

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

N°d'ordre:.....

Série:.....



MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Option : **Matériaux**

Présenté par

Salah REFRAFI

- Thème -

Influence des ajouts sur les caractéristiques physico- mécaniques des mortiers et des bétons

Soutenue le :

Devant le jury:

- | | | | |
|----------------|--------------------|------------|------------------------------|
| □ Président : | B.MEZGHICHE | M.C | Université de Biskra. |
| □ Rapporteur : | M. MELLAS | M.C | Université de Biskra. |
| □ Examineurs : | A.GUETTALA | M.C | Université de Biskra. |
| | A.ZAATAR | M.C | Université de Biskra. |
| | A.BOUAZI | M.C | Université de Biskra. |

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur M. MELLAS pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail qu'il a guidé par de judicieux conseils.

J'exprime ma profonde gratitude au chef de département Monsieur MELLAS MEKKI pour ses encouragements et son assistance qu'il n'a cessé de me prodiguer.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur B. MEZGHICHE, Président de jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en président le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de jury et de bien vouloir juger ce travail.

□ A. GUETTALA.

□ A. ZATAR.

Je remercie très chaleureusement mes parents, mes sœurs, mes frères, mes collègues, et tous ceux qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

RÉSUMÉ

L'utilisation des ajouts tel que la pouzzolane et le filler, comme substitutions au ciment, est une pratique inconnue par nos constructeurs. C'est pourquoi, il nous a paru essentiel d'étudier et d'évaluer l'influence de ces ajouts sur les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des mortiers et des bétons.

Les résultats obtenus dans notre étude confirment que l'utilisation des ciments ternaires (avec pouzzolane et filler calcaire) contribue d'une façon positive à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des mortiers et des bétons. L'utilisation de ce type de ciment nous permet d'avoir des ouvrages durables et d'économiser l'énergie dans la production du ciment.

Mots clés

Ajouts, Ciment, Mortier, Béton, Caractéristiques physico-mécaniques et Durabilité.

ABSTRACT

The use of additions such as the pouzzolane and the filler, as replacements in the cement, is an unknown practice by our builders. It seemed essential to study and to estimate the influence of these additions on physical-mechanical characteristics and durability of mortars and concretes.

The Results obtained in our study confirm that the use of cements ternery (with pouzzolane and filler limestone) contributes in a positive way to the improvement of physical-mechanical characteristics and the durability of mortars and concretes. The use of this type of cement allows us to have durable builders and to save energy in the production of the cement.

Key words

Additions, Cement, Mortar, Concrete, Physical-mechanical characteristics and Durability.

CHAPITRE I : REVUE DE LA DOCUMENTATION

I.1. INTRODUCTION

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» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ce matériau 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 [19, 22, 34].

Les secrets de fabrication de ce matériau et son utilisation se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre. Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile.

En 1817, l'ingénieur français Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique [61].

C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [69].

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 MPA, et même 140 MPA dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPA [24].

I.2. CONSTITUANTS DES MATERIAUX CIMENTAIRES

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

I.2.1. Ciment

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse (CaSO_4) finement broyé et d'ajouts éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse.

Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique ou surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse.

Elle s'exprime en cm^2/g la finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80 % de calcaire (CaCO_3) et 20% d'argile. L'argile est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions tels que l'oxyde de fer (Fe_2O_3), le magnésium (MgO), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O). Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S dénommé alite, de silicate bicalcique C_2S ou bélite, d'aluminate C_3A ou célite,

d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ou Felite, et d'autres phases mineures. Le C_3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70 % de sa masse.

Le C_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30 %, 5 à 10 % et 5 à 15 % du clinker classique (pour plus de détails voir [75]).

I.2.2. Squelette granulaire

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [5]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

La résistance du béton est fonction du rapport eau/liant, la maniabilité du béton frais est quant à elle surtout affectée par la granulométrie des granulats. La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et diminuent le ressuage du béton frais [6]. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive (développement d'un lien avec le ciment sans influence significative sur le procédé de durcissement ni la solidité).

I.2.3. Eau

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales: Elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau est constituée de molécules polaires de H_2O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques.

L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces intergranulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines).

L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment et fines) [24].

L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Rappelons qu'un ciment portland demande environ 25 % de son poids en eau pour s'hydrater complètement (sous réserve des problèmes de floc et d'expansion).

I.2.4. Les ajouts

I.2.4.1. Définition

Les ajouts pour béton sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelque fois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou varié et plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc..., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques.

On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz[27].

I.2.4.2. Classification des ajouts

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des ajouts qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs [66].

Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latentes ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers.

Les ajouts se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (I.1).

| Type | Réactivité | Matériaux |
|--------------------|---------------------|---|
| hydraulique | fortement réactif | ciments spéciaux, chaux hydraulique |
| hydraulique latent | fortement réactif | laitier granulé (laitiers de haut fourneaux vitreux granulé), cendres riches en calcium (cendres volantes calciques) |
| pouzzolanique | fortement réactif | fumée de silice |
| pouzzolanique | moyennement réactif | cendres volantes pauvres en calcium (cendres volantes siliceuses), pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, tufs volcaniques, trass, phonolithe, terres à diatomées) |
| pouzzolanique | faiblement réactif | scories cristallines |
| inerte | pas réactif | filler (farine calcaire et poudre de quartz), fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétiques |

Tableau I.1 : Classification des ajouts selon leur réactivité, d'après [31].

I.2.4.3. Effet pouzzolanique des ajouts :

En principe les matériaux hydrauliques, hydrauliques latentes et pouzzolaniques contiennent les mêmes composants chimiques. Les proportions sont toute fois différentes. Les liants hydrauliques sont des matières qui durcissent dans l'eau et qui sont ensuite insolubles dans l'eau (ciment Portland, chaux hydraulique).

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de fait pas avec l'eau. Ce n'est que lorsque le ciment Portland a formé suffisamment d'hydroxyde de calcium que le laitier et les cendres volantes riches en chaux peuvent être rendues hydrophobes dans le milieu alcalin. On obtient alors les mêmes produits hydratés que pour le ciment Portland, seulement les proportions sont différentes. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif.

Les substances pouzzolaniques contiennent, encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient par conséquent pas uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton.

La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique.

Les substances inertes ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins.

L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton. Les pigments sont utilisés pour l'aspect esthétique [33].

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité et leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influent sur la durabilité également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [7].

Notons que la finesse favorise l'effet physico-chimique des ajouts. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [72].

I.2.4.4. Comportement du ciment avec ajout

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout [72].

1/- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.

2/- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme et améliore la résistance du béton en milieu agressif.

3/- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons.

