturelle (%)	Perlite (%)	Consistance (E/L) (%)	Début de prise h : mn prise (h : mn)	Fin de prise h : mn
CEM I	100	0	0	28	164	310
P _{10pz}	90	10	0	30	165	345
P _{20pz}	80	20	0	32	160	325
P _{30pz}	70	30	0	33	127	315
P _{10p}	90	0	10	28	166	335
P _{20p}	80	0	20	30	158	320
P _{30p}	70	0	30	32	135	318
P _(5pz+5p)	90	5	5	30	158	320
P _(10pz+10p)	80	10	10	32	155	318
P _(15pz+15p)	70	15	15	34	125	310

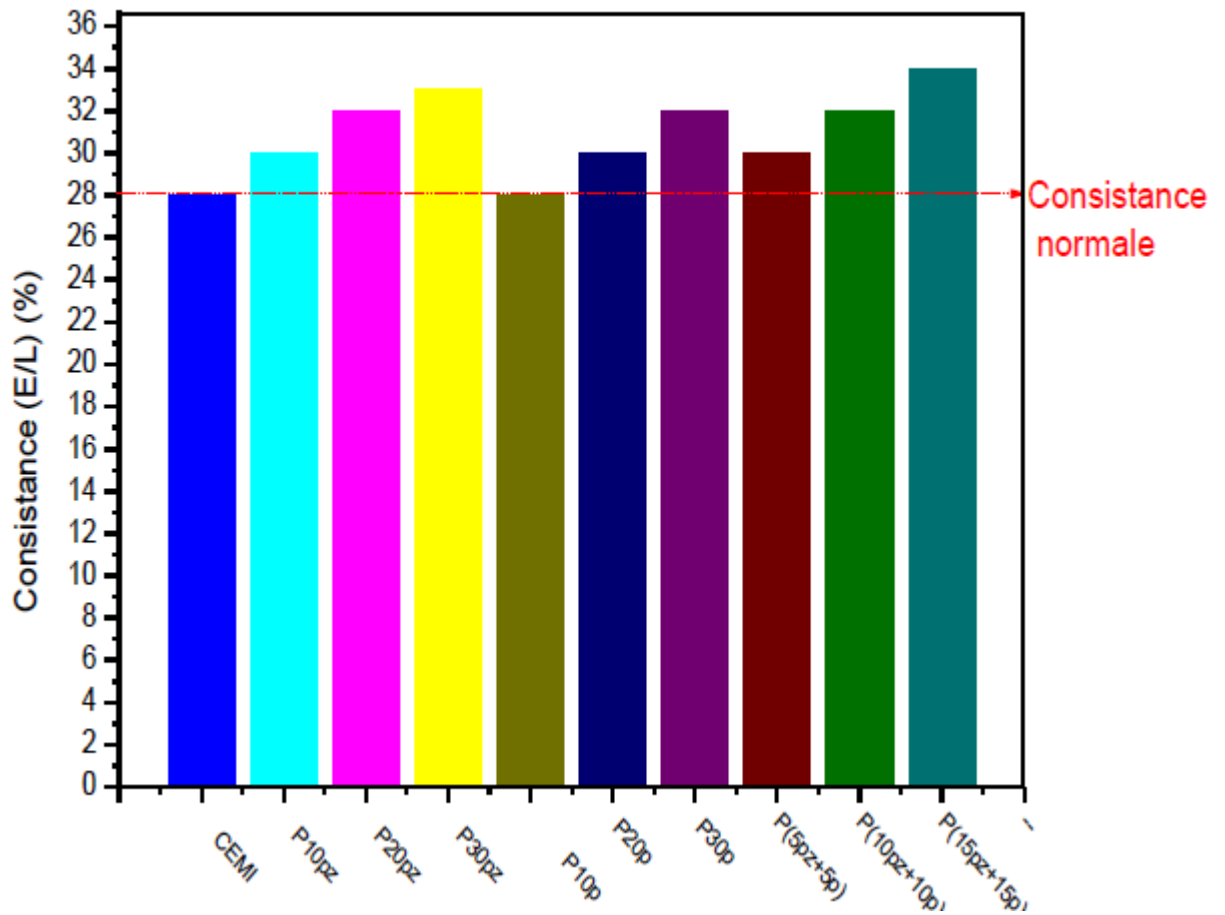


Figure II .1.5.1.a : Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs pouzzolaniques

Il a constaté dans la Figure III .1.5.1.a que la consistance est normale pour la pâte du ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite (P10p), mais pour les pâtes pouzzolaniques leurs consistances sont élevées, plus le teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus la consistance augmente. **Chaib [13]** a constaté la même chose pour la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et la perlite, dont la consistance des pâtes du ciment augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

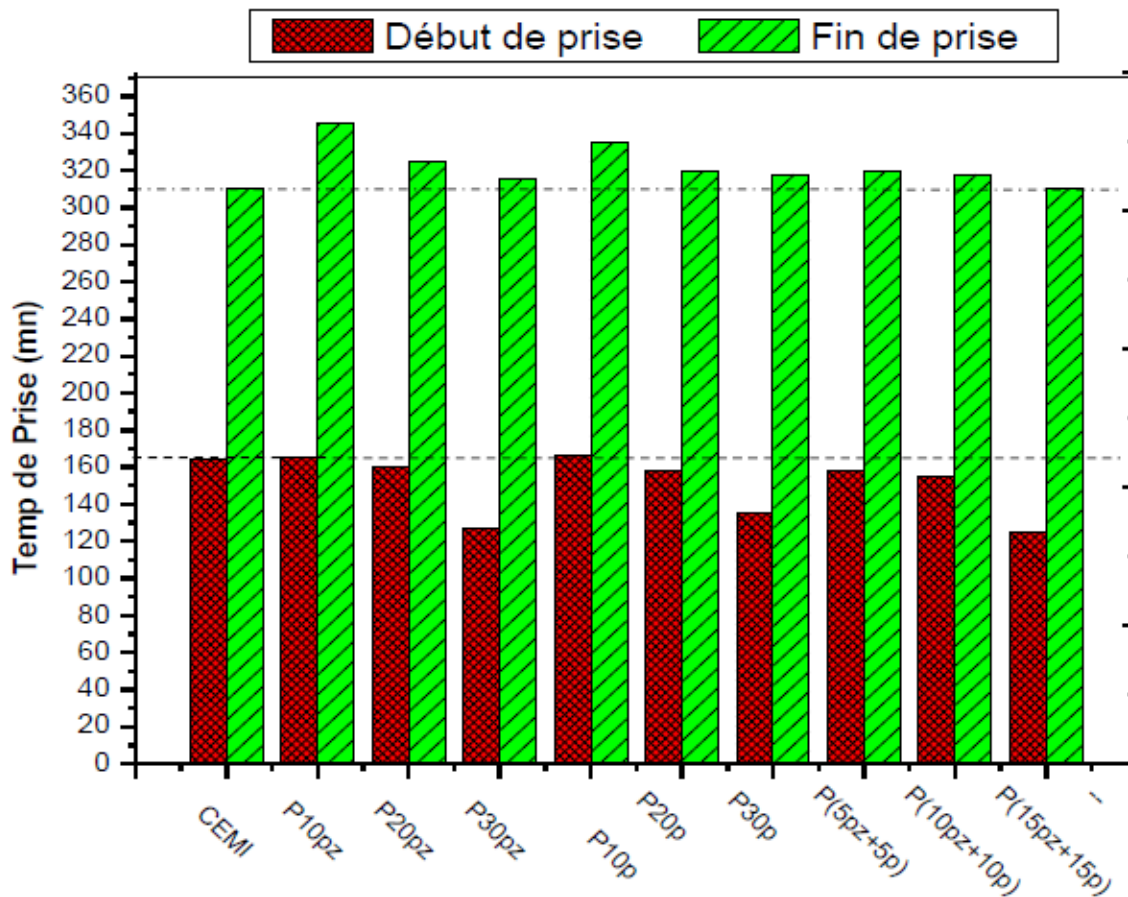


Figure II .1.5.1.b : Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des Différentes Teneurs pouzzolaniques

Figure II .1.5.1.b présente le temps de prise qui est inversement proportionnel à la teneur des différentes pâtes de ciment avec l'ajout ou sans ajout. Plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus le temps de prise diminue. Ceci est conforme à l'étude faite par **Ali Aichouba et al [40]** qui ont rapporté que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle, cause l'accélération de la prise avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Ainsi, le ciment contenant 30% de pouzzolane naturelle présente une diminution de 32% pour le début de prise et 23% pour la fin de prise. **Erdem et al, [37]** ont testé deux perlites naturelles provenant de deux régions de la Turquie (Izmir et Erzincan). Ils ont produit plusieurs ciments composés en substituant le ciment par différentes quantités de perlite (20% et 30%, en poids de ciment). Ils ont conclu qu'en raison de la dilution du ciment, les temps de prise des pâtes contenant de la perlite étaient plus longs que celui du témoin. Ils ont conclu aussi que, les ciments produits par broyage de la perlite avec le clinker, présentant une plus grande finesse et des temps de prise plus longs comparés aux ciments broyés séparément.

Chaib [13] a constaté la même chose pour la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, dont les temps de début et de fin de prise du ciment diminuent avec l'augmentation du pourcentage de cet ajout. De la même sorte, **R.Chahaoui [66]** a étudié des mortiers de ciment portland de la cimenterie de zahana est partiellement substitué avec la pouzzolane de Béni-Saf.

1.5.2. Maniabilité des mortiers frais :

Les résultats d'essais d'étalement sur table à choc représentés dans le tableau II.1.5.2 sont conformément à la norme ASTM C 1437, montrant qu'avec une quantité d'eau constante pour la préparation de tous les mortiers, le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure aux mortiers pouzzolaniques. Ainsi, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle et de la perlite suivant la figure II .1.5.2 .

Cela prouve que l'augmentation du taux de la pouzzolane naturelle, perlite accroît sensiblement la demande en eau selon ces résultats.

La croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface.

Tableau II.1.5.2. Influence de la pouzzolane naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50.

Etalement $E\%=(D_r-D_i) /D_i, D_i=100\text{mm}$					
Désignation de mortier	Pouzzolane naturelle (%)	Perlite (%)	E/C	Etalement (mm)	Etalement (%)
M ₀	0	0	0,50	120	20
M _{10PZ}	10	0	0,50	114	14
M _{20PZ}	20	0	0,50	110	10
M _{30PZ}	30	0	0,50	106	06
M _{10P}	0	10	0,50	116	16
M _{20P}	0	20	0,50	112	12
M _{30p}	0	30	0,50	106	06
M _{5PZ+5P}	5	5	0,50	117	17
M _{10PZ+10P}	10	10	0,50	113	13
M _{15PZ+15P}	15	15	0,50	107	07

Les résultats ci-dessus lui ont confirmé que la substitution du ciment par des fines telles que les pouzzolanes naturelles et les perlites, fait à ce que ces liants sont caractérisés par une grande surface spécifique conduisant à la baisse de la maniabilité du mortier.

Ceci est en accord avec les résultats de recherches de **Y Senhadji [43]** et **R Chihaoui [66]** qui ont trouvé même remarque aux résultats d'expériences par l'utilisation de plusieurs ajouts pouzzolaniques (la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, perlite, la fumée de silice et le méta kaolin) pour la confection des mortiers, indique que ces ajouts pouzzolaniques diminuent la maniabilité car leur demande en eau est supérieure à celle du mortier de ciment pure. Afin d'obtenir des consistances voisines de celles d'un mortier normalisé de CEM I il a maintenu le rapport E/L constant en ajustant la maniabilité par l'utilisation d'un superplastifiant

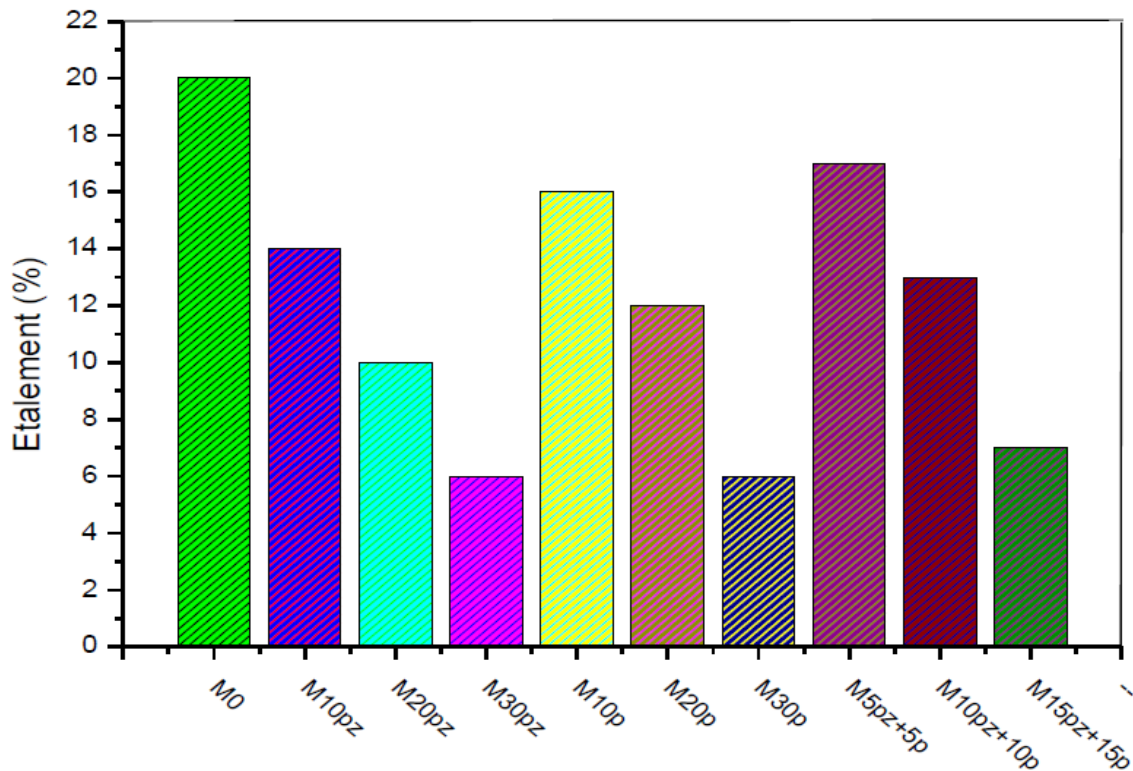


Figure II .1.5.2 : Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques.

