

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
Département : Génie Des Matériaux**



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie des Matériaux

**Option : Science des matériaux pour la construction durable (MCD)
Option : Contrôle qualité des matériaux(MCQ)**

THEME

**Influence d'attaques par $(\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3)$ et (MgSO_4) sur
les résistances mécaniques en compression sur les mortiers
A base des ciments pouzzolaniques**

Réalisé Par :

**NASREDDINE DALILA
AMROUCHE MERIEM**

Encadré par :

Mr. SAIDI.M

Devant le Jury:

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons à adresser nos grands remerciements à notre promoteur Monsieur Mohamed Saïdi pour tous ses conseils, ses grands efforts et surtout sa patience.

Nous remercions tous les enseignants du département de génie des matériaux.

Nous remercions aussi toute l'équipe du groupe « LNHC » de OUED SMAR : ami Rezkí, Rahíche Mohamed, Sabrina et CHahra qui nous ont orientés et encouragés durant notre stage pratique.

Nous remercions toute l'équipe de l'unité de recherche « FSI » ami Saïd, Najet, Jagjiga pour l'intérêt qu'ils ont portés à notre travail.

En fin, nous tenons à remercier les membres du jury qui ont consacré un peu de leur temps pour examiner et évaluer notre travail.

« Dédicaces »

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

*Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant
mes études depuis mon enfance*

*Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes
Etudes*

Mon fiancé Mohamed Amine et sa famille

Mes frères Mohamed, Samir, et Ahmed

Mes sœurs Fatima , Hakima , Naima et surtout Saida

Mes copines Samia, Nassima,

Hafida, Malika, Fatima, Farida, Hassina, Samah, Sarra

*A ma binome Amroche Mereim
et sa famille.*

*Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien que
je n'ai oublier Personne dans cette courte page.*

Spécialement pour le groupe MCD14

GENIE DES MATERIAUX

DALILA NASREDDINE

« Dédicaces »

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance

Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes Etudes

Mes frères Mohamed, Omar et Brahim

Mes sœurs Fatma , Sakina , Amina et surtout Zineb

Mes copines Souhila , Salma et Dalal

A ma binome Nasreddine Dalila

et sa famille.

Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublier Personne dans cette courte page.

Spécialement pour le groupe MCQ14

GENIE DES MATERIAUX

MERJEM AMROUCHE

Partie théorique

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES CIMENTS	
I.1. Définition.....	2
I.2. Historique.....	2
I.3. Les constituants des ciments.....	3
I.3.1. Le clinker.....	3
I.3.2. le gypse.....	5
I.3.3. Additions minérales.....	5
I.4. Matières premières.....	6
I-4-1 : Calcaire.....	6
I-4-2 : Eléments argileux calcaires.....	7
I-4-3 : Argiles.....	8
I.4.4. Matières auxiliaires.....	9
I.5. Ajouts cimentaires.....	10
I.5.1. Définition des ajouts cimentaires.....	10
I.5.2. classification des ajouts.....	10
I.5.3. bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaires.....	11
I-5-4 : La pouzzolane.....	12
I.5.4.1 : Définition.....	12
I.5.4.2: Types de pouzzolane	12
I.5.4.3: Effet de La pouzzolane	14
I.5.4.4 : Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes.....	15
I.5.4.5. Hydratation et réaction pouzzolanique	16
I.5.4.6. Différentes utilisations de la pouzzolane.....	17
I.6. Processus de fabrication de ciment.....	17
I.7. Hydratation du ciment.....	22
I.7.1. Hydratation et prise du ciment Portland (CPA).....	22
I.7.2. Hydratation du Silicate tricalcique C3S	22
I.7.3. Hydratation du silicate bi calcique C2S	23

SOMMAIRE

I.7.4.Hydratation de l'aluminat tricalcique C3A	24
I.7.5.Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique C4AF.....	24
I.8. Classification des ciments	24
I.8.1. Classification des ciments en fonction de leur composition	25
I.8.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	25
I.8.3. Propriétés des ciments	26
I.8.4.Les différents types de ciment spéciaux.....	26
I.9. Conclusion	27

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MORTIERS

II.1.Définition.....	28
II.2.Les constituants des mortiers.....	28
II.2.1 .Les liants.....	29
II.2.2.Les sables.....	29
II.2. 3.L'eau de gâchage	31
II.2.4.Les additifs	32
II.3.Les différents types des mortiers	34
II.3.1.Les mortiers de ciment	34
II.3 .2.Les mortiers de chaux.....	34
II.3.3.Les mortiers bâtards	34
II.3.4.Mortier rapide	34
II.3.5.Mortiers fabriqués sur chantier.....	34
II.3.6.Mortier industriel.....	34
II.3.7.Mortier réfractaire	34
II.3.8.Mortier autoplaçant.....	35
II.4.Préparation des mortiers	35
II.5.Caractéristiques principales.....	35
II.6.Les emplois de mortiers.....	35
II.6.1.Les joints de maçonnerie.....	35
II.6.2.Les enduits	36
II.6.3.Les chapes	36

CHAPITRE III : LA DURABILITE

III.1.Introduction	37
III .2.Définitionde la durabilité.....	37
III .3.Paramètres chimiques de la durabilité	38
III .3.1.Paramètres liés au matériau	38
III .3. 2 Paramètres liés à l'environnement	40
III .3. 3 Paramètres liés à la structure.....	41
III .4.Revue des principaux milieux agressifs.....	43
III .4. 1. Milieux acides.....	43
III.4.2 Milieu sulfate.....	46
III.4.3. Attaque d'origine biochimique.....	55
III.4.4 Autres milieux considérés agressifs.....	56
III.5 Conclusion	56

Partie pratique

IV.1. objectif et méthodologie du travail.....	56
IV.2. Caractéristiques des constituants.....	58
IV.2.1 :L'eau de gâchage	58
IV.2.2 : Ciment CEMI	58
IV.2.3 : Le Sable.....	59
IV.2.4 : Caractérisation de la pouzzolane.....	64
IV.2.5 :L'Adjuvant.....	65
IV.3. Formulation et confection des différents mortiers	67
IV.3.1. Composition des mortiers.....	68
IV.4. caractéristiques des différentes compositions.....	70
IV.4.1. La masse volumique	71
IV.4.2. La consistance normale.....	71
IV.4.3 .Le délai de prise	72
IV.5. caractéristiques physiques du mortier.....	73
IV.5.1. L'étalement.....	73
IV.5.2. Masse volumique.....	74

SOMMAIRE

IV.5.3. L'absorption d'eau et la porosité	76
IV.6. Caractéristiques mécaniques des différents mortiers	77
IV.7. Durabilité des éprouvettes	80
IV.8. La résistance mécanique après dégradation	82
IV.9: Analyses minéralogiques	85
IV.9.1: Analyses aux diffractions des rayons x de la poudre $MgSO_4$	85
IV.9.2: Analyses aux diffractions des rayons x de la poudre ($HNO_3 + NH_4NO_3$)	86
IV.9.3: Analyses aux diffractions des rayons x des éprouvettes dégradées dans l'acide ($MgSO_4$).....	87
IV.9.4: Analyses aux diffractions des rayons x des éprouvettes dégradées dans l'acide ($HNO_3 + NH_4NO_3$).....	90
IV.10: Analyses chimiques (Analyses de fluorescence x de La poudre ($HNO_3 + NH_4NO_3$)).....	91
IV.11 : La perte de résistance après 1 année d'attaque	91
Conclusion générale.....	95
Annexes	
Bibliographie	

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CIMENTS

Figure. I.1 : les constituants du ciment	3
Figure I.2 : le clinker.....	3
Figure. I.3 : roche de gypse.....	5
Figure. I.4 : roche de calcaire.....	7
Figure. I.5 :l'argile.....	8
Figure. I.6.Cendre volante.....	12
Figure. I.7 : la pouzzolane.....	12
Figure. I.8 : les différents types de pouzzolane.....	13
Figure. I.9 : Extraction.....	18
Figure. I.10 : broyeur.....	19
FigureI.11 : le four rotatif.....	20
Figure. I.12 : Silicate tricalcique C3S.....	23
Figure. I.13 : silicate bi calcique C2S.....	23
Figure. I.14 : la microscopie de l'aluminate tricalcique C3A.....	24

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MORTIERS

Figure II.1 :l'obtention et constituant des mortiers.....	28
Figure II.2: sable naturel.....	30
Figure II.3: sable artificiel.....	30
Figure. II.4: Courbe granulométrique du sable normalisé	31
Figure II.4: calcite.....	33
Figure II.5.Les joints de maçonnerie.....	36

LISTE DES FIGURES

Figure II.6. Réglage d'une chape.....36

CHAPITRE III : LA DURABILITE

Figure III .1 : Influence de la taille maximale des grains sur le coefficient de diffusion effectif40

Figure III 2 : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques41

Figure III.3: Perte relative de masse de pâtes de ciment ($E/C= 0.27$) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acide organique maintenue à $pH= 4$45

Figure III. 4: visualisation de la surface dégradée dans un prisme.....46

Figure III.5: schéma représente l'expansion autour des agrégats.....48

Figure III.6 : Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton, éprouvettes de béton conservées pendant 16 ans dans une solution de concentration de 10 % environ.....49

Figure III.7: Relation entre le rapport E/C d'un mortier et l'expansion en milieu sulfatique50

Figure III.8 Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajout de laitier.....52

Figure III.9: Pénétration des chlorures dans des bétons en fonction de la teneur en laitier du ciment et du rapport E/C53

Figure III.11: Coefficient de diffusion à 28 jours des ions chlorure en fonction de la teneur en cendres, de différentes classes de béton54

Figure III.11: Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction du temps dans des BHP contenant des dosages croissants en fumée de silice54

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

Figure IV-1: Diffractogramme des RX de ciment..... 59

LISTE DES FIGURES

Figure IV-2: Diffractogramme des RX de sable fin	61
Figure IV.3: La courbe granulométrique par tamisage de sable de KHEMIS MELIANA	62
Figure IV-4: Diffractogramme des RX de sable gros	63
Figure IV-5: Diffractogramme des RX de la pouzzolane.	65
Figure IV.6 : malaxeur des mortiers	69
Figure IV.7 : moule des mortiers.....	69
Figure IV.8 : chambre humide	70
Figure IV.9 : bassin d'eau	70
Figure IV.10 : La masse volumique des différents ciments utilisés.....	71
Figure IV.11 : La consistance normale des différents ciments utilisés.....	72
Figure IV.12 : Le délai de prise des différents ciments utilisés.....	73
Figure IV.13 : L'étalement des mortiers.....	74
Figure IV.14 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers CEM1.....	75
Figure IV.15: La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers avec adjuvant TEMPO12.....	76
Figure IV.16 :L'appareil de flexion.	77
Figure IV.17 : La résistance à la flexion des mortiers.....	78
Figure IV.18 : L'appareil de compression.....	79
Figure IV.19: La résistance à la compression des différents mortiers.....	80
Figure IV.20 : Etat des éprouvettes après 1 année d'attaques par le mélange d'acide (HNO ₃ + NH ₄ NO ₃).....	81
Figure IV .21: Etat des éprouvettes après 1 année l'attaque par le sel MgSO ₄	82

LISTE DES FIGURES

Figure IV.22: La résistance à la compression des différents mortiers.	83
Figure IV.23: La résistance à la compression des différents mortiers.....	84
Figure IV.24: L'analyse DRX de la poudre $MgSO_4$ après dégradation.....	85
Figure IV.25: L'analyse DRX de la poudre ($HNO_3 + NH_4NO_3$).....	86
Figure IV.26: L'analyse DRX de MCEM1 avant dégradation	87
Figure IV.27: L'analyse DRX de MCEM1 après dégradation.....	88
Figure IV.28: L'analyse DRX de $MPZ_{30} (SSB_2) + TP_{12}$	89
Figure IV.29: L'analyse DRX de MCEM1.....	90
Figure IV.30: L'analyse DRX de $MP_{30} (SSB_2) + TP_{12}$	90
Figure IV.31 : la perte de résistance par $MgSO_4$	92
Figure IV.32 : la perte de résistance par ($HNO_3 + NH_4 NO_3$)	92

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CIMENTS

Tableau I.1: Composition chimique du gypse	5
Tableau I.2 : Classification des ajouts selon leur réactivité	11
Tableau I-3: classification du ciment en fonction de leur résistance.....	25
Tableau I.4 : caractéristiques de ciment.....	26

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MORTIERS

Tableau II .1 : Différentes actions des adjuvants.....	32
Tableau II. 2 : Le dosage d'un mortier normalisé.....	35

CHAPITRE III : LA DURABILITE

Tableau III.1: Processus généraux d'altération chimique des liants hydrauliques causes et conséquences	42
Tableau III.2: Critères de composition de la norme NF P15-317 pour les ciments destinés à la mer et en milieux sulfatiques moyennement agressifs.	51
Tableau III.3: Critère de composition de la norme NF P15-319 pour les ciments destinés aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates.....	52

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

Tableau IV-1: Composition chimique du ciment	58
Tableau IV-2 : Composition minéralogique du ciment	58
Tableau IV.3: Caractéristiques physiques de ciment.....	59
Tableau IV-4: Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1).	60
Tableau IV-5: Caractéristiques physiques de sable fin.....	60
Tableau IV-6:Composition chimique de sable fin.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV-7 : Analyse granulométrique du sable grossier.....	61
Tableau IV-8: Caractéristiques physiques de sable de KHEMIS MELIANA.....	63
Tableau IV-9: Composition chimique de sable gros.....	63
Tableau IV-10 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane	65
Tableau IV.11: La composition chimique de la pouzzolane.....	64
Tableau IV.12: Les différentes compositions des mortiers	68
Tableau IV.13 : La masse volumique des différents ciments.....	71
Tableau IV.14 : La consistance normale des différents ciments.....	72
Tableau IV.15 : Le délai de prise des différents ciments.....	72
Tableau IV.16 : L'étalement des différents mortiers.....	73
Tableau IV.17 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers CEM1.....	74
Tableau IV.18 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers avec adjuvant TEMPO12.....	75
Tableau IV.19: La porosité et l'absorption d'eau des différents mortiers.....	77
Tableau IV.20: La résistance à la flexion des différents mortiers.....	78
Tableau IV.21: La résistance à la compression des différents mortiers.....	79
Tableau IV.22: La résistance à la compression des mortiers après dégradation.....	82
Tableau IV.23. La résistance à la compression des mortiers après dégradation.....	83
Tableau IV.24: Analyses de fluorescence x de la poudre ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$)	91
Tableau IV.25 : La perte de résistance après dégradation par MgSO_4	91
Tableau IV.26 : La perte de résistance après dégradation par ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$)	92

.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le ciment est le constituant de base des bétons et des mortiers. Ce liant hydraulique permet en effet de coller entre eux les grains de sable et les granulats. Mis au point au début du XIXe siècle, le ciment est aujourd'hui le deuxième produit de consommation courante dans le monde après l'eau, et ne cessent d'augmenter.

En Algérie on utilise comme ajout le laitier de haut fourneau, pouzzolane naturelle ou tuf...etc. et en faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciment avec des propriétés physico-mécaniques demandées.

En plus les ajouts améliorent les propriétés mécaniques à condition d'optimiser la quantité d'ajout, cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains. Et il ne faut pas oublier, que les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates, par rapport au ciment portland, ce qui a tendance à augmenter la durabilité du béton et du mortier.

Le ciment pouzzolanique est constitué d'un mélange de clinker, de gypse et de pouzzolane qui doit en plus satisfaire à l'essai de «pouzzolanité ». Les pouzzolanes sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique ; ils sont employés en cimenterie pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est -à- dire une aptitude à fixer la portlandite à une température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation.

La valorisation de la pouzzolane naturelle utilisée en tant que matières premières pour la production de clinker, a permis de protéger les ressources naturelles non renouvelables. Grâce à cette valorisation, l'industrie cimentière contribue à résoudre certains problèmes des déchets (sans compter les avantages qui en résultent au niveau des émissions de CO₂).

Dans ce contexte, il faut étudier les mécanismes de dégradation mis en jeu dans les systèmes à ambiances chimiques sévères afin de relier la durabilité et la résistance du matériau aux paramètres de composition imposés.

L'objectif de cette recherche consiste à étudier les propriétés physico-mécaniques, et la durabilité des mortiers élaborés par substitution d'une partie de ciment allant jusqu'à un pourcentage de 30% de pouzzolane en fonction de différentes surfaces spécifiques et de l'action de superplastifiant. Ces éprouvettes sont soumises à des attaques chimiques dans différents milieux agressifs (mélange d'acide nitrique et nitrates d'ammonium (HNO₃+ NH₄ NO₃), avec une concentration de 10% et une solution de sel de sulfates de magnésium (MgSO₄) avec une concentration de 10%, pendant une durée d'une année afin de pouvoir étudier la durabilité de ces mortiers dans différents milieux agressifs. Afin d'évaluer le degré de dégradation de ces mortiers après une attaque chimique, cette étude est complétée par une analyse microstructurale d'identification par DRX.

Partie théorique

CHAPITRE I

Généralités sur les ciments

I.1. Définition

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier [1].

I.2. Historique

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" $[Ca(OH)_2]$ et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice.

L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'Empire face au retour de la maçonnerie en pierre [2].

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel ceux nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement [3].

I.3. Les constituants des ciments



Fig. I.1 : les constituants du ciment

I.3.1. Le clinker

Constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange d'oxyde silicique, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux, le clinker sert à fabriquer le ciment, entrant lui-même dans la liste des constituants des bétons [4].



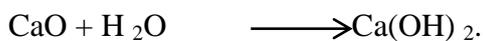
Fig. I.2 : le clinker

I.3.1.1. Composition chimique du clinker

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

Le clinker portland comprend les oxydes suivant : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂.

- CaO : Il est lié avec SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion).



La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker [5].

I.3.1.2. Composition minéralogique du clinker

➤ **Silicate tricalcique : Alite « C3S » : 40 à 65%.**

Le « C3S » se trouve en très grande proportion dans le « CPA ». C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée [5].

➤ **Silicate bicalcique : Bélite « C2S » : 8 à 35%.**

Il confère au ciment des résistances moins élevées que le « C3S » ; mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle de « C3S », car sa dureté est plus grande. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis [5].

➤ **Aluminate tricalcique : Céliste : « C3A » : 1 à 13%.**

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière. Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation est fortement exothermique [5].

➤ **Aluminate tétra calcique : Féelite, C 4AF :3 à 14%.**

Il est appelé aussi la féelite. Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises. On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique, et il constitue un fondant pendant la cuisson avec « C3A » [5].

I.3.2. le gypse

Le gypse est un minéral composé de sulfate hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ainsi qu'une roche évaporitique. Le nom vient du latin gypsum, emprunté au grec gypso, de même sens.

Le gypse est un minéral très commun des séries sédimentaires et peut former des roches mono minérales (régulateur de prise) [6].



Fig. I.3 : roche de gypse [6]

Tableau I.1: Composition chimique du gypse :

composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
%	10.05	2.99	1.55	26.90	3.86	0.41	0.05	30.33	0.007

I.3.3. Additions minérales

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant

les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1% [7].

I.4. Matières premières

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques chaux, silice, alumine et fer.

En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner.

On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [5].

On classe habituellement les matières premières naturelles en :

- Calcaire : plus de 80% de CaCO_3 .
- Eléments argilo- calcaires : de 40% à 80% de CaCO_3 .
- Argile : moins de 40% de CaCO_3 [5].

I-4-1 : Calcaire

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues).



Fig. I.4 : roche de calcaire

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [5]. Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont :

➤ **I-4-1-1 : la silice**

Elle se présente sous plusieurs formes :

- Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.
- Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux [5].

➤ **I-4-1-2 : la magnésie**

La magnésie est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté. Les calcaires ne doivent pas contenir plus de 5% de magnésie [5].

➤ **I-4-1-3 : le fer**

Le fer rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde Fe_2O_3 ou de pyrite Fe_2S (le maximum permis est de 2% dans ce dernier cas). Le fer joue un rôle utile de fondant [5].

➤ **I-4-1-4 : les alcalis**

Tels que soude et potasse sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières du four, lesquelles sont actuellement souvent recyclées. Les alcalis peuvent provoquer certaines difficultés au cours de la fabrication du ciment

(formation d'anneaux dans le four, modification de certaines caractéristiques physique du ciment).

Les calcaires dits « purs » contiennent au moins 95% de CaCO_3 et les impuretés mentionnées ci-dessus jouent alors un rôle mineur [5].

I-4-2 : Eléments argileux calcaires

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage.

Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportions voulues. Ces « pierres à ciments » sont évidemment très rares [5].

I-4-3 : Argiles

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi :

- les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.
- les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.



Fig. I.5 :l'argile

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- groupe kaolin : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- groupe halloysite : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.
- groupe montmorillonite : formule générale: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
- groupe des minéraux argileux micacés : (ex : séricite).
- groupe des minéraux argileux magnésiens : (ex : sépiolite).

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,...etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée.

D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger. Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible.

Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkérisation [5].

I.4.4. Matières auxiliaires

Leur utilisation est sans cesse croissante, on distingue:

- Les matériaux correctifs, qui sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .
- Les régulateurs de prise du ciment.
- Les minéralisateurs.
- D'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air... [8].

I.4.4.1. Les matériaux correctifs

On distingue:

- Les correctifs siliceux: le sable et le grès.

- Les correctifs alumineux: bauxite ...
- Les correctifs ferrugineux: minerai de fer, pyrite grillée.

I.4.4.2. Les minéralisateurs

L'activation chimique du processus de cuisson se réalise grâce à des minéralisateurs accélérateurs qui mènent à une:

- Accélération de la décomposition de CaCO_3 .
- Accélération des réactions à l'état solide par action sur le réseau cristallin.
- Diminution de la température de formation du clinker fondu.
- Augmentation de la quantité de la phase fondue

I.5. Ajouts cimentaires

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air.

Les ajouts cimentaire sont ajoutés au clinker afin de produire un ciment mélangé ou ajoutés au mélange de béton comme agent complémentaire.

I.5.1. Définition des ajouts cimentaires

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant ,ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant et après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [9].

I.5.2. classification des ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de filler.

Tableau I.2 : Classification des ajouts selon leur réactivité [10].

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique		Ciments spéciaux hydraulique
Hydraulique latent	Fortement réactif	Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calcique)
pouzzolanique	Fortement réactif	Fumé de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées)
	Faible réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Filles (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives dispersions synthétique

I.5.3. Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaires

I.5.3.1. Bénéfices écologiques et environnementaux

- diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière
- élimination des sous-produits de la nature

I.5.3.2. Bénéfices fonctionnels

- incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.5.3.3. Bénéfices économiques

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation).
- comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

I.5.3.2. les ajouts aux ciments

I.4.3.2.1. Les cendres volantes (V)

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et phasiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a) [11].

- Classe F. contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux
- Classe C. contenant entre 15 % et 35% de CaO produit de la combustion du lignite.

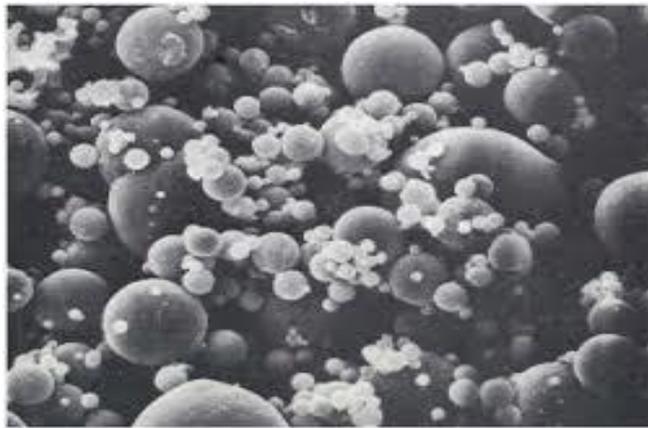


Fig. I.6.Cendre volante

I-5-4 : La pouzzolane



Fig. I.8 : la pouzzolane

I.5.4.1 : Définition

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la

chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise [12].

I.5.4.2: Types de pouzzolane

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les artificiels :



Fig. I.9 : les différents types de pouzzolane

I.5.4.2 .1 : Pouzzolane naturelle

➤ Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

➤ Tufs volcaniques compacts

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte [13].

I.5.4.2.2 : Pouzzolane artificielle

➤ Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. la première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO) les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%.

➤ **Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques de LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100 %.

➤ **Argiles calcinées**

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice.

➤ **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique [13].

I.5.4.3: Effet de La pouzzolane

I.5.4.3.1 : A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [14].

I.5.4.3.2 : A l'état durci

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- ✓ Accroissement de la résistance finale
- ✓ Légère diminution du retrait et du fluage
- ✓ Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité
- ✓ Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques ;
- ✓ Protection des armatures contre la corrosion
- ✓ Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques

I.5.4.4 : Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes). D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [15].

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:

❖ 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.

❖ 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.

I.5.4.5. Hydratation et réaction pouzzolanique

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO, ce qui est le contraire pour le ciment portland.

Par conséquent, l'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO₂ du pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca (OH) ₂ créée par l'hydratation du ciment portlands[16].

Les pouzzolanes ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et alumine de calcium hydraté développant des résistances.

La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker portland (CSH, C₄AH₁₃, C₈AFH₂₆, C₆AS₃H₃₂).

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée.

Au cours de l'hydratation du ciment portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes.

La situation est différente en présence de pouzzolanes. Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminate de calcium hydraté (CAH).

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [17].

I.5.4.6. Différentes utilisations de la pouzzolane

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

I.5.4.6.1. L'agriculture

➤ La culture en plein champ

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

➤ Horticulture

L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

I.5.4.6.2. Applications routières

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel). Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée [18].

I.5.4.6.3. Dans l'industrie

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement

les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane.

I.6. Processus de fabrication de ciment

I.6.1. Extraction

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges comme le calcaire (75 à 80%) et l'argile (20 à 25%) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert.

Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des tombereaux (dumpers) ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) [19].



Fig. I.10 : Extraction

I.6.2. Concassage

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur.

Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté. Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile [20].

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- Le concasseur giratoire.
- Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- Le concasseur à marteaux pour les matériaux friables à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20.

I.6.3. Le séchage et le broyage

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace, Ensuite, 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et semi-sèche [20].



Fig. I.11 : broyeur

I.6.4. Homogénéisation

C'est au cours de cette phase, que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, qu'on peut obtenir un produit, parfaitement homogène de caractéristique chimique uniforme.

I.6.5. La cuisson

La cuisson se fait à une température voisine de 1450°C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se préchauffe le cru à environ 800°C. A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker.

- la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive
- l'argile se scinde en ses constituantes silices et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation.