I.2.4.5. Enjeux environnementaux

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment pour ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets dans l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1500 °C [72].

Les principaux rejets en terme de volume sont le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂) et les poussières [69].

Dans le secteur cimentier, les émissions de (CO₂) sont les plus importantes. En effet, pendant la cuisson des matières premières calcaires, le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone (CO₂) contenu dans le calcaire. Les sources d'émissions de (CO₂) comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire [71].

Le développement durable du béton permet entre autre de réduire l'émission des gaz a effet de serre, la production d'une tonne de ciment génère environ la même quantité de (CO₂) dans l'atmosphère. Le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de (CO₂) émise [71].

I.2.4.6. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux

A/- Bénéfices fonctionnels

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.
- 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.

B/- 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.

C/- Bénéfices écologiques et environnementaux

- Diminution de l'émission du (CO₂) par l'industrie cimentière.
- Elimination des sous-produits de la nature.

I.2.4.7. Pouzzolane

I.2.4.7.1. Définition

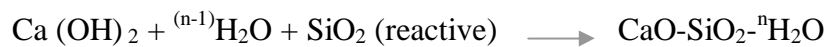
Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés économiques. Elles sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes [11, 44].

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers: Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques,

- en renforcement l'imperméabilité et de la durabilité,
- à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. [10, 11]. (Figure I.1).

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolanique finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau), [37].



Figure I.1 : Pouzzolane naturelle granulée

I.2.4.7.2. Classification des pouzzolanes

Les pouzzolanes sont classées suivant :

- Leur activité.
- Leur nature.

A/- Suivant leurs activités : On distingue trois groupes de pouzzolanes, [14]

- Pouzzolane hautement activée : Fumée de silice.
- Pouzzolane moyennement activée :
 - Cendres volantes pauvres en calcium (cendre volante siliceuse).
 - Pouzzolanes naturelles telles que : verres volcaniques, tufs volcaniques, trass, terres à diatomées.
- Pouzzolanes faiblement actives : scories cristallines.

B/- Suivant leur nature de provenance : On distingue trois groupes de pouzzolanes, [45].

- Pouzzolanes naturelles d'origine volcanique : Essentiellement composées de silice, d'alumine et de ferrite, ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. (Ex : verres volcaniques, pierres ponce, tufs volcaniques, zéolite, trass, rhyolite...).
- Pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire : Essentiellement composées de silice jusqu'à 98% (Ex : terres à diatomées, tripoli, gaize).
- Pouzzolanes artificielles : Roches traitées thermiquement (argile, schiste, latérite...). Briques et tuiles pulvérisées (appelées tuileaux), déchets industriels (cendres volantes, fumées de silices de centrales thermiques).

1.2.4.7.3. L'activité pouzzolanique

Les pouzzolanes naturelles sont des roches acides ayant des teneurs élevées en silice puis en alumine et en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. La somme (silice + alumine), varie souvent de 70 à 80 %. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevée. Bien que le caractère pouzzolanique soit lié à la quantité de la chaux susceptible d'entrer en réaction, c'est à dire à la réactivité pouzzolanique, la corrélation entre cette caractéristique et la résistance du ciment pouzzolanique n'est pas très bonne.

Le rapport entre le clinker et l'ajout pouzzolanique est établi en fonction de l'activité de ce dernier et de la composition minéralogique du clinker (teneur en C_3S). Plus, l'ajout est actif, plus, il peut fixer l'oxyde $Ca(OH)_2$ de calcium hydraté [43]. La diminution de la chaux libre dans les ciments à la pouzzolane est principalement attribuée à la consommation de cette

chaux par l'ajout pouzzolanique. Il est aussi clair que la chaux libre diminue avec la quantité de pouzzolane ajoutée (voir figure (I.2)) [25].

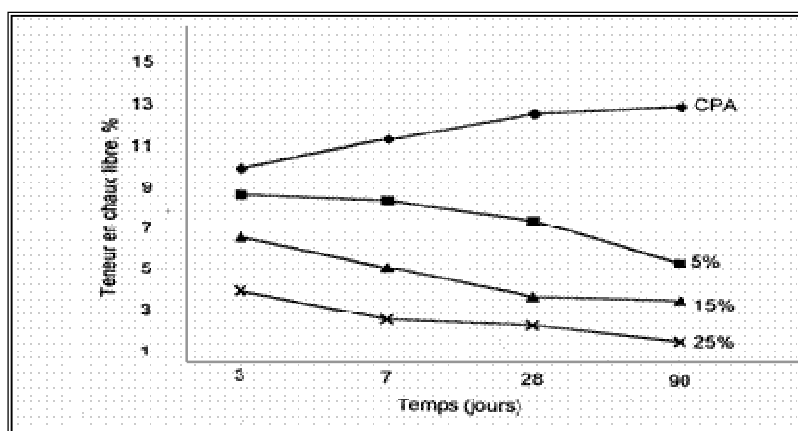


Figure I.2: Teneur en chaux libre dans différentes pâtes de ciment pouzzolaniques, d'après [23].

I.2.4.7.4. Utilisations

A/- Liants à bas coût énergétique

On peut ajouter des pouzzolanes à du clinker et du gypse (et à d'autres constituants secondaires) afin de réaliser des liants à ajouts comme en France les CPJ. Ou encore comme en Italie des liants à 33 % de pouzzolanes naturelles.

B/- Ajouts aux mortiers et aux bétons

Des pouzzolanes broyées peuvent être ajoutées à raison de 50 à 100 Kg/m³ afin d'améliorer les propriétés des mortiers et des bétons à l'état frais ou durci. Il s'agit par exemple de béton transporté par canalisation, de béton coulé en grande masse, de béton destiné à des ouvrages maritimes [50].

I.2.4.7.5. Actions de la pouzzolane sur les qualités des ciments

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. Réduit la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration, et de la tendance à la ségrégation du béton frais sont les avantages incontestables d'un ajout lors de bétonnages de masse [2].

A l'état durci, les pouzzolanes (réaction lente) améliorent la résistance aux eaux agressives et permettent une fixation progressive des alcalis, des ciments (propriété intéressante dans le cas d'une attaque possible des granulats).

Amélioration de 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 :
 - Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
 - Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

I.2.4.8. LES FILLERS

I.2.4.8.1. Définition

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante: Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5% de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement selon Bombled [10]. Il y a trois fois plus de charges négatives que positives.

Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production. En France, vers 1996, le prix des fillers calcaires était environ cinq fois plus faible que celui du ciment. Les réductions de coût de production et une accessibilité importante sont à l'origine de l'utilisation relativement courante des fillers calcaires en France. Le composant principal est le carbonate de calcium, présent sous forme de calcite.