D'après ces essais effectués, cette figure ci-dessus montre que l'étalement est inversement proportionnel à la teneur de la pouzzolane naturelle et de la perlite, plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus l'étalement diminue.

1.6. Les Essais Sur Les Différents Mortiers à L'état Durci :

1.6.1 Essais mécaniques :

1.6.1.1 Résistance à la compression des mortiers à l'état durci :

Les résultats des résistances à la compression des éprouvettes de (50mmx50mmx50mm) immergées dans un milieu de conservation. Il a signalé que les éprouvettes de mortiers sont conservées pendant une durée de 300 jours dans une eau saturée en chaux.

Les figures (III.4 et III.5) présentent l'évolution, l'effet de la pouzzolane et le rapport de la Résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (j varie de 7 à 300j) Dans l'eau saturée en chaux.

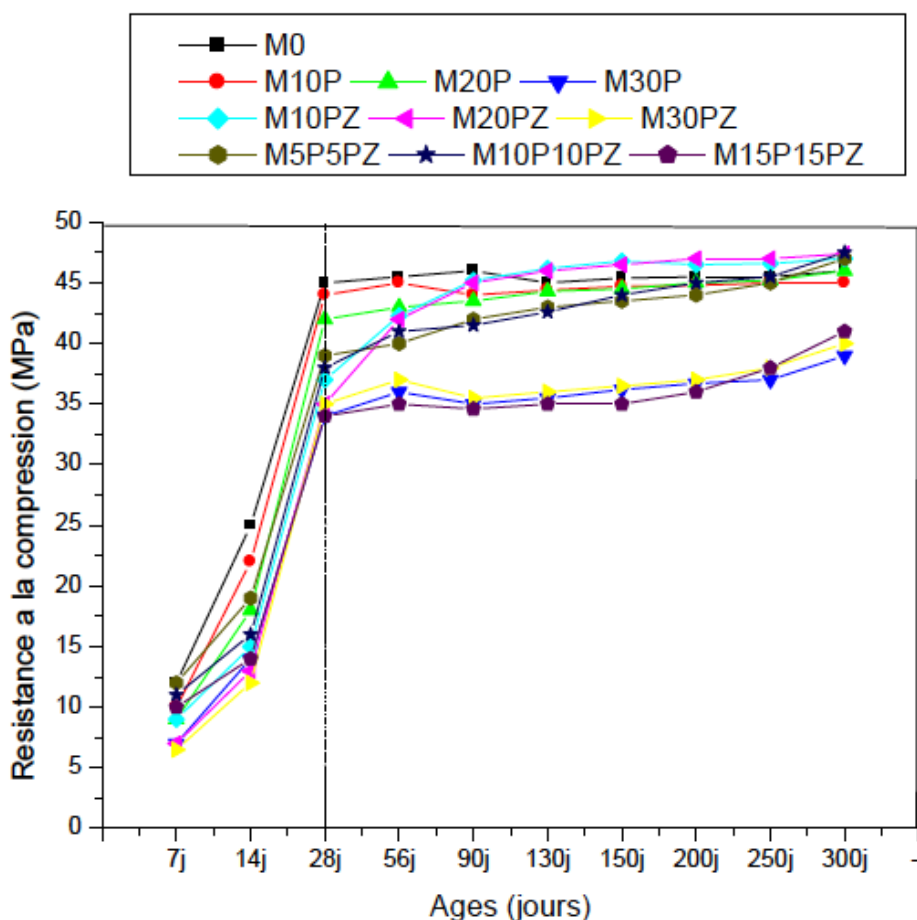


Figure II .1.6.1.1.a : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux.

D'après cette figure, Hamadache [18] a fait les remarques suivantes :

- Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours, après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour tous les mortiers.
- Les résistances à la compression diminuent en générale avec l'augmentation du pourcentage des ajouts pouzzolaniques.

- Il a remarqué que la résistance à la compression de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute.

Selon **Day R.L., Shi C [69]**, la finesse d'un liant est un facteur important affectant le taux de développement de la résistance. L'augmentation de la finesse dans les limites acceptables peut améliorer le développement de la résistance au jeune âge, particulièrement si un ciment contient des ajouts minéraux.

Les figures II .1.6.1.1.a et II .1.6.1.1. b présentent l'évolution, l'effet de la pouzzolane et le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.

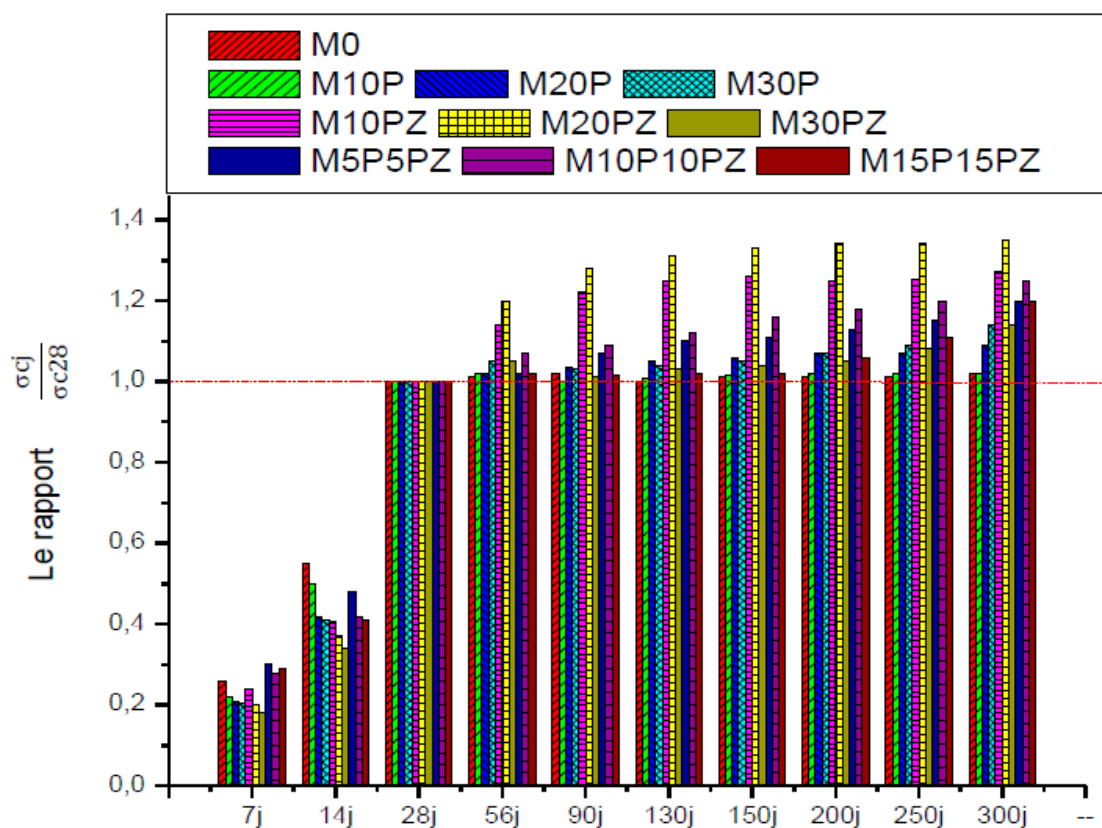


Figure II .1.6.1.1.b : Evolution du rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (j varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.

Il a pu constater dans la Figure II .1.6.1.1.b que le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec ajout pouzzolanique à partir de 56^{ème} jours. Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle et de la perlite contenu dans le ciment, qui consomme de la Portlandite (CH) produite suite à l'hydratation du ciment. Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des mortiers pouzzolaniques.

1.6.1.2 Résistance à la traction des mortiers à l'état durci :

L'expérimentales des résistances à la traction des éprouvettes de (40mmx40mmx160mm) les ont immergées dans un milieu de conservation. Et aussi les éprouvettes de mortiers les ont conservées pendant une durée de 300 jours dans une eau saturée en chaux.

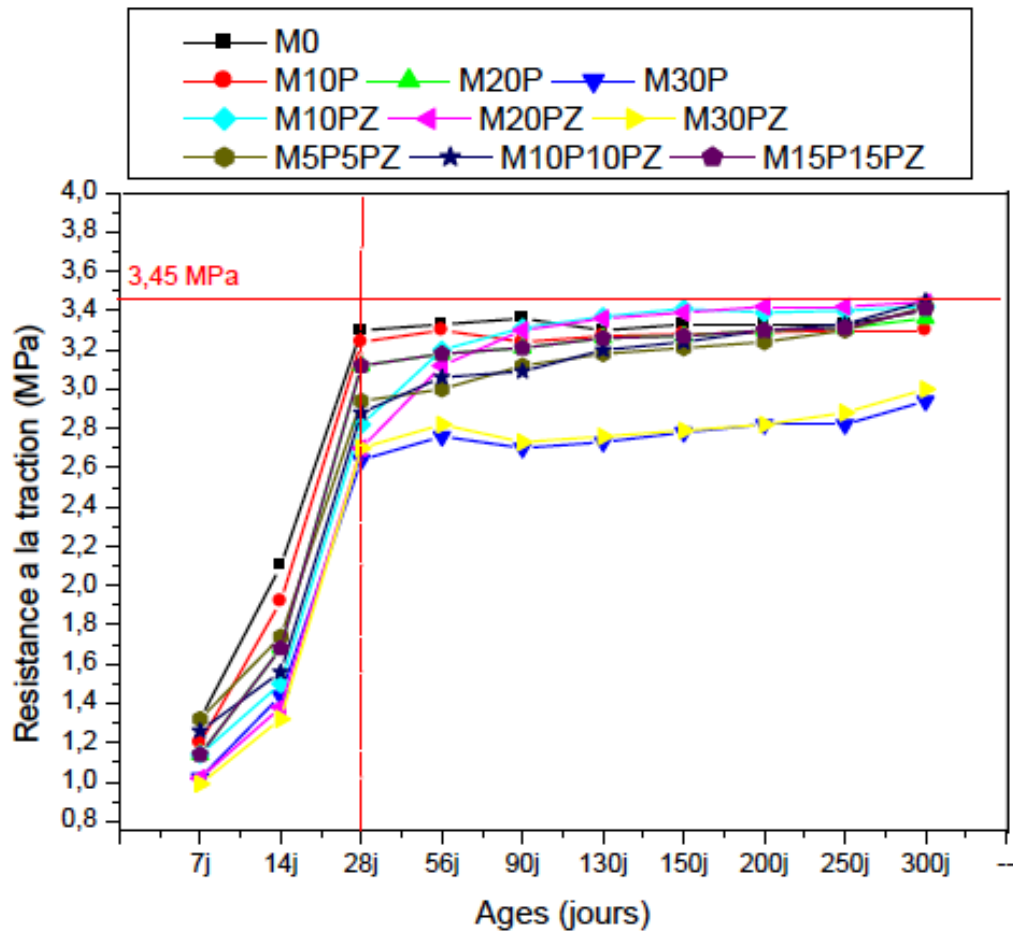


Figure II .1.6.1.2.a : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturé en chaux.

Il a remarqué dans la Figure II .1.6.1.2.a que la résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de 28 jours, Il a constaté qu'il y a une augmentation lente sauf qu'une chute résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite.