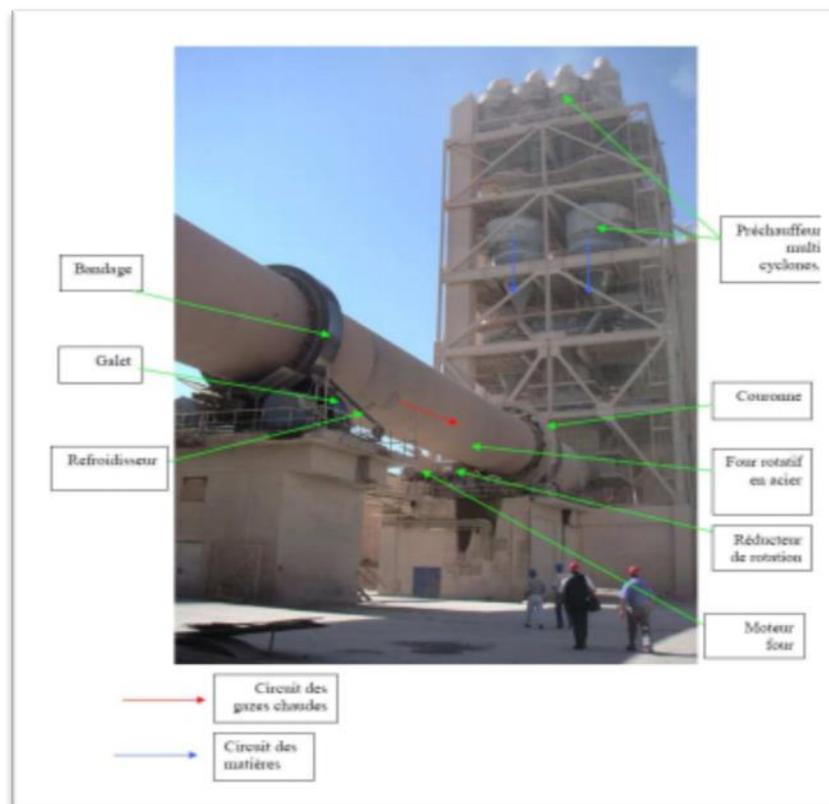


Fig. I.2 : le four rotatif

I.6.7. Broyage du clinker

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [10].

I.6.8. Stockage, ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches.

I.6.9. Les transporteurs

Le déplacement de la matière d'une installation à l'autre s'effectue à l'aide des transporteurs spécifique, chacun a son propre rôle. On peut distinguer : les transporteurs mécaniques, les transporteurs à bandes, les transporteurs à vis sans fin, les élévateurs à godets, et les transporteurs pneumatiques.

I.6.10. Procédés de fabrication de ciment portland

IL existe 4 méthodes de fabrication du ciment. [21]

- ❖ Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne)
- ❖ Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide)
- ❖ Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée)
- ❖ Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche)

I.6.10.1. Procédés en voie sèche et semi-sèche

Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées et homogénéisées de façon à former un mélange de composition chimique requise. Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four du refroidisseur. Un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir le complément de chaleur nécessaire si les matières premières contiennent une forte proportion d'humidité et pour le démarrage du four.

I.6.10.2. En voie humide ou semi-humide

Dans le procédé par voie humide, la matière première est additionnée d'eau dès le broyage et manipulée sous forme de pâte fluide introduite par pompage dans des fours rotatifs longs de 100 à 200 m.

Ce procédé présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie de plus que le procédé par voie sèche.

Dans le procédé par voie semi-sèche, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée comme précédemment.

I.7. Hydratation du ciment**I.7.1. Hydratation et prise du ciment Portland (CPA)**

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe, qui a été étudié pour la première fois par Henri Lechatelier (1887). Schématiquement, Lechatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment [22]:

- L'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment.
- La dissolution ou solvatation, des grains de ciment ou phases anhydres, en présence d'eau.
- La précipitation des phases hydratées.

Pour décrire l'hydratation du ciment, différents travaux ont été publiés concernant des phases pures comme l'alite, C_3S [16,17], la bélite, C_2S [18], l'aluminate tricalcique, C_3A [19,20], ou encore la phase alumino-ferritique, C_4AF [21].

I.7.2. Hydratation du Silicate tricalcique C_3S

Pour la phase C_3S , dès son mélange avec l'eau, des ions calcium, hydroxydes et silicates passent en solution. La solution devient alors rapidement sursaturée par rapport aux phases hydratées, à savoir l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ encore appelé- portlandite, noté CH, ainsi que des hydrates silico-calciques, notés CSH qui sont des composés non stœchiométriques. Ou le rapport C/S varie entre 1,5 et 1,8. Les hydrates CSH ont les

propriétés d'un gel Une partie des ions $(SO_4)^{2-}$ provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre H et permet d'améliorer sa résistance [22].

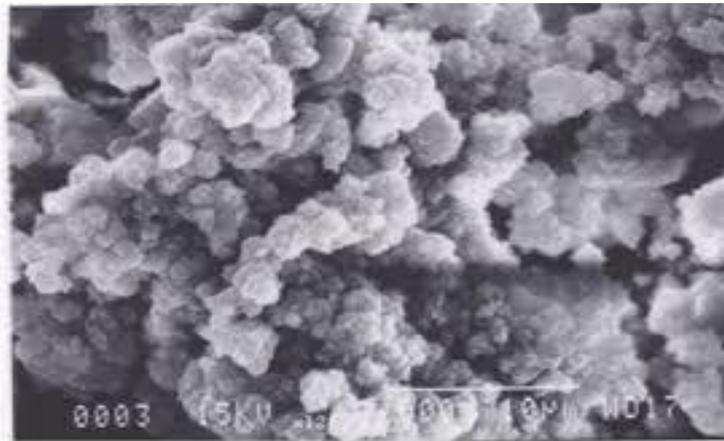
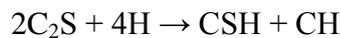


Fig. I.13 : Silicate tricalcique C_3S

I.7.3.Hydratation du silicate bi calcique C_2S

Une fois hydraté, C_2S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de

Réaction est plus élevée [23].

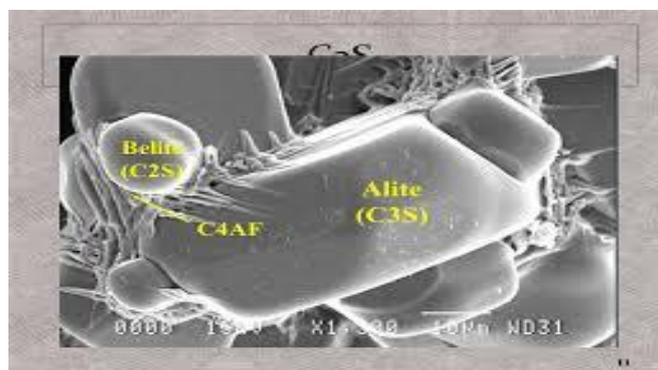


Fig. I.14 : silicate bi calcique C_2S

I.7.4. Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A

La réaction est donnée par:



L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ · 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base hexagonale [23].

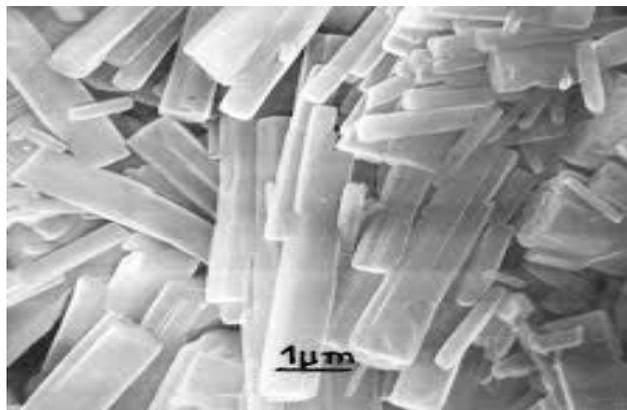


Fig. I.15 : la microscopie de l'aluminate tricalcique C₃A

I.7.5. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique C₄AF

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [23].

I.8. Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale [24]:

I.8.1. Classification de ciment en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés le, sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux, ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffre romains dans leur notation européenne (sols, granulats...) :

- CEM I: ciment Portland (CPA)
- CEM II: ciment Portland composé (CPJ)
- CEM III : ciment haut Fournaux (CHF)
- CEM IV: ciment pouzzolanique (CPZ)
- CEM V : ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres: CLC)

I.8.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties selon le tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [24].

Tableau I-1: classification du ciment en fonction de leur résistance

Résistance à la compression (MPa)		
Classe de résistance	2 jours inf.	28 jours inf.
32.5(Normale) 32.5 (Rapide)	- ≥ 13.5	$\geq 32.5 \geq 32.5$
42.5 42.5 R	$\geq 12.5 \geq 20$	$\geq 42.5 \geq 42.5$
52.5 52.5 R	$\geq 20 \geq 30$	$\geq 52.5 \geq 52.5$

I.8.3. Propriétés des ciments

Tableau I.2 : caractéristiques de ciment [25].

Caractéristiques du ciment	Valeur
Masse volumique apparente [g/cm ³]	0.80 à 1.30
Masse volumique absolue [g/cm ³]	2.90 à 3.15
Surface spécifique Blaine [g/cm ²]	2.70 à 5.00

➤ **Le retrait**

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme 4x4x16 cm sur mortier normal. Le retrait limité à 0,8 mm/m pour les ciments CPA et CPJ de classe 45R et 55. Il n'est pas normalisé pour les autres ciments (CLK, CHF, CLC) [25].

➤ **L'expansion**

Se mesure grâce aux aiguilles de Le Chatelier. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments [25].

I.8.4. Les différents types de ciment spéciaux

Il existe plusieurs types de ciments spéciaux, la plupart contiennent du ciment portland [26]. Il s'agit notamment de ceux qui suivent ci-après :

- Ciment à maçonner
- Ciment plastique
- Ciment expansif (à retrait compensé)
- Ciments pour puits de pétrole
- Ciment Portland imperméabilisant
- Ciment à prise contrôlée
- Ciments géo polymériques
- Ciments au phosphate de magnésium
- Ciments au soufre
- Ciment blanc
- Ciment de laitier
- Ciments naturels
- Ciment prompt

- Le Ciment alumineux

I.9. Conclusion

Le ciment est un liant hydraulique très répandu. En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du ciment et son dosage jouent un rôle primordial sur le comportement des matériaux cimentaires vis-à-vis des milieux chimiquement agressifs.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe de fabrication et l'hydratation du ciment sont utiles. Cela nous permet de mieux comprendre l'interaction entre le type de ciment utilisé et l'environnement auquel l' sera exposé.

CHAPITRE II

Généralités sur les mortiers

- eau
- sable
- adjuvants

II.2.1 .Les liants

Généralement, on peut utiliser:

- Les ciments normalisés (gris ou blanc);
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- Les liants à maçonner;
- Les chaux hydrauliques naturelles;
- Les chaux éteintes [28].

II.2.2.Les sable

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides.

II.2.2.1.Les types de sables

II.2.2.1.1.Sables naturels

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - Sable de laitier;
 - sable d’oxydes de fer, de chromite;
 - corindon;
 - sable de briques concassés;
 - liège torréfié;
 - Polystyrène expansé;
 - Vermiculite, perlite

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.



Figure II.2: sable naturel

II.2.2.1.2.Sables artificiels

Proviennent soit de pierres naturelles broyées, soit de certains déchets d'industries métalliques (laitier, mâchefer), soit, cas très spécial, de la cuisson des argiles.

Le sable est introduit dans le mélange de la farine cru en quantité de 2% comme correcteur de la teneur de SiO₂.



Figure II.3: sable artificiel

II.2.2.2.Granulométrie

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

- Extra-fins: jusqu'à 0,08 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- Fins: jusqu'à 1,6 mm;
- Moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- Gros: jusqu'à 5 mm

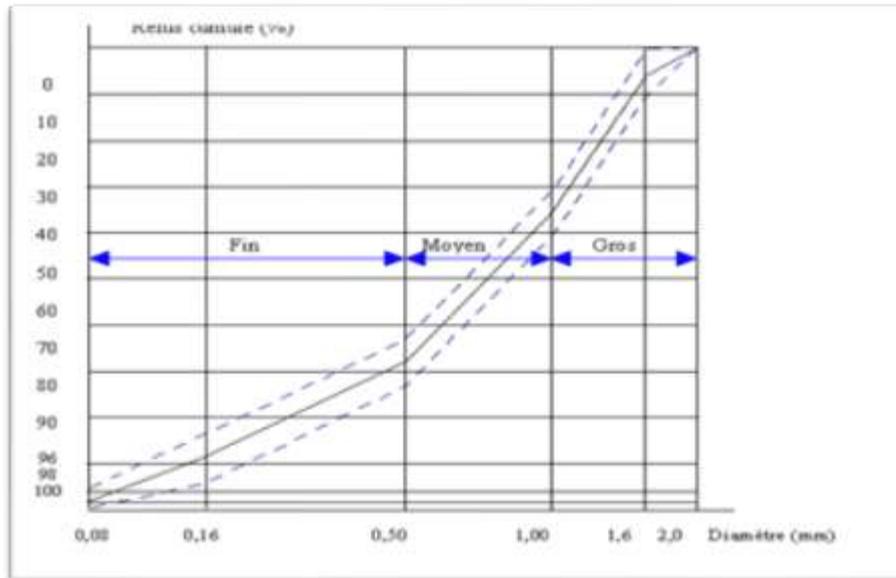


Figure. II.4: Courbe granulométrique du sable normalisé

II.2.2.3. Rôle de sable dans les mortiers

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécanique, ajoutant de ça, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

II.2. 3. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, nécessaire à hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du mortier (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du mortier.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme [NF P 18-303]. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

II.2.4.Les additifs

II.2 .4.1.Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- Les plastifiants (réducteurs d'eau)
- Les entraîneurs d'air;
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre [29].

Tableau II .1 : Différentes actions des adjuvants.

Rôle...	Action sur	Domaine d'emploi
Ils diminuent le temps prise ou durcissement du ciment	La prise	Bétonnage pour temps froids, décoffrage rapides, travaux sous l'eau
Ils augmentent le temps de prise		Bétonnage par temps chauds, avec coffrage glissant
A teneur en eau égale, ils augmentent l'ouvrabilité du béton et mortier	L'ouvrabilité	Travaux Génie civil, bétonnage avec chauffage glissant
A même maniabilité, ils augmentent les résistances		Idem
Ils provoquent un fort croisement de la maniabilité		Fondation, dalles, raideurs, béton pompé
Ils entraînent la formation de microbulle d'air uniformément	Les résistances aux agents extérieurs	Béton exposé au gel, bétons routiers
Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers		Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité

II.2. 4.2. Les ajouts

Les différentes variétés du ciment sont liées directement par les qualités et les proportions des différents matériaux ajoutés au clinker, selon leurs activités, on peut les classer en trois types

II.2. 4.2.1. Les fillers calcaires

Ils sont constitués de calcaire broyé. Leur principale fonction est un rôle de remplissage. Une partie du clinker peut être remplacée sans grand impact sur les propriétés finales par un matériau pratiquement inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates du ciment. En fait, les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ils conduisent à la formation de carbo-aluminates de calcium [30].

II.2. 4.2.2. Les calcites

Sont des ajouts incolore, blanche, jaune, brune, rouge et noir .elles se composent que de CaCO_3 (100%) leur densité varie entre 2,6 à 2,8, son indice de réfraction est entre 1,48 à 1,65
Propriétés chimiques : éclate dans la flamme et libère CO_2 , le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl



Figure II.5: calcite.

II.2. 4.2.3. Les colorants

On peut donner la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus 6% du poids du ciment portland. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée .L'ajout d'une trop grande quantité de pigment diminuera la résistance et la durabilité. Le poids maximal de pigment ne devra pas dépasser, en poids 1% du ciment, sauf dans le cas de noir de carbone qui ne devrait pas représenter plus de 2%.

II.3.Les différents types des mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:[31].

II.3.1.Les mortiers de ciment

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

II.3 .2.Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

II.3.3.Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

II.3.4.Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements

II.3.5.Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre

II.3.6.Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

II.3.7.Mortier réfractaire

En générale, il est fabriqué avec du ciment alumineux, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues ...etc. La tenue à la température des mortiers de ciment alumineux dépend de plusieurs facteurs tels que la composition chimique et minéralogique et aussi le type des granulats utilisés

II.3.8.Mortier autoplaçant

Un mortier autoplaçant est un mortier très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des mortiers autoplaçant s'effectue par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en oeuvre par vibration .Les constituants entrant dans la fabrication du mortier autoplaçant , selon leur utilisation, en trois categories: les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

II.4.Préparation des mortiers

Pour calculer les quantités nécessaires en fonction des dosages et des travaux à réaliser (Voir tableaux ci-après)[32].

Tableau II. 2 : Le dosage d'un mortier normalisé.

Sable	Ciment	Eau
1350	450	225

II.5.Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des mortiers sont [33].

- Ouvrabilité;
- Délais de Prise;
- Résistances mécaniques;
- Retraits et gonflements, etc.

II.6.Les emplois de mortiers

II.6.1.Les joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'ils liaisonnent sans fissurer. Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.la norme XP P-202-1 «DTU 20 .1.ouvrage en maçonnerie de petits éléments .parois et murs.» fournit des

indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiement, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.



Figure II.13.Les joints de maçonnerie

II.6.2.Les enduits

Ce domaine d'application, qui constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers, fait l'objet du rappelons simplement qu'à côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201(DTU 26.1), se développent aujourd'hui les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels. Ces produits font l'objet d'une procédure d'avis technique par le CSTB.

II.6.3.Les chapes

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



Figure II.14.Réglage d'une chape

Partie pratique

CHAPITRE III

Durabilité des matériaux cimentaires

III.1.Introduction

Aujourd'hui, l'un des principaux enjeux du Génie civil consiste à pouvoir garantir une stabilité, ou du moins une maîtrise, dans le temps des propriétés mécaniques d'un ouvrage dans son environnement. Cet enjeu, concerne les structures futures ou en cours de conception, mais aussi les réalisations actuelles. Il implique à la fois une prise en compte du comportement durable constituant la structure et un suivi de l'ouvrage au cours de son exploitation. Le but est de pouvoir prédire et garantir une durée de vie d'un ouvrage autrement que par des critères conventionnels.

La durabilité des ouvrages en béton, qui peut être définie comme étant leur capacité d'assurer la tenue en service prévue, est une caractéristique très importante, surtout pour les ouvrages importants de génie civil (ponts, silos, réservoirs, barrages, enceintes nucléaires...), car en cas de dégradations de tels ouvrages, les conséquences seront multiples et graves, surcoûts de réparation, limitation de la durée de vie de l'ouvrage, et dans des cas extrême la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. Donc, la prise en compte préventive des facteurs qui peuvent affecter la durabilité des ouvrages, donc leur économie et leur sécurité, est impérative lors de la conception et de l'élaboration de ces ouvrages [34].

III .2.Définition la durabilité

Un ouvrage durable indique que cet ouvrage doit résister au cours de temps aux divers agressions ou sollicitations, c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions divers telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur le milieu ambiant. L'ouvrage doit conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (Fonctionnement, Sécurité, Confort d'usagers), avec des frais de maintenance et d'entretien réduits que possible.

La résistance au béton à se dégrader par les actions physiques et chimiques du milieu, la durabilité est « Le temps pendant lequel le béton est capable d'exécuter ses fonctions ». Le manque de la durabilité en tant que résistance physico-chimique du béton peut dégrader la résistance mécanique à moyen ou à long terme.

III .3.Paramètres chimiques de la durabilité

III .3.1.Paramètres liés au matériau

III .3.1.1.Composition chimique et minéralogique du ciment

- **Teneur potentielle en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$** : vis-à-vis des attaques chimiques (eaux pures, acides, sulfates ...), la portlandite est la plus facilement solubilisation.

C'est pourquoi dans les milieux agressifs, des bétons élaborés avec des ciments composés ou contenant des additions consommatrices de chaux comme le laitier, les pouzzolanes, cendres volantes, fumées de silice...etc. la teneur potentielle en hydroxyde calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est considérée comme un indicateur majeur de durabilité, plus la teneur en chaux est faible, plus la résistance chimique est bonne [35].

- **Teneur en aluminat tricalcique C_3A et en silicate tricalcique C_3S**

Au contact de l'eau de mer et dans les milieux fortement chargés en sulfates, le C_3A anhydre résiduel qui n'a pas réagi avec le gypse régulateur de prise peut se transformer en étringite expansive, dans ces cas, sa teneur doit être limitée, la même chose pour le C_3S [35].

- **Teneur en additions minérales** : les laitiers, les cendres volantes, les pouzzolanes, les fumées de silice sont généralement favorables à la résistance chimique du béton, d'une part parce qu'ils réduisent la basicité globale du matériau en consommant la chaux libérée par l'hydratation des silicates C_3S et C_2S , d'autre part, par leur effet positif sur la microstructure du béton [35].

III .3.1.2.Nature minéralogique des granulats

III .3.1.2.1. 1Alcali-réaction

Il est admet que les alcali-réaction se présentent sous trois types :

Réaction alcali- silice, réaction alcali-silicate, réaction alcali –carbonate.

- **Réaction alcali-silice (RAS)** : les granulats, composés essentiellement de silice y sont parfois vulnérables : la silice mal cristallisée est la plus altérable et réagit avec les ions alcalins de la solution interstitielle des pores du ciment .La cinétique de l'attaque est gérée par un ensemble de paramètres tel que le pH, l'alcalinité (concentration en ions OH), la concentration en ions calcium (Ca^{2+}), la qualité de la structure du granulat SiO_2 ...

Les ponts silanols Si- OH de la structure granulaire sont détruits et des siloxanes Si-O-Na-OH ou Si -O -K- OH sont créés. Ce nouveau composé est un gel fortement hydrophile qui gonfle en présence d'eau. Les produits que l'on nomme "gels" sont

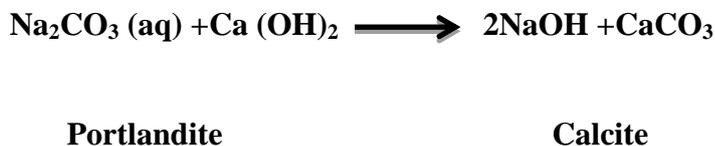
également appelés CKSH et CSH dans le jargon cimentier. Il s'agit de phase hydratée composée de potassium et/ou calcium, silicium.

- **Réaction alcali silicate** : la seule différence avec l'alcali-silice est que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllosilicates, tecto-silicate, sains ou altérés) [35].
- **Réaction alcali carbonate** : la réaction se manifeste par des calcaires dolomitiques qui renferment des impuretés phylliteuses, les expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf le béton qui est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses [35].

La dédolomitisation correspond à la réaction suivante :



La solution alcaline est régénérée en permanence :



III .3.1.3. Formulation et propriétés de transfert du béton

Les propriétés de transfert dont dépend la capacité du béton à résister à la pénétration des agents agressifs liquides ou gazeux, sont déterminantes pour la durabilité. Elles sont représentées essentiellement par les deux indicateurs majeurs de durabilité qui sont la durabilité qui sont la diffusivité et la perméabilité. Toutes deux en relation avec la compacité. La compacité elle-même assurée par une formulation optimale du squelette granulaire de béton. Dans le cas des bétons à hautes performances, la compacité maximale est obtenue par une large étendue granulaire associée à l'utilisation des fines (calcaire, pouzzolanes, laitier, cendres volantes, fumée de silice) venant en complément ou en substitution du ciment. La dimension maximale des grains a peu d'influence sur la durabilité, la figure (III ,1) illustre l'influence de la dimension maximale des grains dans le domaine de béton.

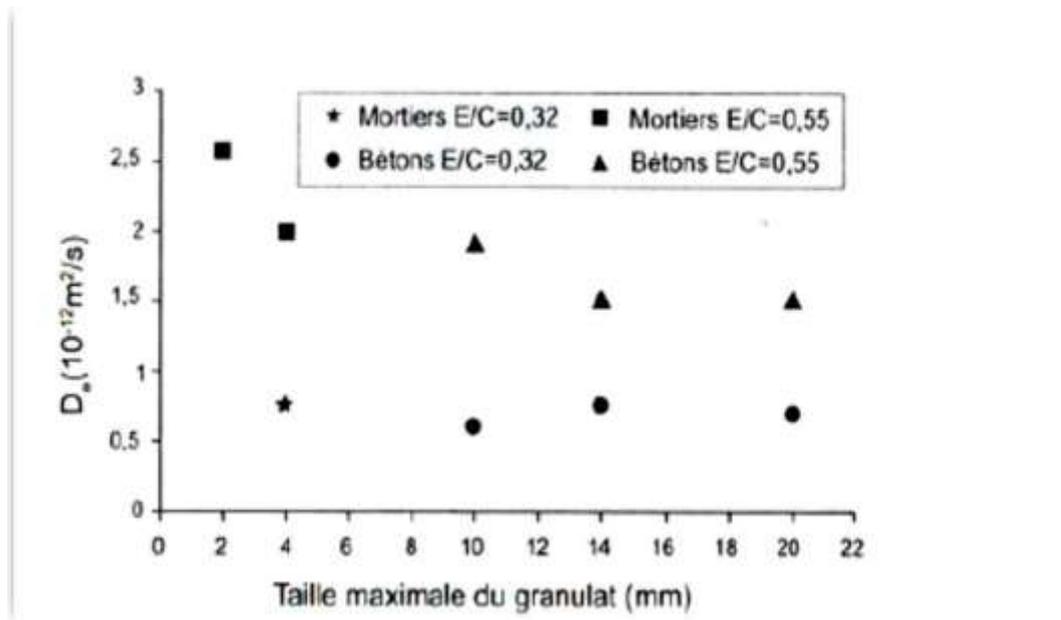


Figure III .1 : Influence de la taille maximale des grains sur le coefficient de diffusion Effectif [36].

III .3. 2 Paramètres liés à l'environnement

Les principaux paramètres à prendre en compte :

- La nature physique de l'agent : qui peut être liquide, gazeux ou solide. Les milieux liquides sont essentiellement les eaux pures ou moins chargées et des solutions d'acides, de bases et de sels d'origine naturelle ou artificielle ;
- Les milieux gazeux sont d'origine naturelle, industrielle ou domestique, par exemple CO , SO_2 , NO_x , H_2S dans les ouvrages d'assainissement, le chlore dégage lors d'industries ;
- La nature chimique de l'agent agressif, sa concentration, son mode d'action (dissolution, hydrolyse, lixiviation, dissolution / précipitation de composé néoformés expansifs ou non) ;
- Les conditions climatiques naturelles ou artificielles, générales et locales, exposition atmosphérique, immersion totale, semi immersion, zone de marnage ou encore enfouissement ;
- L'humidité relative $<65\%$ suivant le fascicule de documentation **FD P18-01** étant peu favorable au développement de réaction [37].
- La température qui est généralement un facteur d'accélération des réactions ;

- Les cycles climatiques, les cycles humidification séchage accélérant considérablement les dégradations du béton ;
- La mobilité du milieu agressif qui accélère les échanges chimiques et qui peut éventuellement induire un effet mécanique supplémentaire (érosion, chocs), est un facteur aggravant ;

III .3. 3 Paramètres liés à la structure

Il est pris en compte, les effets des contraintes mécaniques au fonctionnement de l’ouvrage ; chargement, fatigue, dilatation et retraits différentiels. Les contraintes peuvent engendrer des fissurations sont susceptibles d’accélérer et d’aggraver d’éventuelles attaques chimique qui sont susceptibles elles-mêmes d’affaiblir la structure.