I.2.4.8.2. Mode d'action des fillers

Les fillers se différencient les uns des autres par : leurs origines, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent, leur finesse, la forme des grains, leur état de surface, leur dureté, leur porosité.

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

I.2.4.8.3. Actions des fillers sur les qualités des ciments

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment:

- Accroissement de maniabilité.
- Diminution de perméabilité.
- Diminution de capillarité.

- Réduction de la fissuralité.
- Il limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- La stabilité du béton est améliorée mais un réducteur d'eau est nécessaire pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

1.2.4.8.3.1. Action sur la porosité

Les fillers calcaires auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du CaCO_3 (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de CaCO_3 et de C_3S anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de C_3S incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de CaCO_3 [7].

À un certain degré d'hydratation, une pâte de C_3S ne contenant pas de CaCO_3 a une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de CaCO_3 peut posséder une porosité plus faible, due des degrés différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans CaCO_3 [8].

1.2.4.8.3.2. Action sur les propriétés mécaniques

Beaucoup d'articles ont été écrits pour relier présence de fillers calcaires avec résistance. Pour beaucoup la résistance serait améliorée, ou au moins équivalente dans le cas d'addition.

Soroka et Setter [71] expliquent notamment une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice obtenue.

Le broyage concomitant avec celui des fillers ne favorise pas une bonne répartition de particules en taille. Notamment la plus grande part de clinker dans les larges particules ne favoriserait pas le développement de la résistance au jeune âge [51].

1.2.4.8.3.3. Réactivité directe des fillers calcaires

Longuet, Beuglen et Zelwer [42] ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C_3A comme évaluation de la réactivité hydraulique d'un filler calcaire donné. En effet, il a été démontré que le CaCO_3 peut réagir avec le clinker. Des

analyses de diffraction aux rayons (X) a permis de détecter la présence de carboaluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange [36]. La formation de carboaluminates de calcium hydratés est vue comme analogue à celle de l'ettringite [38]. Il y a composition entre SO_4 et CO_3 pour réagir avec les aluminates de calcium.

La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec hydraté de formule $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. La forme $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec CaCO_3 [38].

I.2.4.8.3.4. Réactivité indirecte des fillers calcaires

Le gypse réagit plus vite avec l'aluminate tricalcique pour former de l'ettringite lorsque du carbonate de calcium est présent dans le mélange, selon Klemm et Adams [38]. Cela proviendrait de la réaction du CaCO_3 sur la surface des grains de C_3A formant une membrane plus perméable de plaquâtes hexagonales. La conversion d'ettringite en monosulfoaluminate hydraté est aussi accélérée [63].

Des observations au microscope électronique à balayage ont montré que les produits d'hydratation se font sur les particules de C_3S et aussi de CaCO_3 , confortant ainsi l'idée du carbonate de calcium comme éventuel site de nucléation [63].

L'addition de CaCO_3 augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique [63].

Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue.

Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le dichlorure de calcium .mais sans toutefois diminuer la période d'induction [63].

L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO_3 . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation [63].

Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO_3 seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de CaCO_3 incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25% [63].

I.2.4.8.4. Utilisation

Les fillers s'utilisent en ajout aux mortiers ou aux bétons, afin de corriger la granulométrie et d'augmenter la capacité (principalement, cas du béton prêt à l'emploi, du béton manufacturé). Les fillers constituent, par ailleurs, des ajouts ou des charges parfois utilisés dans certains adjuvants (plastifiants, hydrofuges) dans les mortiers prêts à l'emploi, des enduits, des ciments, colles des peintures, des bétons bitumineux.

I.3. HYDRATATION

Après le malaxage de l'eau et du ciment la pâte de ciment fluide durcit parce que l'eau est absorbée dans les minéraux de clinker amorphes en formant la pâte de ciment. Les réactions chimiques qui se déroulent à cette occasion sont appelées hydratation.

I.3.1. Aspects cinétiques et prise

Les grains de ciment réagissent à leur surface avec l'eau de gâchage, la réaction chimique commence. De très petits produits d'hydratation en forme d'aiguille précipitent et enveloppent les différents grains de ciment (couche fine). Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit diffuser à travers les pores de gel de la couche de gel de ciment devenant de plus en plus dense et de plus en plus épaisse, jusqu'à ce qu'elle atteigne le noyau non hydraté.

L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée. Une petite partie du ciment reste non hydraté.

Le grain de ciment hydraté grossit et double à peu près son volume initial. La modification de la résistance à la déformation ou l'augmentation de la résistance pendant l'hydratation se subdivise en plusieurs phases.

Au fil du temps, le béton frais perd sa consistance initiale et prend, jusqu'à ce qu'il ne soit plus ouvrable. Puis le béton se solidifie. Enfin, lorsque la résistance devient mesurable (env. 0.1 N/mm^2) on parle de béton durci [33].

La vitesse d'hydratation dépend :

- de la température du béton frais et de la température ambiante,
- de la nature et de la finesse du ciment,
- de la teneur en ciment et du rapport E/C du béton,

- de la nature des adjuvants et de leur dosage.

L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) et l'eau de gâchage. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. Le matériau passe alors d'un état de suspension de particules floculées à celui de solide viscoélastique.

L'hydratation du ciment est un processus très complexe du fait que les réactions de ses différents constituants se déroulent simultanément à des cinétiques différentes et que celles-ci peuvent s'interférer (ex: couplage thermique des réactions). Dès le contact avec l'eau, les différentes phases du ciment se dissolvent superficiellement et libèrent des ions de calcium (Ca^{2+}), des ions d'hydroxyde (OH^-), des ions silicates ($SiO_4H_2^{2-}$, SiO_4H^{3-} , $SiO_7H_4^{2-}$), des ions aluminates ($Al_5(OH)^{4-}$, AlO^{2-}) et des ions sulfates (SO_4^{2-}).

La vitesse d'hydratation des diverses phases du ciment est différente. L'aluminate (C_3A) réagit très rapidement et cette réaction est fortement exothermique. En absence de sulfate (provenant du gypse), l'écran d'ettringite ainsi formé bloque l'hydratation des autres constituants du ciment et plus particulièrement le C_3S . Par rapport au C_3S , le C_2S réagit beaucoup plus lentement (10 à 20 fois plus lent) et il n'a pas de rôle majeur sur la structuration de la pâte de ciment à l'état frais.

Voici donc les principales transformations du ciment portland:

Alite + Eau = C-S-H + Chaux

Bélite + Eau = C-S-H + Chaux

Aluminates tricalcique + Sulfates + Eau = Ettringite

Aluminates tricalcique + Ettringite + Eau = Monosulfoaluminate

Aluminoferrite tétracalcique + Eau + Hydroxyde de Calcium = Aluminoferrite de Calcium hydraté

N'y a pas ou plus de sulfates:

Aluminates Tricalcique + Eau = Hydrogrenats

I.3.2. Chimie d'hydratation du ciment Portland avec ajouts

Les différents ajouts minéraux affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que la forme de leur élément.