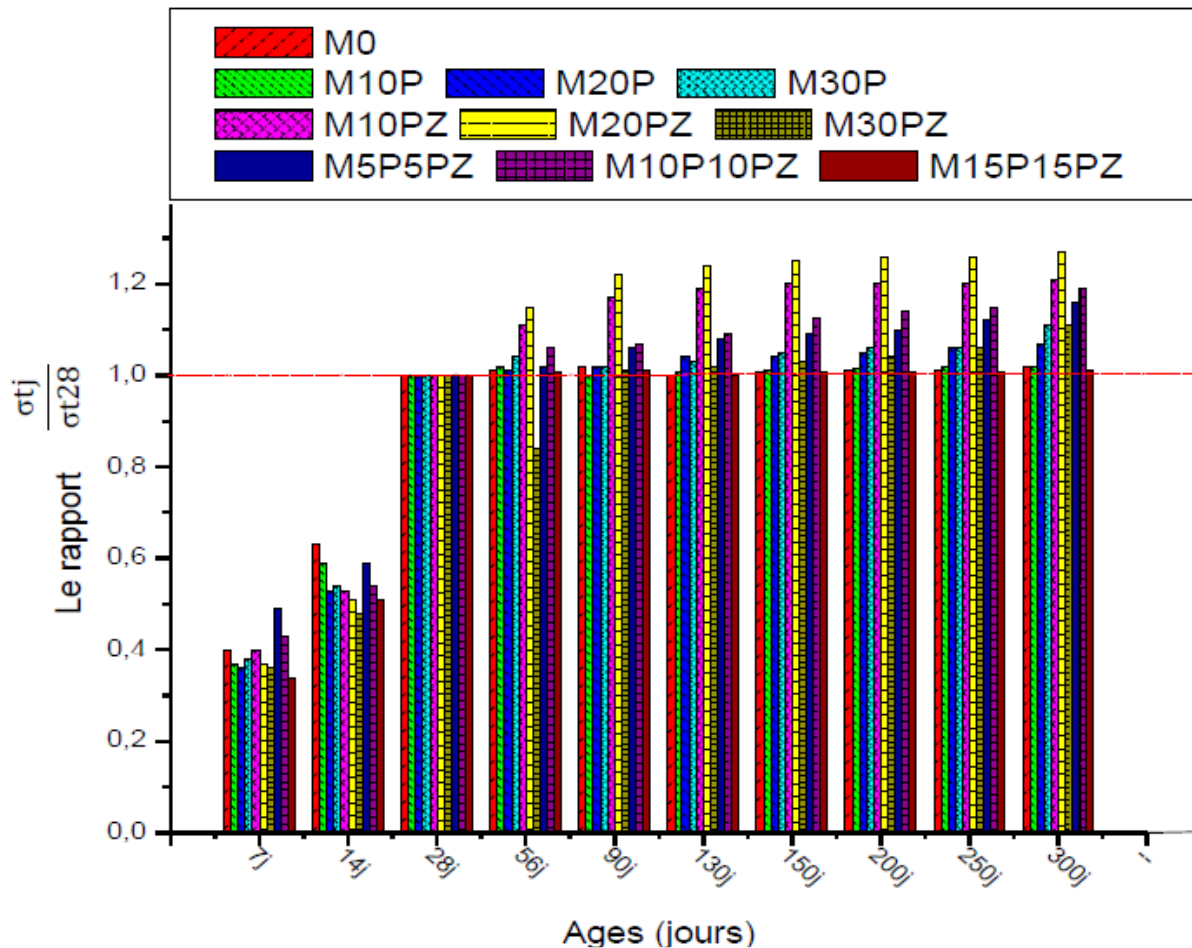


Figure II .1.6.1.2.b : Evolution du rapport de la résistance à la traction par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (j varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.

Le rapport de la résistance à la traction par celle mesurée à 28 jours augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec ajout pouzzolanique de 10 %, 20 % de pouzzolane naturelle et de 5% de pouzzolane plus 5% de perlite et même pour 10% de pouzzolane plus 10% de perlite à partir du 56^{ème} jour. Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique contenu dans le ciment, suite à la consommation de la Portlandite (CH) produite à l'hydratation du ciment.

Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des mortiers pouzzolaniques.

1.6.2 Essais De Durabilité :

1.6.2.1. Variation de la masse des mortiers :

Le suivi de la variation de la masse des éprouvettes cubiques de (50x50x50) mm³ conservées dans les cinq milieux distincts, à savoir l'eau douce, la solution de 5 % de chlore de sodium (NaCl), la solution de mélange (5% Na₂SO₄+5% M_gSO₄), l'eau de sebkha et l'eau de mer ont été effectués selon la norme ASTM C267-01 [70].

1.6.2.1.1. Variation de la masse des mortiers conservés dans l'eau douce:

La figure II 1.6.2.1.1. Montre l'évolution de la variation de la masse des éprouvettes de différents mortiers en fonction de la période d'immersion dans l'eau douce.

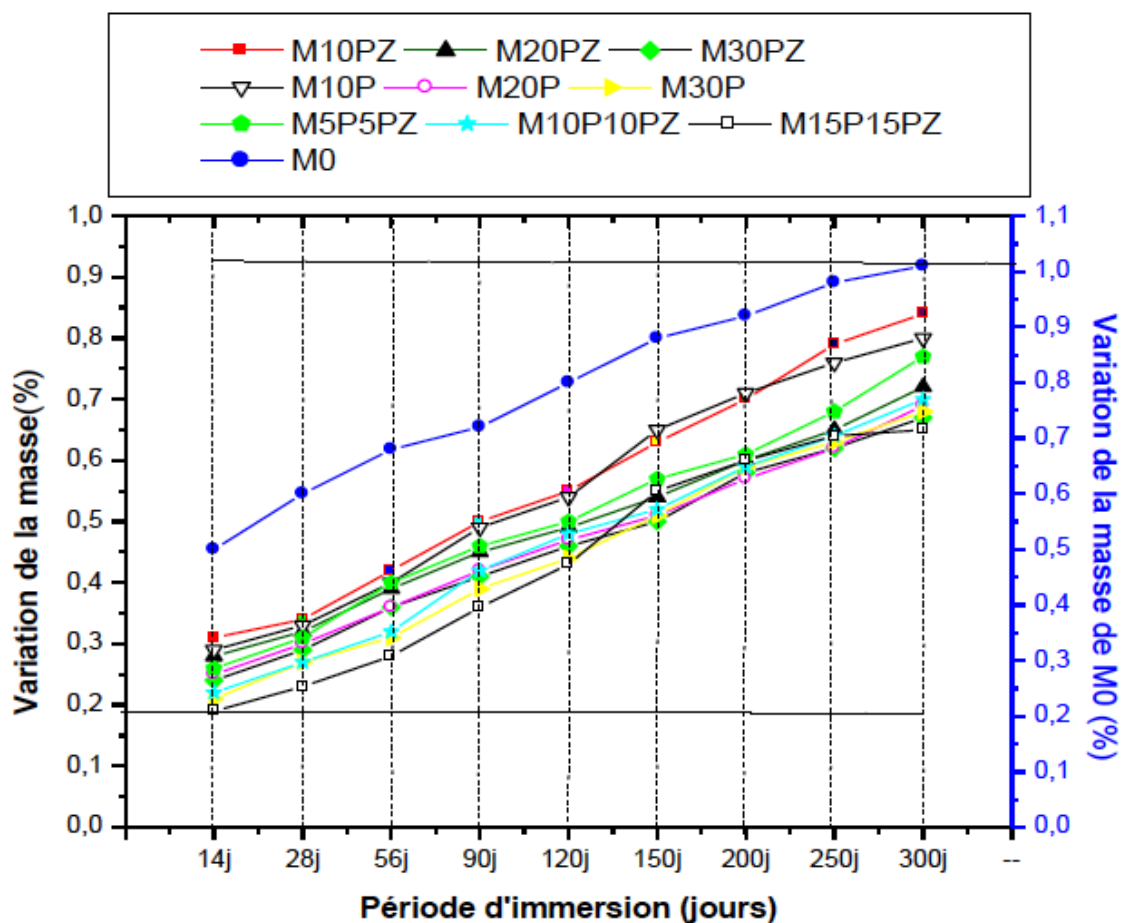


Figure II 1.6.2.1.1. : Evolution de la variation de la masse des mortiers Immergés dans l'eau douce.

Il a aussi constaté que tous les mortiers présentent un gain dans leurs masses respectives. Ce gain évolue d'une manière régulière pour tous les mortiers en fonction de la période d'immersion jusqu'à 300 jours.

L'accroissement progressif de gain en masse est attribué à la continuité de la formation des hydrates dans les différents mortiers et probablement à la formation de couches denses de la calcite (CaCO_3) sur la surface des éprouvettes. Ces couches ont pour origine la présence des ions carbonates qui se combinent aux ions calcium, issus majoritairement de la dissolution de la portlandite mais aussi provenant directement de la solution d'eau douce.

Les mortiers pouzzolaniques présentent des gains moins importants que celui du mortier sans pouzzolane ou perlite. Cela est peut-être attribué à la réduction de la quantité de la portlandite suite à la réaction pouzzolanique en engendrant la réduction de la quantité de couches denses de la calcite formées dans les éprouvettes des mortiers pouzzolaniques.

La phase interstitielle contenue dans le mortier a un pH basique (environ 13). Si le mortier se trouve au contact d'une eau douce, très peu chargée en ions, et donc de pH plus faible que celui de la solution interstitielle (environ 7) la pâte de ciment se trouve en déséquilibre avec ce milieu. On constate alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte, par la dissolution de la portlandite ensuite une attaque progressive des gels C-S-H [72].

1.6.2.1.2. Variation de la masse des mortiers conservés dans la solution 5% de NaCl :

D'après Figure II 1.6.2.1.2., il a constaté une évolution positive de la variation de la masse de tous les mortiers en fonction de la période d'immersion dans la solution de 5 % du chlorure de sodium. Cette évolution positive est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents mortiers, à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution.

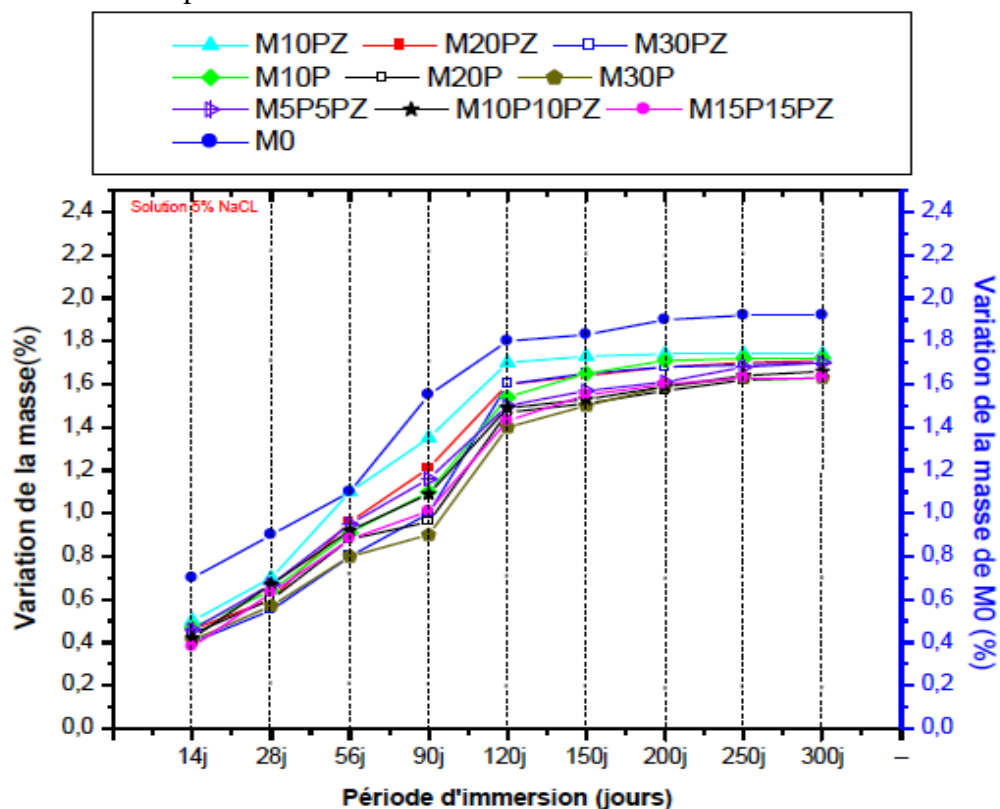


Figure II 1.6.2.1.2. : Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans la solution 5% NaCl.

Les mortiers pouzzolaniques ont présenté des gains de masse moins importants que ceux du mortier témoin. Cela est dû à la réactivité pouzzolanique qui consomme la portlandite pour former du gypse et de l'ettringite, d'où le gain en masse est réduit dans les mortiers pouzzolaniques par rapport au mortier témoin [18].

1.6.2.1.3. Variation de la masse des mortiers conservés dans la solution (5% Na₂SO₄+5% MgSO₄) :

Figure II 1.6.2.1.3 a illustré la variation de la masse en fonction du temps des mortiers immergés dans la solution de mélange 5 % Na₂SO₄ + 5 % MgSO₄.