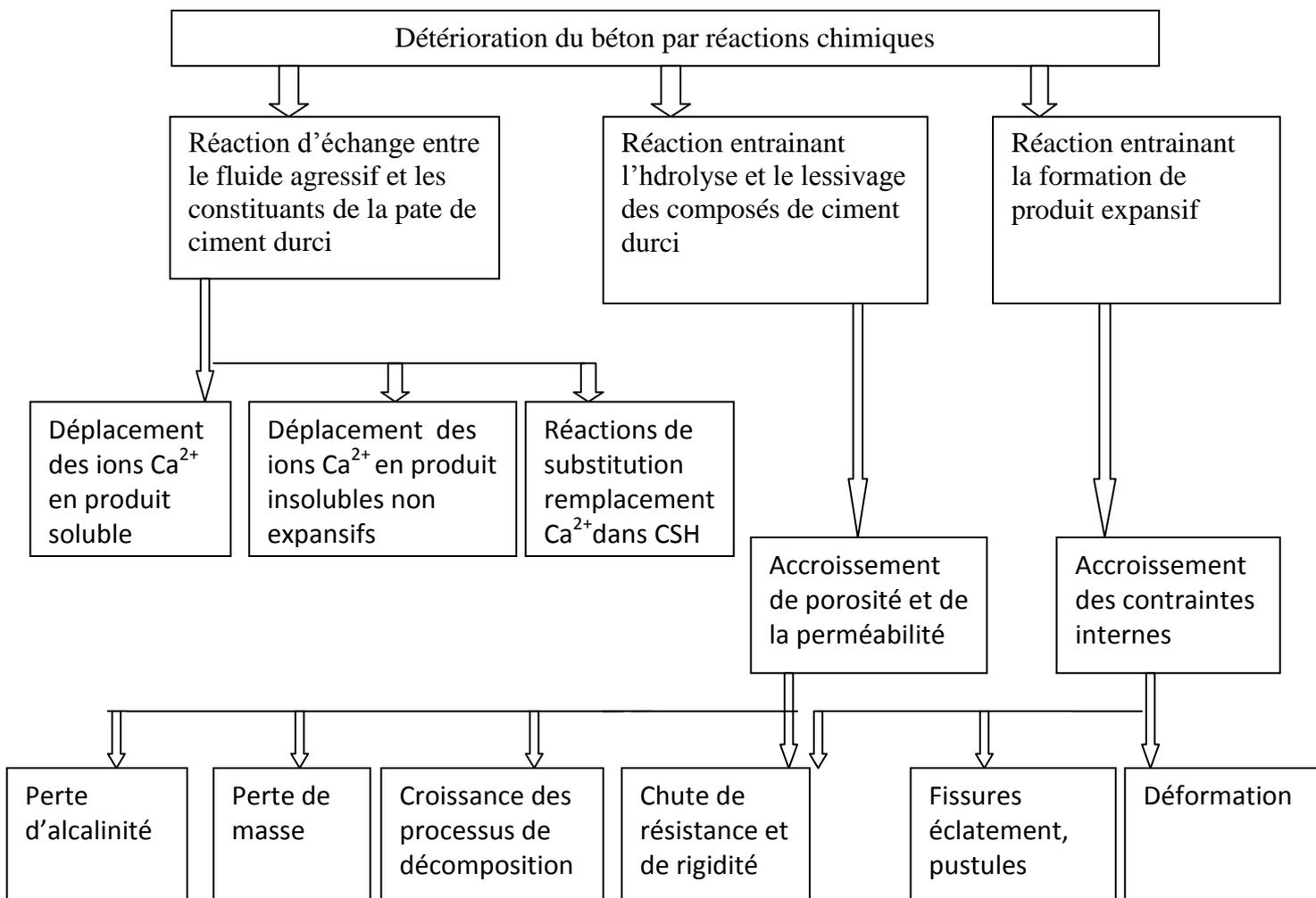


Figure III 2 : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [38].

Tableau III.1: Processus généraux d'altération chimique des liants hydrauliques causes et conséquences [38].

Processus d'altération chimiques	Facteurs	A courts et moyens termes	A long terme
Hydrolyse Dissolution Lixiviation des composants de la pâte de ciment	pH des solutions au contact. Dioxyde de carbone	Chute de pH du milieu interstitiel Décalcification accroissement de la porosité et de la perméabilité	Perte de cohésion de résistance mécanique.
Réactions solide/solution, entre le fluide et la pâte de ciment.	Réaction avec des anions formant des sels de calcium. Réactions formant des produits insolubles expansifs (sulfate, réaction alcali silice, corrosion de fer).	Formation des composés solubles. Décalcification accroissement de la porosité et de la perméabilité. Formation des composés insolubles. Augmentation des contraintes mécaniques internes.	Perte de cohésion de résistance mécanique. Colmatage. Fissuration Fracturation éclatement

III .4.Revue des principaux milieux agressifs

➤ Action des acides

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques: l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agro – alimentaires
- les réseaux d'égouts

III .4. 1. Milieux acides

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

III .4. 1.1. Acides méniraux

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'ettringite. [35]

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraine la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif.

III .4. 1.2. Acides organiques

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes.

▪ Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides

a- Protection supplémentaire par la mise en œuvre de la résine, bitume et autre revêtement

b- Bien identifier les risques: nature de(s) sel(s), concentrations, mode d'action (mobilité, renouvellement, température.....)

c- Utiliser des ciments à faible teneur en chaux, en particulier des ciments avec ajout minéraux consommateurs de chaux comme le laitier, cendres volantes, silico-alumineuse, pouzzolane réactives, fumée de silice;

d- La mise en œuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton

Les expériences de Berton et al faites sur trois types des pâtes de ciment, ciment au laitier de type CEMIII/B, ciment sans ajout CEM I et ciment sans ajout de type CEM I PM/ES immerges en solution acide, montrent que le ciment au laitier de type CEM III/B est celui qui présente la plus faible perte relative de masse alors que les deux sans ajouts de type CEMI conduisent à des plus fortes pertes de masse, indépendamment de leur teneur en C3A (faible teneur pour le CEM I PM/ES(3.4%), teneur élevée pour le CEM I (10.5%) voir **figure III.3.** [39]

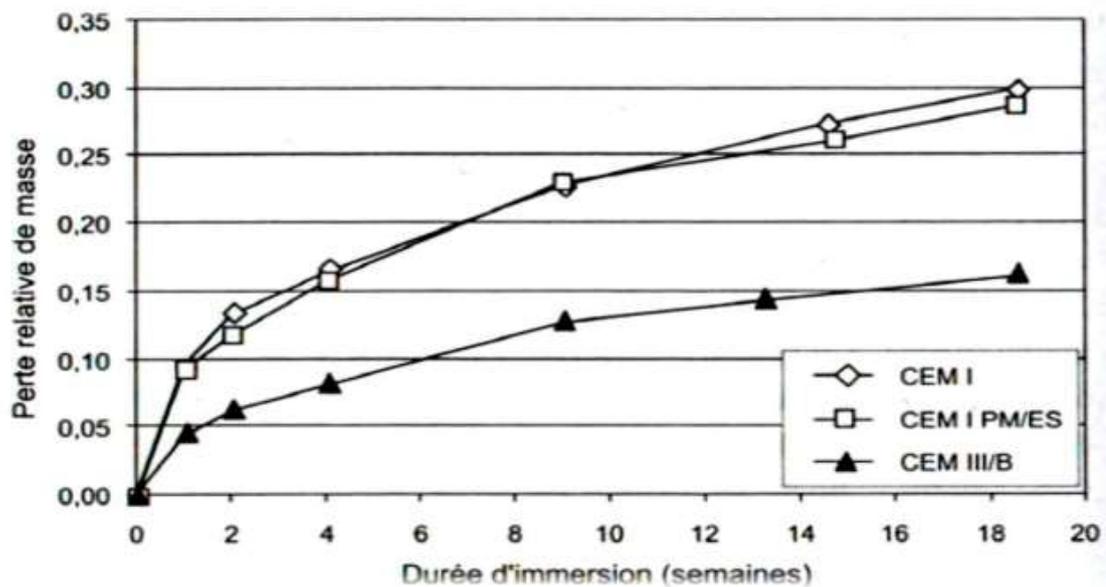


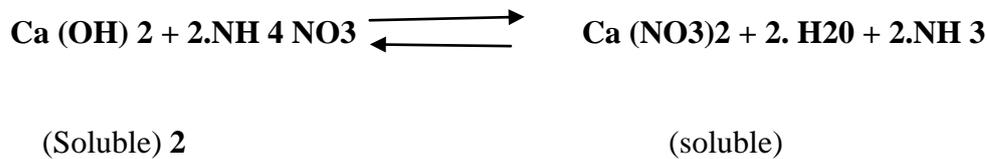
Figure III.3: Perte relative de masse de pâtes de ciment ($E/C= 0.27$) en fonction de la durée d'immersion dans une solution d'acide organique maintenue a **pH= 4.** [40]

III.4.1.3 Nitrate d'ammonium

Le nitrate d'ammonium est très soluble dans l'eau et réagit dans un premier temps avec la pâte de ciment par des réactions d'échange d'ions avec la formation d'un sel de calcium soluble $[Ca(NO_3)]$ et un dégagement gazeux d'ammoniac (NH_3) et dans un second temps avec celle d'un nitro aluminat de calcium

La décalcification progressive de la pâte de ciment durcie se traduit par la combinaison de la chaux avec la partie acide NO_3^- qui conduit à la formation d'un nitrate de calcium soluble. La formation d'ammoniac tend à réduire légèrement le pH et empêche la solution d'atteindre son état d'équilibre. En effet ce dégagement de NH_3 est compensé par une

mise en solution de la chaux pour maintenir la constante d'équilibre de la réaction chimique (déplacement de la réaction dans le sens 1)



Le nitrate d'ammonium détériore la pâte de ciment sans provoquer, dans un premier temps et sous certaines conditions, de phénomènes expansifs. En effet le matériau s'affaiblit par solubilisation progressive de la chaux, sans qu'aucun signe extérieur de dégradation n'apparaisse, à condition qu'il soit immergé dans la solution et que les phénomènes de lixiviation puissent être entretenus [48].



Figure III. 5: visualisation de la surface dégradée dans un prisme

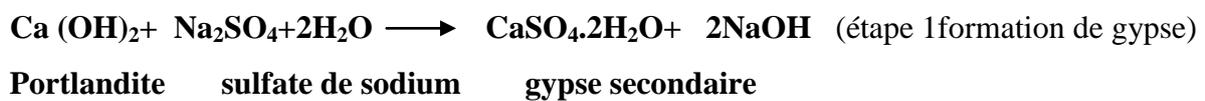
III.4.2 Milieu sulfate

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques ou industrielles. Les réactions sulfuriques constituent une source importante de désordres pour les ouvrages. Ces réactions mettent en jeu les ions sulfates présents dans la solution interstitielle et les aluminates du ciment (anhydres ou hydrates). Elles conduisent à la formation dans le béton durci d'étringite secondaire potentiellement expansive ($3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 32\text{H}_2\text{O}$) la formation de cette étréngité expansive est à distinguer de d'étringite primaire obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette étréngite primaire n'est jamais

expansive. Et sous certaines conditions, les CSH peuvent réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasite (CaCO₃, CaSiO₃, CaSO₄, 15H₂O) entraînant des phénomènes expansifs et désagrégation de l'ensemble du liant. Les sulfates peuvent être internes ou externes [41]

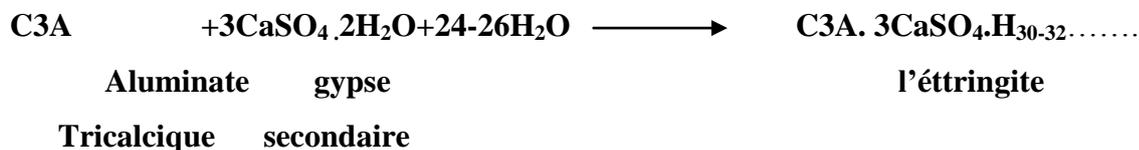
Les réactions chimiques des différents sulfates avec la pâte de ciment durci sont les suivantes:

- **Le sulfate de sodium:** très soluble, entraîne des dégradations par formation de gypse et de l'étringite expansive [35].



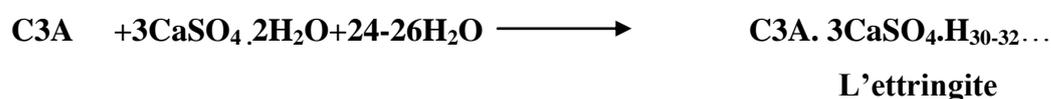
La réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant:
d'étringite

- soit par le C3A anhydre



- Soit à partir de l'aluminate tetra- calcique hydrate C₄AH₁₃ ou de monosulfoaluminate de calcium C₃A.CaSO₄.H₁₂

- **Le sulfate de magnésium:** Le sulfate de magnésium est particulièrement agressif par la double action du cation Mg²⁺ qui s'échange avec le cation Ca²⁺ selon les relations. [35]





Silicate de magnésium hydraté

Le silicate de magnésium hydrate M-S-H n'a pas des propriétés liantes en plus la cristallisation d'ettringite est instable en présence de sulfate de magnésium.

Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{+2} conduisent à la formation de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en un silicate de magnésium hydraté MSH sans propriétés liantes. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire.

- **Le sulfate de calcium:** se trouve dans le sol sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses. Son attaque produit des dégradations au béton qui est due à la formation d'étrangéité expansive.

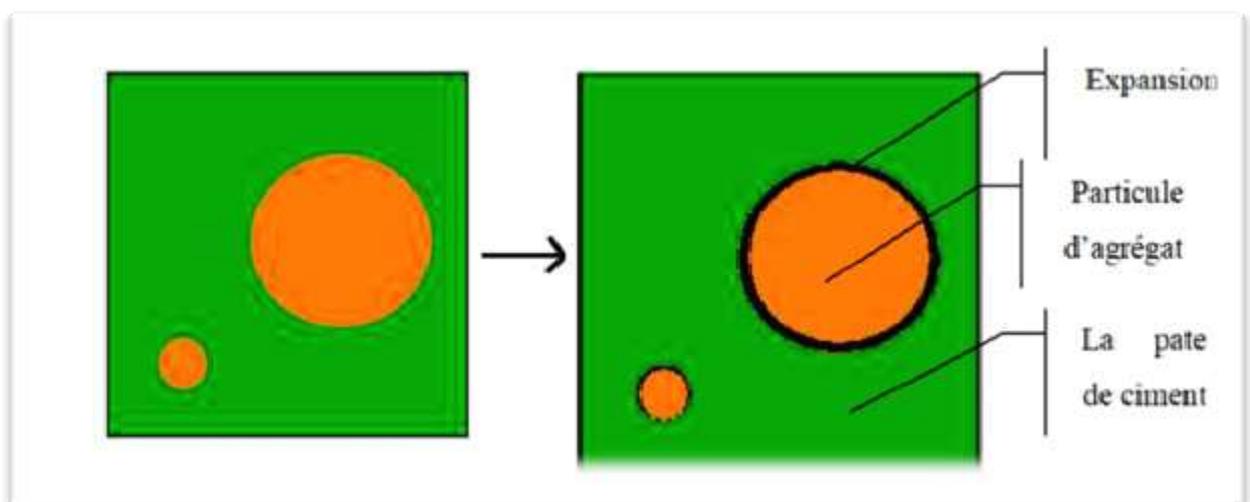


Figure III.7: schéma représente l'expansion autour des agrégats.

➤ Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements sulfuriques

- Une analyse approfondie sur les conditions environnementales générales et locales est indispensable afin de définir la classe d'exposition de la structure ou des éléments de

la structure qui permet de s'adapter au mieux la formulation du béton.

- Le dosage de ciment: la résistance chimique du béton croît avec le dosage en ciment voir figure III.7.

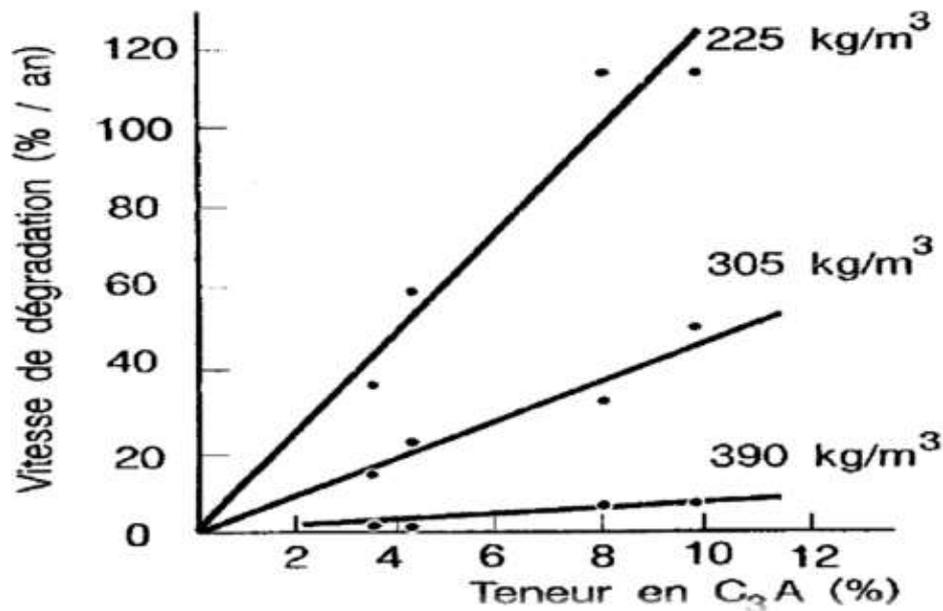


Figure III.7: Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton, éprouvettes de béton conservées pendant 16 ans dans une solution de concentration de 10 % environ. [37]

- **La Compacité:** la compacité détermine les capacités de transfert du béton vis-à-vis de l'eau et des ions agressifs, la compacité dépend du dosage en ciment, du rapport E/C, et l'étendue granulaire en relation avec un dosage optimal en fines (**Figure III.8**)

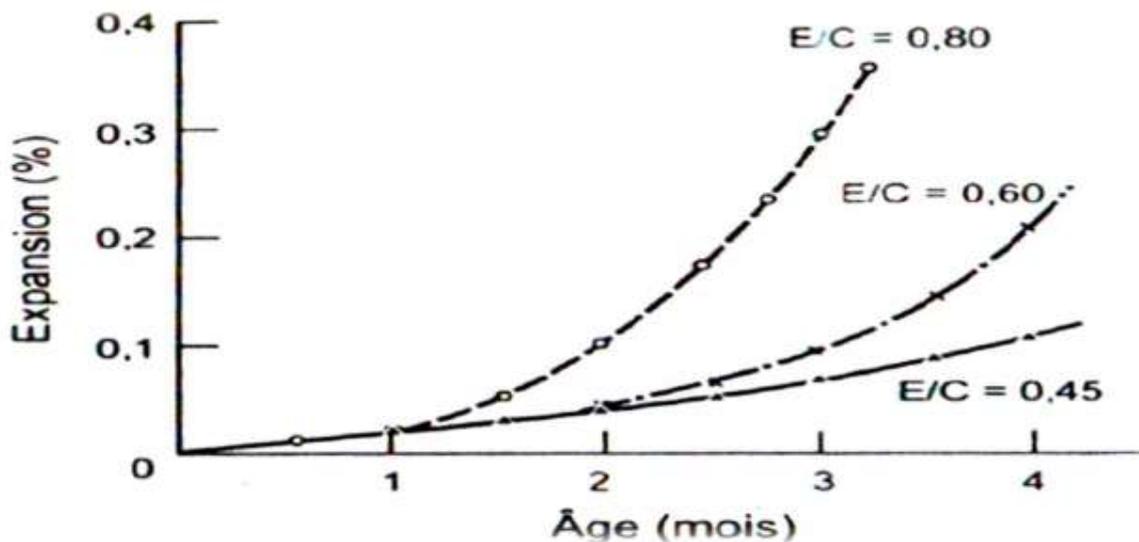


Figure III.8: Relation entre le rapport E/C d'un mortier et l'expansion en milieu sulfatique [39]

Teneur en C_3A : la vitesse de dégradation du béton est proportionnelle au pourcentage en C_3A du ciment portland, non seulement le C_3A mais surtout du rapport C_3A/SO_3 . Pour limiter la vulnérabilité des constituants riches en chaux $Ca(OH)_2$ et C-S-H la norme **NF P15-317** limite la teneur en C_3S des ciments de type CEM I et CEM II/A sous forme d'indice dit « indice de Sarden », cet indice est égal au $\% C_3A + 0.27 \% C_3S$. L'ensemble des prescriptions de la norme **NF P15-317** est résumé dans le tableau III.2. Les prescriptions de la norme **NF P15-319** pour les ciments pour les travaux en eaux à haute teneur en sulfates sont résumées au tableau III.3.

Tableau III.2: Critères de composition de la norme **NF P15-317** pour les ciments destinés à la mer et en milieux sulfatiques moyennement agressifs. [42]

ciment	Ajout	C_3A	SO_3	$\%C_3A+0.27\% C_3S$
CEM I		$\leq 10\%$	$\leq 3\%$ si $C_3A \leq 8\%$	23.5% ciment
			$\leq 2.5\%$ si $8\% \leq C_3A \leq 10\%$	
CEM II/A-S(a)	$\leq 13\%$	$\leq 11.5\%$	$\leq 3\%$ ciment	
CEM II/A-V		Clinker		

CEM II/A-D	$\leq 13\%$	$\leq 10\%$ ciment		
CEM II/A-P	$\leq 20\%$	$\leq 10\%$ Ciment	$\leq 3\%$ / ciment	$\leq 26\%$ /clinker si $p \geq 10\%$
				$\leq 23.5\%$ /clinker si $p \geq 10\%$
CEM II/A-L	$\leq 20\%$	$\leq 10\%$ Ciment	$\leq 3\%$ si C_3A clinker $\leq 8\%$ 2.5% \leq si 8% \leq C_3A clinker $\leq 0\%$	$\leq 23.5\%$ ciment
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Limitation des ions sulfure $S_2 \leq 2\%$ / ciment			
CEM V/A CEM V/B	Limitation des ions sulfure $S_2 \leq 2\%$ / ciment $C_aO \leq 50\%$ / ciment			

Tableau III.3: Critère de composition de la norme **NF P15-319** pour les ciments destinés aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates [43].

Ciment	C₃A	C₃A+2C₄AF	SO₃
CEM I	$\leq 5\%$	$\leq 20\%$	$\leq 3\%$ si $C_3A \leq 3\%$ $\leq 2.5\%$ si $3\% \leq C_3A \leq 5\%$
CEM II/A et B	$\leq 5\%$	$\leq 20\%$	$\leq 4\%$
CEM III/A CEM III/B et C	La teneur en laitier du CEM III/A doit être $\geq 60\%$. Pas de spécification chimique particulière		
CEM V/A et B	$C_aO \leq 50\%$ /ciment		

- ✓ **Effet des additions sur la résistance aux sulfates :** les additions minérales de laitier, de cendres volantes silico alumineuses, de pouzzolane naturelle et de fumée de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates, l'amélioration est

due à la dilution des aluminates et à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, au moins pour les bétons âgés. [35]

- **Ajout de laitiers:** l'ajout de laitier influence positivement sur la résistance du béton. Ce comportement est due aux effets de dilution, de réduction de la teneur en chaux et de la modification de la microstructure de la pâte du ciment dont la densification très importante au cours du temps, réduit notablement la capacité de transfert des ions agressifs dans le béton. Figures (III.9, III.10).

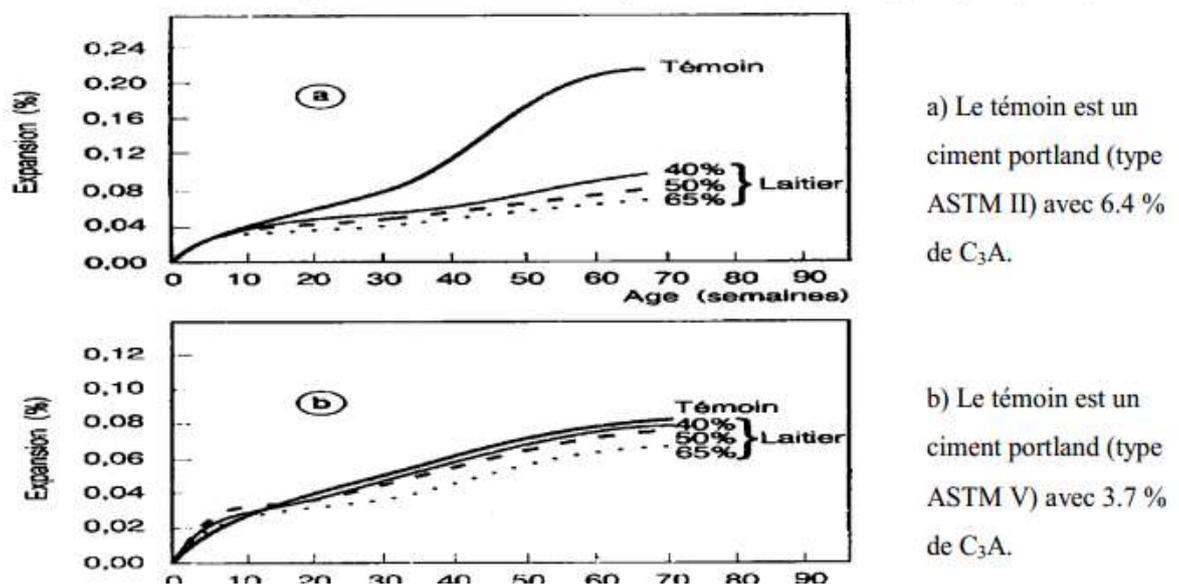


Figure III.9 Résistance aux sulfates d'échantillons de mortier avec ajout de laitier. [35]

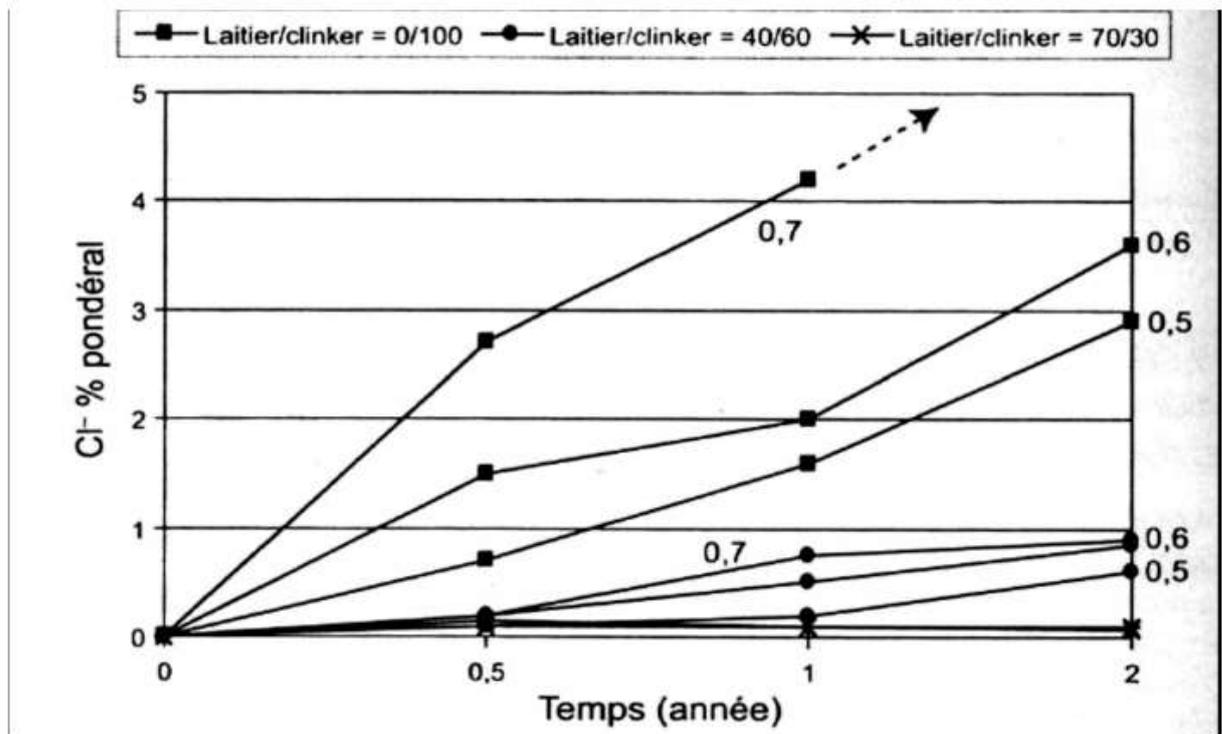


Figure III.10: Pénétration des chlorures dans des bétons en fonction de la teneur en laitier du ciment et du rapport E/C. [35]

- **Cendres volantes:** Elles ont des effets bénéfiques sur la tenue des bétons aux sulfates. Cette effet est dû à la consommation partielle par les cendres du portlandien libéré lors d'hydratation des silicates du ciment portland et réduction du rapport CaO/SiO_2 des C-S-H, due aussi aux modifications de microstructure par la réduction des rayons des pores. La figure III.11 montre l'influence bénéfique des cendres sur le coefficient de diffusion.