La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, les fumées de silice (SiO_2) permet une réduction de la teneur en Ca(OH)_2 et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange.

Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment portland témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker portland, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et exige un apport d'humidité suffisant pendant plus long temps [2].

Parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et béton durci: La réaction relativement lente, la consommation d'hydroxyde de calcium, et l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie [2].

I.3.2.1. Hydratation et réaction pouzzolanique

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Gardent une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO_2 ce qui 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 SiO_2 du pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)_2 créée par l'hydratation du ciment portland [15].

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 aluminat 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 , C_4AH_{13} , $\text{C}_8\text{AFH}_{26}$, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) [47].

Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée dans les figures (I.3) et (I.4).

Au cours de l'hydratation du ciment Portland (figure (I.3)), 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 [1]. La situation est différente en présence de pouzzolanes (figure (I.4)), le point de départ des réactions est ici aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminat de calcium hydraté (CAH).

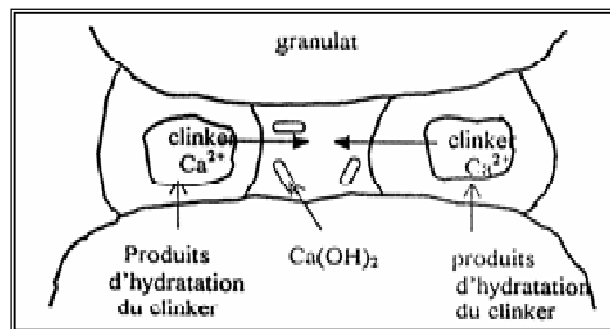


Figure I.3 : Hydratation du clinker de ciment Portland, d'après [29].

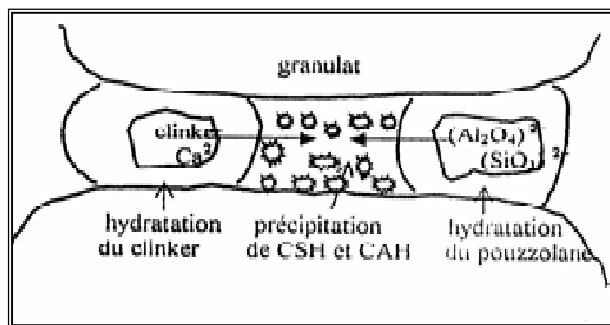


Figure I.4 : Hydratation du ciment à la pouzzolane, (modifié selon [29])

I.3.2.2. Chaleur d'hydratation de la pouzzolane

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton [25].

Des valeurs de chaleur d'hydratation après 7 jours étaient déterminées à partir des pâtes de ciment portland mélangé avec 25 % et 35 % d'ajout pouzzolanique (voir figure (I.5)).

Les additions pouzzolaniques provoquent une diminution quasi linéaire dans la chaleur d'hydratation des pâtes. Elles réduisent la chaleur d'hydratation à 7 jours de 9 % et 17 % pour 25 % et 35 % d'additions pouzzolaniques, respectivement [48].

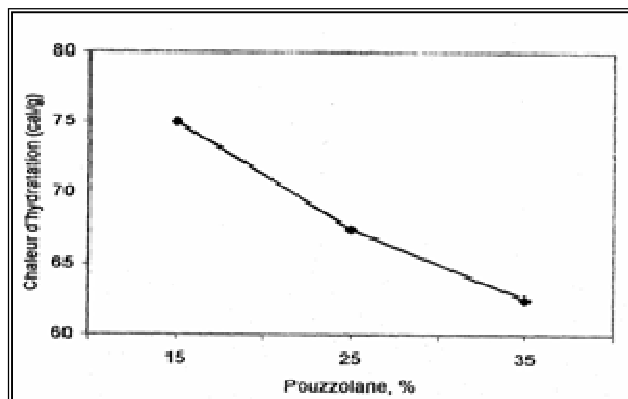


Figure 1.5: Effet de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation de ciment Portland, d'après [35].

La chaleur d'hydratation des mortiers à base de ciment à la pouzzolane, durant les premières heures, augmente avec l'activité pouzzolanique de l'ajout de pouzzolane. Alors qu'après 5 heures la chaleur d'hydratation est inférieure à celle de mortiers de base, parce que le pourcentage de substitution de ciment neutralise la chaleur de la réaction pouzzolanique et l'influence de la substitution prédomine sur l'effet de l'activité pouzzolanique [41].

La figure (I.6) représente le comportement de différents mortiers fabriqués par différents matériaux pouzzolaniques, avec une référence zéro qui montre la chaleur développée par les mortiers à base de CPA. Ce tracé couvre les premières 14 heures de l'essai, puisque après 48 heures, la chaleur commence à se stabiliser.

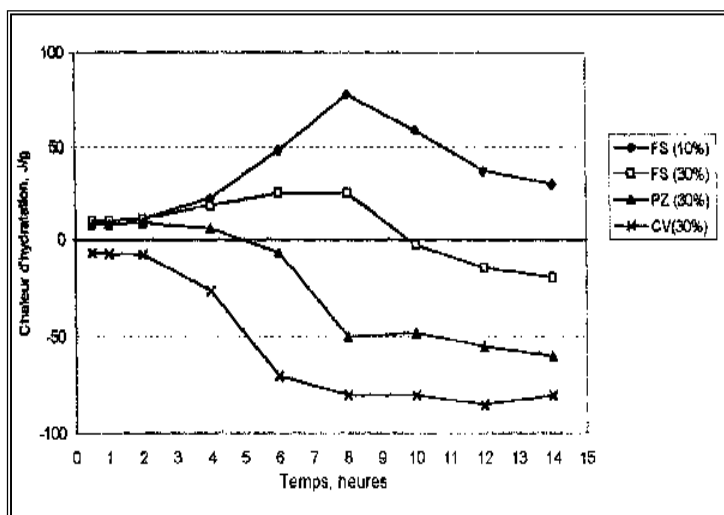


Figure 1.6: Chaleur d'hydratation en fonction du temps, d'après [67].

Après 5 heures la pouzzolane naturelles, d'origine sédimentaire (87.7% de SiO_2), montre une diminution dans la chaleur d'hydratation mais cette diminution reste plus faible que celle due à la cendre volante (pouzzolane artificielle, 41.5% SiO_2). Alors que le mortier à base de fumée de silice retarde ce phénomène jusqu'à 10 heures à cause de sa grande activité pouzzolanique.