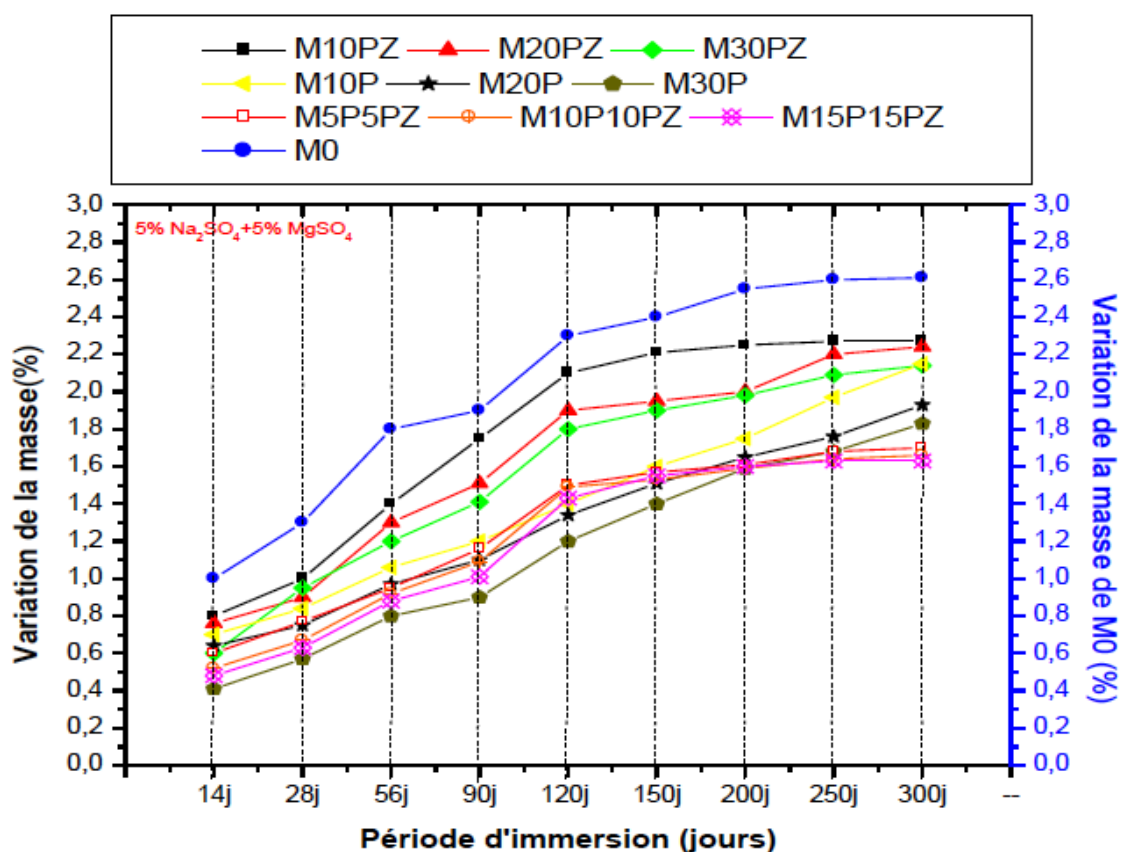


Figure II 1.6.2.1.3. : Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans la solution (5 % Na₂SO₄ + 5 % MgSO₄).

Hamadache [18] a montré que l'augmentation de la masse des mortiers immergés en solutions sulfatiques peut être expliquée par la formation des produits volumineux. L'attaque du mortier par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions sulfates et l'aluminat de calcium hydraté (C3A), 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 sulfoaluminat de calcium communément appelé « Ettringite » et l'hydrate de calcium mieux connu sous le nom de « gypse ». La formation d'ettringite est liée à une augmentation de huit fois le volume initial.

Dès que les cristaux en aiguilles n'ont plus de place pour croître dans les pores, une pression de cristallisation se produit, qui entraîne l'expansion et, finalement, l'éclatement de la surface du mortier.

La variation de la masse des mortiers peut être expliquée par les processus de transport, perméabilité et diffusion, au sein de la matrice cimentaire. Ces propriétés de transport sont considérées comme « des indicateurs de durabilité ». Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en solution interstitielle du matériau.

1.6.2.1.4. Variation de la masse des mortiers conservés dans l'eau de Sebkhah :

La Figure II 1.6.2.1.4 a montré l'évolution de la variation de la masse des éprouvettes de différents mortiers en fonction de la période d'immersion dans l'eau de sebkhah.

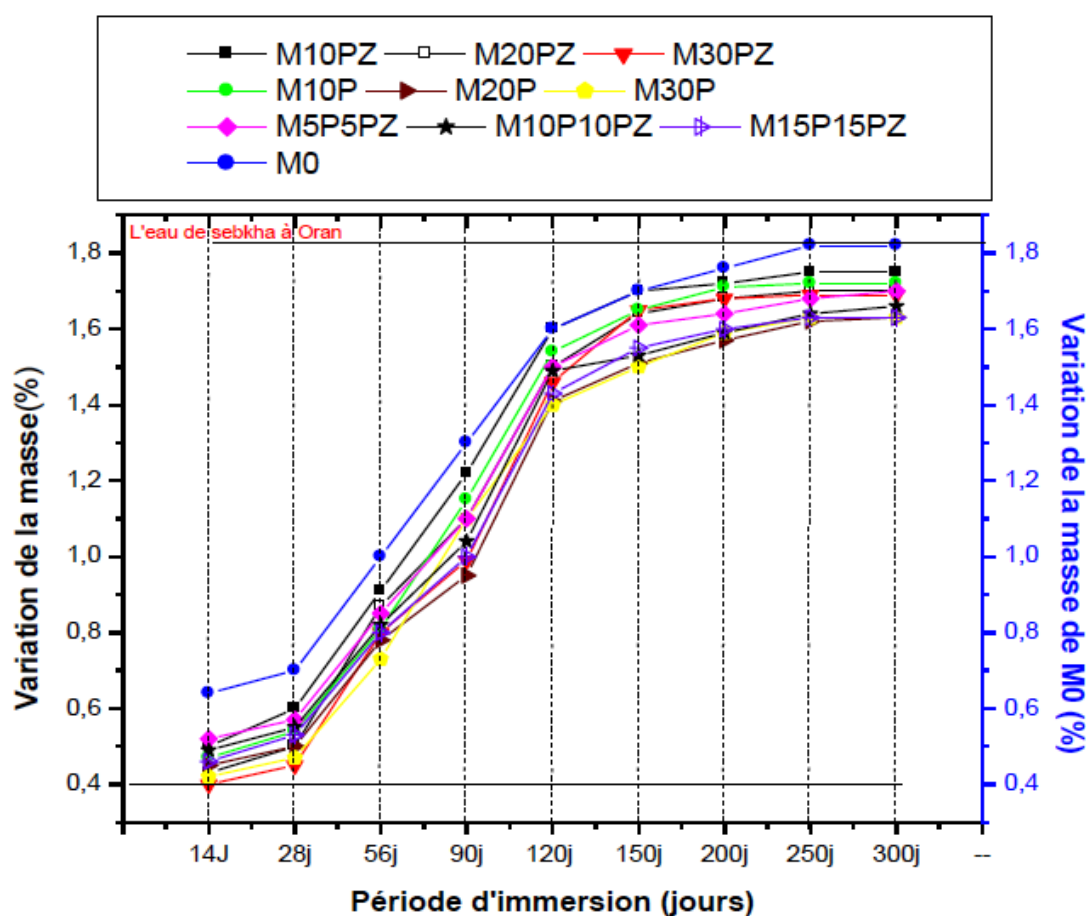


Figure II 1.6.2.1.4. : Evolution de la variation de la masse des mortiers immergés dans l'eau de sebkhah

Il a constaté dans cette figure que tous les mortiers présentent un gain en leurs masses respectives. Ce gain évolue d'une manière régulière pour tous les mortiers en fonction de la période d'immersion jusqu'à 300 jours.

1.6.2.1.5. Variation de la masse des mortiers conservés dans l'eau de mer :

La Figure II 1.6.2.1.5.a a montré l'évolution de la variation de la masse des éprouvettes de différents mortiers en fonction de la période d'immersion dans l'eau de mer.

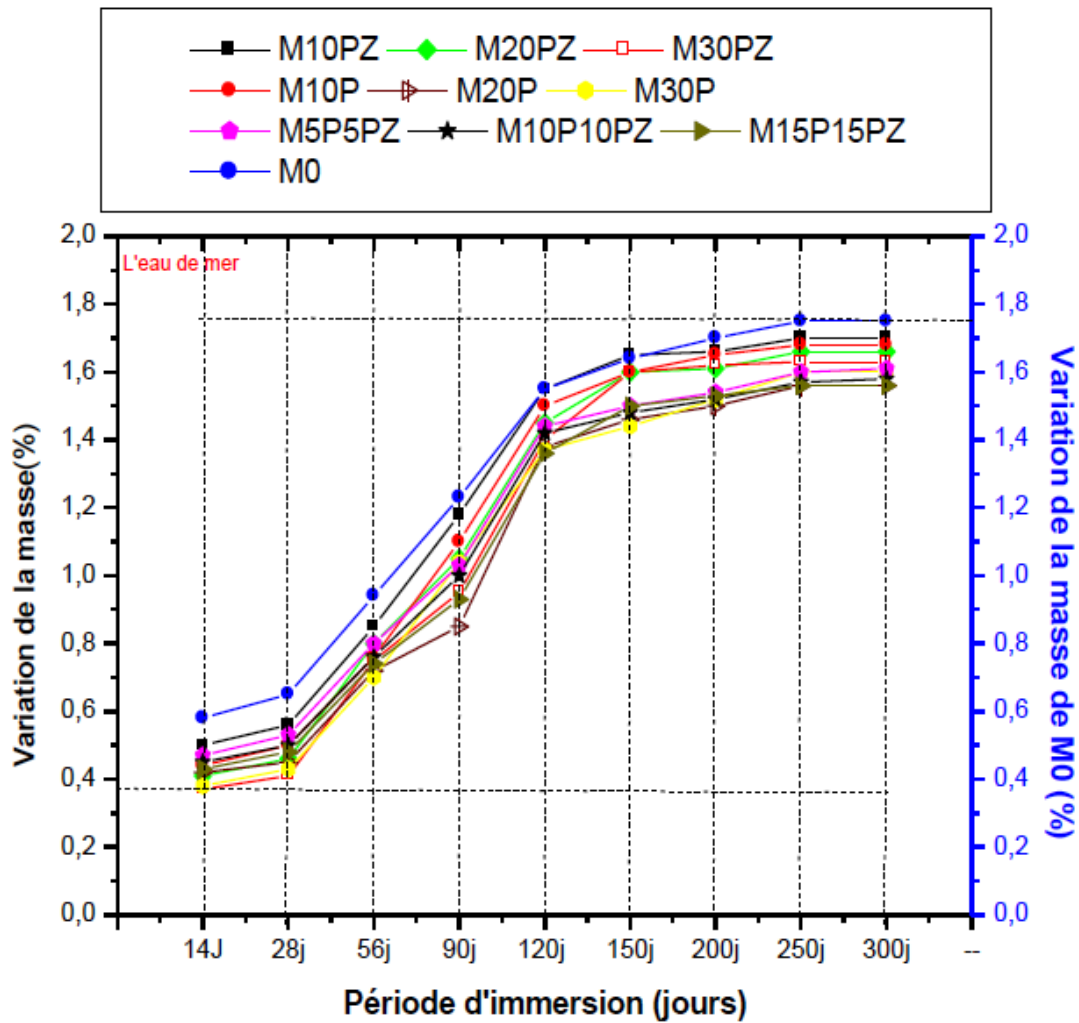


Figure II 1.6.2.1.5.a : Evolution de la variation de la masse des mortiers Immergés dans l'eau de mer

Il a constaté que tous les mortiers présentent un gain de masses dans l'eau de mer, ces pourcentages des gains de masses sont moins que les gains des masses qui se présentent dans les milieux agressifs l'eau de Sebkhah, la solution de 5% NaCl et la solution de (5 % Na₂SO₄ + 5 % MgSO₄).

La figure II 1.6.2.1.5.b. a illustré l'augmentation de masse après 300 jours d'immersion des différents mortiers dans les cinq milieux de conservations : L'eau douce, L'eau de mer, L'eau de sebkha, Solution 5% NaCL et Solution de (5 % Na₂SO₄ + 5 % MgSO₄).

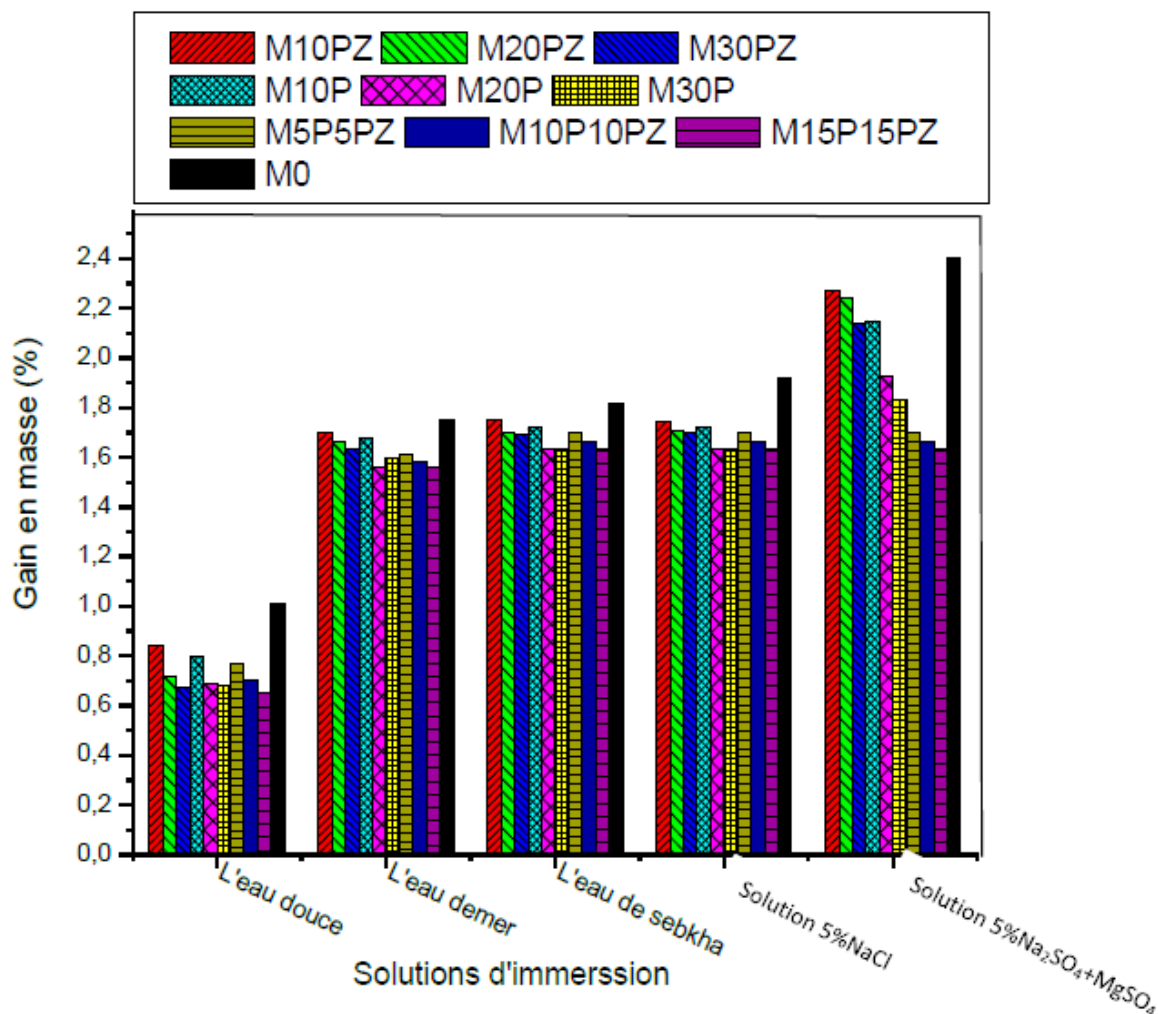


Figure II 1.6.2.1.5.b : Le gain en masse des échantillons du mortier à 300 jours.