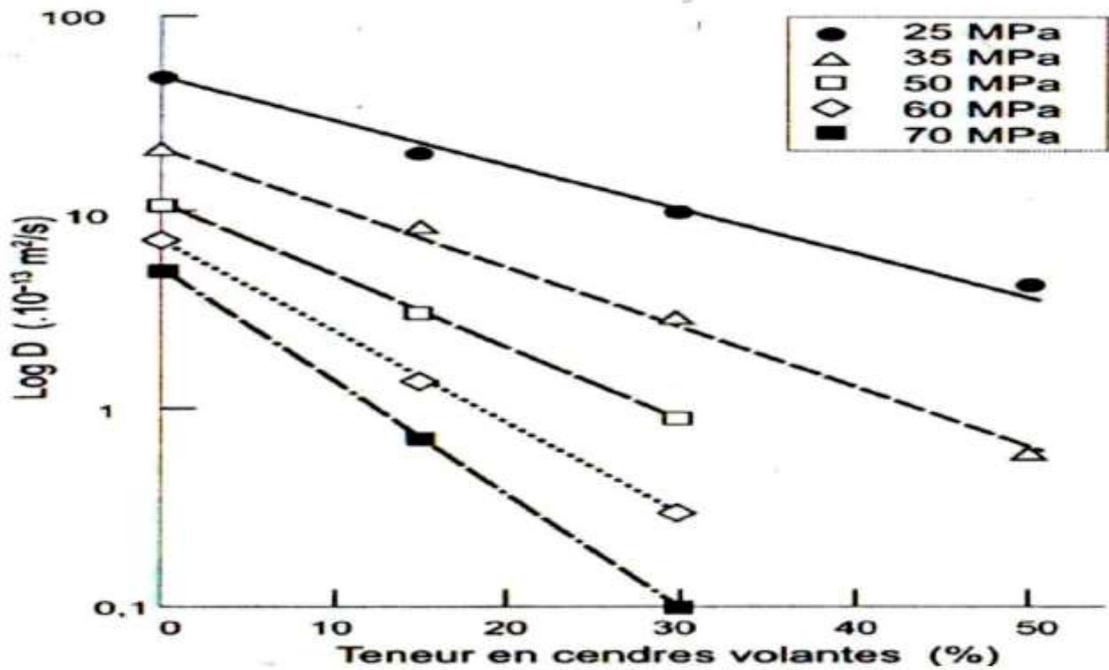


Figure III.11: Coefficient de diffusion à 28 jours des ions chlorure en fonction de la teneur en cendres, de différentes classes de béton [50]

- Fumées de silice :** Elles ont des effets très bénéfiques sur la résistance des bétons aux sulfates dus à leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des C-S-H qu’elles forment, la figure III.12montre une diminution importante du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la teneur en fumée de silice

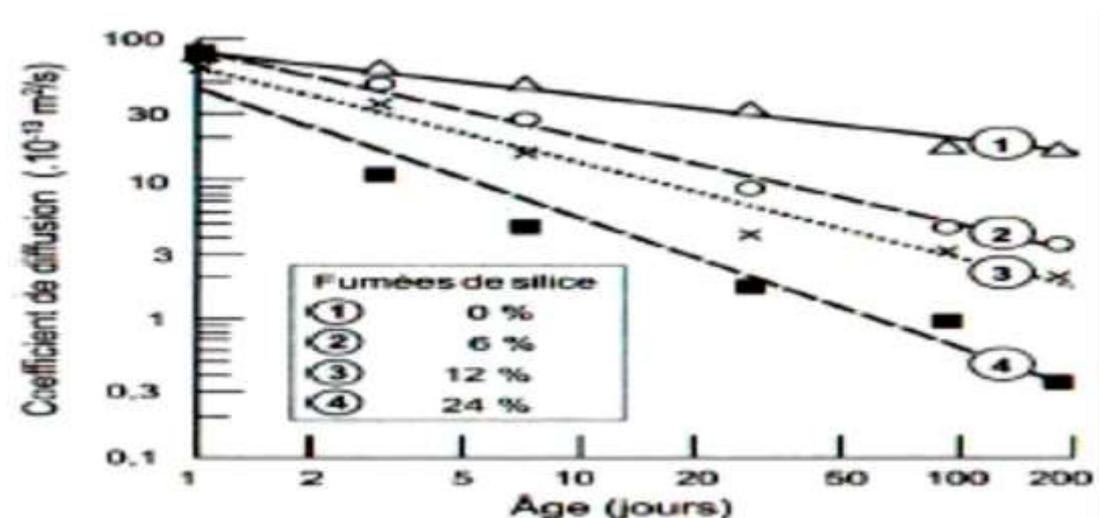


Figure III.12: Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction du temps dans des BHP contenant des dosages croissants en fumée de silice [44].

- **Les pouzzolanes:** Leurs effets sont voisins de ceux décrits pour les autres additions consommation de la chaux et de production de C-S-H moins basiques et accroissement de compacité.
- **Les calcaires:** Ils réagissent très peu avec les hydrates du ciment, l'effet peut être essentiellement un effet filler, c'est-à-dire un accroissement de compacité, comme il y'a la possibilité de formation d'ettringite (une forme d'attaque sulfatique)

III.4.3. Attaque d'origine biochimique

III.4.3.1 Cas des eaux usées

Dans les réseaux d'assainissement la présence d'hydrogène sulfure H_2S , susceptible des oxyde en acide sulfurique H_2SO_4 , peut être à l'origine des dégradations du béton. Le processus d'attaque du béton interviennent principalement des sulfato-bacteries de type « Thio Bacillus thiooxydans » dont la particularité est d'utiliser l'hydrogène dans leur métabolisme et de rejeter sous forme d'acide sulfurique H_2SO_4 , très agressif vis-à-vis du béton suivant un double mécanisme d'attaque acide et d'attaque sulfatique suivant ces réactions:



L'attaque acide conduit à la dissolution de la chaux de l'hydrolyse de calcium et C-S-H. l'attaque sulfatique conduit à la formation d'ettringite pouvant être expansive. En outre, la présence d'acide peut provoquer la passivation des aciers d'armatures et leur corrosion[35]

III.4.3.2. Cas d'effluents agricoles et agro-alimentaires:

Les effluents agricoles et agroalimentaires sont des produits constitués initialement de matières organiques complexes, qui sous l'action de bactéries identifiées, aérobies ou anaérobies, sont transformés en acides organiques.

Dans ce milieu, la portlandite étant le premier hydrate attaqué, il convient de limiter la teneur en privilégiant les ciments à forte teneur en C_2S et les additions comme le laitier et le cendre volante et la fumée de silice, aussi il convient de fabriquer des bétons compacts peu perméables, de diffusivité faible, incorporant des granulats résistants aux acides[35].

III.4.4 Autres milieux considérés agressifs Les nitrates, les sels d'ammonium, le chlore d'ammonium $ClNH_4$, le sulfate d'ammonium, les chlorures, les phosphates, les oxalates, les hydroxydes alcalin.

III.5 Conclusion

On termine ce chapitre par des recommandations relevées de la norme **NF EN206-1** qui concerne la spécification, la performance, la production et la conformité du béton. On subdivise ces recommandations en trois :

- **Conception des ouvrages:**

Pour la conception des ouvrages situés dans des milieux chimiquement agressifs, il y a lieu de définir clairement les attaques environnementales liées à l'agressivité des ambiances et à la présence d'eau puis définir la classe d'exposition.

Il convient d'éviter autant que possible les zones singulières dans lesquelles les pénétrations plus faciles des solutions agressives, ainsi, les formes simples, évitant la stagnation des agents liquides agressifs. Les déferents joints constructifs doivent être particulièrement étudiés

- **Conception des bétons**

Il faut concevoir un béton compact, peu perméable par l'optimisation du squelette granulaire, l'introduction des fines et ultrafines et l'utilisation des superplastifiants. Il convient s'adapter le choix des matériaux aux agents agressifs.

- **Fabrication et mise en œuvre:**

La qualité des matériaux, la compatibilité entre matériaux et méthode de construction, la qualité de l'exécution, les niveaux de contrôle et d'assurance qualité sont des paramètres fondamentaux vis-à-vis de la durabilité des ouvrage dans, tous les cas, et en particulier en ambiance chimique agressive

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les mécanismes d'altération chimique des matrices cimentaires dans un environnement agressif sont les phénomènes de dissolution des hydrates ou décalcification progressive de la pâte de ciment suivant le diagramme d'équilibre local entre la phase solide et la phase liquide et la diffusion des ions de la solution interstitielle vers le milieu extérieur. On observe tout d'abord une dissolution de la portlandite CH par contact avec la solution aqueuse, puis une dissolution progressive des C-S-H.

Cette étude nous renseigne sur la possibilité la résistance chimique d'un mortier à base de ciment substitué par la pouzzolane de Béni-Saf. Cette dernière présente des intérêts très importants du point de vue technique, économique, écologique, résistance mécanique et du point de vue durabilité, les résultats expérimentaux menés à travers cette étude permettent de dégager les conclusions suivantes :

Les résultats des résistances mécaniques (flexion ou compression) sont meilleurs pour les mortiers élaborés à base de ciment substitué avec 30 % de pouzzolane SSB2. Ils nous montrent qu'il faut fixer le taux de pouzzolane substitué qui réagit avec la portlandite pour former un silicate de calcium hydraté (rapport pouzzolane / portlandite).

Les résultats de la perte de résistance nous montrent que l'acide nitrique est plus agressif que le sel $MgSO_4$, cependant la meilleure résistance chimique est donnée par les éprouvettes élaborées avec 30 % de pouzzolane SSB2.

Les résultats des résistances mécaniques après attaque montrent qu'il y a une diminution des résistances en compression des mortiers CEM1 dans le mélange d'acide ($HNO_3 + NH_4NO_3$) et dans la solution de sel ($MgSO_4$). Cependant, on remarque une augmentation des autres variantes à savoir le mortier avec la SSB2 dans le mélange d'acide ($HNO_3 + NH_4NO_3$) et la solution de sel ($MgSO_4$), cette constatation est due à la formation de C-S-H de deuxième génération à long terme.

L'effet du superplastifiant est très bénéfique parce qu'il améliore les propriétés mécaniques et chimiques de ces mortiers.

Enfin et d'après ces résultats, nous pouvons dire que les mortiers élaborés à base d'un sable de KHEMIS MILIANA et d'un ciment substitué par la pouzzolane peuvent être employés dans des constructions en milieux agressifs notamment les constructions souterraines, les bacs de stockage, les zones marines, les laboratoires chimiques, les ouvrages d'assainissement etc....

IV.1. objectif et méthodologie du travail

Dans ce chapitre, nous exposerons le travail pratique effectué au niveau de laboratoire (LNHC) et laboratoire (FSI), cette partie répond aux plusieurs questions importantes.

Notre étude a pour objectif d'étudier les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers à base de ciment pouzzolanique, et de caractériser ces mortiers immergés dans deux milieux agressifs pour une durée d'une année à savoir l'acide nitrique et le sulfate de magnésium. Ce travail est complété par des analyses chimiques et minéralogiques des éprouvettes dégradées et des produits de dégradation.

Pour cela, nous avons réparti le travail en quatre parties :

Première partie : une caractérisation des matières premières :

- sables (KHEMIS MILIANA et BOUSSAADA).
- le ciment CEMI 42,5 N, avec un pourcentage de 30% de pouzzolane de SSB différentes (SSB1 est égale à $6124\text{cm}^2/\text{g}$ et SSB2 est égale à $8634\text{cm}^2/\text{g}$);
- Superplastifiant «TEMPO12» SIKA.
- Pouzzolane (SOUR EL GHOZLANE).

Deuxième partie :

- Formulation des différentes compositions de mortier ;
- Caractérisation des mortiers à l'état frais
- Confection et conservation des éprouvettes ;

Troisième partie :

- Caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers confectionnés ;
- Détermination des meilleures variantes

Quatrième partie :

- Durabilité des mortiers par :
 - Attaque par un mélange d'acide Nitrique et de nitrate d'ammonium ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$) à 10%;

- Attaque par la solution de sel ($MgSO_4$) ;
- La résistance mécanique après dégradation :
 - Après 28 jours
 - Après 1 année
- Les analyses chimiques et minéralogiques de la poudre dégradée dans les deux solutions ;
- Les analyses chimiques et minéralogiques des éprouvettes après attaques;
- Interprétation des résultats ;
- Conclusion générale.

Partie I :

IV.2. Caractéristiques des constituants

Dans cette partie, on traite la détermination des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du mortier. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant de mortier.

IV.2.1 :L'eau de gâchage

L'eau utilisée est une eau potable (de robinet).

IV.2.2 : Ciment CEMI

Le type de ciment choisi est un «CEMI - 42.5 » dont les caractéristiques sont les suivantes :

IV.2.2.1 : Composition chimique :

Tableau IV-1: Composition chimique du ciment.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Mgo
%	63.97	21.86	4.85	3.51	0.90	0.28	0.61	2.17

IV.2.2.2 : Composition minéralogique :

Tableau IV-2 : Composition minéralogique du ciment

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	52.77	22.90	6.91	10.67

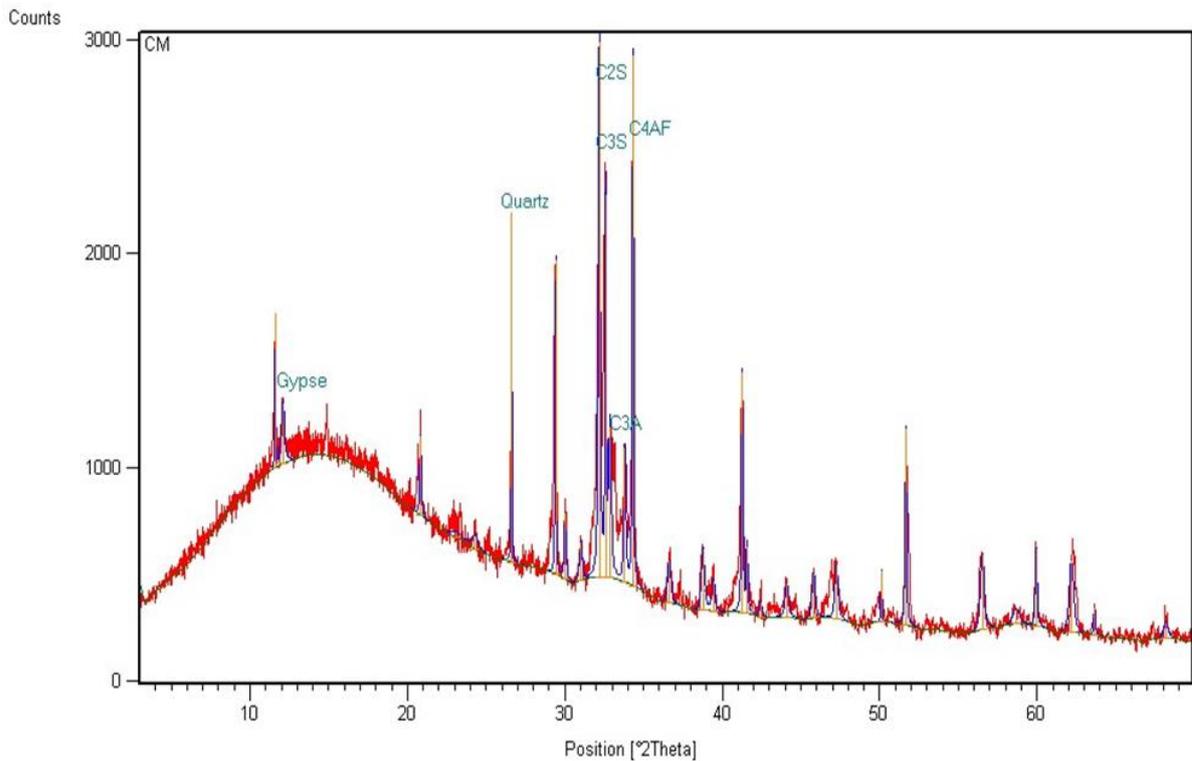


Figure IV-1: Diffractogramme des RX de ciment

IV.2.2.3 : Caractéristiques physiques du ciment

Tableau IV.3: Caractéristiques physiques de ciment.

Désignations		Moyenne	Unités
Masse volumique apparente		1.03	g/cm^3
Masse volumique absolue		3.12	g/cm^3
Surface spécifique(SSB) (NA231)		3167	Cm^2/g
Consistance normale (NA 229)		27	% H_2O
Temps de prise	Début de prise	180	min
	Fin de prise	255	min
La classe vraie NF EN 196-1		42.5 R	MPa

IV.2.3 : Le sable

Les sables utilisés sont :sable grossier (S1) de KHEMIS MELIANA, et sable fin (S2) de BOUSAADA.

Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivants :

IV.2.3.1 : Sable fin de Boussaâda

Tableau IV-4: Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1).

Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisats cumulés (%)	Module de finesse
1.25	21	2.1	97.9	Mf= 1.33
0.63	25.4	2.5	97.5	
0.315	340.1	34.01	65.99	
0.16	950	95	5	
0.08	1000	100	0	
Fond de tamis	1000	100	0	

L'analyse de granulométrie montre que le module de finesse du sable gros (S1) est $Mf1=3.05$, qui nécessite une correction à cause de sa grosseur. Pour la correction on utilise le sable fin (S2) avec un $Mf2 = 1.33$.

Tableau IV-5: Caractéristiques physiques de sable fin

Caractéristiques	Résultats	Unités
Equivalent de sable	85	%
L'absorption d'eau	0.72	%
La masse volumique apparente	1.56	g/cm^3
La masse volumique absolue	2.85	g/cm^3

a) Composition chimique

Tableau IV-6: Composition chimique de sable fin.

Eléments	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
%	3.96	42.17	10.44	4.34	32.58	3.71	1.44	0.80	0.05	0.35	0.16

b) Composition minéralogique

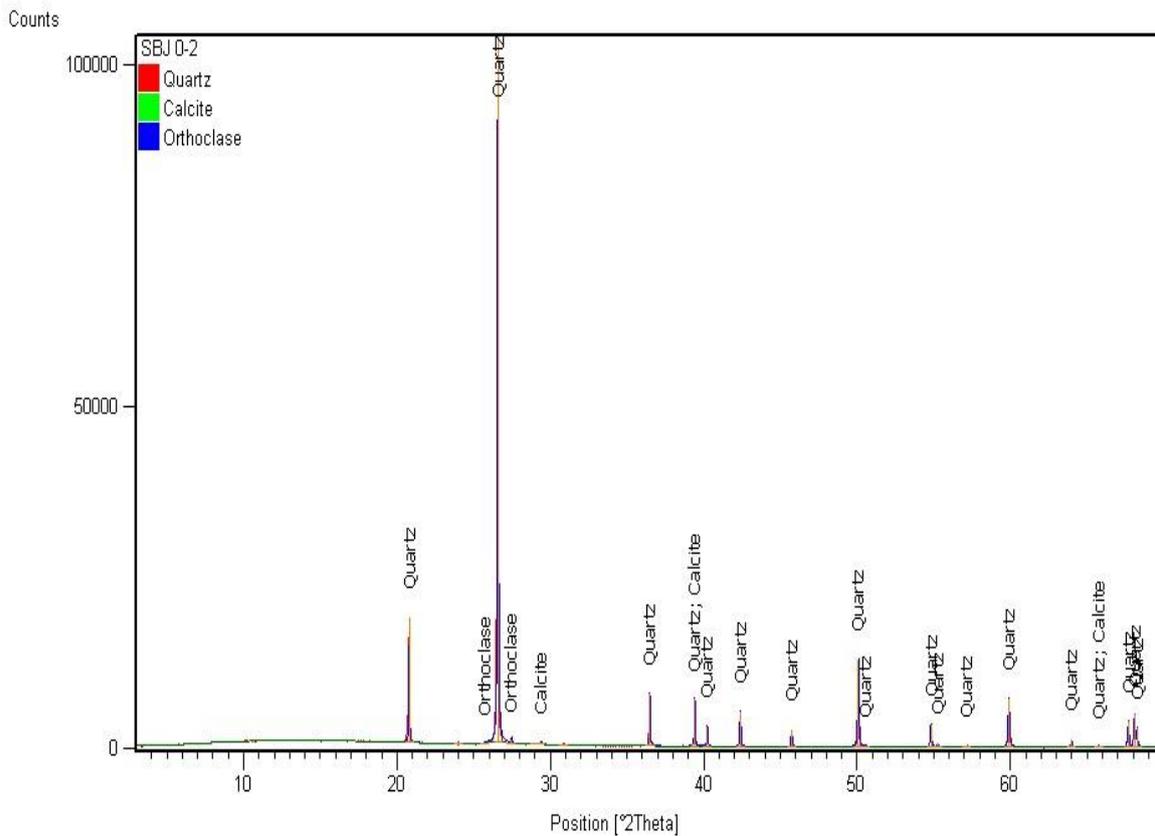


Figure IV-2: Diffractogramme des RX de sable fin

IV.2.3.2 : Sable grossier de KHEMIS MELIANA :

Tableau IV-7 : Analyse granulométrique du sable grossier.

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)	Module de finesse
4	57.2	2.86	97.14	MF=3.05
2.5	387.7	19.38	80.38	
1.25	892.2	44.61	55.39	
0.63	1274.4	63.72	36.28	
0.315	1571.8	78.59	21.41	
0.16	1917.5	95.87	4.13	
0.08	2000	100	0	
Fond de tamis	2000	100	0	

IV.2.3.2 .1 : Module de finesse

Module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$MF = \frac{\sum \text{Refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5.4}{100}$$

$$MF = \frac{95.87 + 78.59 + 63.72 + 44.61 + 19.38 + 2.86}{100} = 3.05$$

IV.2.3.2.2 : Courbe granulométrie de sable de KHEMISSE MELIANA :

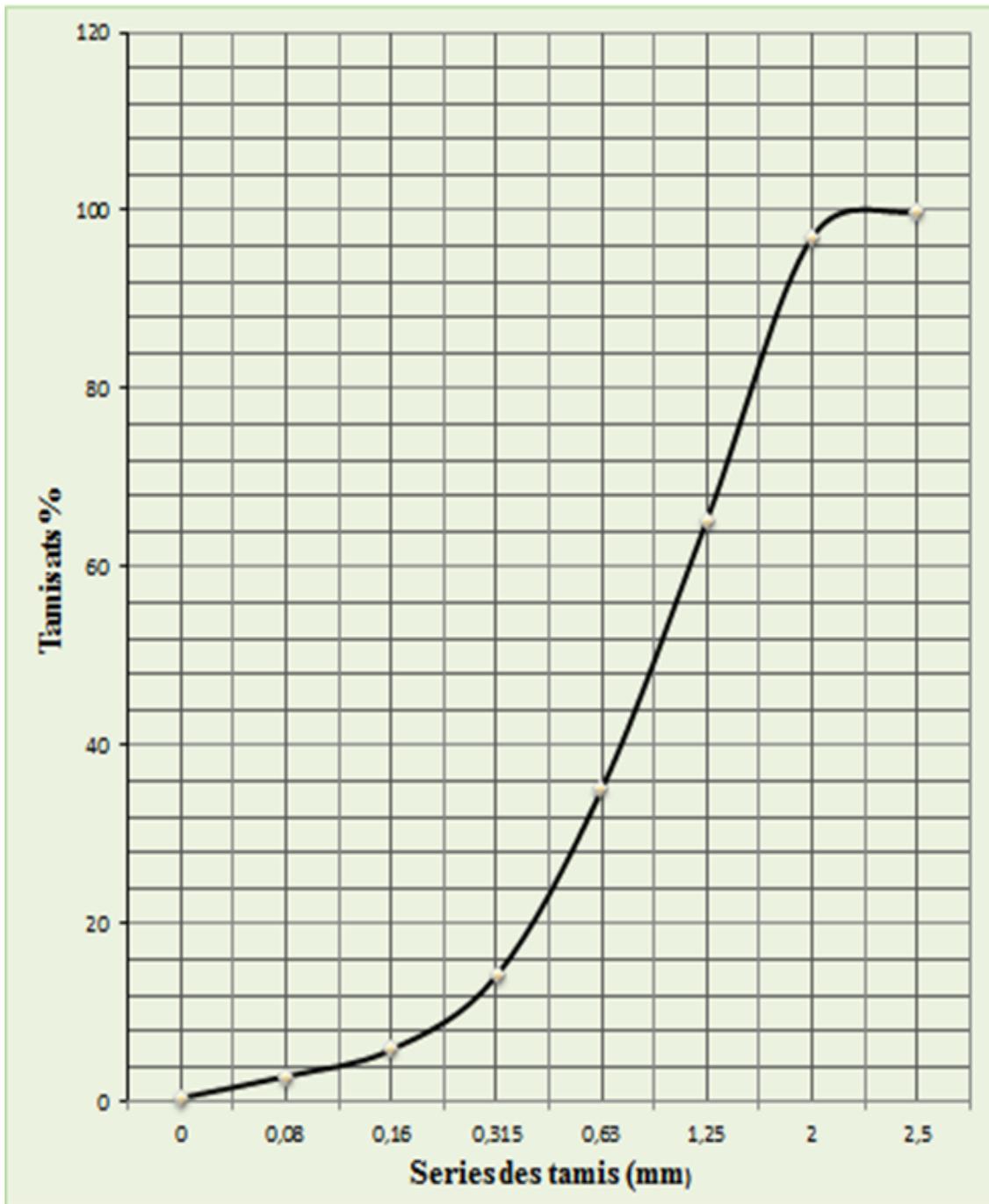


Figure IV.3: La courbe granulométrique par tamisage de sable de KHEMIS MELIANA.

Tableau IV-8: Caractéristiques physiques de sable de KHEMIS MELIANA :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Equivalent de sable	87	%
L'absorption d'eau	14	%
La masse volumique apparente	1.63	g/cm ³
La masse volumique absolue	2.5	g/cm ³

a)Composition chimique

Tableau IV-9: Composition chimique de sable gros.