Quand on avait 10% de substitution de ciment par la fumée de silice (93.3% de SiO_2) le phénomène précédant n'est pas vu, puisque le degré de substitution n'est pas suffisant pour compenser la chaleur dégagée durant la réaction pouzzolanique [41].

I.3.2.3. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du pouzzolane

Les résultats d'une série d'expériences ont montré que par l'augmentation de la finesse du 25% d'ajout de 3650 cm^2/g à 5000 cm^2/g les résistances à tous les âges étaient améliorés de 24% [46].

L'ajout pouzzolanique peut changer la structure des pores, fait diminuer le nombre de gros pores et augmente celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse de la pouzzolane, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace [17].

I.4. MICROSTRUCTURE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Le processus d'hydratation d'un ciment conduit à un matériau durci composé de plusieurs «phases» [26] de l'agencement desquelles résulte la structure et la texture de la pâte. Ces différentes "phases" peuvent être:

- Des particules de ciment non hydraté ou partiellement hydraté.
- La pâte de ciment, elle-même de microstructure complexe, contenant plusieurs types d'hydrates, de la portlandite et des pores.
- Des bulles d'air, qui constituent une sous-famille spécifique de pores.

Il existe une relation aujourd'hui bien comprise entre la microstructure des ciments et leurs propriétés mécaniques. Elle concerne l'influence néfaste des pores capillaires (porosité à l'échelle supérieure au micromètre) sur la résistance du matériau [20].

I.4.1. Les silicates de calcium hydraté (CSH)

- Le C-S-H est un gel solide poreux ayant une structure en feuillet et formé de cristaux très petits (20 à 30 angströms). Les forces de Van der Waals sont en partie responsables de la cohésion de ce gel.
- Le PH de la solution interstitielle contenant les C-S-H est très alcalin (il est voisin de 13). A des PH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca^{2+} .
- Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- La porosité du gel de C-S-H représente environ 28 % du volume total du gel.
- Les pores de gel sont extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte et du béton.
- La famille des C-S-H est formée d'une grande variété de silicates de calcium hydratés. Une des caractéristiques importantes qui différencie ces espèces est le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport C/S). Dans une pâte de ciment ce rapport est compris entre 1,5 et 1,9 [28].
- Pour des C-S-H de synthèse (C-S-H non formés à partir de ciment), il est compris entre 0,5 et 2 suivant les conditions de synthèse. Certains auteurs [28] considèrent qu'il existe plusieurs " phases " C-S-H différenciées par leur rapport C/S. {Que ce soient les C-S-H (I) et C-S-H (II) pour Taylor [28] ou les C-S-H (α) et C-S-H (β) pour Nonat [23]}. Toutefois, leur différenciation dans une pâte de ciment n'a pas encore été démontrée.

I.4.2. La chaux hydraté (CH ou portlandite)

- La portlandite joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique.
- La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton).
- Elle est produite à la suite de l'hydratation du C3S et C2S.
- Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le PH devient inférieur à environ 12,5.

I.4.3. Les aluminates hydratés

Ils occupent de 15 à 20% du volume de la pâte hydratée. On les retrouve généralement sous deux formes :

- Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques.
- Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales) [3].

I.5. LA DURABILITÉ

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et aspect de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement.

La performance décrit l'ensemble des caractéristiques physico-mécaniques, de la résistance aux agressions chimiques et de la durabilité vis-à-vis d'exigences imposées.

La durée de vie décrit la période de temps après sa mise en oeuvre durant laquelle toutes les propriétés d'un matériau dépassent le seuil minimal acceptable. Un matériau a une durée de vie limitée car il subit graduellement des modifications chimiques, physiques et mécaniques qui réduisent sa performance.

I.5.1. Les pores

I.5.1.1. Définition

Les pores sont des cavités vides ou remplies d'eau dans le béton durci. La porosité est le rapport entre le volume de vides V_v et le volume total V_t d'un corps. La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide.

Fagerlund, a déterminé la courbe représentant la résistance en fonction de la porosité pour des différents mortiers et béton, il découvrit que les courbes obtenues entre la résistance du béton et la porosité du béton et mortier ont les mêmes formes que celles de la résistance de la pâte de ciment.

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires qui lui confèrent plusieurs caractéristiques telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique. On distingue les pores contenus dans les granulats de ceux se

trouvant dans la pâte de ciment. La taille et le volume des pores situés à l'intérieur des granulats n'évoluent pas avec le temps et ils influent sur la résistance du béton à la corrosion. Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue (Figure I.7).

Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO_2 , Cl^- , etc....).

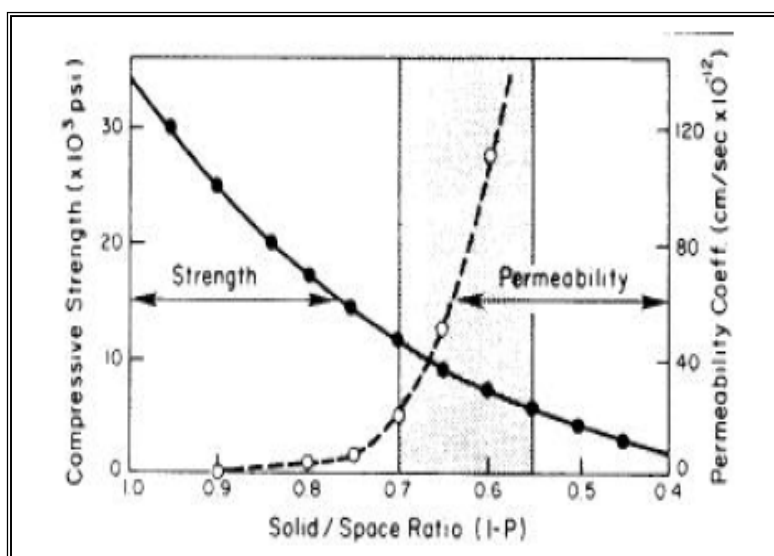


Figure I.7: Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton, [46].

1.5.1.2. L'influence de rapport E/C sur la porosité

Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Sur la figure I.8, on voit clairement que plus le rapport E/C est faible, plus, initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres.

Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

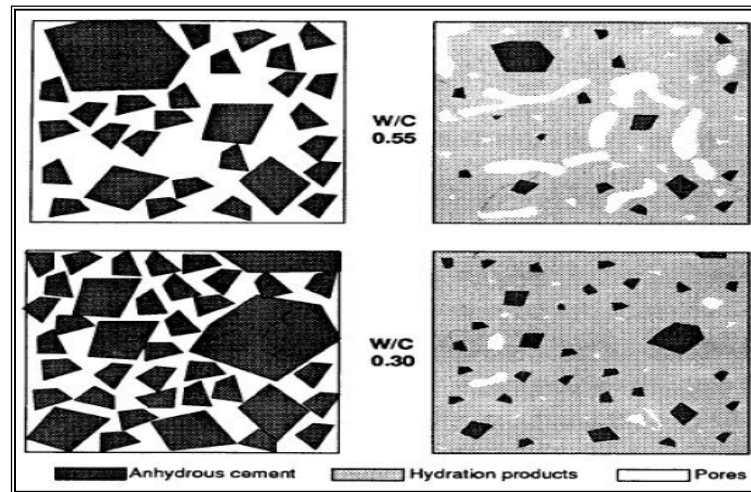


Figure I.8 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci, [26].

Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces intergranulaires. C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance par leur moindre porosité.

L'influence du paramètre E/C sur l'avancement de l'hydratation est très complexe. D'après Boivin [66], de faibles valeurs du rapport E/C entraînent un ralentissement des réactions d'hydratation au jeune âge. Une concentration élevée en C-S-H est obtenue plus rapidement quand la quantité d'eau interstitielle est faible. Au-delà de cette période, une baisse du E/C produit l'effet contraire. Powers [57] explique ceci par le fait qu'à faible teneur en eau, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation devient rapidement très rare une fois que l'eau contenue dans les pores capillaires est épuisée. Ce manque d'eau se traduit alors par un ralentissement des réactions d'hydratation.

Selon Acker [56] et Barognel-Bouny [75], cette théorie de Powers n'est pas justifiée étant donné que l'eau retenue entre les feuillets de C-S-H (Eau zéolitique) reste encore disponible pour l'hydratation lorsque la totalité de l'eau capillaire est consommée. La porosité du matériau dépend de sa teneur en eau initiale. La taille des pores est d'autant plus petite que le rapport E/C est faible. Selon Barognel-Bouny [75], les pores des gels sont d'autant moins importants que le rapport eau/solide est faible. Or, plus les pores sont fins, plus les dépressions capillaires sont élevées et les pressions baissent beaucoup plus rapidement.

La figure (I.9) permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100 % d'hydratation (conservation dans l'eau).

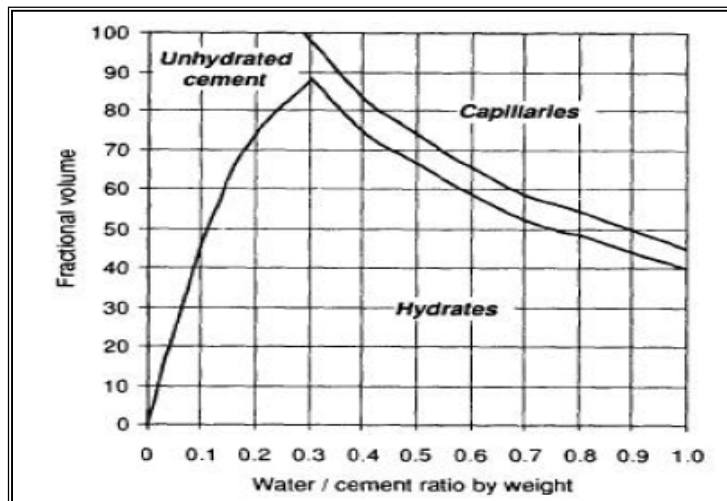


Figure I.9 : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation dans l'eau, [32].

En pratique, l'hydratation n'est jamais complète car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. A un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un E/C très faible (0,25) il subsiste toujours une certaine porosité capillaire. La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. Ce phénomène est illustré sur la figure I.10. En réduisant le E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité passe de 40% à moins de 20% et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur de l'ordre 10.

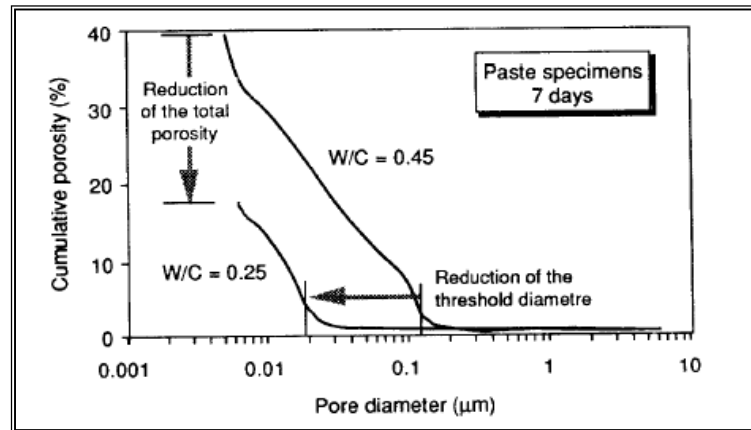


Figure I.10 : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau, [26].

En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs. (Figure (I.11)).

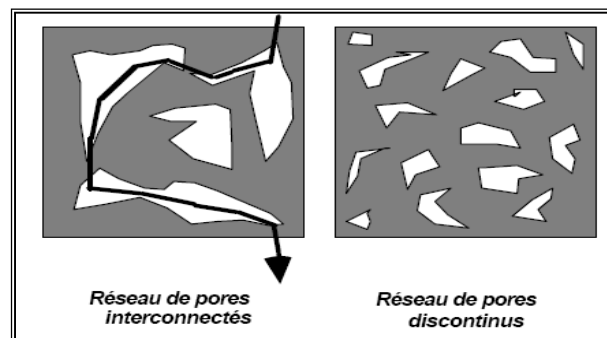


Figure (I.11) : Influence du degré d'inter connectivité sur la perméabilité de la pâte.

1.5.1.3. Evaluation de la porosité

Malheureusement pour obtenir un béton maniable, il est donc nécessaire d'utiliser plus d'eau qu'il en faut pour hydrater toutes les particules de ciment. Cette eau additionnelle qui ne sera jamais liée à des particules de ciment dans la pâte durcie crée une porosité à l'intérieur de la pâte durcie ce qui affaibli les propriétés mécaniques du béton et diminue considérablement sa durabilité.

Parrot [60] a trouvé que pour un ciment dont le rapport E/C est de 0.6 (par masse) l'échange de l'eau par le méthanol montre que le volume des pores occupé par le méthanol est seulement de 0.6 % en moyenne de celui occupé par les pores remplis d'eau initialement.

Cette méthode d'échange procure des informations fiables sur la structure.

Notre recherche sera basée sur les travaux de M. Mellas [52] pour continuer de mesurer la porosité par « *l'échange de méthanol* ». La porosité obtenue par l'échange du méthanol est calculée seulement pour les échantillons de la pâte du ciment durcie (ou mortier) et ne peut pas être appliquée aux échantillons de béton.