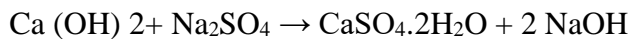
Il a remarqué pour l'ensemble des éprouvettes du mortier que le gain en masse dans le cas de l'immersion en eau douce est inférieur au gain mesuré sur les éprouvettes immergées en autre solutions. En comparons les résultats de l'augmentation de masse des échantillons immergés en solution de mélange (5% Na₂SO₄ + 5% MgSO₄), la solution de (5% NaCl), l'eau de sebkha et l'eau de mer, il a constaté que l'augmentation en masse de la solution de mélange est plus élevée par rapport à celle de (5% NaCl), L'eau de sebkha et dans l'eau de mer.

Les mécanismes de l'attaque par les sulfates diffèrent d'un sulfate à l'autre. L'action des sulfates prend une forme d'expansion du béton ou du mortier suite à la formation de produits expansifs.

Dans son étude les produits résultants de l'action des deux solutions sulfatées sont :

1^{er} cas : l'action du Na₂SO₄

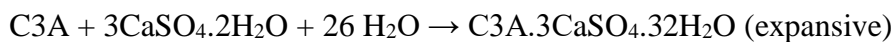
- a. Substitution ionique entre la portlandite et les sulfates selon la formule suivante :



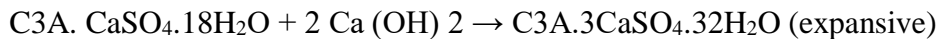
NaOH : Alcalinité élevée ce qui assure la stabilité des C-S-H.

CaSO₄ · 2H₂O : produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

- b. Formation de l'ettringite secondaire, à partir du C3A anhydre résiduel selon la formule chimique suivante :



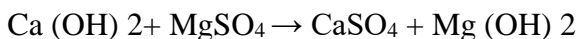
A partir des aluminates hydratés selon la formule chimique :



2^{ème} cas : l'action du MgSO₄

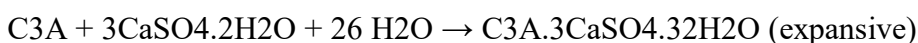
Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium, ceci est dû à sa double action qui se traduit par :

- a. Formation de la brucite :

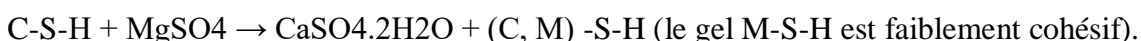


Mg (OH)₂ : la brucite est caractérisée par une faible solubilité et un pH faible [23].

- b. Formation de l'ettringite secondaire à partir du C3A anhydre résiduel :



- c. Substitution des ions Ca⁺⁺ par les ions Mg⁺⁺ dans les C-S-H :



L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du MgSO₄ par rapport à l'attaque du Na₂SO₄, peut être expliquée par la formation de la brucite (Mg(OH)₂), qui est un produit très peu soluble.

BILAN

BILAN

D'après le précieux travail de M. Hamadache [18] a basé sur une partie du comportement d'un mortier à base de pouzzolane et ajout de perlite face aux attaques chimiques sa résistance mécanique et a constaté sa durabilité durant des jours successifs par les différents essais qui ont été réalisés au laboratoire dans le cadre de cette thèse, il a fait ressortir certains nombres de points :

✿ **L'**intérêt majeur qui a été à l'origine de cette thèse est la possibilité de substituer partiellement d'un matériau industriel (le ciment), par un matériau naturel qui est la pouzzolane et la perlite. L'un et l'autre n'ont pas le même prix de revient. En effet la pouzzolane naturelle et la perlite étant des produits naturels et ne passant donc pas par des processus industriels onéreuse.

Mais, les mortiers obtenus de la substitution du ciment par les matériaux tels que la pouzzolane et la perlite ne peuvent être retenus que s'ils présentent des performances physico-chimiques et durabilité nettement meilleures que celles obtenues avec un mortier ordinaire.

✿ **La** valorisation de la perlite de Hammem Boghrara à Maghnia et la pouzzolane naturelle de Beni saf en tant qu'ajout cimentaire dans le mortier a été le souci de l'étude.

En ce qui concerne l'évaluation de l'activité pouzzolanique de ces matériaux (perlite, pouzzolane naturelle), on a conclu ce qui suit :

- L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) de la pouzzolane et la perlite révèle la forte présence de quartz ;
- Le test préliminaire de Frattini pour l'évaluation de l'activité pouzzolanique des matériaux de substituant au ciment est plus nécessaire avant de faire la confection des mortiers ou bétons. Le degré d'activité pouzzolanique des ajouts de perlite, pouzzolane naturelle en utilisant le test de Frattini sont actives ;
- Les compositions chimiques élémentaire de la perlite et de pouzzolane naturelle sont montrent une quantité de quartz plus élevée en comparant aux autres compositions chimiques.

✿ **Les** caractéristiques physiques à l'état frais des pâtes et mortiers, il est arrivé aux conclusions suivantes :

- ♦ La consistance est normale pour la pâte du ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite, mais pour les pâtes pouzzolaniques leurs consistances sont élevées, plus le teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus la consistance augmente ;
- ♦ Le temps de prise qui est inversement proportionnel à la teneur des différentes pâtes de ciment avec l'ajout ou sans ajout. Plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus le temps

de prise diminue. L'ajout de perlite naturelle dans le ciment accélère les temps de début et de fin de prise des pâtes ;

- ♦ La substitution du ciment par des fines telles les pouzzolanes naturelles et les perlites, fait que ces liants sont caractérisés par une grande surface spécifique conduisant à la baisse de la maniabilité du mortier.

✿ **L**es caractéristiques physiques à l'état frais, en étudiant le comportement mécanique des mortiers, il a conclu ce qui suit :

- ♦ La résistance à la compression de tous les mortiers dans l'eau saturée en chaux augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute ;
- ♦ Le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours, augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec l'ajout pouzzolanique à partir de 56 jours.

Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des mortiers pouzzolaniques ;

- ♦ La résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de 28 jours, il a constaté qu'il y a une augmentation lente sauf qu'une chute résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite, même pour le rapport de la résistance à la traction par celle mesurée à 28 jours augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec ajout pouzzolanique de 10%, 20% pouzzolane naturelle et de 5% pouzzolane plus 5% de perlite et même pour 10% pouzzolane plus 10%perlite à partir de 56jours. Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique contenu dans le ciment, suite à la consommation de la Portlandite (CH) produite à l'hydratation du ciment.

✿ **C**oncernant l'étude de la durabilité a été consacré sur la variation de masse par les mortiers à base des ajouts de la perlite et de pouzzolane naturelle dans les milieux agressifs (milieux naturels, milieux artificiels), il a conclu que le suivi de la variation de la masse des éprouvettes cubiques des mortiers de dimension (50x50x50) mm³ conservées dans les cinq milieux distincts comme suit :

- Dans l'eau douce : Un gain évolue d'une manière régulière pour tous les mortiers en fonction de la période d'immersion jusqu'à 300 jours,
- Dans la solution 5% NaCl : Une évolution positive de la variation de masse pour tous les mortiers en fonction de la période d'immersion dans la solution de 5% du chlorure de sodium,

- Dans la solution de 5% Na_2SO_4 +5% MgSO_4 : Une augmentation de la masse des mortiers immergés en solutions sulfatiques peut être expliquée par la formation des produits volumineux,
- Dans l'eau de Sebkhah : Un gain évolue d'une manière régulière pour tous les mortiers en période d'immersion jusqu'à 300 jours. Ce gain est moindre que le gain dans la solution de 5% Na_2SO_4 +5% MgSO_4 ,
- Dans l'eau de mer : Tous les mortiers présentent un gain de masses dans ce milieu, ces pourcentages des gains de masses sont moins que les gains des masses qui se présentent dans les milieux agressifs l'eau de Sebkhah, la solution de 5% NaCl et la solution de 5% Na_2SO_4 +5% MgSO_4 .

Ce bilan va être très utile pour l'élaboration de notre projet de recherche. Il sera donc plus qu'une recommandation pour essayer de valoriser un autre type d'ajout qui représente une combinaison optimale entre la vase de Chorfa et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Surtout pour enrichir et actualiser la bibliographie particulièrement sur la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques.

CHAPITRE IV:

Identifications Des

Matériaux Utilisés

1.1 INTRODUCTION:

Dans ce dernier chapitre intitulé Identifications et Matériaux utilisés, nous avons expliqué le travail qu'on l'a fait et le travail qui devra être fait par la préparation des matériaux et le mode opératoire des essais qui devront être réalisés, débutant par les essais qui ont été effectués, en ce qui concerne l'identification des divers matériaux utilisés et détermination de leurs caractéristiques physique et chimique entrant dans la composition du mortier, dans le but de confectionner une combinaison de mortier de ciment à base de pouzzolane et de la vase calcinée, dans le souci de l'exposé à des attaques chimiques et valoriser les résultats physico-chimiques et résistance mécanique obtenus.

Ce travail expérimental étudie le comportement d'un mortier à base de pouzzolane et sédiments fluviaux vis-à-vis aux attaques chimiques Avec la possibilité de substituer partiellement du ciment avec ajout en pourcentage gradué de pouzzolane et de vase calcinée dans le mortier Figure IV.1.

Cette étude consiste à préparer un mortier par remplacement du ciment par un ajout pouzzolanique et la vase calcinée substituée à divers pourcentage (10%PZ, 20%PZ, 30%PZ, 10%V, 20%V, 30%V, 5%PZ+5%V, 10%PZ+10%V, 15%PZ+15%V). Dans cette étude, nous voulons faire varier ce pourcentage dans le mortier par la méthode de substitution afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques et durabilité du mortier.

Ces mortiers après une période de confection dans des différents pourcentages, ils vont être préparés à l'état frais pour essais, puis à l'état durci par leur confection dans des éprouvettes Prismatiques (4cm x 4cm x 16cm), ainsi les conservés dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et dans des récipients adéquats, et qui doivent être retirés de l'eau au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté, ils seront après subis aux différents essais au laboratoire.

- Laboratoires de l'université de Mostaganem -Université de Abdelhamid Ibn Badis.
- Laboratoire des travaux publics de l'ouest - L.T.P.O - Oran.

Malheureusement, les travaux aux laboratoires sont arrêtés suite à la pandémie du corona virus COVID 19, ce qui nous a bouleversé et stoppé pour achever la phase de la préparation des mortiers, puis l'immersion de ces derniers dans des récipients qui contiennent les différents attaques chimiques.

NB : Les étapes qui ont dû être faites sont présentées sous forme d'organigramme

Dans la **Figure IV.1.1** Et qui Donne une démarche à notre travail.