Eléments	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
%	4.48	74.10	9.43	3.83	3.77	0.48	1.92	1.25	0.18	0.49	0.07

b) Composition minéralogique

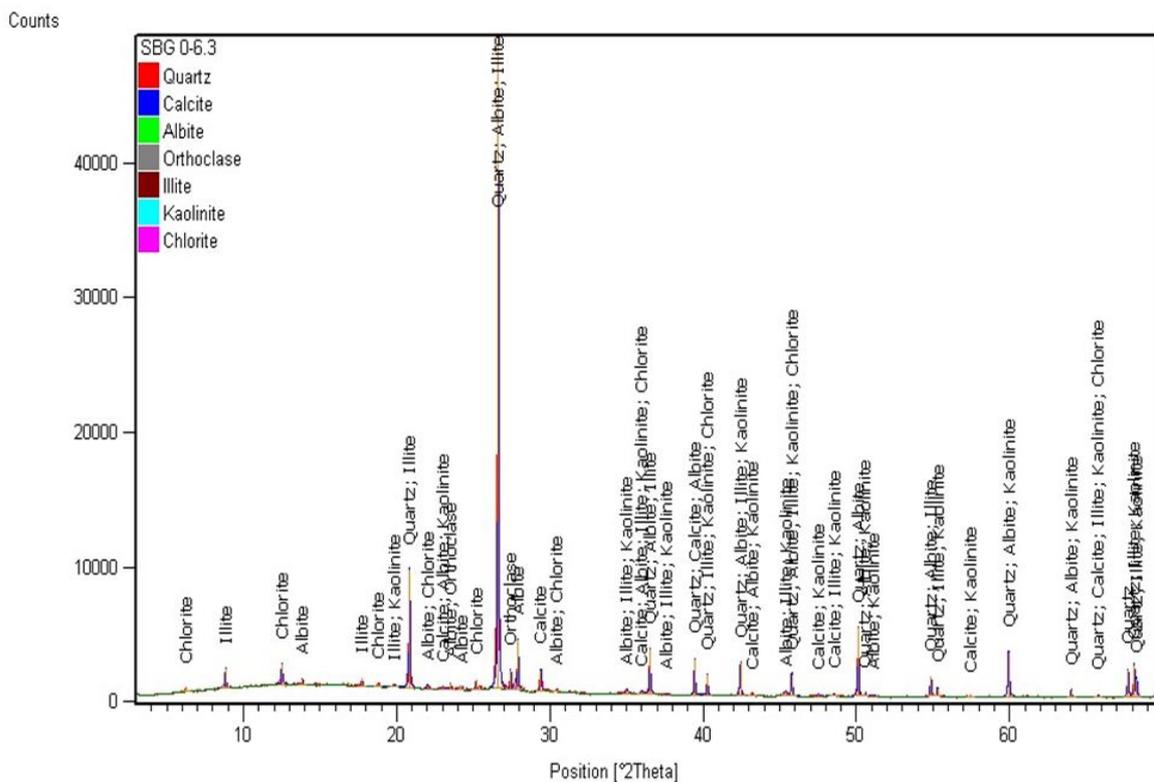


Figure IV-4: Diffractogramme des RX de sable gros.

- **La correction du sable selon ABRAMS :**

La correction du sable 0/63 s'effectue par le sable de dune (BOUSSAADA) qui a un module de finesse très petit 1.33. Pour cela, la correction est faite selon la méthode d'ABRAMS.

Module de finesse désiré : **2.5**

$$S_1 = \frac{M_{fx} - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} \times 100 \rightarrow S_1 = \frac{2.5 - 1.33}{3.05 - 1.33} \times 100 = 68\%$$

$$S_2 = \frac{M_{f1} - M_{fx}}{M_{f1} - M_{f2}} \times 100 \rightarrow S_2 = \frac{3.05 - 2.5}{3.05 - 1.33} \times 100 = 32\%$$

% S1 = 68 sable gros

% S2 = 32 sable fin

➤ **Commentaire**

D'après les résultats obtenus sur le sable corrigé par l'analyse granulométrique, on peut dire qu'il réponde aux exigences de la norme pour qu'il soit utilisé dans notre formulation.

IV.2.4 : Caractérisation de la pouzzolane

La pouzzolane naturelle utilisée provient de la carrière de BENI SAF. Elle a été broyée dans un broyeur à boulets au niveau de l'atelier de broyage de la F.S.I (BOUMERDES).

Tableau IV-10 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente SSB1	0.83	g/cm ³
Masse volumique apparente SSB2	0.85	g/cm ³
Masse volumique absolue SSB1	2.77	g/cm ³
Masse volumique absolue SSB2	2.75	g/cm ³
Surface spécifique Blaine de poudre SSB1	6124	Cm ² /g
Surface spécifique Blaine de poudre SSB2	8634	Cm ² /g

IV.2.4.1 : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane

Tableau IV.11: La composition chimique de la pouzzolane de SOUR EL GHEZLANE.

Eléments	PAF	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃
%	5.87	44.86	9.33	10.57	4.32	1.34	3.25	0.75	2.13	0.01	17.55

IV.2.4.2 : La composition minéralogique de la pouzzolane

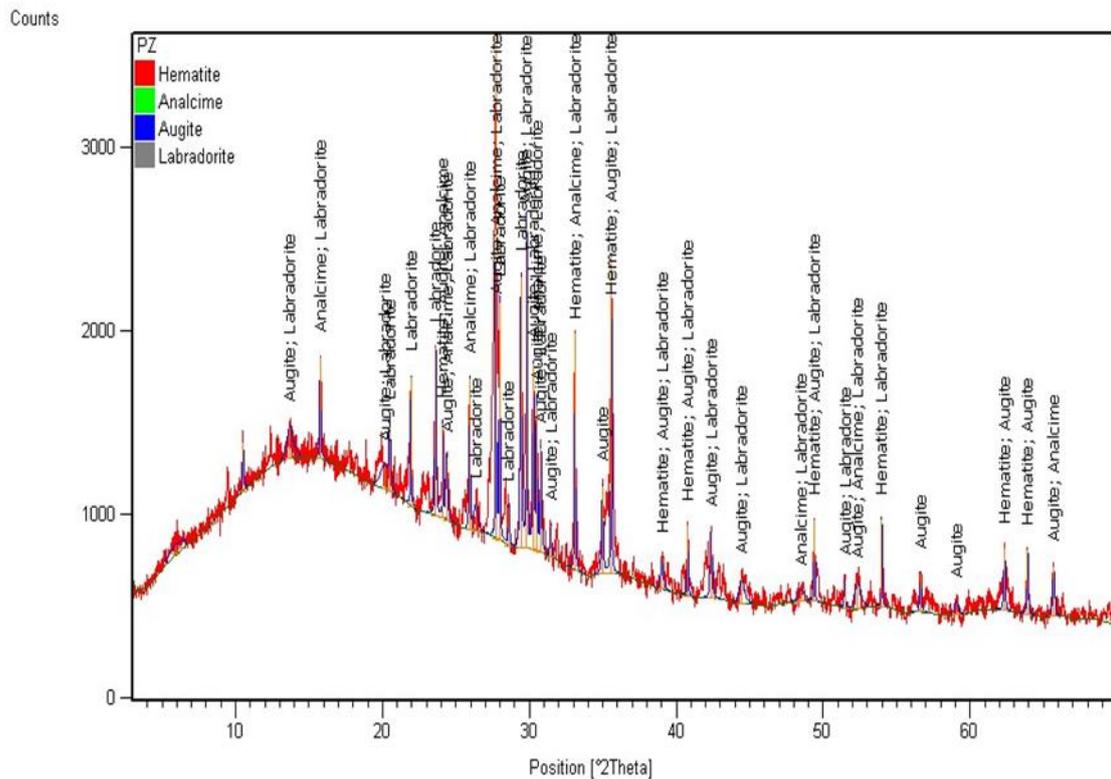


Figure IV-5: Diffractogramme des RX de la pouzzolane.

IV.2.5 :L'Adjuvant

Tempo 12 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

a)Description

SIKA VISCOCRETE Tempo 12 : Superplastifiant haut réducteur d'eau conforme à la norme NF EN 934-2 (d'après SIKA EL-DJAZAIR, c'est un adjuvant à base de Copolymère acrylique).

SIKA VISCOCRETE Tempo 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau de nouvelle génération non chloré. Il est conçu à base de copolymère acrylique qui améliore considérablement les propriétés des bétons. Le SIKA VISCOCRETE Tempo 12 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant.

b) Caractéristiques

- Forme Liquide
- Couleur Brun clair
- pH $6,0 \pm 1$
- Densité $1,06 \pm 0,01$
- Teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq}}$ $\leq 1\%$
- Extrait sec..... $30,2 \pm 1,3$

C) Propriétés et effets

Les superplastifiants **SIKA VISCOCRETE Tempo 12** permettent :

Sur béton frais

- L'obtention d'un E/C très faible ;
- l'amélioration considérable de la fluidité ;
- une très bonne maniabilité ;
- un long maintien de l'ouvrabilité (>2h);
- d'éviter la ségrégation ;
- de faciliter la mise en œuvre du béton ;
- améliore la stabilité du béton.

Sur béton durci

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;
- de diminuer la porosité ;

- d'augmenter la durabilité ;
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration ;
- d'obtenir un meilleur parement.

d) Dosage

- Plage de dosage recommandée : 0,2 à 3,0 % du poids de ciment.
- Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction de type du béton et des effets recherchés.

E) Mode d'emploi

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

F) Domaines d'application

- Bétons à hautes performances ;
- Bétons auto – plaçants ;
- Bétons pompés ;
- Bétons précontraints ;
- Bétons architecturaux.

Partie II :

IV.3. Formulation et confection des différents mortiers

Après la caractérisation de tous les constituants, l'étape suivante est consacrée à la confection des moules, mais avant l'élaboration nous devons prendre des précautions pour assurer la bonne réalisation des mortiers.

- Il faut nettoyer tous les outils (balance, malaxeur, moules) ainsi que la surface de travail ;
- Etalonner toutes les machines pour minimiser le pourcentage d'erreur ;

IV.3.1. Composition des mortiers

Les différentes formulations sont réalisées selon les proportions des constituants ci-dessous :

Tableau IV.12: Les différentes compositions des mortiers.

Constituant Mortier	Pouzzolane 30%		CEM1	Sables	Adjuvant TP ₁₂	E/C
	%	(g)	(g)	(g)	%	%
MCEM	/	/	450	1350	/	0.5
MC+TP ₁₂	/	/	450	1350	1.5	0.4
MPZ ₃₀ SSB ₁	30	135	315	1350	/	0.5
MPZ ₃₀ SSB ₁ +TP ₁₂	30	135	315	1350	1.8	0.4
MPZ ₃₀ SSB ₂	30	135	315	1350	/	0.5
MPZ ₃₀ SSB ₂ +TP ₁₂	30	135	315	1350	2	0.4

Avec :

MCEM1: mortier CEM1.

MC+TP12 : mortier CEM1 avec adjuvant TEMPO12.

MPZ₃₀SSB1 et SSB2 : Les mortiers qui ont 30 % de pouzzolane substituée dans le ciment.

MPZ₃₀SSB₁ et SSB2 + TP₁₂ : les mortiers qui ont 30% de pouzzolane substituée dans le ciment avec adjuvant TEMPO 12.

IV.3.2. Mode de malaxage

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur automatique avec une cuve de cinq litres au niveau de laboratoire (LNHC), cette opération a une durée de temps environ de 4 min divisée en 4 étapes:

- Le malaxage à sec de tous les constituants sauf (l'eau et super plastifiant) pendant 1 minute avec une vitesse lente ;
- Puis on ajoute 2/3 d'eau et malaxer pendant 1 minute avec une vitesse lente ; L'eau qui reste (1/3) est mélangée avec le superplastifiant pour former un mélange (eau+ sup) ;

- On ajoute 1/2 (eau+ sup) pendant 1 minute de malaxage avec une vitesse rapide ;
- On ajoute 1/2 (eau+ sup) pendant 1 minute avec une vitesse rapide.



Figure IV.6: malaxeur des mortiers.

IV.3.3. Remplissage des moules

Pour chaque formulation ,6 éprouvettes sont réalisées dans les moules (4*4*16) dont 3 éprouvettes pour l'essai de traction par flexion et compression (28j) et 3 éprouvettes pour les essais de durabilité. La conservation après démoulage se fait à une température de 20 °C dans l'eau.



Figure IV.6: Mise en moule des mortiers.

IV.3.4. La conservation des éprouvettes

Le démoulage se fait après 24 heures de la mise en moule, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Figure IV.8 : chambre humide



Figure IV.9 : bassin d'eau

Partie III:

IV.4. caractéristiques des différentes compositions

- Les ciments utilisés sont CEMI et CEMI substitué par la pouzzolane avec différentes surfaces spécifiques :

- CEMI
- 70% CEM1 +30 % pouzzolane avec une SSB1 6124 de cm^2/g ;
- 70% CEM1+ 30 % pouzzolane avec une SSB2 8634 de cm^2/g ;

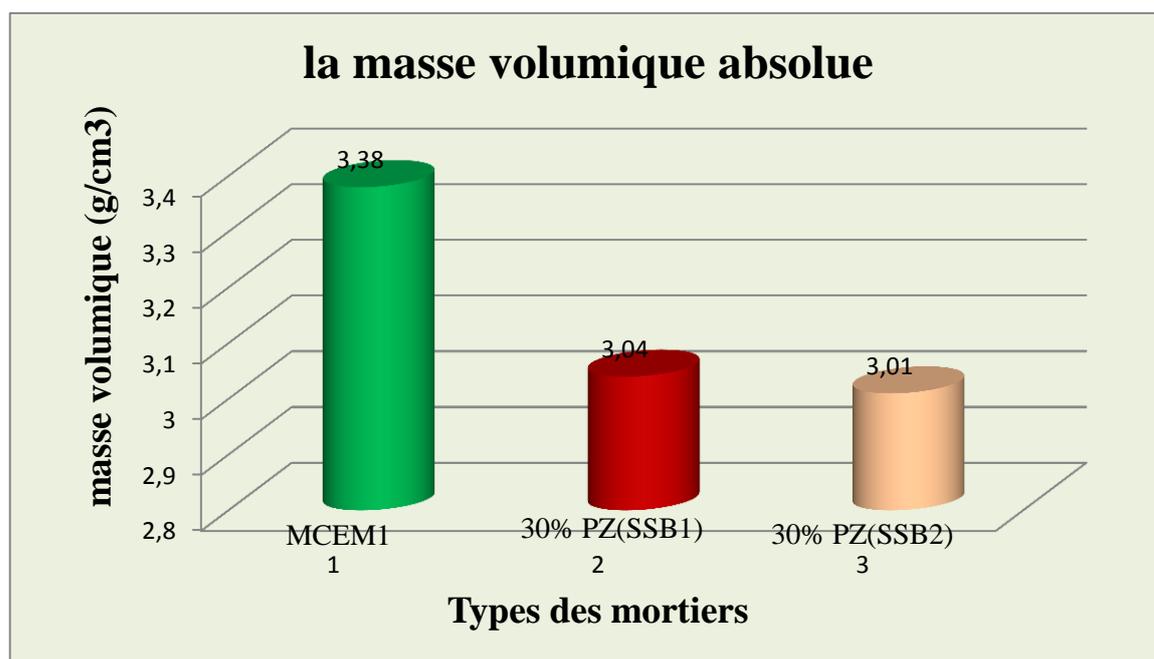
Pour la confection des éprouvettes témoins et des mortiers pouzzolaniques

Ces trois types de ciment ont des caractéristiques physiques différentes telles que le délai de prise, la consistance normale et la masse volumique qui sont présentées dans les tableaux suivants :

IV.4.1. La masse volumique

TableauIV.13 : La masse volumique des différents ciments.

ciment	Témoin MCEM	CEM1+30%PZ(SSB ₁)	CEM1+30%PZ(SSB ₂)
caractéristique			
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.38	3.04	3.01



FigureIV.10 : La masse volumique des différents ciments utilisés.

➤ **Commentaire**

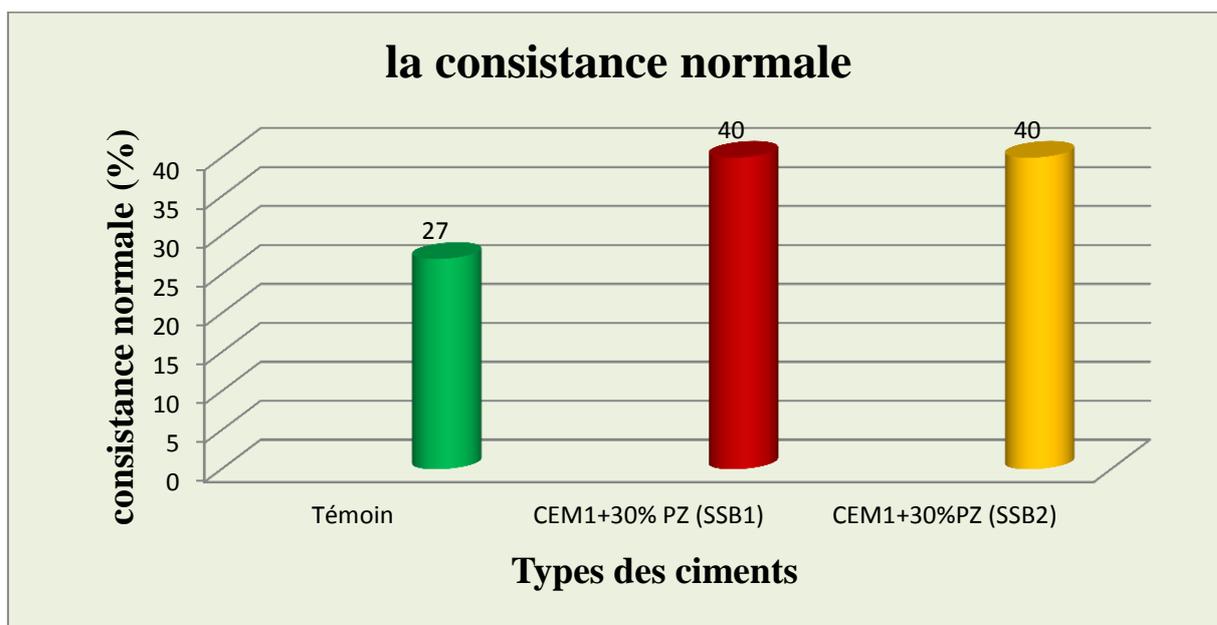
On constate que la masse volumique de ciment diminue lorsque la SSB de la pouzzolane augmente, cette diminution est due à la masse volumique de la pouzzolane qui est inférieure à celle de ciment.

IV.4.2. La consistance normale

L'essai de la consistance permet de déterminer le pourcentage d'eau requis pour la fabrication d'une pâte de ciment normale. La pâte est dite normale lorsque la sonde de 10 mm de diamètre de l'appareil de Vicat s'enfonce à une profondeur de 6 ± 1 mm en 30 secondes selon la norme (EN 196-3), la teneur en eau est exprimée en pourcentage de masse de ciment.

TableauIV.14 : La consistance normale des différents ciments.

Ciment	Témoin	CEM1+30% PZ(SSB1)	CEM1+30%PZ (SSB2)
Caractéristique			
Consistance normale (%)	27	40	40

**Figure IV.11** : La consistance normale des différents ciments utilisés.

➤ **Commentaire**

La consistance normale croit avec l'augmentation du SSB de la pouzzolane dans le ciment.

IV.4.3 .Le délai de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme **NF P15-473**.

TableauIV.15 : Le délai de prise des différents ciments.

Ciment	CEM1	CEM1+30% PZ (SSB1)	CEM1+30% PZ (SSB2)
Caractéristiques			
Début de prise (mn)	180	123	105
Fin de prise (mn)	255	197	175

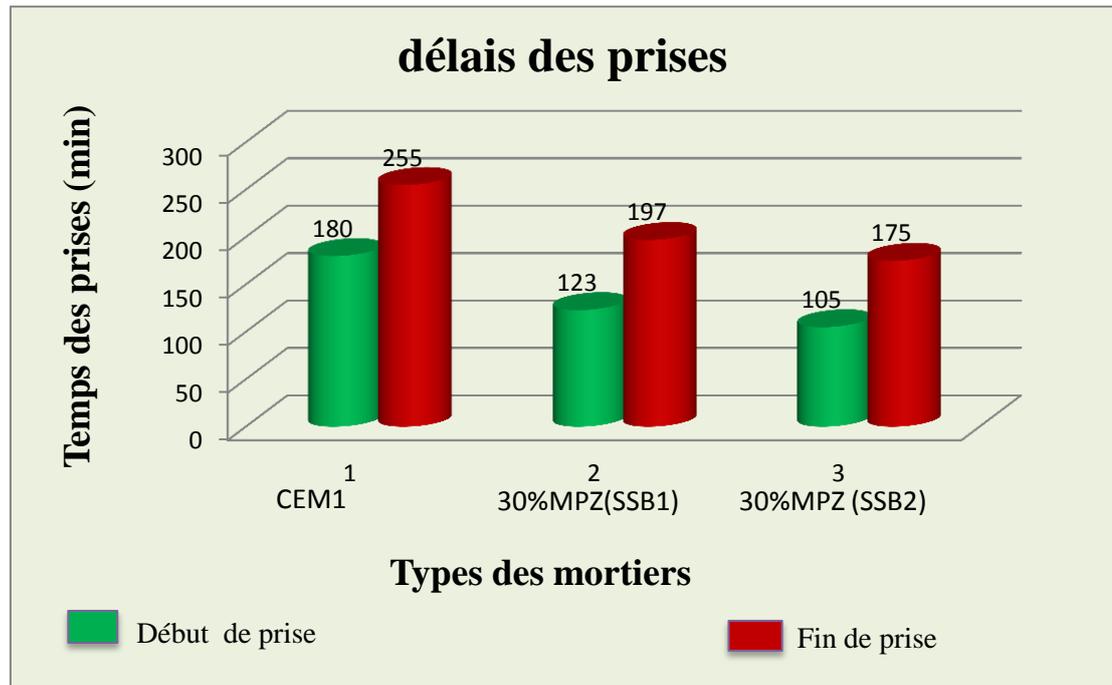


Figure IV.12 : Le délai de prise des différents ciments utilisés.

➤ **Commentaire**

Cette figure représente l'effet du SSB de pouzzolane sur le début et la fin de prise, on remarque quand la SSB de pouzzolane augmente les délais de prises diminuent.

IV.5. caractéristiques physiques du mortier

IV.5.1. L'étalement

Cette propriété est vérifiée par un essai d'étalement qui consiste à remplir de mortier un moule tronconique dont le diamètre inférieur 60 mm, diamètre supérieure 35 mm et de hauteur de 70 mm, à retirer le moule puis à mesurer l'étalement du mortier, qui est de l'ordre de 20 ± 2 mm.

Tableau IV.16 : L'étalement des différents mortiers.

Mortier	MCEM1		MPZ30 (SSB1)		MPZ30 (SSB2)	
	CEM1	TP ₁₂	PZ ₃₀	TP ₁₂	PZ ₃₀	TP ₁₂
Etalement au mini cône (cm)	12	13	12.5	14	13	14.5

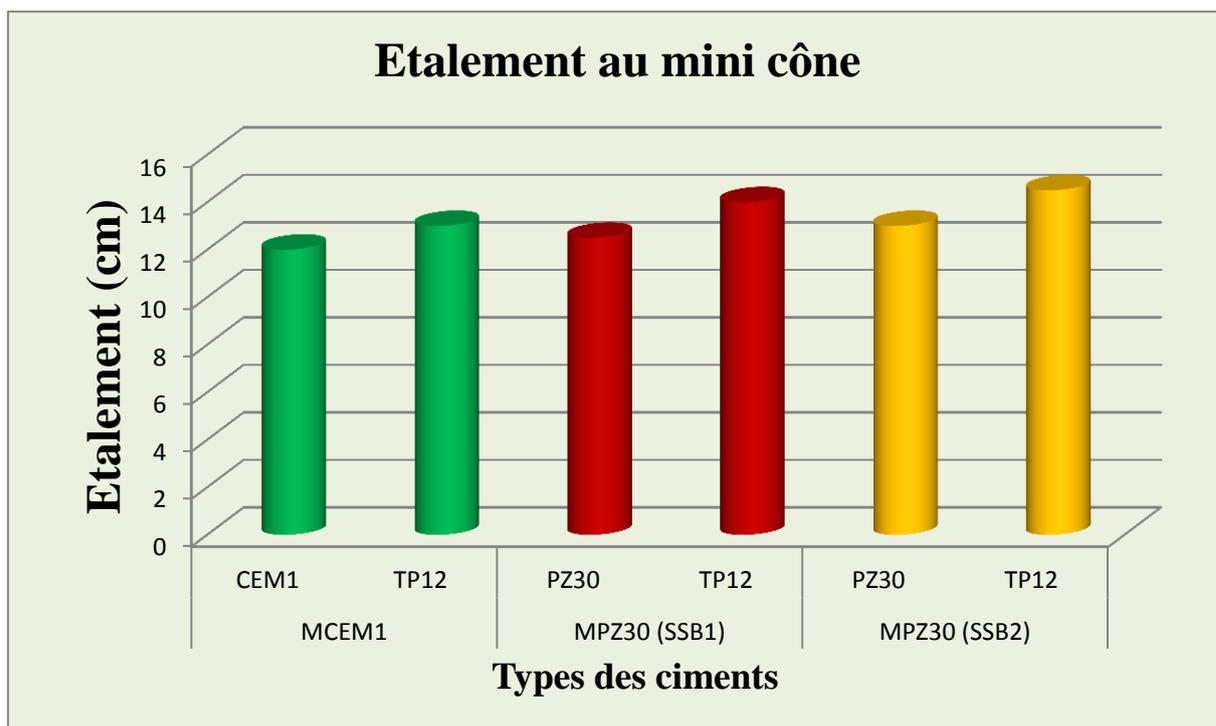


Figure IV.13 : L'étalement des mortiers.

➤ **Commentaire**

Cette figure représente l'étalement des différents mortiers. On observe que l'étalement augmente avec l'ajout et l'adjuvant.

IV.5.2. Masse volumique

Cette mesure détermine le rendement volumique (le rapport de la masse sur le volume) de la composition du mortier frais et durci et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

Tableau IV.17 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers CEM1.

Mortier	MCEM1	
	Témoin	TP ₁₂
Caractéristiques		
Masse volumique à l'état frais (g/cm ³)	3.12	2.33
Masse volumique à l'état durci (g/cm ³)	2.28	2.24

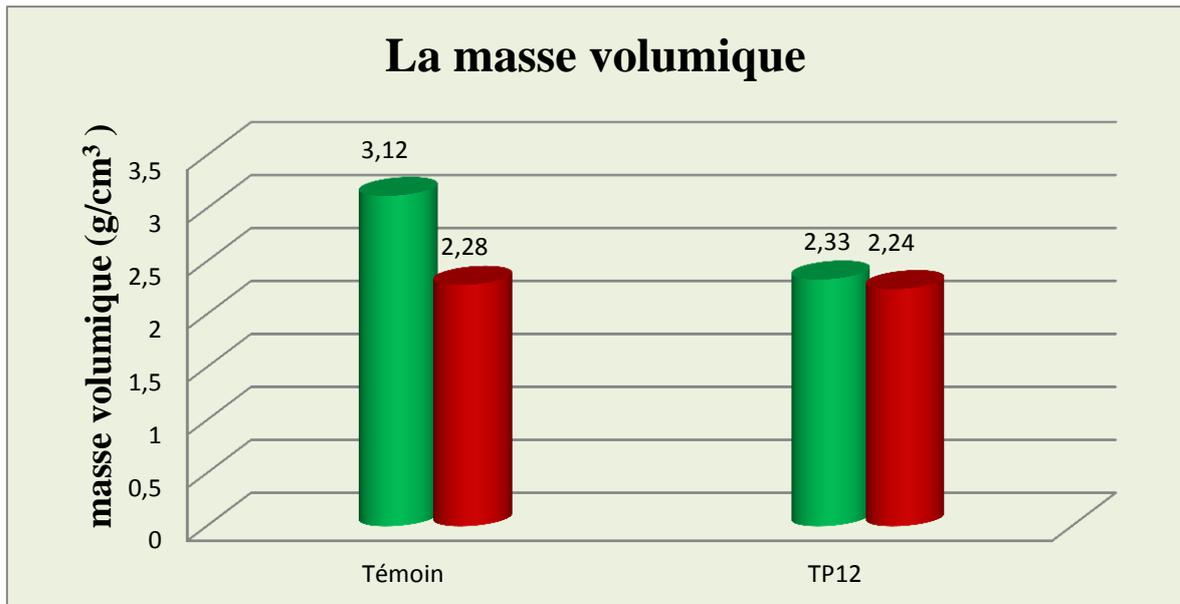


Figure IV.14 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers CEM1.