La détermination de la porosité par le remplacement du méthanol est obtenue par trempage des échantillons dans une quantité d'eau jusqu'à un poids constant avant de mesurer le poids ainsi que le volume de l'échantillon saturé superficiellement sec. Les tranches sont, ensuite immergées dans le méthanol et le décroissement du poids sont contrôlé en fonction du temps d'immersion.

L'échange complet est indiqué par une aboutie d'un poids constant. Pour éviter une hydratation supplémentaire, les échantillons sont immergés directement dans le méthanol du moment que ces échantillons seront utilisés pour la détermination de la porosité totale.

Les valeurs des volumes des tranches sont obtenues par pesage de l'échantillon saturé par le méthanol avec une surface sèche à l'air puis totalement immergé dans le méthanol. La densité est obtenue par un densimètre à bouteille; le poids sec de chaque échantillon est obtenu après qu'il a été entreposé à 20°C sur du gel de la silice pour 48 heures.

Le volume total est obtenu par la formule: $V_m = (W_m - W_a) / \gamma_m$

Où: W_a : poids de l'échantillon à l'état sec (g).

W_m : poids de l'échantillon immergé dans le méthanol (g).

γ_m : densité du méthanol (g/cm³).

Le volume des pores est obtenu à partir du poids de l'échantillon saturé légèrement sec par le méthanol moins le poids sec, après avoir stocké l'échantillon dans le gel de la silice, divisé par la densité du méthanol.

La porosité par échange de méthanol sera calculée par la formule suivante: $P_m = V_m / V_t$

Où: P_m : la porosité totale basée sur l'échange du méthanol.

V_m : le volume occupé par le méthanol dans la pâte du ciment (ou mortier).

V_t : le volume total.

I.5.1.4. Relation entre la porosité et la résistance

Il est à noter que la structure des pores a une grande influence sur les propriétés mécaniques du béton [64]. La résistance d'un mortier de ciment ou d'un béton dépend de la résistance de la pâte du ciment de même que celle des granulats. Le ciment hydraté, obtenu après les réactions chimiques, est l'élément responsable du développement de la résistance du béton ou du mortier. La contribution du ciment dans la résistance du béton dépend de la participation de chacun de ses différents composants. De nombreuses formules ont été établies pour décrire l'influence de la porosité sur la résistance des matériaux, mais aucune de ces formules ne peut s'appliquer directement à un matériau hétérogène tel que le béton. Dans un tel matériau les agrégats jouent un rôle prépondérant, par rapport aux contraintes qui leurs sont appliquées.

I.5.2. Résistances aux eaux agressives

L'utilisation de ciments contenant des ajouts cimentaires semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces ajouts nous permet d'augmenter la capacité des bétons à résister à l'attaque chimique dans un environnement agressif, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs [70].

I.5.2.1. Eaux pures et eaux douces

Les eaux douces peuvent minéraliser de teneur en dioxyde de carbone agressif comprise entre 15 et 30 mg/l et de PH 5.5 à 6.5, sont classées dans la catégorie des environnements faiblement agressifs. Toutefois, des expériences récentes établissent que, même dans ce cas, on ne peut pas négliger l'action dissolvante de l'eau [39].

L'eau douce peu théoriquement causé de très gros dégâts au béton. Heureusement, elle n'attaque pratiquement pas un béton étanche à l'eau avec un rapport $E/C < 0,60$ [4].

L'attaque d'un béton par des eaux pures faiblement agressives ne peut s'effectuer que s'il est peu compact : dans ces conditions, elle consiste surtout en une dissolution de la portlandite et par conséquent le lessivage. Les silicates et les aluminates, moins solubles, sont attaqués plus tardivement lorsqu'une partie de la chaux a déjà été lessivée. La dissolution sélective de leur calcium provoque un accroissement de leur porosité, en même temps que le rapport molaire $[CaO/SiO_2]$ décroît. Les ions alcalins Na^+ et K^+ , particulièrement mobile, sont également lessivés par les eaux [39].

Le processus d'attaque conduit à des pertes de masses et d'alcalinité due au lessivage de la portlandite, ce qui induit une augmentation de la porosité et de la perméabilité. Il peut se traduire également par une diminution de la cohésion et une chute des résistances mécaniques du béton. Corrélativement, on constate que les ciments sont d'autant plus résistants à l'attaque par les eaux douces qu'ils sont moins riches en hydroxyde de calcium et ont une plus grande stabilité chimique. C'est le cas des ciments avec additions minérales (Laitiers, pouzzolanes naturelles, fumée de silice,...) dont l'hydratation libère peu ou pas de portlandite, tout en générant des CSH de rapport CaO/SiO₂ faible [16].

L'attaque du béton par les eaux douces chargées en dioxyde de carbone se déroule conformément à un processus de dissolution/précipitation, selon le mécanisme suivant [16] : L'eau amenée à percoler à travers le béton se sature progressivement en bicarbonate, par suite la dissolution de la portlandite et, à un degré moindre, des CSH, lorsque cette solution de bicarbonate vient en contact avec d'autres cristaux de portlandite, il y a précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section de percolation : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \longrightarrow 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$.

La précipitation de carbonate de calcium permet à nouveau la formation de bicarbonate et le processus se répète : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(HCO}_3)_2$

Comme dans le cas des bétons au contact d'eaux pures, on constate que la dégradation par eaux chargées en dioxyde de carbone est fonction de la teneur en portlandite, c'est à dire du type de ciments. Les bétons sont d'autant plus résistants que le ciment libère moins de portlandite. L'hydroxyde de calcium fait plus de 20 à 25 % en poids de la pâte des ciments portlands et son enlèvement provoque une évidente augmentation dans la perméabilité du béton et la déstabilisation des phases hydratées.

La quantité de la chaux lessivée dépend largement de la compacité du béton et de type de ciment (figure I.12).

Dans ce cas, La résistance à la lixiviation des ions Ca²⁺ est d'autant plus grande que le ciment contient moins de chaux, les bétons de CPA, riche en chaux, sont plus sensibles à l'altération que les bétons de ciments au laitiers, pouzzolane, et les bétons de ciment alumineux [28]. Dans ce cas, les ciments pouzzolaniques se comportent mieux que les ciments portlands, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface du béton, riche en gel de silice et d'alumine [14]. La teneur en CaO est environ 64% dans le CPA et 45% dans les ciments pouzzolaniques, mais

principalement c'est la grande quantité de CH et la faible quantité de C-S-H qui étaient à l'origine de leur faible résistance au lessivage [40].