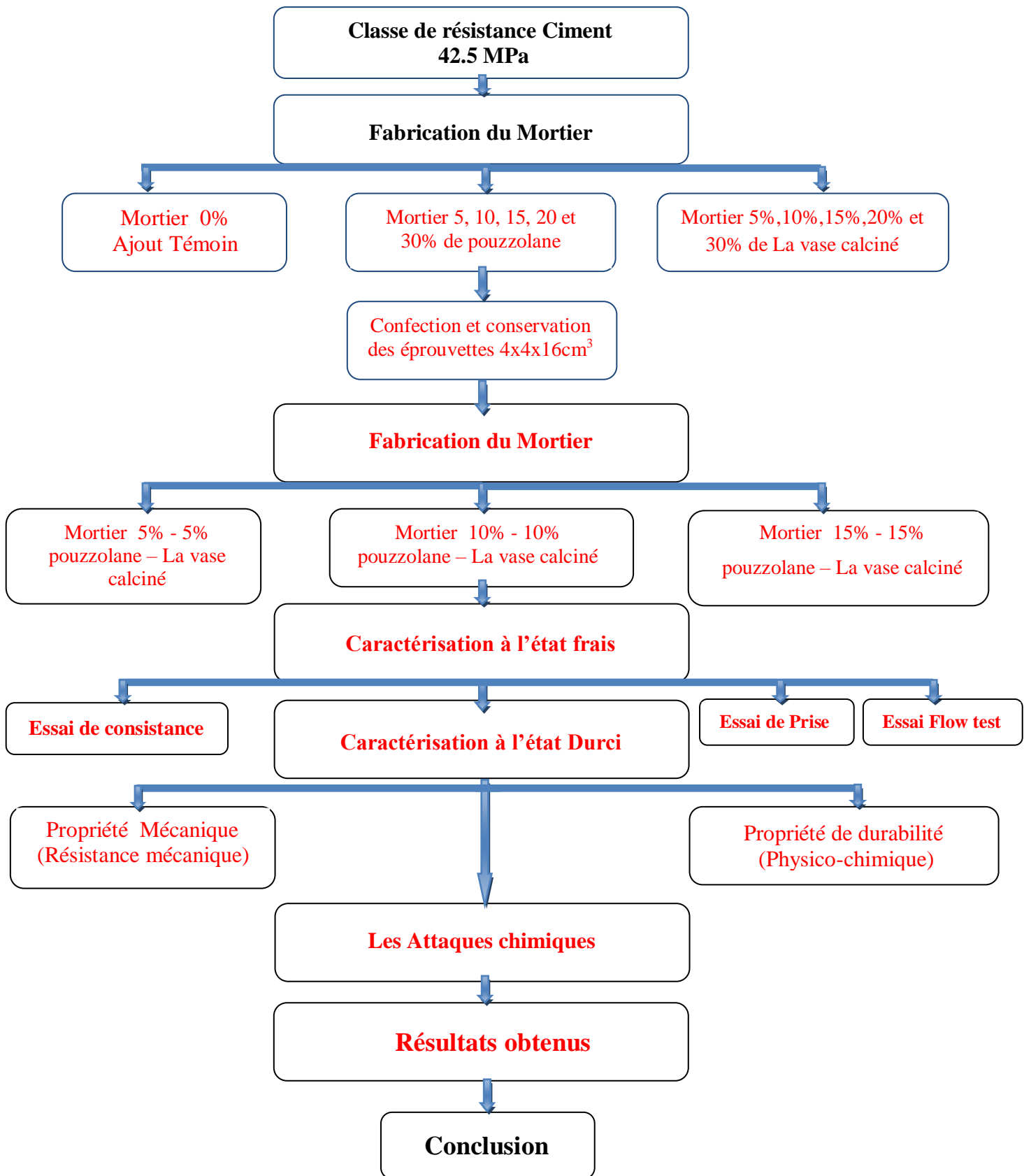


Figure IV.1.1 : Organigramme récapitulant du travail a mené.

IDENTIFICATIONS DES MATERIAUX UTILISÉS

1.2 LE CIMENT

Le ciment qui été utilisés dans tous les essais et dans la composition des différents bétons auto plaçant est Un ciment CPA CEM I 42,5 provenant de l'usine de Zahana (ouest Algérie). Il contient au moins 95% de clinker. Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise, comme on vous l'explique sur la Figure IV .1.2 .a

Le choix de ce ciment sans ajout est justifié par l'étude de l'effet de chaque substitut sur les performances des bétons autoplaçants sans qu'il y'ait d'interférence avec les autres ajouts présents dans les ciments composés et qui pourraient fausser les interprétations.

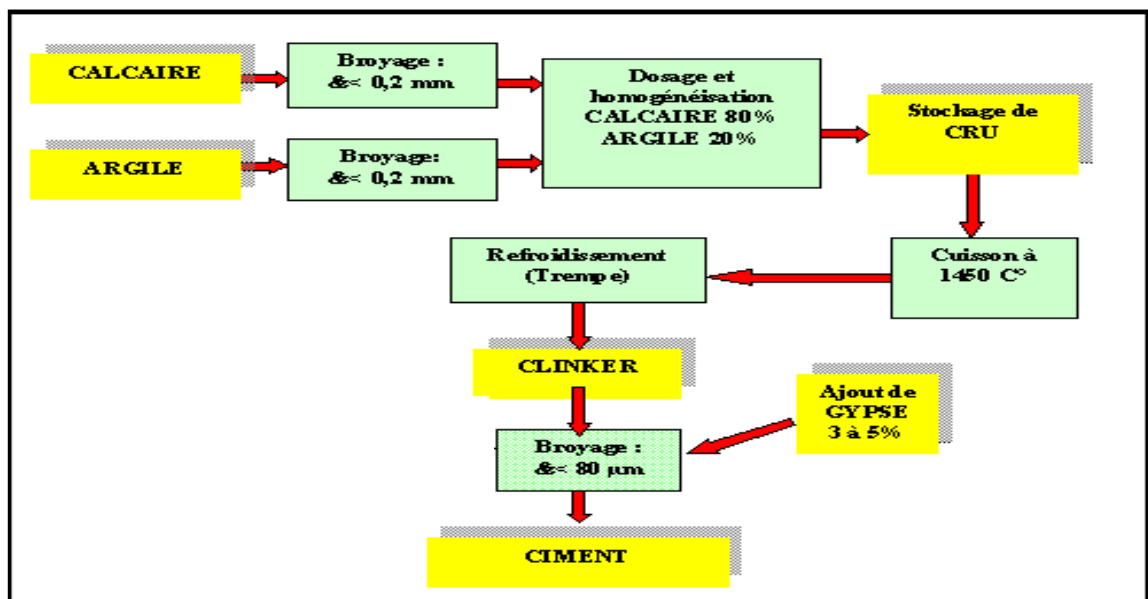


Figure IV .1.2.a : les phases de fabrications du ciment

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa.

La surface spécifique de Blaine (S.S.B) du ciment est de 318 m²/kg.

La masse volumique absolue (ρ) du ciment anhydre est de 3,13 g/cm³.

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante ; lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

Elle est mesurée par un appareil appelé «perméabilimètre de Blaine» dont la description complète est donnée dans la norme EN 196-6 et exprimée en cm²/g [79].

La composition chimique du ciment est donnée par le **Tableau IV 1.2.a**

Tableau IV 1.2.a : Composition chimique du ciment utilisé.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Perte au Feu	Insolubles
Teneur en %	22.30	5.10	3.99	63.60	1.43	1.24	0.70	0.34	1.18	0.36

Sa composition minéralogique illustrée dans le **Tableau IV 1.2.b**, est obtenue en utilisant la formule de Bogue appliquée au clinker ordinaire, pour donner les constituants minéraux suivants :

- A 1220°C:** 2 CaO, SiO₂ **Bélite**
 3CaO, SiO₂ **Alite**
- A 1450°C:** 3 CaO, Al₂O₃ **Aluminate**
 4 CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ **Brownmillerite**

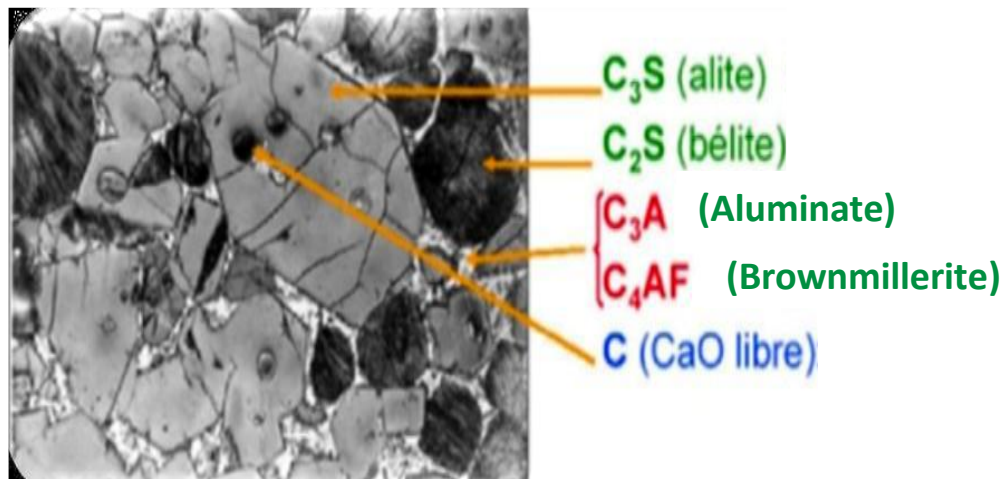


Figure IV .1.2.b: Micrographie des quatre Phases principales de clinker

Tableau IV 1.2.b : Composition minéralogique du clinker.

Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur massique (%) du CEM I 42.5	58.57	16.05	1.43	17.11

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de ciment sans aucun tassement.

La masse volumique absolue du ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3.0 et 3.2, est déterminée selon la norme NF P 18-555, par le volumétre de la Chatelier en utilisant le pycnomètre et la Benzine (ou le benzène), avec un bain thermostatique de température 20° C ± 0.2° C.

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée selon la norme NF EN196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde. Le temps de prise est déterminé selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.



Figure IV .1.2.c : Appareil de Vicat Manuel

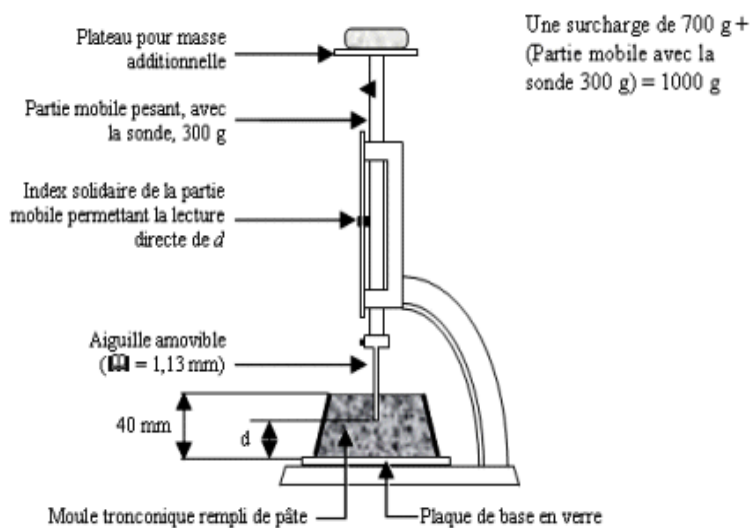


Figure IV .1.3.d : Schéma de fonctionnement de l'Appareil de Vicat

Ces caractéristiques physiques sont groupées dans le **Tableau IV 1.2.c**

Tableau IV 1.2.c : Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5

L'état du ciment	Caractéristiques	Valeurs
Ciment Anhydre	Masse volumique apparente du ciment en (g/cm^3)	1.18
	Masse volumique absolue du ciment en (g/cm^3)	3.13
	Finesse suivant la méthode de Blaine en (cm^2/g)	3180
Pâte de Ciment	Teneur en eau pour consistance normale (%)	25
	Début de prise	2h 45
	Fin de Prise	3h 55

1.3 LA VASE

Le sédiment fluvial dont nous voulons procéder à sa substitution au mortier de ciment à base de la pouzzolane c'est La vase, elle a été prélevée en aval du barrage Chorfa (wilaya de mascara) dans la zone de rejet. Après son amenée de l'endroit citée, des essais de caractérisation physiques et chimiques ont été effectués au laboratoire de l'université sur des échantillons prélevés par soins.

La composition chimique de la vase du barrage Chorfa permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes, cette transformation nous assure la réactivité pouzzolanique recherchée.

Nous avons donc concrétisé le processus de préparation et de transformation par traitement thermique de l'échantillon de la vase, ce qui nous a permis par la suite de procéder à l'évaluation des caractéristiques physiques de cette vase. La vase draguée a été passé par les différentes étapes qui sont comme suit :

- 1- **Séchage** : L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve (105°C) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.
- 2- **Concassage** : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.
- 3- **Broyage** : La vase concassée est totalement broyée.
- 4- **Tamisage** : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 µm où seul le passant est considéré par la suite.
- 5- **Calcination** : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °C. en petite quantité en vue de la dimension du four, la vitesse de cuisson doit être réglée à 5° C/min afin de garantir une cuisson lente et uniforme, ensuite, La température de cuisson de 750 °C ±5, a été maintenue constante pendant 05 heures pour obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui a été conservée à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

Les Figures ci-dessus résument toutes les étapes de préparation de la vase.



Figure IV .1.3.a: Vase à L'état Initial.



Figure IV .1.3.b: Four de calcination Utilisé (+ 1200°C).



Figure IV .1.3.c : Vase Concassée.



Figure IV .1.3.d : Vase Tamisée.



Figure IV .1.3.e : Vase après calcination (produit final).

La composition chimique de cette vase calcinée a été effectuée au laboratoire L.T.P.O d'Oran, les résultats d'analyse sont représentés dans le Tableau IV 1.3.a

Tableau IV 1.3.a: Caractéristiques chimiques de la vase calcinée

Les composants chimiques	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	SO ₄	K ₂ O	Total	CaCO ₃	Carbonates	CO ₂	H ₂ O
Teneur en (%)	55.34	15.75	7.43	13.82	0.17	/	0.70	92.51	23.5	4.64	2.04	0.87

Comme nous l'avons expliqué dans le premier chapitre concernant les Propriétés et caractéristiques pouzzolanique Selon la norme ASTM C618 les résultats trouvés sont :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 78.82\% > 70\%$
- Sa teneur en verre silice-CaO=41,52% > 34%, donc la vase calcinée comporte une phase vitreuse.

Donc La vase calcinée du barrage de Chorfa est pouzzolanique.

1.3.1 Les Caractéristiques physiques de la vase :

La vase étudiée a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique afin de pouvoir l'identifier.