Tableau IV.18 : La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers avec adjuvant TEMPO12.

Mortier Caractéristiques	MPZ ₃₀ (SSB ₁)		MPZ ₃₀ (SSB ₂)	
	MPZ	MPZ+TP ₁₂	MPZ	MPZ+TP ₁₂
Masse volumique à l'état frais (g/cm ³)	2.22	2.24	1.71	1.83
Masse volumique à l'état durci (g/cm ³)	1.17	2.29	1.65	1.89

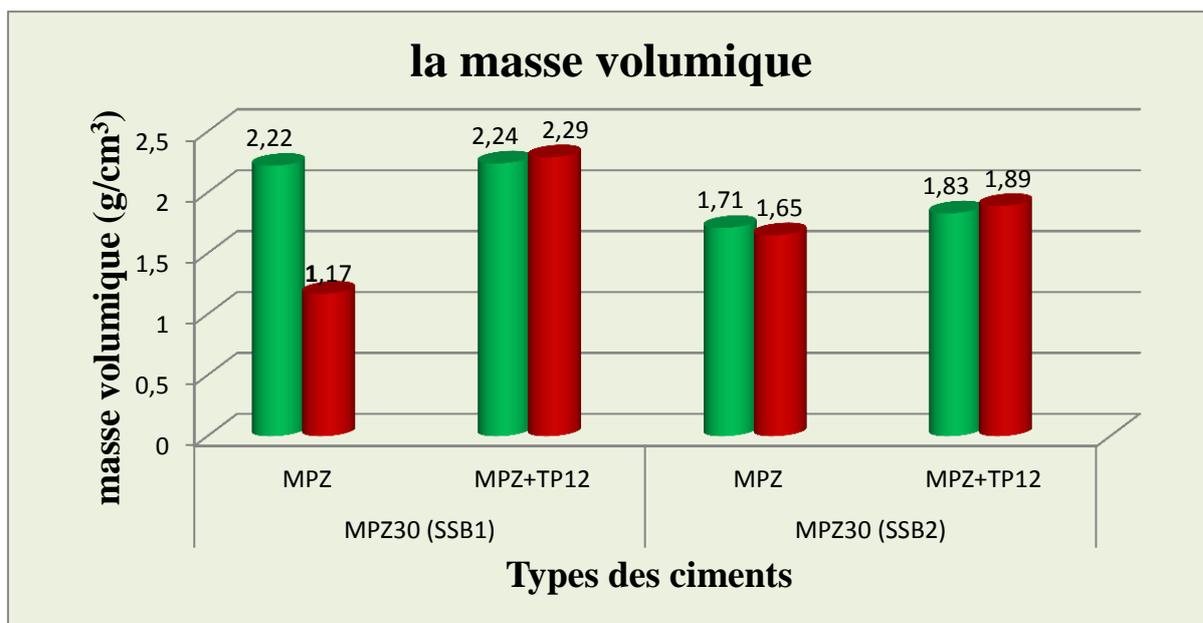


Figure IV.15: La masse volumique à l'état frais et durci des mortiers avec adjuvant TEMPO12.

➤ **Commentaire**

A partir des tableaux (IV.18, 19) qui sont illustrés dans les figures (IV.14, 15), on observe que la masse volumique des mortiers à l'état durci diminue par rapport à celles de l'état frais à l'exception des mortiers avec ajout dont la masse volumique à l'état durci augmente.

IV.5.3. L'absorption d'eau et la porosité

Pour connaître le pourcentage d'eau absorbé et le pourcentage du vide pour chaque type d'éprouvette, on a fait les essais de l'absorption d'eau et la porosité, en suivant les étapes ci-dessous :

- 1- on pèse les différentes éprouvettes (CEM1 témoin, CEM1 +TEMPO12, MPZ30 (SSB1) ; MPZ30 (SSB2), on note (M_1) ;
- 2- puis on immerge les échantillons dans un bac rempli d'eau à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ pendant 48 H ;
- 3- Enfin on retire les éprouvettes et essuyées avec une serviette et pesées (M_2) ;

Les résultats sont calculés par les relations suivantes :

$$Ab = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$$

$$P = [V_{\text{de vide}} / V_{\text{Total}}] \times 100$$

Avec :

- V de vide : volume de vide $M_2 - M_1 / \rho$, ρ la masse volumique d'eau;
- V total : volume de l'éprouvette (4*4*16) ;

Tableau IV.19 : La porosité et l'absorption d'eau des différents mortiers.

Mortier caractéristiques	MCEM ₁		MPZ ₃₀ (SSB ₁)	MPZ ₃₀ (SSB ₂)
	Témoin	+TP ₁₂	+TP ₁₂	+TP ₁₂
M ₁ g	570	575	557	537
M ₂ g	576	578	563	540
Ab %	1.05	0.52	1.08	0.56
P %	2.34	1.17	2.34	1.17

IV.6. Caractéristiques mécaniques des différents mortiers

IV.6.1. Résistance à la flexion



Figure IV.16 : L'appareil de flexion.

Les essais de flexion sont réalisés sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétrique et centrée sur le plateau de la presse hydraulique pourvu d'un dispositif de flexion trois points puis une charge continue est appliquée sur l'éprouvette jusqu'à la rupture.

La charge P en KN et la résistance à la flexion R_f en MPa sont affichées sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture.

Le tableau suivant présente les résultats de la résistance mécanique (à 28 jours) à la flexion des différentes combinaisons des éprouvettes confectionnées.

Tableau IV.20: La résistance à la flexion des différents mortiers.

Mortier	Résistance
	Résistance à la flexion (MPa) A 28 jours
MCEM ₁ témoin	5.86
MCEM ₁ + TP ₁₂	8.81
MPZ ₃₀ (SSB ₁)	9.52
MPZ ₃₀ (SSB ₁) + TP ₁₂	10.10
MPZ ₃₀ (SSB ₂)	10.47
MPZ ₃₀ (SSB ₂) + TP ₁₂	10.71

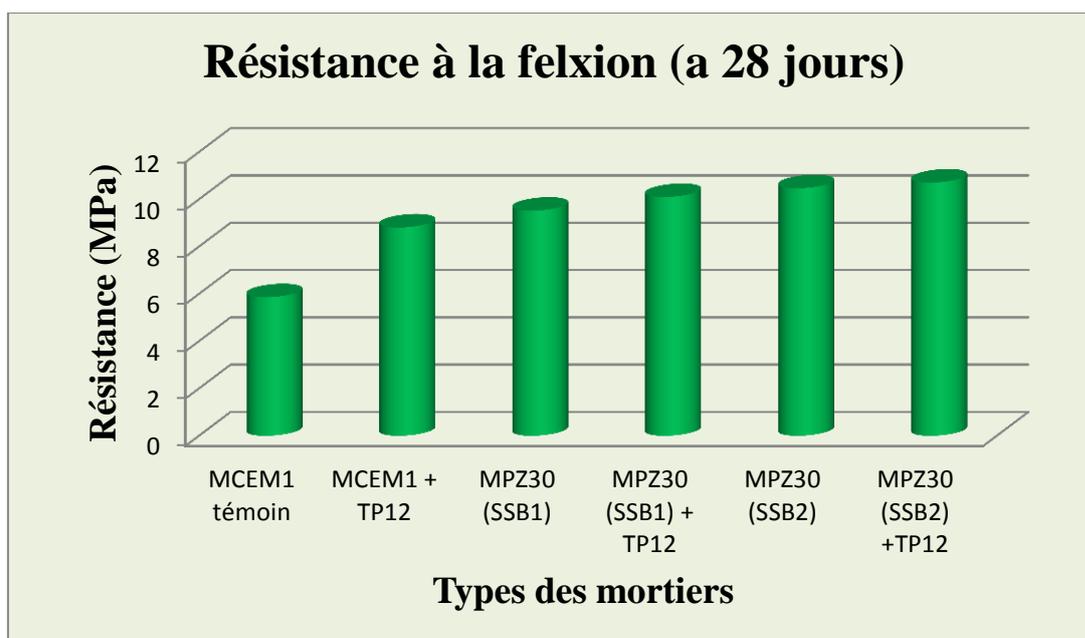


Figure IV.17 : La résistance à la flexion des mortiers.

IV.6.2. Résistance à la compression



Figure IV.18 : L'appareil de compression.

La résistance à la compression des bétons a été évaluée sur les demi-prismes issus de la flexion trois-points. Le demi-prisme est centré entre les deux plateaux de l'appareil et un chargement est effectué à une vitesse constante de 0.5 KN/s jusqu'à la rupture.

On effectue la lecture de la charge d'écrasement P en KN et la résistance à la compression R_C en MPa sur l'écran de l'appareil. Les résistances à la compression des différentes combinaisons des bétons confectionnés sont illustrées dans le Tableau IV.21.

Tableau IV.21: La résistance à la compression des différents mortiers.

Mortier	Résistance	Résistance à la compression(MPa)
		A 28 jours
MCEM ₁ témoin		43.78
MCEM ₁ + TP ₁₂		50.53
MPZ ₃₀ (SSB ₁)		50.57
MPZ ₃₀ (SSB ₁) + TP ₁₂		50.62
MPZ ₃₀ (SSB ₂)		50.94
MPZ ₃₀ (SSB ₂) + TP ₁₂		51.01

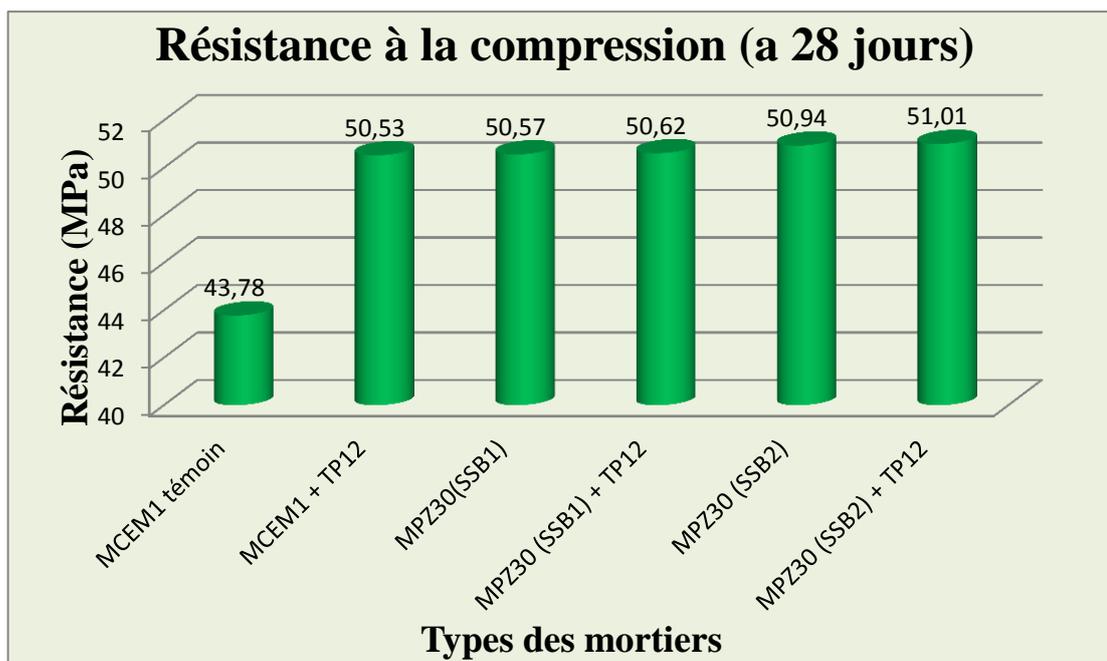


Figure IV.19: La résistance à la compression des différents mortiers.

➤ **Commentaire**

Les figures 17 et 19 illustrent l'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers. D'après la figure 17 On observe que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec l'ajout de SSB2 de pouzzolane et avec l'adjuvant par rapport aux autres variantes (figures 17 et 19).

Partie IV

IV.7. Durabilité des éprouvettes

Dans ces trois premières parties nous avons présenté les matériaux utilisés dans cette étude et les techniques expérimentales pour caractériser ces matériaux ainsi que la formulation des éprouvettes et leurs propriétés mécaniques.

La connaissance de leurs caractéristiques est très importante dans notre recherche, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on a procédé à la caractérisation de chaque constituant des mortiers.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux qui seront étudiés dans la partie suivante du point de vue durabilité.

IV.7.1. Mode opératoire

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes prismatiques de mortier ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) confectionnées, démoulées après 24 heures, les éprouvettes sont conservées dans l'eau de laboratoire à une température de $20^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ jusqu'à 28 jours. Après 28 jours, nous avons procédé au séchage des différentes éprouvettes par étuvage à 100°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (élimination de toute l'eau libre) dans le but de pouvoir mesurer la perte de masse de chaque éprouvette. Ces éprouvettes sont ensuite immergées dans différentes solutions (mélange d'acide nitrique et nitrates d'ammonium, solution MgSO_4), qui ont une concentration identique de 10%, pendant une durée d'une année pour évaluer la durabilité de chaque composition de mortier :

Les combinaisons performantes que nous avons sélectionnées pour les essais de durabilité sont :

- MCEM1 témoin ;
- MCEM1 avec un adjuvant (TEMPO12 (TP_{12})) ;
- MPZ30 (SSB1 et SSB2) avec un adjuvant TP_{12} ;

L'attaque due aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions est évaluée selon la Norme ASTM C 267-96.

IV.7.2. Résultats des différentes attaques d'acides

IV.7.2.1. L'attaque des mortiers par les nitrates d'ammonium et l'acide nitrique

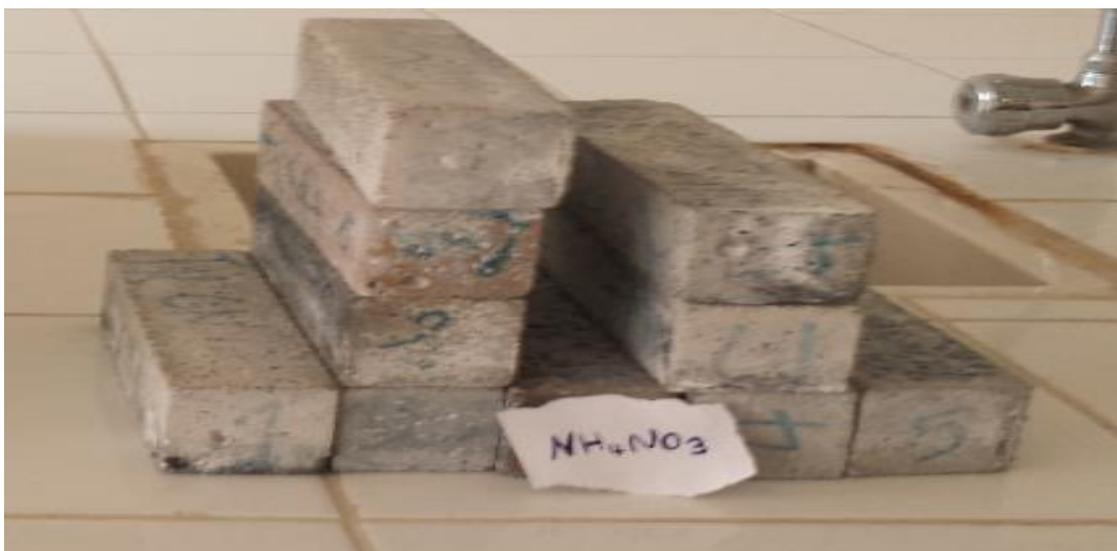


Figure IV.20 : Etat des éprouvettes après 1 année d'attaques par le mélange d'acide (HNO_3 + NH_4NO_3).

IV.7.2.2. L'attaque des mortiers par le sel $MgSO_4$



Figure IV .21: Etat des éprouvettes après 1 année l'attaque par le sel $MgSO_4$.

IV.8. La résistance mécanique après dégradation

IV.8.1. La résistance mécanique après attaque par $MgSO_4$

Comme nous le savons la dégradation des bétons ou bien des mortiers influence négativement sur le comportement mécanique de ces derniers pour cette raison que nous avons fait des essais de compression pour confirmer cette théorie. La réalisation de ces essais est la même que celle de 28 jours, les tableaux suivants (Tableau IV.23, 24) résument les résultats de la résistance à la compression après altérations par les différentes solutions.

Tableau IV.22: La résistance à la compression des mortiers après dégradation par $MgSO_4$.

Résistance Mortier	Résistance après 28 jours des éprouvettes saines en MPa	Résistance après 28 jours des éprouvettes attaques par $MgSO_4$ en MPa	Résistance après après 1 année attaques par $MgSO_4$ en MPa
MCEM1 témoin	43.78	40.27	37.40
MCEM1+TP₁₂	50.53	50.51	48.60
MPZ₃₀ (SSB₁) +TP₁₂	50.62	54.86	55.60
MPZ₃₀ (SSB₂) +TP₁₂	51.01	55.35	59.34

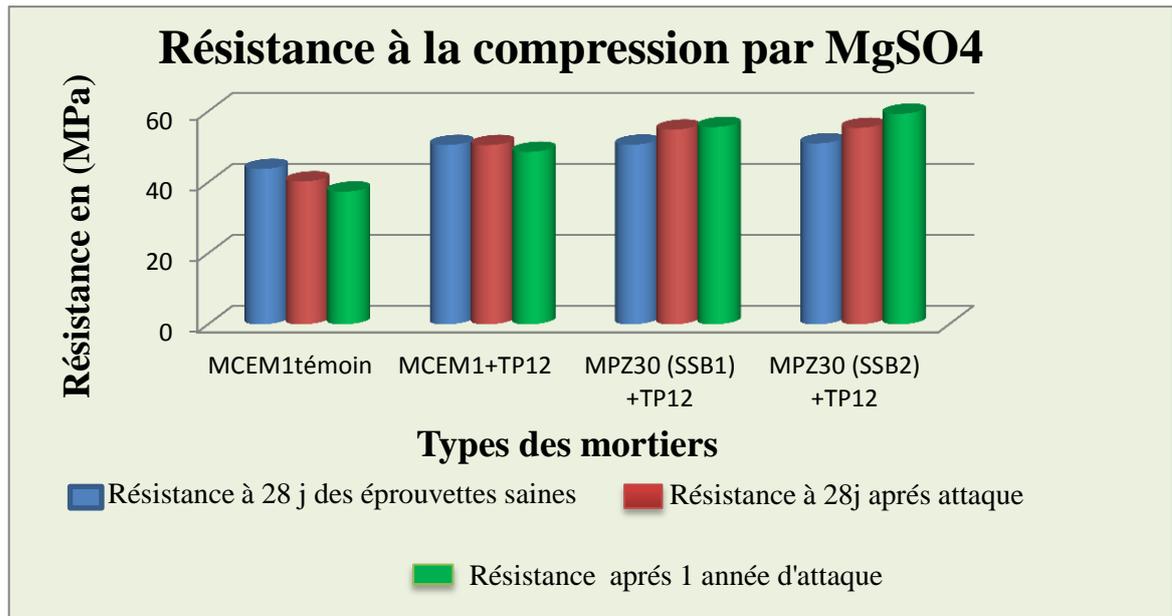


Figure IV.22: La résistance à la compression des différents mortiers.

IV.8.2. La résistance mécanique après attaques par (HNO₃+NH₄NO₃)

Tableau IV.23. La résistance à la compression des mortiers après dégradation par (HNO₃+NH₄NO₃)

Mortier	Résistance après 28 jours des éprouvettes saines	Résistance après attaques par le mélange (HNO ₃ +NH ₄ NO ₃) après 28 jours	Résistance après attaques par le mélange (HNO ₃ +NH ₄ NO ₃) après 1 année
MCEM1 témoin	43.78	40.43	38.56
MCEM1 + TP ₁₂	50.53	50.59	45.69
MPZ ₃₀ (SSB ₁) +TP ₁₂	50.62	55.51	60.43
MPZ ₃₀ (SSB ₂) +TP ₁₂	51.01	58.50	65.91

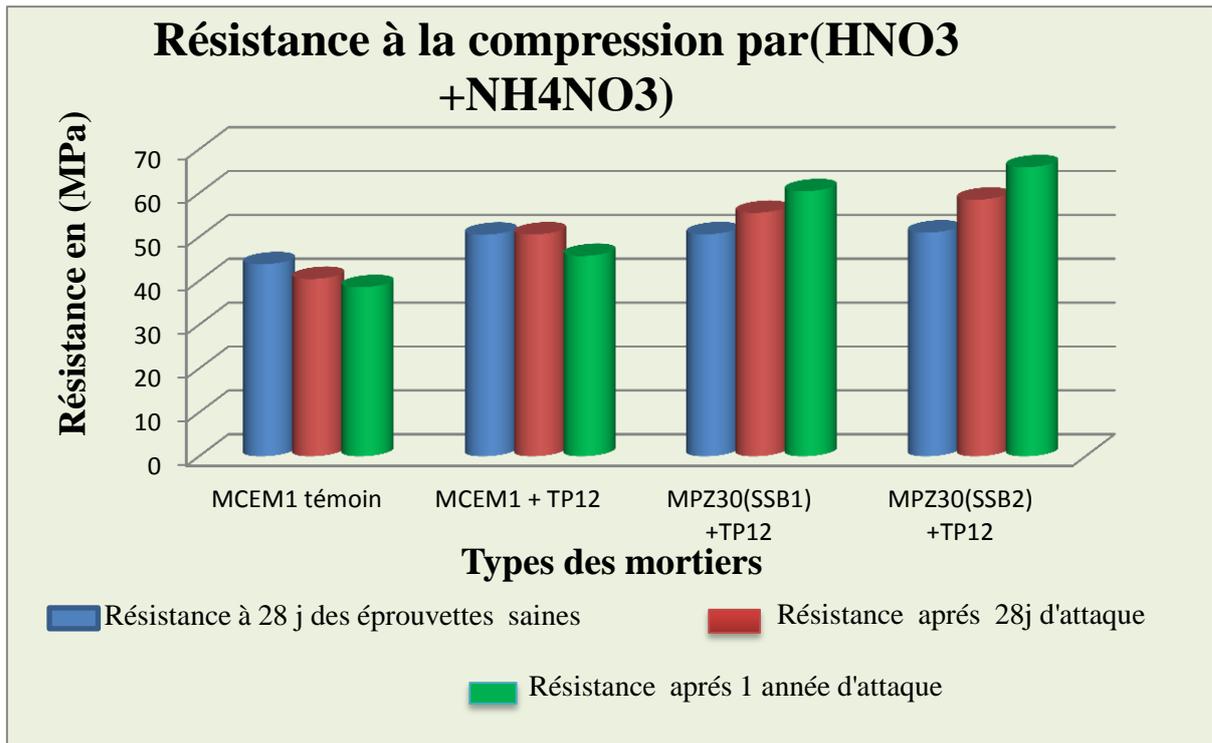


Figure IV.23: La résistance à la compression des différents mortiers.

IV.9:Analyses minéralogiques

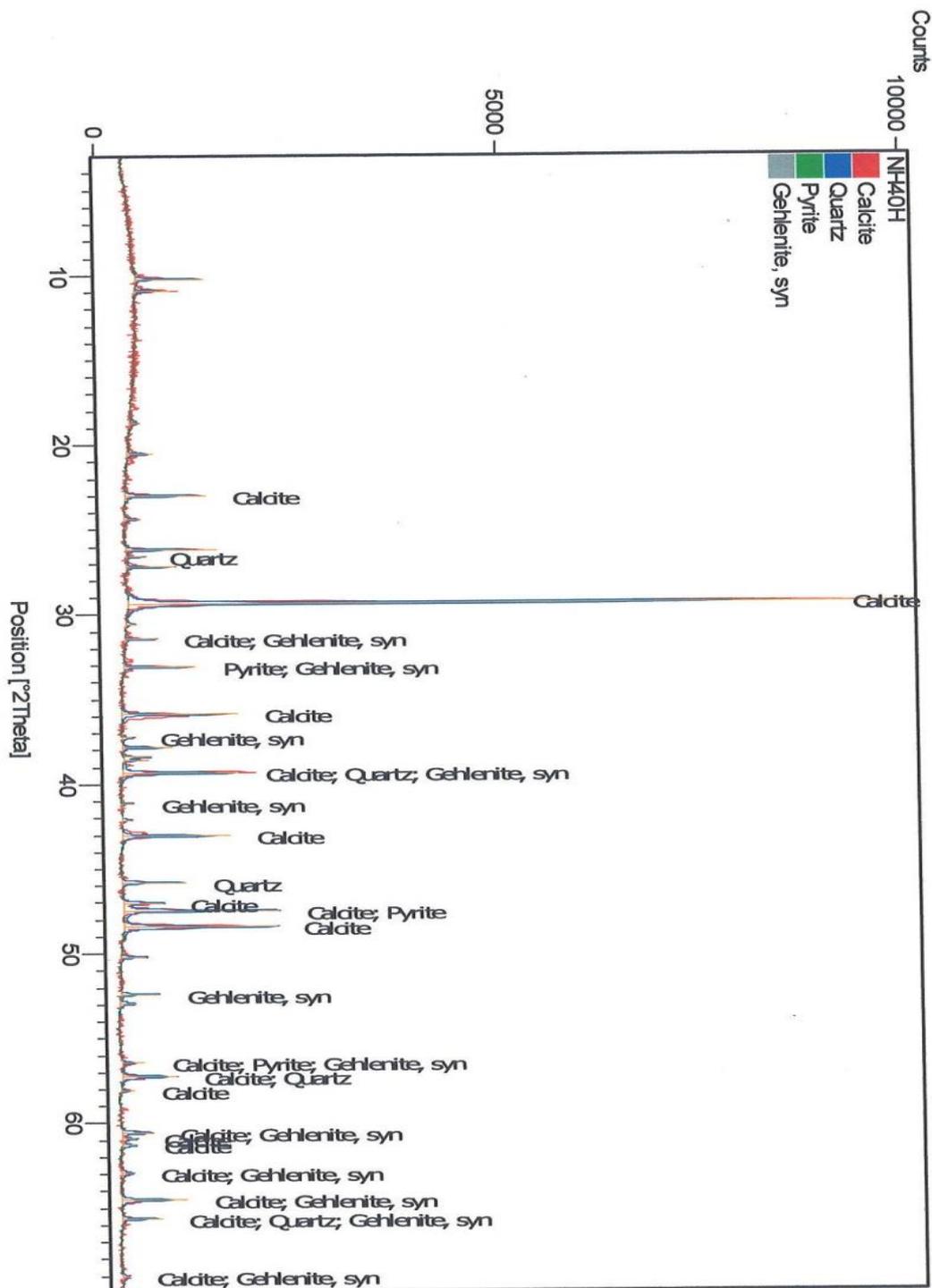
IV.9.1:Analyses aux diffractions des rayons x de la poudre dégradée dans MgSO_4 

Figure IV.24: L'analyse DRX de la poudre MgSO_4 après dégradation.

IV.9.3.2 : Analyse aux diffractions des rayons x de MCEM1 après dégradation

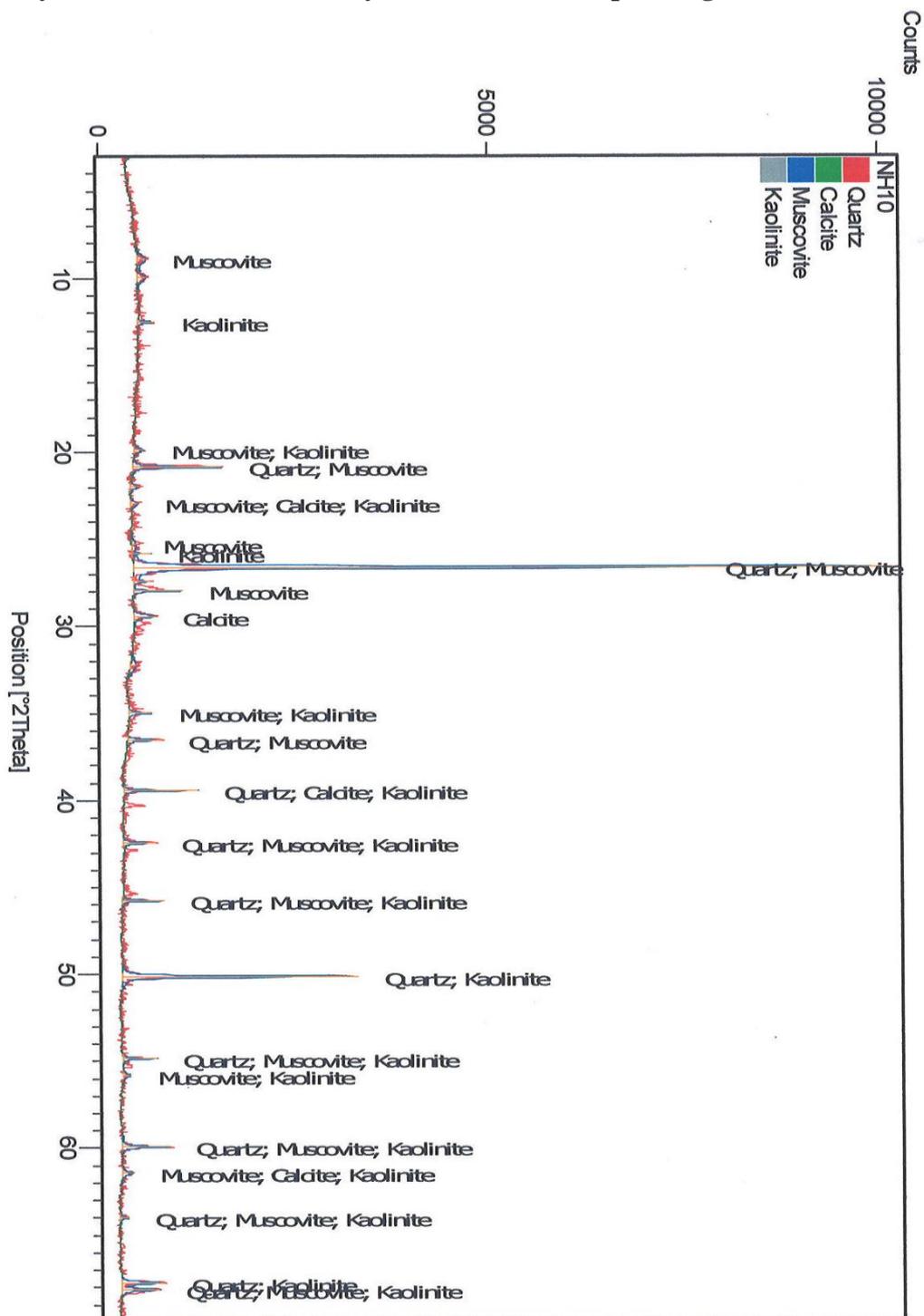


Figure IV.27: L'analyse DRX de MCEM1 après dégradation.

IV.9.3.3 : Analyse aux diffractions des rayons x de MP₃₀ (SSB₂) +TP₁₂

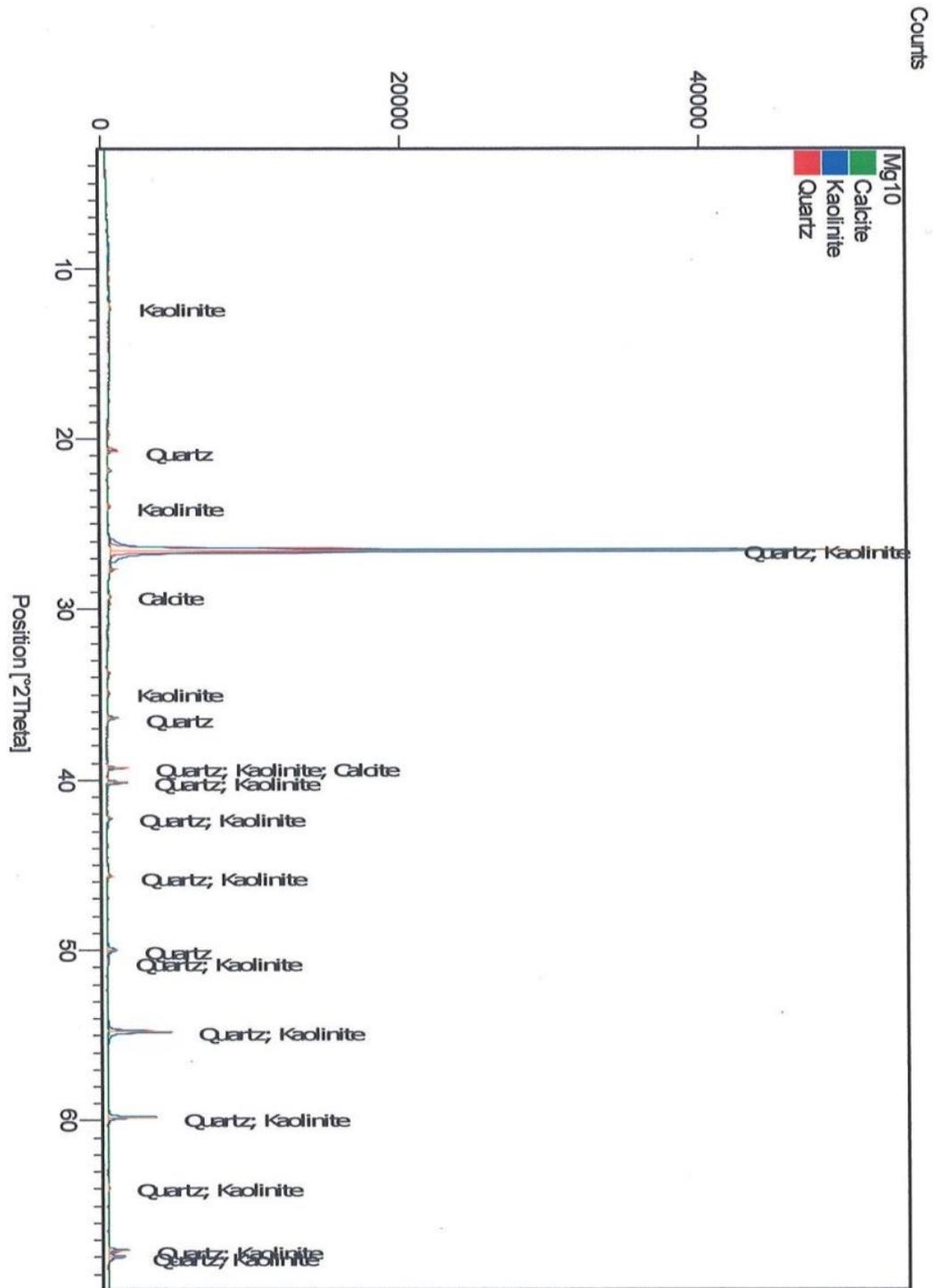
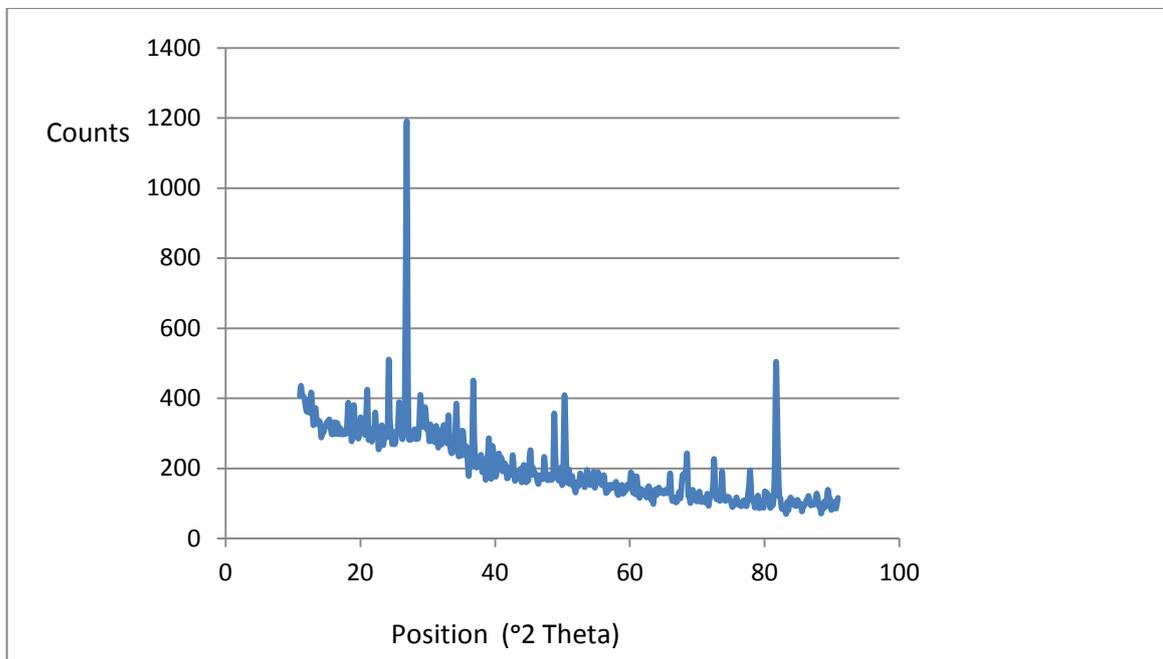
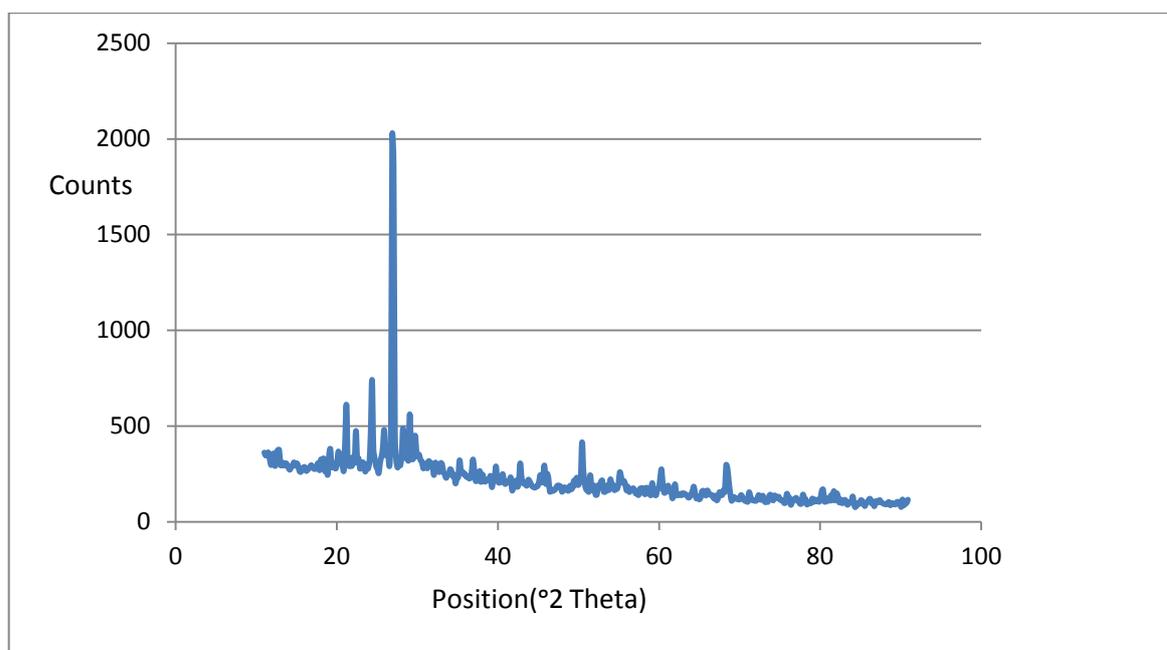


Figure IV.28: L'analyse DRX deMPZ₃₀ (SSB₂) +TP₁₂.

IV.9.4: Analyses aux diffractions des rayons x des éprouvettes dégradées dans l'acide ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$)**IV.9.4.1 : Analyse aux diffractions des rayons x de MCEM1****Figure IV.29:** L'analyse DRX de MCEM1.**IV.9.4.2 : Analyse aux diffractions des rayons x de MP_{30} (SSB_2) + TP_{12}** **Figure IV.30:** L'analyse DRX de MP_{30} (SSB_2) + TP_{12} .

IV.10:Analyses chimiques

Tableau IV.24:Analyses de fluorescence x de la poudre(HNO₃ + NH₄NO₃)

Analyte	Etat du calibrage	Formule du composé	Concentration (%)	Méthode de calculé
Na	Calibré	Na ₂ O	0.228	Calculé
Mg	Calibré	MgO	0.264	Calculé
Al	Calibré	Al ₂ O ₃	1.025	Calculé
Si	Calibré	SiO ₂	3.846	Calculé
S	Calibré	SO ₃	0.250	Calculé
K	Calibré	K ₂ O	0.258	Calculé
Ca	Calibré	CaO	50.586	Calculé
Fe	Calibré	Fe ₂ O ₃	0.644	Calculé

IV.11 : La perte de résistance après 1 année d'attaque

Le degré de dégradation est évalué par la formule de perte de résistance suivante :

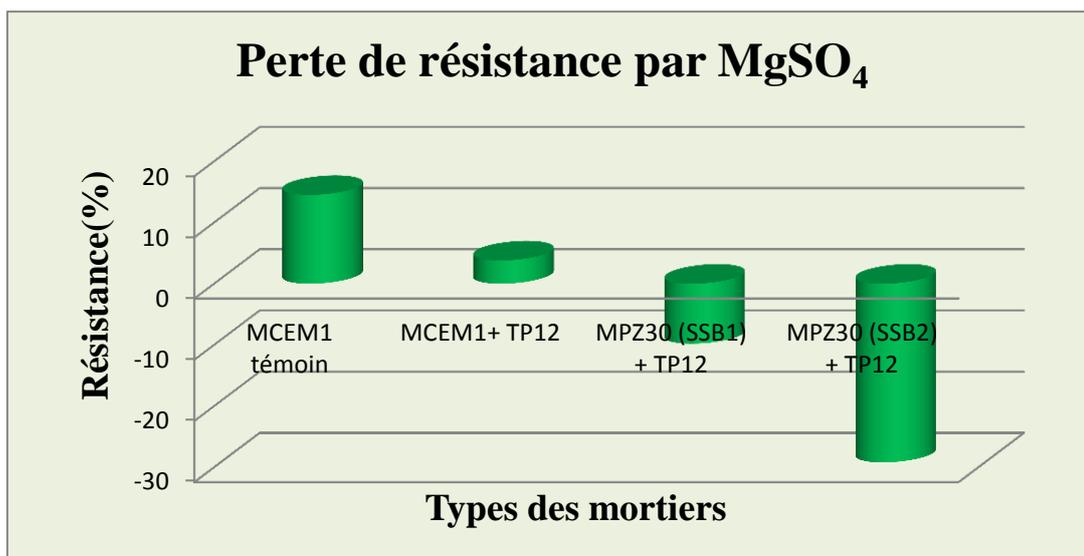
$$\Delta R\% = \frac{R_{28} - R_{1\text{année}}}{R_{28}} \%$$

Avec : $R_{1\text{année}}$: La résistance des éprouvettes après une année de dégradation

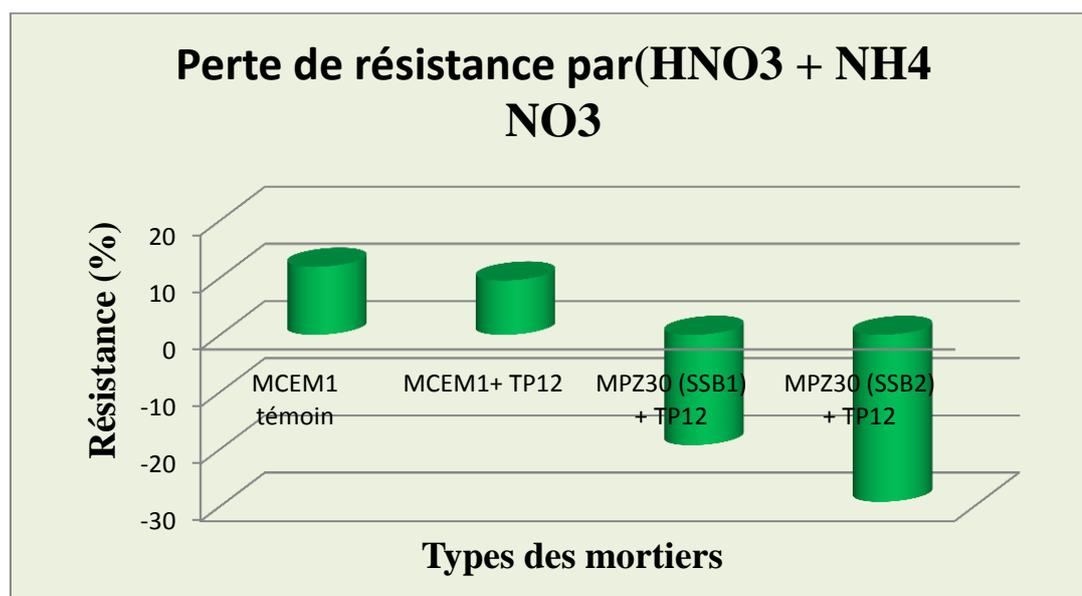
R_{28} : La résistance des éprouvettes après 28 jours de dégradation

Tableau IV.25 : La perte de résistance après dégradation par MgSO₄

La perte de Résistance Mortier	La perte de résistance par MgSO ₄ (%)
MCEM1 témoin	14.5
MCEM1+ TP ₁₂	3.8
MPZ ₃₀ (SSB ₁) + TP ₁₂	-9.8
MPZ ₃₀ (SSB ₂) + TP ₁₂	-29.2

Figure IV.31 : la perte de résistance par $MgSO_4$.Tableau IV.26 : La perte de résistance après dégradation par ($HNO_3 + NH_4 NO_3$)

Mortier	La perte de résistance par ($HNO_3 + NH_4 NO_3$) (%)
MCEM1 témoin	11.9
MCEM1+ TP ₁₂	9.5
MPZ ₃₀ (SSB ₁) + TP ₁₂	-19.3
MPZ ₃₀ (SSB ₂) + TP ₁₂	-29.2

Figure IV.32 : la perte de résistance par ($HNO_3 + NH_4 NO_3$)

Interprétations des résultats

A partir des résultats des d'attaques chimiques après immersion des éprouvettes dans différents milieux agressifs, nous constatons que :

- Toutes les variantes présentent une augmentation de la résistance mécanique vis-à-vis des attaques par des solutions (MgSO_4) et ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4 \text{NO}_3$) sauf les éprouvettes CEM1 témoins et plus l'adjuvant, cette augmentation de la résistance mécanique est directement proportionnelle au taux de substitution de pouzzolane ceci peut s'expliquer par l'activité de pouzzolane à long terme. La pouzzolane à une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau, peut se combiner avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui formé durant l'hydratation du ciment portland.

On peut donc décrire une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :

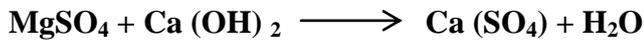
Pouzzolane + eau + chaux → silice de calcium hydraté.

- Le nitrate d'ammonium fait dissoudre le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ car leur caractère lessivant est très agressif, (il est utilisé pour l'étude de décalcification des matériaux cimentaires)
- Avec le temps, l'agressivité des nitrates d'ammonium devient de plus en plus importante car ils se cristallisent dans les pores et sa concentration sera plus grande.
- La présence de pouzzolane lors de l'hydratation fait absorber la portlandite émise par le clinker pour former des minéraux de propriétés liantes.
- Certaines particules de l'ajout pouzzolane en présence de l'eau se gonflent, en compactant le mortier, ce compactage fait augmenter au ciment ses capacités de résistance à l'agressivité aux sels, et rend difficile la pénétration des solutions aqueuses qui causent la destruction du mortier.
- Dans l'atmosphère humide, le ciment pouzzolanique présente une meilleure résistance que dans l'atmosphère sèche grâce aux réactions avec l'eau et la portlandite.
- On remarque une augmentation de la résistance des éprouvettes avec adjuvant cela est dû à l'action des superplastifiants qui n'agissent pas directement sur la dispersion des particules. Ils contrôlent cependant la vitesse d'hydratation et influencent la morphologie des hydrates formés et les effets stériques sont prédominants. Les espèces de plus grande masse molaire ont également une plus grande influence sur la rhéologie des pâtes de ciments.

A partir des résultats des DRX des différents éprouvettes, nous constatons que :

- L'analyse de la matière dégradée des éprouvettes attaquées par MgSO_4 pendant une durée d'une année a donné naissance à la calcite, pyrite, Gehlenite (figure IV.24).

Les réactions chimiques qui peuvent être mises en jeu sont les suivantes :

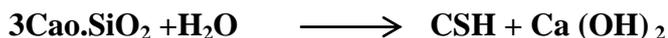


- L'analyse du produit de dégradation des éprouvettes dans la solution de $(\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{HNO}_3)$ a fait apparaître les composés calcite, pyrite, illite, analcine, monrrorillonite, Goethnite, Hydromolysite (figure IV.25).



- Il y a une grande dégradation de la quantité de quartz suite à une attaque par un acide forte (acide nitrique HNO_3) et le sel de nitrates d'ammonium (NH_4NO_3)
- Une bonne résistance des échantillons élaborés par un ciment pouzzolanique.
- En faisant la comparaison entre les Diffractogramme du mortier soin et les mortiers attaqués par une solution $(\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{HNO}_3)$, nous pouvons conclure que la quantité de quartz contenue dans l'éprouvette élaborée à l'aide de 30% de la pouzzolane est nettement supérieure à celle des mortiers normale. ceci prouve que la pouzzolane protège ces éprouvettes par la formation des composés non dégradable suite à des réactions pouzzolaniques à long terme (figure IV.26 ,27 ,28).

Les réactions pouzzolaniques :



- Diminution de quantité de quartz de manière significative des mortiers normaux dans la solution MgSO_4 .
- Disparition de gypse et de portlandite dans la solution MgSO_4 .
- Il y a une augmentation correspond un gain de quartz et de kaolinite suite à des réactions à long terme de pouzzolane.

Résumé

L'objectif de cette recherche consiste à étudier les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers élaborés par substitution d'une partie de ciment allant jusqu'à un pourcentage de 30% de pouzzolane en fonction de différentes surfaces spécifiques et de Superplastifiant. Ces mortiers sont soumis à des attaques chimiques dans différents milieux agressifs (mélange d'acide nitrique et nitrates d'ammonium ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$) et une solution de sel de sulfates de magnésium (MgSO_4)) avec une concentration de 10%, pendant une durée d'une année, afin de pouvoir évaluer la durabilité de ces mortiers dans différents milieux agressifs. Les résultats obtenus montrent que ces mortiers développent, à long terme, des résistances mécaniques et chimiques mieux que les mortiers à base de CEMI et ceci est dû à l'action de la pouzzolane qui fixe la portlandite pour former les CSH.

Mots clés : ciment substitué, pouzzolane, mortier, résistances mécaniques, durabilité.

Abstract

The objective of this research is to study the physical and mechanical properties and durability of mortars produced by substitution of one part cement up to a percentage of 30% pozzolan according to different specific surfaces and Superplasticizer. These mortars are subject to chemical attacks in aggressive environments different (mixture of nitric acid and ammonium nitrate ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{HNO}_3$) and a magnesium sulfate salt solution (MgSO_4)) with a concentration of 10%, for a period of one year, in order to assess the durability of these mortars in various aggressive environments. The results show that these mortars develop long-term, mechanical and chemical resistance better than the mortars of CEMI and this is due to the action of pozzolan which fix portlandite to form CSH.

Keywords— aggressive environments, durability, mechanical strengths, pozzolanic cement, self-compacting mortar.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. GC 1712 « Durabilité et réparation du béton », département génie civil, université de Sherbrooke – Canada, avril 2009.
- [2]. Bernard DARBOIS, Walter ROTHLAUF, «CIMNT» , Encyclopaedia universalis.
- [3]. R. Dupain . Lanchon, J.C. Sain-Arroman, Granulats, Sols, Ciment et Béton , deuxième Edition , Castella éd. ISBN 19952713514711.
- [4]. George Dreux . nouveau guide du Béton troisième édition . Edition Eyrolles. Paris. 1981
- [5]. Documentation de la Hamma bouziane le ciment portland
- [6]. Le centre d'information sur l'eau Paris France ; <http://www.cieau.com/toutpubL/teste14/contenu1423.htm> , 2009
- [7]. Erik B Nelson, Jean-François Baretand Michel Michaux (1990) «ciment Additives and Mechanisms Action»
- [8]. Le ciment est un matériau essentiel en construction. Les parpaings de ciment ou blocs de béton servent à monter les murs . catherine Roy , CC BY-NC-ND 2.0 , Flickr
- [9]. Georges Dreux . Jean Festa , nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris , Edition Eyrolles , 2009.
- [10]. Rock product, mars 1996 , cembureau, international ciment review , juillet 1997
- [11]. CHICHAOUI Ramdane ; Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2008)
- [12]. Société suisse des ingénieurs et architectes, Norme SIA 215 , «liant minéraux » , Zurich 1978
- [13]. L'emploi d'ajouts cimentaire dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage «ciment ASSOCIATION of CANADA» par Norman F. Macleod, ing . Mars 2005.
- [14]. Milier E.W, «Blended cements Applications and implications» ciment and concrete composites, vol. 15, No. 4/PP.237-245, 1993.
- [15]. M. Venuat – la pratique des ciments , mortiers et bétons – Tome 1 : «caractéristiques des liants et des bétons , mise en œuvre des coulis et mortiers» - édition 2 – collection Moniteur . - 277 p-1989.
- [16]. Byfors K, «Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and PH values in cement paste» , Cem .concr, Res, 1987, 17, 1, 115-130.
- [17]. MIDGLEY H.G. AND ILISTON J .M, «The penetration of chlorides into hardened-cement pastes , Cem, concr, Res», 1984. 14, 4, 546-558.