- Les masses volumiques apparentes de la vase calcinée ont été obtenues par la pesée d'un récipient d'un litre rempli sans aucun tassement.
- Les masses volumiques absolues ont été déterminées, selon NF P 18-555, par le pycnomètre de Le Châtelier et le benzène.

Tableau IV 1.3.1: Caractéristiques physiques de la vase calcinée du Barrage de Chorfa.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente de la vase en (g/cm ³)	0.57
Masse volumique absolue de la vase en (g/cm ³)	2.65
Finesse suivant la méthode de Blaine en (cm ² /g)	7830

L'analyse granulométrique de la vase calcinée a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LAFARGE située dans la région de Sig (Figure IV .1.3.1).

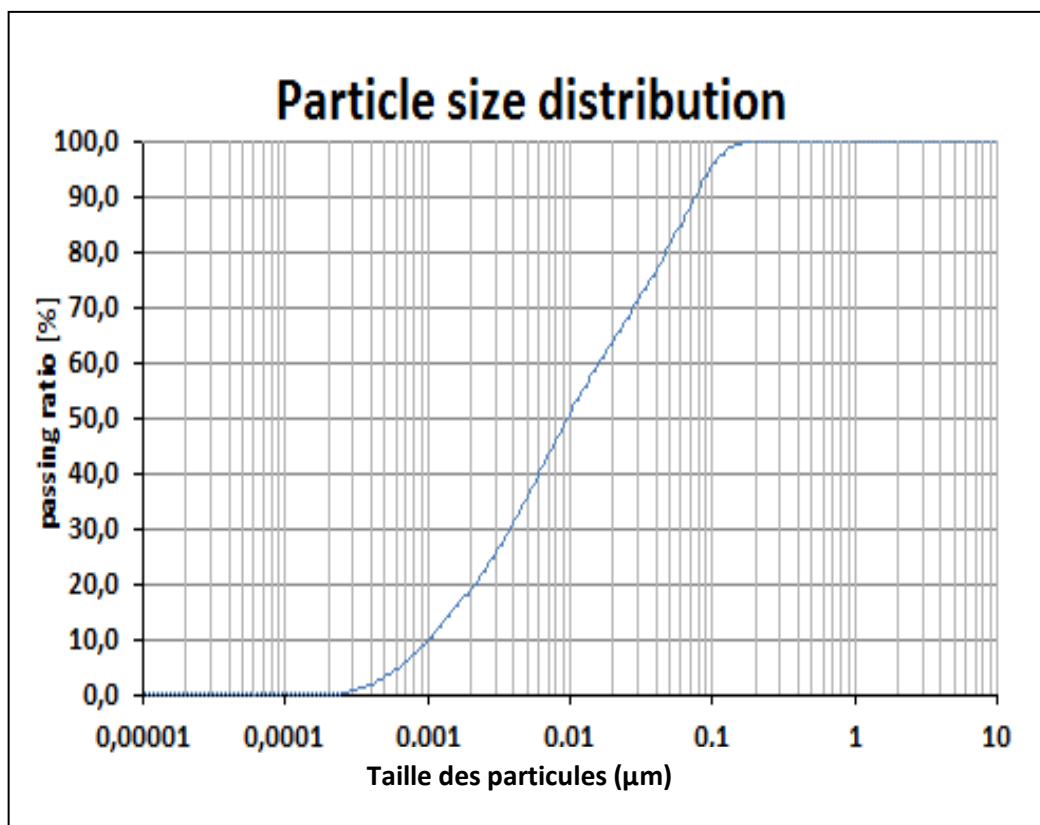


Figure IV .1.3.1: Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa [Laboratoire LAFARGE, Sig].

1.4 POUZZOLANE NATURELLE :

La pouzzolane naturelle utilisée est extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-saf. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponces bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre (Figure IV.1.4.b), résultante de concassage des scories pouzzolaniques (Figure IV.1.4.a) la pouzzolane est étuvée pendant 24 heures à une température de 50°C afin d'éliminer l'humidité, ensuite les broyée jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de maille 80 µm.



Figure IV .1.4.a: Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage



Figure IV .1.4.b: Poudre de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf broyée à 80 µm.

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau IV .1.4

Tableau IV 1.4.a : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Les composants chimiques	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	CaCO ₃	Cl	MgO	Na ₂ O
Teneur en (%)	42.95	16.32	9.49	12.36	0.01	1.39	10.75	0.00	4.20	3.00

Les caractéristiques physiques de cette pouzzolane sont mentionnées dans le Tableau IV 1.4.b.

Tableau IV 1.4.b : Caractéristiques physiques de la Pouzzolane Naturelle de Béni-Saf.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue de la vase en (g/cm ³)	2.60
Finesse suivant la méthode de Blaine en (cm ² /g)	4330

1.5 LES SABLES

Nous avons employé Pour notre étude, une composition en granulats, comportant un sable naturel siliceux, provenant de la carrière de Oued El Kheir (région de Mostaganem) et un sable concassé calcaire provenant de la carrière de Terga (Ain temouchent).

Le sable qui sera utilisé dans tous les confections des mortiers, et ce après correction est un sable corrigé de 40 % Sable de Naturel et de 60 % Sable concassé de carrière.

Le tableau IV.1.5 et la figure IV.5.1, nous ont fournis les propriétés des sables utilisés.

Tableau IV.5.1 : Caractéristiques Physiques des sables utilisés.

Origine du sable	Sable Naturel	Sable de Carrière	Sable Corrigé
Classe (fraction)	0/1	0/4	0/4
Nature (minéralogique)	Siliceux	Calcaire	Silico-Calcaire
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,60	2,70	2,68
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,70	1,90	1,83
Coefficient d'absorption	1,53	1,90	1,60
Pourcentage en éléments fins (%)	0,33	1	10
Module de finesse MdF	1,64	2,63	2,32

Analyse granulométrique du sable corrigé

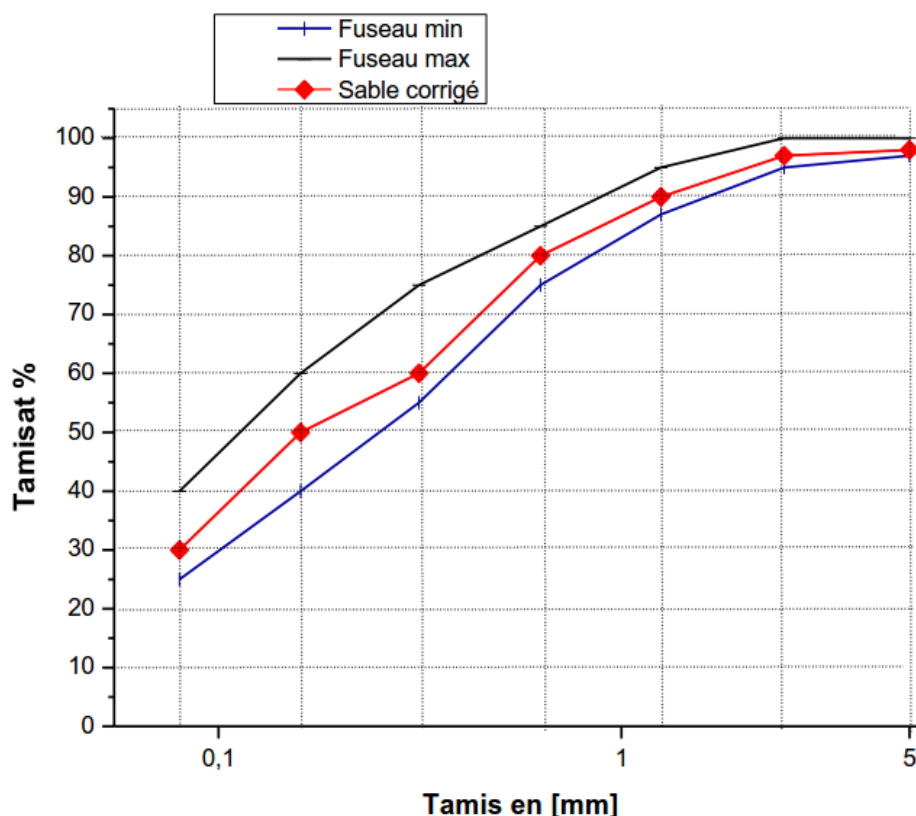


Figure IV .1.5: Courbe granulométrique du sable corrigé

CONCLUSION GENERALE

Le projet de fin d'études présenté dans ce mémoire entre dans le cadre de la valorisation des sédiments fluviaux dans la construction et en même temps résoudre le phénomène qui est l'origine de notre préoccupation l'envasement des barrages en Algérie. Notre sujet consiste à confectionner un mortier à base de pouzzolane naturelle (Beni-saf) avec ajouts en pourcentages étudiés de sédiments fluviaux issus du barrage de Chorfa.

L'utilisation de ce déchet naturel va certainement contribuer à l'économie durable (les coûts de l'entretien des retenues) et au développement de notre pays, ainsi elle va diminuer d'un côté la consommation du clinker et augmenter la production cimentaire tout en préservant l'aspect environnemental.

Avant d'entamer notre travail et avoir une idée claire sur notre problématique, il était nécessaire d'avoir un aperçu sur les différentes recherches actuelles qui s'approchent de notre thème. Ces revues bibliographiques nous ont bien éclairés sur le phénomène de durabilité des mortiers à base de matériaux pouzzolaniques et particulièrement le comportement de ces mortiers vis-à-vis des attaques chimiques.

Malheureusement à cause de la pandémie qui a frappé notre pays, le facteur temps n'était pas en notre faveur ceci nous a obligé de modifier notre plan de travail. Nous avons choisi en premier de se pencher sur les critiques d'une partie de la thèse de Hamadache [18], celle qui concerne la résistance des mortiers aux multiples attaques chimiques. Par la suite nous avons essayé d'identifier les différents matériaux susceptibles d'être utilisés dans notre contribution à savoir l'étude physico-chimiques des composants des mortiers à confectionner.

Le bilan final des recherches citées dans ce mémoire nous a permis d'aboutir à plusieurs recommandations et conclusions qui seront donc très utiles pour l'élaboration de notre contribution.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **B.Hamdi** « L'influence Du Taux D'ajout De Pouzzolane Sur Les Caractéristiques Physico-chimique Et Mécanique Des Ciments - 2018 Bouira Rapport De Soutenance.
- [2] **A kerbouche, m. Mouli, l. Laoufi, y. Senhadji, s. Benosmane** « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers »- SBEIDCO-1st international-2009
- [3] **M. Benkaddour, F. Kazi Aoual, A. Semcha** « Valorisation De La Vase Du Barrage Du Fergoug En Pouzzolane Artificielle », Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique
- [4] **M. Benkaddour, F. Kazi Aoual, A. Semcha** « Durabilité Des Mortiers A Base De Pouzzolane Naturelle Et De Pouzzolane Artificielle, (Enset Oran).
- [5] **Bessenouci mohammed zakaria** « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat » memoire de magister 2009.
- [6] **Bessenouci et al** « Caractérisation, Modélisation Et Analyse Du Comportement Thermo-Mécanique Des Matériaux De Construction A Base Pouzzolanique »
- [7] **Aziez mohammed nadjib** « Attaques sulfatiques externes des matériaux cimentaires : influence de la température ». Durabilité des matériaux et durée de vie des ouvrages 2017
- [8] **N. Kaid, k. Ayed, a. Abidelah, h. Khelafi, d. Kerdal** Etude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs, universite des sciences et de la technologie d'oran.
- [9] **Lakhdar Benamara, Kamal Ouhba Et Andre Hamwi** « Elaboration D'une Pouzzolane De Synthèse A Partir Des Sédiments De Barrage » -2013.
- [10] **Laoufi, y. Senhadji, a. Benazzouk, t. Langlet, m. Mouli, i. Laoufi, a. S. Benosman** « Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposes a une attaque chimique »2016
- [11]. **Samai soumia** « Formulation d'un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis a températures élevées » -2016
- [12]. **Aouididi lwiza** « Caractérisation d'un ciment a base de pouzzolane » - 2016
- [13]. **O.Chaib, m. Mouli, m.Hanifi, m.Hamadache, s. Benosmane et f. Dif** -2015 « Etude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base ciments composes ».
- [14]. **A.aichoube, m. Ghrici, a. Benaissa** « Effets de la pouzzolane naturelle de beni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » Colloque CMEDIMAT 2005, ENSET oran .
- [15]. **Houhou et al** « Influence De L'ajout Pouzzoulanique Sur Le Comportement Mécanique De La Pate De Ciment », 27ème Colloque Maghrebin En Genie Civil, Biskara, Algerie, 2002
- [16]. **y senhadji** « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques » (acides et sulfates) .– 2013.
- [17]. **M said-mansour, m ghrici, s kenai** « Effets de la Combinaison de la Pouzzolane et du Calcaire sur les Propriétés des mortiers et des bétons » - congres international, 2005