BIBLIOGRAPHIE

- [18].Meukam .P.«caractérisation des matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments»,Thèse de doctorat,Université de Gergy-pontoise,2004.
- [19].C.Avenir ,B.Rosier,D.Sommain ; ciment naturel; Grenoble,Glénat éd.ISBN 10 :2723 46 1580 ,176 P ;2007.
- [20].B.Bounabe Ayache ; Automatisation du stackeur et le moteur four ;Rapport de stage à ERCE et SCHB ; Université de paul cézanne Aix Marseille 3 ;[http://www .bhautomation.fr / Download /Automatisation-stackeur – four – imenterie –DG .Pdf](http://www.bhautomation.fr/Download/Automatisation-stackeur-four-imenterie-DG.Pdf),2006-2007 .
- [21].ASSOCIATION FRANCAISE de la connaissance et de l'application des Normes, Actualité technologique et scientifique,les ciments, disponible sur site web [http://www.techno-science .net/](http://www.techno-science.net/)(consulté le 12/04/2006) .
- [22].V.S.Ramachadran;concrete science ;concrete admixture Handbook;Second Edition ;Noyes publication;PP .12-13;1995.
- [23].D.Sedan ;Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces de fibre chanvre/ciment . « Influence sur les propriétés mécaniques du composite ; Thèse de doctoa,Université de limoges ;2007.
- [24].Phoummavong ;matériaux de construction ;cours en ligne ; Université Nationale du laos ;[http /www .la .refer.org /matériaux /default .html](http/www.la.refer.org/matériaux/default.html),2009.
- [25].Adam M . Neville : « propriétés des bétons » ,traduit par le CRIB ,Edition Eyrolles ,paris , 2000.
- [26].fiche de propriété de la société LAFARGE pour les produits cimentaire
- [27].BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur.
- [28].WILLIAM.D, CALLISTER.JR «Science et génie des matériaux»modolu Editeur, 2001.
- [29].Arezki Tagni –Hamou « Microstructure ET physico-chimie des ciments ET des bétons, chapitre 8.
- [30].Klaus J.; Aulis K.; Kai S.; Nordenswan E., The Effects of Cement Variations on Concrete Workability ,Nordic Concrete Research, publication n° 26-3.
- [31]. Yassine SENHADJI : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2006).
- [32].Richard Gagné : GCI 714 - Durabilité et réparations du béton

BIBLIOGRAPHIE

[33].Jean-Pierre OLIVIER, Angélique VICHOT, "La durabilité des bétons", presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-8(2e édition), avril 2008.

[34].LOBET A, "Influence des paramètres de composition des matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert " Thèse doctorat INSA Toulouse, 2003.

[35].FD P 18-011, "Fascicule de documentation "définition et classification des environnements chimiquement agressifs".

[36].BOUALLEG SAIDA, "Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires", mémoire de magistère, Université de Mohammed Boudiaf de M'sila, soutenu le 28/09/2004.

[37].OUYONG C , NANNI A, CHANG W, "Internal and external sulfate sources of sulfate ions in portland mortar : two types of chemical attack" CCR, vol 18 n° 5, 1988, p. 699-709.

[38].BERTRON A , ESCADEILLAS G ,DUCHESNE J. "Cément pastes alteration by liquid manure organic acids : chemical and mineragical characterization" CCR., vol.34, n°10, 2004,pp 1823-1835.

[39].Francois de LARRARD, "Construire en béton", presses de l'école nationale des ponts et chaussées ISBN 2-85978-366-0, 2002

[40].Norme NF p15-317, "Liant hydraulique. Ciment pour travaux à la mer", septembre 1995.

[41].Norme NF p15-319, " Liants hydraulique, ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate", septembre 1995.

[42].NF EN 206-1-, partie 1, "Spécification, performances, production et conformité du béton" février 2001.

[43].Site internet www.understanding-cement.com le 11/05/2013 à 15 h.

[44].CARDE.C, « Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques de la lixiviation des matériaux cimentaires », Doctorat - INSA de Toulouse, 1996

[45].LOVERA P., Le Bescop P., Gallé C., Adenot F., Bouniol P., Richet C., (1999) « Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des colis bétons », Rapport Technique CEA Saclay, DESD/SESD/LBSE W99-201.

[46].LUDWING U., « Zement - kalk - gips in the chemistry of cement and concrete", 3 ème édition, Edouard amold publishers, London, 1970

BIBLIOGRAPHIE

[47].VIET-HUNG NGUYEN,« Couplage Dégradation Chimique -Comportement en compression du Béton» Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,2005.

[48].TANG L, NILSSON L .O Chloride, "Diffusivity in high strength concrete at different ages", Nord Constr. Res. Vol. 11, n° 1, 1992 p.162-171.

Annexes

Annexes

I-Essais de caractérisation des matériaux utilisés :

I-1-Essais sur granulats :

I-1-1-Analyse granulométrique selon la norme NF P18 -560

➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au-dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0.063 mm



Figure 1: série des tamis

Annexes

I.1.2-Mesure la propreté des granulats selon la norme NF P18 -560

❖ Essai d'équivalent de sable :

➤ But de l'essai :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

➤ Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un Processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins

Hauteur h_2 : sable propre seulement

On détermine le degré de propreté du sable : Selon que

la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

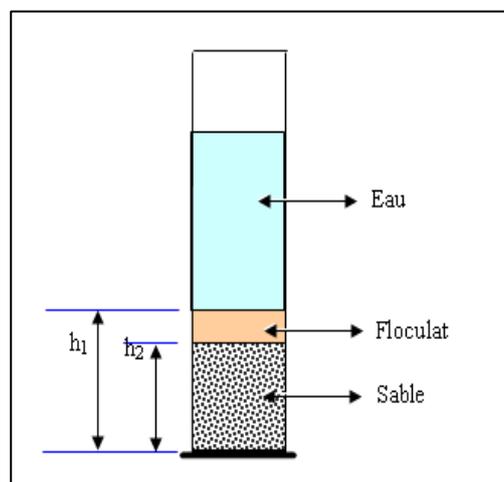


Figure 2 : Equivalent de sable

➤ Appareillage :

- Echantillonneur ;
- Balance ;
- Tamis d'ouverture de 5mm ;
- Deux éprouvettes ;
- piston ;
- Etuve de séchage ;
- Agitateur.

Annexes

➤ Mode d'opérateur

- 1- Procéder à échantillonnage de la quantité « m » de ce sable suivant les prescriptions du mode opératoire de la norme NF P18-553 .Peser la quantité de sable échantillonnée,
- 2- Etuver la quantité de sable échantillonnée jusqu'à séchage, noter le poids après séchage ;
- 3- Tamiser soigneusement au tamis de maille 5 mm, une quantité de 500 g à 700 g de ce sable ;
- 4- Procéder au prélèvement sur la quantité de sable tamisée deux échantillons pour essai de 120 g, Mettre chaque échantillon dans un récipient numéroté ;
- 5- la solution lavant est préparée en versant un flacon 125 ml de solution concentrée, dans la bonbonne rempli partiellement d'eau distille, Rincer bien le flacon avec de l'eau distillée, compléter les cinq litres d'eau distillée dans la bonbonne, puis agiter énergiquement ;
- 6- Remplir les deux (02) éprouvettes d'essai de solution lavant jusqu'au premier trait de repère, le numéro de chaque éprouvette doit correspondre à celui du récipient contenant la quantité de sable pour essai ;
- 7- Verser la quantité de sable du premier récipient dans l'éprouvette correspondante à l'aide de l'entonnoir ,mettre le chronomètre en marche ,donner quelque coups à la base de l'éprouvette et laisser reposer dix minutes ,refaire la même opération avec l'autre échantillon
- 8- Au bout des dix (10) minutes, boucher l'éprouvette avec le bouchon en caoutchouc, placer l'éprouvette dans l'agitateur et faire subir à l'éprouvette 90 cycles ,pendant 30 secondes ;
- 9- Procéder au lavage à l'aide du tube laveur en rinçant le bouchon au-dessus de l'éprouvette ensuite les parois de l'éprouvette afin de dégager les fins argileuses emprisonnées dans le sable jusqu'à ce que la solution lavant atteigne le trait supérieur de l'éprouvette et enfin laisser reposer vingt (20) minutes ,refaire les mêmes opérations ;
- 10- A la fin des 20 mn, mesurer la hauteur (h1) du floculat par rapport au fond de l'éprouvette à l'aide de la règle. Mesurer également la hauteur (h2) de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette ;
- 11- Faire descendre doucement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sable bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston à l'aide de la vise et mesurer

Annexes

à l'aide de la règle la hauteur « h2 » entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon ;

12- Refaire les mêmes opérations sur la seconde éprouvette.

Les résultats de l'essai sont donnés comme suit :

- Équivalent de sable à vue : $E_{sv} = (h_2/h_1) * 100\%$.
- Équivalent de sable avec le piston : $E_{sp} = (h'_2/h'_1) * 100\%$.

h'₂ et h₂: hauteur de sable propre.

h₁: hauteur de sable propre + hauteur des imputées.

Classification de sable:

D'après les résultats obtenus on classe le sable comme suivant:

E_{sv} Nature et qualité de sable.

- 65 < E_s < 60 sable argileux n'est pas utilisable au béton
- 75 > E_{sv} > 65 et 70 > E_s > 60 sable argileux utilisable au béton
- 80 > E_{sv} > 75 et 80 > E_s > 70 sable propre utilisable au béton

E_{sv} < 85 et E_s < 80 sable trop propre utilisable au béton



Figure 3 : Essai d'équivalent de sable.

Annexes

I.1.3-Détermination de la masse volumique absolue et apparente d'un sable selon la norme NF P18 -560

A-Détermination de la masse volumique absolue :

➤ But de l'essai

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition des bétons .Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différents classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

➤ Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple et très rapide et elle utilise du matériel très courant de laboratoire .Toutefois sa précision est faible.

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau ;
2. Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et introduire l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;
3. Le liquide monte dans l'éprouvette .Lire le niveau volume V_2 .

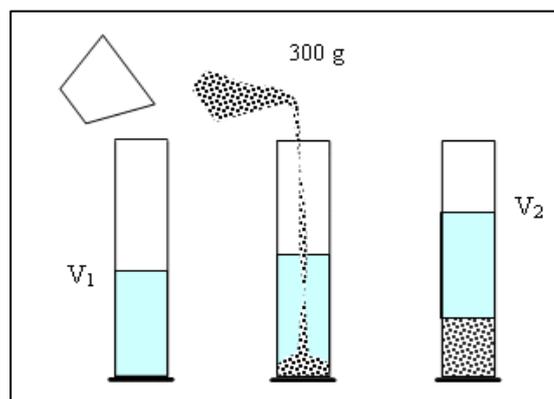


Figure 4 : Méthode de l'éprouvette graduée

La masse volumique est alors : $Ps = \frac{M}{V_2 - V_1}$

B-Détermination de la masse volumique apparente :

➤ Matériel nécessaire :

- Un entonnoir monté sur trépied
- Un récipient
- Une règle à araser
- une balance

Annexes

➤ Mode opératoire :

1. Peser le récipient vide M_0 ;
2. Verser granulat au travers de l'entonnoir jusqu'à refus
3. Araser et peser M_1 ;
4. La masse de granulat est $M_1 - M_0$

La Connaissance de la masse de granulat et le volume du récipient, on peut calculer la masse volumique apparente du granulat.

La volumique apparente est calculée par la formule suivante : $P_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V}$



Figure 5: Essai de la masse volumique apparente.

I.1.4-Mesurer le coefficient d'absorption, la porosité et de la teneur en eau des granulats selon la Norme NF P18-554 et 18-555.

➤ Appareillage

- Echantillonneurs ;
- Balance hydrostatique ;
- Etuve de séchage ;
- Tamis de 4mm ;
- Bain marie

➤ Mode opératoire

1. Régler l'échantillonneur selon grosseur D des granulats ;
2. Echantillonner et peser une masse ; M
3. Sécher la masse de matériau, Puis la peser ; M_s
4. Laver au tamis de 4 mm le matériau, le sécher ensuite à l'étuve à 105 C° pendant 24 h ;
5. Laisser refroidir le matériau et le peser ; M_s
6. Immerger le matériau dans le bain Marie pendant 24h, le retirer ensuite, éponger avec un chiffon et le peser ;
7. Placer le matériau dans le panier perforé, l'immerger dans l'eau du récipient et peser sa masse dans l'eau ; M_a
8. Etuver le matériau à 105 C° pendant 24 heures ;
9. Mettre le matériau dans le bain marie à la température de 20C° , pendant 24 h ;

Annexes

10. Retirer le matériau, éponger soigneusement et peser ; M_w
11. Placer le matériau dans le panier perforé, l'immerger dans l'eau du récipient et le peser, M_w'
12. Calculer le coefficient d'absorption A_b selon la formule suivante :

$$A_b = ((M_a - M_s) / M_s) * 100 \quad \text{en \%}$$

13. Calculer la porosité N selon la formule suivante :

$$N = ((M_w - M_s) / (M_w - M_w')) * 100 \quad \text{en \%}$$

14. Calculer la teneur en eau W selon la formule suivante :

$$W = ((M - M_s') / M_s) * 100 \quad \text{en \%}$$

I.1.6-Essais de résistance au choc et à l'usure des granulats :

I.1.6.1--Micro Deval (usure par frottement) selon Norme NF EN 1097-1 :

➤ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottement mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

➤ **Préparation de l'échantillon :**

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des Trois classes granulaires suivantes.

Pour effectuer un essai sec ou un essai en présence de l'eau :

- ✓ Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- ✓ Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- ✓ La masse de l'échantillon pour essai sera de 500g ± 2g.

➤ **Mode opératoire :**

- 1- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive puis les 500 g de matériau préparé.

Pour effectuer un essai en présence d'eau on ajoutera 2.5litre.

Annexes

- 2- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant 2 heures ou 12000 tr.
- 3- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement l'intérieur de cylindre.
- 4- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- 5- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- 6- Sécher le refus à 1.6mm à 105°C jusqu'à masse constante.
- 7- Peser ce refus au gramme près ; soit m_0 le résultat de la pesée.

$$M_{DE} = \frac{500 - m_0}{500} * 100$$



Figure 6 : Essai micro Deval.

I-2-Essais sur ciment :

I-2-1-Détermination la consistance normalisée et du temps de prise :

a) Détermination de la consistance normalisée (EN 196-3) :

➤ But de l'essai :

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours de temps .Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différentes paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée ».

Annexes

➤ **Appareillage :**

- Malaxeur ;
- balance ;
- moule ;
- sonde ;
- aiguille ;
- bain ;
- appareille de Vicat.

➤ **Mode opératoire :**

1. Peser au moyen d'une balance 500 g de ciment ;
2. peser une quantité d'eau de 125 g ;
3. mettre en marche le malaxeur à petite vitesse, et introduire l'eau et le ciment en dix (10) secondes au maximum, et en évitant toute perte d'eau ou de ciment. noter le temps de démarrage.
4. Arrêter le malaxeur après 90 s, pendant 30s, et enlever la pâte de ciment adhérant aux parois et au fond et la placer au milieu du bol.
5. Remettre le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 90 s ;
6. Verser immédiatement dans le moule placé sur la plaque de base, éliminer les vides dans la pâte en tapotant doucement le moule et enlever l'excès de pate par un léger mouvement de scie de manière avoir une surface supérieur lisse ;
7. Abaisser doucement la sonde jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte, après une pause de 1 à 2 secondes, lâcher rapidement les parties mobiles et laisser la sonde pénétrer verticalement au centre de la pâte ;
8. Enregistrer la valeur lue sur l'échelle qui indique la distance entre la face inférieure de la sonde et la plaque de base ;
9. Refaire l'essai avec des pates contenant des quantités d'eau différents, jusqu'à ce que l'une d'elle produise une distance de (6+/-) mm entre la sonde et la plaque de base, enregistrer la teneur en eau de cette pate comme consistance de la pâte de ciment.

Annexes



Figure 7 : L'essai de consistance

b) Détermination du temps de début et de fin de prise :

➤ **But de l'essai :**

Le début de prise dépend de plusieurs paramètres ; il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture du ciment étudié ; il dépend aussi de la température ambiante et, des dosages en adjuvant. L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit significatif de cette rapidité de prise.

➤ **Principe de l'essai :**

Il consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment en mesurant la profondeur d'enfoncement de l'aiguille de l'appareil dans la pâte.

➤ **Appareillage :**

- Un appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre ;
- Un moule tronconique ;
- Un chronomètre ;
- Une balance

Annexes

➤ **Mode opératoire :**

1. Retirer la sonde et la remplacer par l'aiguille ;
2. Régler l'appareil de Vicat équipé de l'aiguille fixée en abaissant l'aiguille jusqu'au contact avec la plaque de base ;
3. Remplir un moule tronconique de pâte de consistance normalisée, malaxée suivant la partie 1 ;(noter l'heure du malaxage).
4. Placer le moule rempli et la plaque de base dans le bain d'eau de température de (20 ± 1) C° ;
5. Après un temps approprié, placer le moule et la plaque de base sous l'aiguillé de l'appareil de Vicat, et abaisser jusqu'à ce qu'elle soit en contact avec la pâte.
6. Après une pause de 1 à 2 S, lâcher rapidement les parties mobiles et laisser l'aiguillé pénétrer verticalement dans la pâte ;
7. Enregistrer la valeur lue sur l'échelle qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguillé et la plaque de base ;
8. Refaire la même opération à intervalle de temps, jusqu'à avoir la valeur lue de (6 ± 3) mm ;
9. Noter le temps de début de prise du ciment, le temps d'écoulé zéro (heure de malaxage), et le temps auquel la distance lue est de (6 ± 3) mm ;
10. Retourner le moule rempli, utilisé ci-dessus sur sa plaque de base, et l'immerger dans le bain d'eau à température de (20 ± 1) C° ;
11. Après un temps approprié, refaire l'essai de pénétration comme en partie 1, et enregistrer la valeur lue ;
12. Recommencer l'opération de pénétration sur la même éprouvettes jusqu'à ce que l'aiguillé ne pénètre que de 0,5 mm .Noter ce temps qui correspond au temps de fin de prise ;
13. Confirmer ce temps par deux pénétrations à de points différentes de l'éprouvette.

Annexes



Figure 8 : L'essai de début et fin de prise

I-2-2-Essai d'étalement au mini-cône d'abrams

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, car le plus facile à mettre en œuvre, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide d'un cône à mortier petit (mini-cône d'Abrams)

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

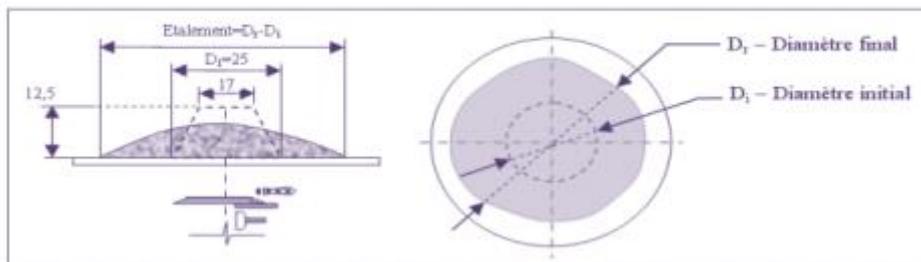


Figure 9 : Essai d'étalement au cône à mortier

I-2-3- La surface spécifique de Blaine SSB NF P 15-471

La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et la température connue, à traverser une couche tassée de liant.



Figure 10 : Perméabilimètre de Blaine.

➤ Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement broyée. Cette finesse est une caractéristique importante, lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique, c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre, l'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

➤ Principe de l'essai

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre. La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est longue. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à racine t.

➤ Equipement nécessaire

- Un appareil appelé Perméabilimètre de Blaine.
- Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester
- Un manomètre constitué d'un tube en verre de forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère ;
- La cellule est équipée d'une grille dans sa partie inférieure ;
- Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini ;
- Une balance précise à 0.2 s après ;
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule ;

Annexes

- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée ;
- Un thermomètre précis à $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ près pour mesurer température de l'air

➤ Conduite de l'essai selon NF EN 196- 6

- Afin de déterminer la SSB la masse spécifique doit être déterminée eu préalable.
- Calculer la masse à peser (m) du lit du ciment :
-

$$m = \rho (1-e) v$$

D'où :

- ρ : étant la masse spécifique préalablement déterminée.
 - V : étant le volume cellulaire.
 - e : étant la porosité du ciment ($e= 0,5$).
- Etuver l'échantillon à une température comprise entre 80 et 100°c , puis le refroidir dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante.
 - Agiter l'échantillon dans un pilulier fermé pour l'homogénéisation de ce dernier.
 - Préparer la cellule en disposant le disque métallique perforé sur l'épaule de cette dernière.
 - Placer un deuxième disque de papier filtre sur le ciment.
 - Insérer le piston plongeur jusqu'au contact avec le papier filtre, le presser jusqu'à ce que la face intérieure de son épaulement soit en contact avec la cellule.
 - Retirer le piston lentement.
 - Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet de manomètre après l'avoir préalablement graissé.
 - En ouvrant le robinet d'arrêt et de la poire, aspirer le liquide manométrique jusqu'au repère supérieure, fermer le robinet d'arrêt.
 - Chronométrer le temps nécessaire au liquide pour passer du deuxième au troisième repère.
 - Enregistrer deux temps pour le même lit.
 - Répéter un deuxième essai pour le même échantillon.

La SSB est calculée par la formule suivante :

Annexes

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3 T}}{P(1-e)\sqrt{\eta}}$$

D'où :

- K : est la constante de l'appareil $K=19,830$
- e : est la porosité de la couche tassée $e=0,5$ (en moyenne).
- P : est la masse volumique absolue du ciment.
- t : est le temps en secondes.
- μ : est la viscosité de l'air. $\mu = 0,0001798$.
- La surface Blaine des ciments varie de 3100 à 6000 cm^2/g .

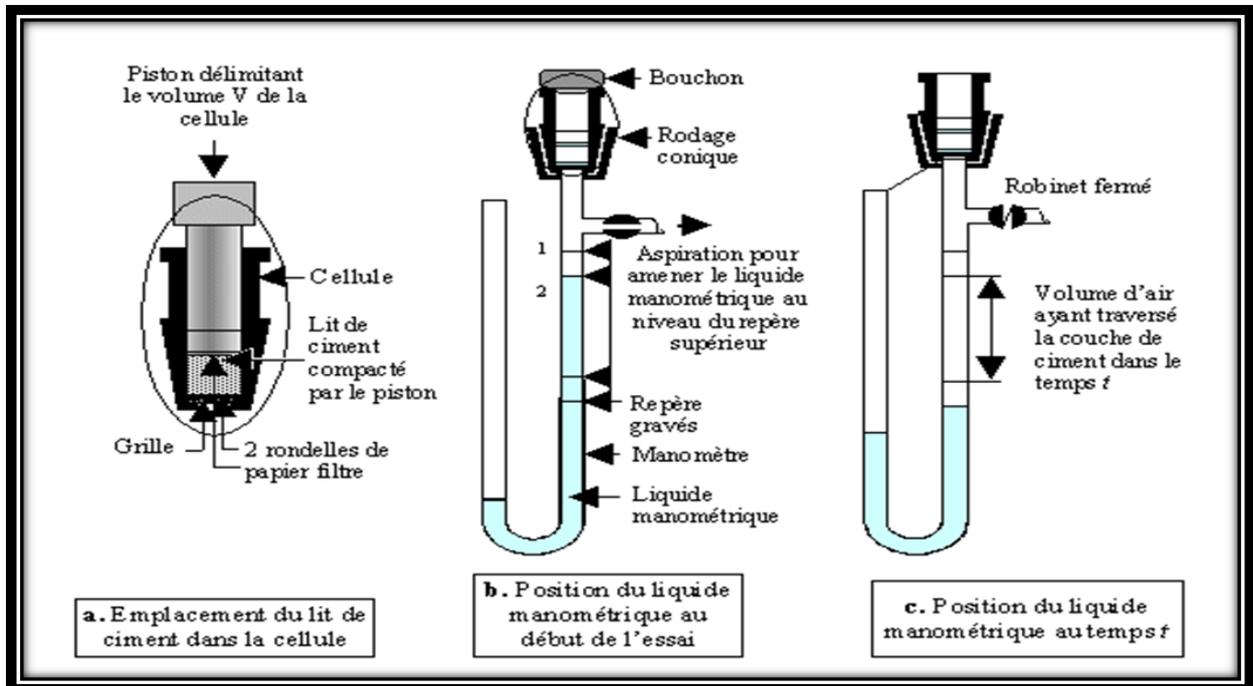


Figure 02 : La surface spécifique de Blain.

I.2.4-Détermination des résistances mécaniques des ciments (traction, compression) selon la Norme NF EN 196-1 :

➤ But de l'essai :

Il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment.

Annexes

➤ Principe de l'essai :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normale. Dans un tel mortier la seule variable est la nature du liant hydraulique, la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

➤ Appareillage :

- Un malaxeur normalisé ;
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $16*4*4 \text{ cm}^3$;
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs ;
- Une machine d'essais à la compression.

➤ Mode opératoire :

1) Préparer les constituants du mortier :

- ❖ Ciment
- ❖ Sable normalisé
- ❖ Eau

2) Introduire l'eau dans la cuve du malaxeur ;

3) Verser le ciment dans la cuve de malaxeur ;

4) Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30 S ;

5) Introduire le sable régulièrement pendant 30 S ;

6) Mettre le malaxeur en marche à vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 S ;

7) Arrêter le malaxeur pendant 90 S ;

8) Pendant les premiers 15 S, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant au milieu de celui-ci ;

9) Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60 S ;

10) Moulage des éprouvettes dans des éprouvettes prismatiques de dimension $16*4*4\text{cm}^3$ en deux couches :

-Couche 01 avec serrage par 60 chocs sur la table à chocs ;

-Couche 01 avec serrage par 60 chocs sur la table à chocs ;

11) Arasement des éprouvettes à l'aide d'une règle métallique plate ;

12) Procéder au marquage des éprouvettes ;

Annexes

- 13) Poser une plaque de verre (ou en acier ou tout autre matériau imperméable) de 210 * 185 * 6 mm sur le moule.
- 14) Démoulage des éprouvettes :
 - 20 min avant l'essai à 24 heures,
 - 21 Entre 20 et 24 heures
- 15) Mettre les éprouvettes dans l'eau à 20 +1 C° ou à 20 -1 C°
- 16) Retirer les éprouvettes dans l'eau au maximum
15 min avant l'essai ;
- 17) Procéder à l'essai de compression en appliquant la charge à raison de 2400 N/S plus ou moins de 200 N/S.



Figure 12 : Moule 4*4*16



Figure 13 : Table a chocs



Figure 14 :L'appareil de flexion.

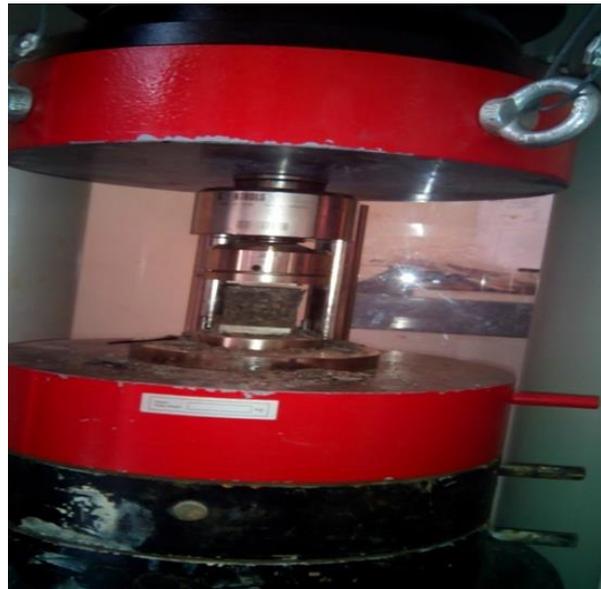


Figure 15: L'appareil de compression.

Annexes

Annexes