- [18]. **M. Hamadache** « résistances mécaniques, conductivité et résistance a la corrosion des mortiers pouzzolaniques » . Oran 2017.
- [19]. **Zineb douaïssia et mouloud merzoud** « Effet des scories et de la pouzzolane naturelle sur le comportement mécanique des mortiers en verre recycles ».
- [20]. **M.z. Bessenouci , e.n. Bibi triki , s. Khelladi et a. Abene** « Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane a l'aide d'une modélisation des matériaux poreux ».Septembre 2011).
- [21]. **N. Kaid^{am}, Cyr^{bs}, Julien^h, Khelafi^a** « **Durabilité du béton contenant une pouzzolane naturelle telle que définie par une approche basée sur les performances** »
- [22]. **A. Logbi , a. Kriker et z. Snisna** « Effets des ajouts de minéraux sur la durabilité et les propriétés physico-mécaniques du mortier ». Et références de ces travaux
- . **LOGBI Abdelaziz.** « Effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton », Thèse de Magister, l'enp- Alger (Juin 1999).
 - . **DAO Phuc Lam.** « Valorisation des laitiers LWS dans les mélanges granulaires ». Thèse de Doctorat, Universté henrypoincaré- rancy (juillet 2010).
 - . **A. Bougara, C. Lynsdale, K. Ezziane.** « Activation des scories algériennes dans les mortiers » Construction et matériaux de construction (2009)
 - . **A. Skaropoulou, K. Sotiriadis, G. Et S. Kakali Tsivilis** « Utilisation d'adjuvants minéraux pour améliorer la résistance du béton de ciment calcaire contre thaumasite forme d'attaque sulfate » Cement Concrete & Composites (2013)
 - . **R. Roscovic, D. Bjegovic.** « Rôle des ajouts de minéraux dans la réduction des émissions de CO2 ». Recherche sur le ciment et le béton (2005)
 - . **CHERAIT Yacine et NAFA Zahredinne .;** « Eléments et matériaux de construction et essais »; Direction de la publication universitaire de Guelma DPUG (2007).
- .**Mladenka Saric-Coric et Pierre-Claude Aïtcin.** « Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice. » Journal canadien de génie civil.
- .**CHABI, S, MEZGHICHE. B, et GUETTALA.H;** « Etude de l'influence des ajouts Minérales actif Sur Le COMPORTEMENT des Ciments Mécaniques ET Mortiers » Courrier du Savoir - N ° 05, Juin 2004
- .**A. Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji et S. Benosmane;** « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécniques des mortiers ». SBEIDCO - 1ère Conférence Internationale sur les Infrastructures d'Environnement Construit Durable dans les Pays en Développement - ENSET Oran (Algérie) - (12-14 octobre 2009).
- . **AMOURI Chahinez, Houari Hacène;** « Les performances des mortiers avec différentes additions minérales » SBEIDCO-1ère conférence internationale sur les infrastructures environnementales bâties

durables dans le développement des pays en développement ENSET Oran (Algérie) - 12-14 octobre 2009 ,

. **Imène Joudi-Bahri, André Lecomte, Mongi Ben Oueddou et Taoufik Achour** , « Utilisation de sables et de charges calcaires dans le béton sans superplastification » Cement & Concrete Composites . **NF P 18 - 555**; « Granulats: mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables » AFNOR - Paris - (1997).

. **KRIKER** . « Durabilité du béton à base de laitier »

[23]. **g. Habert^{ad}, n. Choupay^{bjm}, montel^{ad}, Guillaume^{ag}, Escadeillas^c** « Effets des minéraux secondaires des pouzzolanes naturelles sur leur activité pouzzolanique ».

[24]. **N. Belas belaribi, m. Semcha et I. Laoufi** « Influence de la pouzzolane de beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons » - 2011

[25]. **Belaribi Omar** « Durabilité Des Bétons Auto plaçant A Base De Vase Et De Pouzzoloane » L'université De Mostaganem -2014

[26]. **Belas n., belaribi o., mebrouki a., bouhamou n.** « Valorisation des Sédiments de dragage dans les Bétons séminaire international, innovation & valorisation en génie civil.

[27]. **M. kassoul, a. abdelgader and m. belorgey** « Caractérisation de la Sédimentation des Barrages en Algérie » revue des sciences de l'eau 1997.

[28]. **Hadj sadok rachid** « Analyse Du Cycle De Vie Des Sédiments De Dragage » juin 2019.

[29]. **M. R. Khelifa**, « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants (2009). Architecture, aménagement de l'espace. Université d'Orléans, 2009.

[30] **Khélifa R.**, « Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons », Université Mentouri de Constantine, 2001.

[31] **NF EN 206-1. (2006)**. Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. Norme française, AFNOR.

[32] **j. belabid**. « Comportement mécanique et durabilité Des matériaux cimentaires avec ajouts de cendre et fumée de silice granulats, Sols, Ciments et Bétons », Casteilla, 2000.

[33] **Semcha A.**, « Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Génie Civil. Décembre 2006.

[34] **G. Habert et al** « Effects of the secondary minerals of the natural pozzolana on their pozzolanic activity » Cement and Concrete Research 38 pp 963-975; 2008.

[35] **S. Donatello, M. Tyrer, C.R. Cheeseman**, « Comparison of test methods to assess pozzolanic activity » Cement & Concrete Composites, journal home page: (2010) .

- [36] Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés - V2.0-09/2013- A6 - Barrage : Chasses Et Curages.
- [37] **Erdem et al.** « Effect of various additives on the hydration of perlite gypsum plaster and perlite-portland cement pastes». Turk J Chem 1997;21(3):209–14.
- [38] **Urhan S.** « Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete». Part 2: Observations on expanded perlite aggregate concretes. Cem Concr Res 1987;17(3):465–77.
- [39] **Shi C.**, An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, Canadian journal of civil engineering, vol. 28(5), p778-786, 2001
- [40] **A. Ali Aichouba et al** ; « Effets de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire ». Colloque CMEDIMAT 2005, ENSET Oran -Déc. 2005.
- [41] **N. Belbachir** « Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse », mémoire de magister 2012.
- [42] **M.N. Hohou et B. Mezghiche** « Influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment » 2ème Colloque Maghrébin en Génie Civil, Biskra, 2002.
- [43] **B. Belhachemi et al** « Influence de la surface spécifique Blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique ». Colloque Méditerranéen sur les Matériaux (CMEDIMAT 2005), ENSET Oran, 06-07 Décembre 2005.
- [44] **S. Mansour, M. Kenai** « Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et bétons » Congrès international sur la Réhabilitation des Constructions et Développement Durable. Alger 3 et 4 Mai- 2005.
- [45] **S.Targan, A.Olgun, Y.Erdogan and V.Sevinc**, « Influence on natural pozzolana, colematite ore waste, bottom ash and fly ash on the properties of Portland cement », Cement and Concrete Research , Vol 33 , pp 1175 – 1182 – 2003.
- [46] **F. Bektas et al**, «Utilisation de la poudre de perlite pour supprimer la réaction alcali silice» Elsevier Cement and Concrete Research 35 (2005) 2014– 2017.
- [47] **L.-H Yu, Ou H, L.L Lee**, « Enquête sur l'effet pouzzolanique de poudre de perlite dans le béton » Cement and Concrete Research Volume 33, Numéro 1, Pages 73-76, Janvier 2003
- [48] **Ozkan Sengula et al**, « Etude l'effet de la perlite expansée sur les propriétés mécaniques et de la conductivité thermique du béton léger », Contents lists available at Science Direct, Energy and Buildings 43(2011). 671–676.
- [49] **BAROGHEL-BOUNY et al**, « Matrices cimentaires, analyse microstructure et propriétés de transferts des bétons et durabilités » Hermès science publication- Paris(2001).
- [50] **B. Belhachemi et al** « Influence de l'ajout pouzzolane sur la qualité du ciment » JEREDD 2008 ; ENSET d'Oran ; Juin 2008.
- [51] **M. Fabrice DEBY**, « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en Environnement marin », Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2008.

- [52] **Abderrahmane SOUFI**, « Étude de la durabilité des systèmes béton armé – mortier de réparation en milieu marin » ; Thèse de doctorat l'Université de La Rochelle, 2013.
- [53] **Norme NA442., Equiv EN 197-1**, « Ciment- composition, spécification et critères de conformité des ciments courants » P15-101-1, comité 37 N°20, (2001).
- [54] **Norme NA231., Equiv NF EN 196-6**, « Méthodes d'essais des ciments – Détermination de la finesse » ,P 15-476, comité 37 N°4, (1989).
- [55] **NF P 15-403 (juillet 1963)**. Technique des essais. - Sable normal et mortier normal (homologuée le 31 juillet 1963).
- [56] **NF P 18-554**, « Granulats – Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux ». AFNOR, Paris 1990.
- [57] **Norme (NF P 18-325)**, « Bétons – Performances, production, mise en oeuvre et critères de conformité ».
- [58] **Norme NF P 18-303**, « Concentration en matière de suspension et sels dissous », Qualité requise de l'eau de gâchage Aout1999.
- [59] **M.Benasla** , « Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction, 2014.
- [60] **ASTM C 305-99**, « Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency», 1999.
- [61] **M.Mouli**, «Etude des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication des bétons légers et des bétons à haute performance », thèse USTO 2006.
- [63] **Norme EN 196-3:2005+A1:2008 (E)**, « Methods of testing cement-Part 3: Determination of setting times and soundness »
- [64] **Norme EN 196-5 : Avril 2013**, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 5 : essai de pouzzolanité des ciments pouzzolaniques »
- [65] **ASTM C 1437-01**, « Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar», 2001.
- [66] **R. Chihaoui**, « Durabilité des matériaux cimentaires vis- à-vis d'un environnement chimiquement agressif ». Mémoire de magister génie civil à l'USTMB d'Oran, 2008.
- [67] **ASTM C 109/C 109M-02**, « Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) », 2002.
- [68] **R. Dupain, R. Lanchon, J.-C. Saint-Arrom**, « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Terminal STI Génie Civil, BTS bâtiment, BTS Travaux publics, DUT Génie Civil, MST Génie Civil, Ecole d'ingénieurs, Editions Casteilla 2004.
- [69] **Day R.L., Shi C**, « Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural pozzolan cement pastes », Cement and Concrete Research, Vol. 24(8), p. 1485-1491, 1994.
- [70] **ASTM C 267 – 01**, « Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing's and Polymer Concretes», 2001.

[71] **NF EN 12879 / X33-004**. AFNOR, November 2000 « Caractérisation des boues - Détermination de la perte au feu de la matière sèche Mar, 04/03/2008

[72] **F. ADENOT**. « Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment », Thèse, Université d'Orléans, 1992.

[73] **G. Habert, N. Choupay, JM Montel, D.Guillaume, G.Escadeillas**.«Effects of the secondary minerals of the natural pozzolana on their pozzolanic activity» Cement and Concrete; 2008.

[74] **(La Source) bulletin des laboratoires des ponts et c haussées 2000** -les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés) André LE ROUX, Stéphane ORSETTI.

[75] **M. S Mansour, M.T. Abadlia, K. Bekkour** « Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires ». **Revue de Mécanique Appliquée et Théorique**.

[76] **Haddad O.**, 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24, 25 et 26 Mai 2004.

[77] **Abib Z.**, Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juillet 2006.

[78] **Sedran T.**, Thèse de Doctorat en Structure et Matériaux, « Rhéologie et rhéométrie des bétons - Application aux bétons autonivelants », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Nantes, Mars 1999.

[79] **Safer O.**, Mémoire De Magister « Etude du comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton ordinaire à base de sédiment de dragage 2012.

[80] **Ecoles Française du Béton (EFB)**, mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint- Lambert, Internet, 2004.

[81] **Seddik A.** Thèse de magistère en Génie Civil, « Le béton auto plaçant sous conditions locales », Département de Génie Civil, Université de Sétif (Algérie), Février 2008.

[82] **Khelifa R.**, «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.

[83] **Rapport d'essais préliminaires**, «Etude de ciments aux ajouts», Entreprise Régionale des Cimenterie de l'Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta, 2005.

[84] **FEBELCEM** – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants, Bruxelles, août 2005. Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants.

- [85] **Dreux G. et Festa J.**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [86] **Brunetaud X. et Jausserand L.**, «Travaux pratiques ; Ciment et bétons», Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2005.
- [87] **NF P 18-353, Norme Française** ; Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aide de l'aéromètre à béton.
- [88] **NF P 18-406** relative aux essais de compression des bétons.
- [89] **Rougeau P., Guiraud P.**, «La durabilité dans le contexte normatif européen», LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- [90] **Capmas A.**, «Béton et développement durable», LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- [91] **Assié S.**, Thèse de doctorat en Génie Civil, « Durabilité des bétons auto plaçants », Institut National des Sciences Appliqués de Toulouse, le 29 Octobre 2004.
- [92] **Zhu W., Bartos P. J. M.**, «Permeation properties of self-compacting concrete», Cement and Concrete Research, 33, pp, 921-926, 2003.
- [93] **Rougeau P., Maillard J. L. and Mary-Dippe C.**, “Comparative Study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp, 251-261, 13-15 September 1999.
- [94] **Audenaert K., De Shutter G.**, ”Chloride penetration in self compacting concrete” Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp, 818-825, 17-20 august, 2003.
- [95] **Aitcin P. C., Neuville A. et Acker P.**, «Les différents types de retrait du béton», Bulletin du LCPC 215, réf, 4184, pp, 41-51, mai - juin 1998.
- [96] **Norme Française NF P 15-010**, Octobre 19897.
- [97] **Baron J.**, « Introduction à la durabilité des bétons », p 23-38, La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [98] **NF EN 197-1 Février 2001**, Indice de classement : P 15-101-1 « ciment ».
- [99] **sahouane s. , zebbare z.** Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés mécanique et durabilité du mortier, mémoire master, université Djelfa 2017.
- [100] **Le ciment selon la norme SN EN 197-1:2011** et le cahier technique SIA 2049:2014