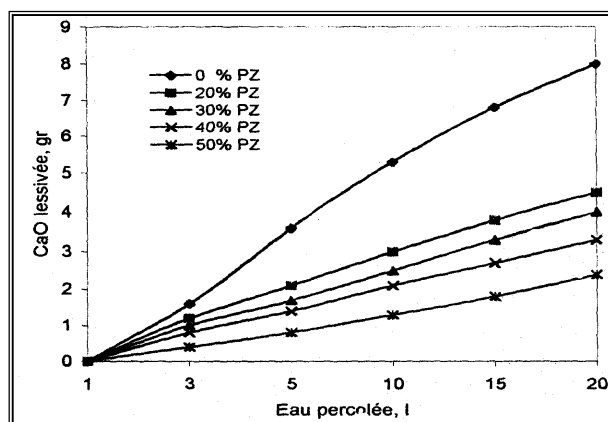


Figure (I.12) : Lessivage de la chaux dans une éprouvette de béton en fonction d'eau percolée et la teneur en pouzzolane du ciment, d'après [41].

Pour les ciments au laitier, la relation entre le type de ciment et l'intensité de l'attaque est illustrée par la figure I.13 ; dans le cas d'un CPA, d'un CHF, et d'un ciment alumineux fondu [2]. Comme le montre dans la même figure ou les pertes de masses des mortiers diminuent quand la teneur en laitiers augmente (supérieure à 40%). Les pertes de masses observées sont accompagnées d'une détérioration des caractéristiques mécaniques: résistance à la flexion et à la compression, module de déformation.

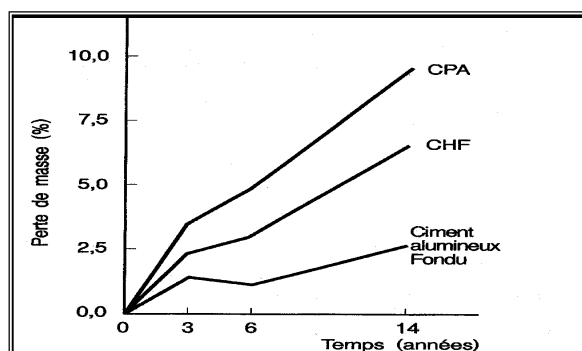
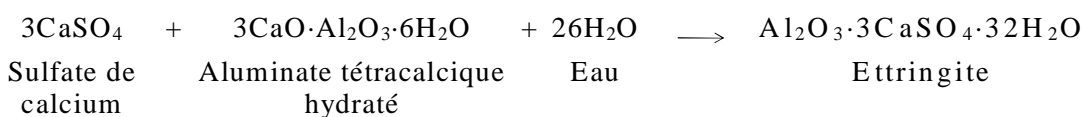


Figure I.13 : Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionné avec différents ciments, conservées dans une eau douce de PH 5 à 5.5, d'après [4].

1.5.2.2. Eaux contenant des sulfates

Quand le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium, sodium et calcium.

Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de sulfate de calcium CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre CaSO_4 et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions lesquelles sont comparativement riches en CaSO_4 et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, comme le cas des pâtes de ciment portland [33].



Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que CaSO_4 puisqu'il réagit non seulement avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive. L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [28].

Les additions minérales de laitiers, de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates.

On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, au moins pour les bétons âgés.

Les ciments avec ajout de laitier ont généralement un bon comportement dans les eaux sulfatées. Ce bon comportement est dû :

- A la réduction de la teneur en chaux et aluminate tétracalcice C_3A du mélange.
- L'accroissement de la compacité des hydrates, en relation avec une diminution du volume poreux pouvant atteindre 25% dans le cas d'additions de laitiers importantes, ces modifications de la structure poreuse entraînent une réduction de la perméabilité.

- Au mode de cristallisation de l'ettringite, formée par précipitation à partir de la phase liquide et non expansive.

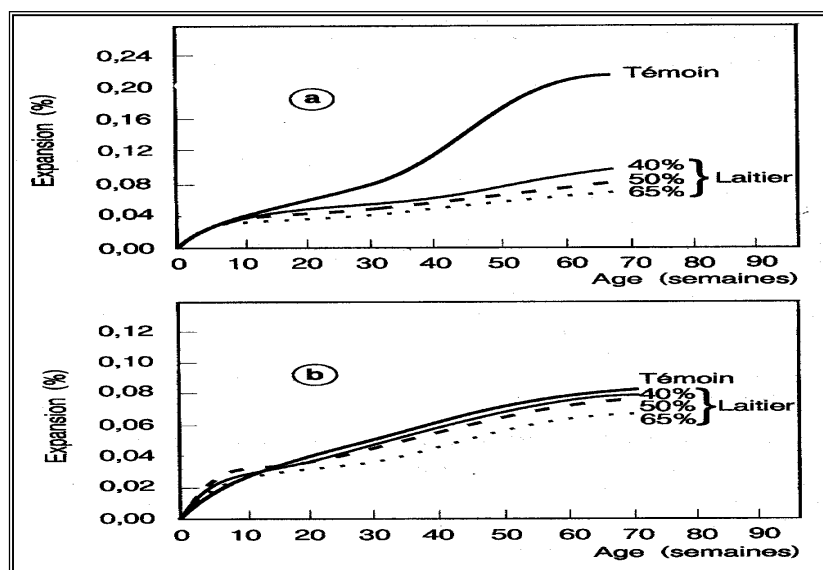


Figure I.14 : L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates, d'après [21].
 (a): le témoin est un ciment portland (type ASTM II) avec 6,4 % de C3A,
 (b): le témoin est un ciment portland (type ASTM V) avec 3,7 % de C3A.

Les ciments pour lesquels la teneur en laitiers est supérieure ou égale à 60% (CHF, CLK) sont considérés comme résistant aux sulfates, indépendamment du clinker de base avec lequel ils ont été fabriqués.

Lorsque la teneur en laitier est inférieure à 60%, et dans le cas des ciments avec ajout de pouzzolane, c'est le clinker de base qui détermine la tenue du ciment aux sulfates. Ce clinker doit satisfaire aux critères exigés pour les ciments Portland, en ce qui concerne les teneurs en C₃A et en SO₃ (voir figure I.14) [16].

- Les pouzzolanes à un taux de substitution de 20 à 30%, ont un effet bénéfique sur la tenue des bétons aux sulfates. Cet effet est dû à la consommation partielle par les pouzzolanes de la portlandite libérée par l'hydratation des silicates du ciment portland, il est dû également aux modifications de microstructure, (voir figure (I.15)).
- La fumée de silice offre également une bonne protection contre l'agressivité des sulfates du fait de leur forte consommation en portlandite et de la structure compacte des CSH qu'elles forment.

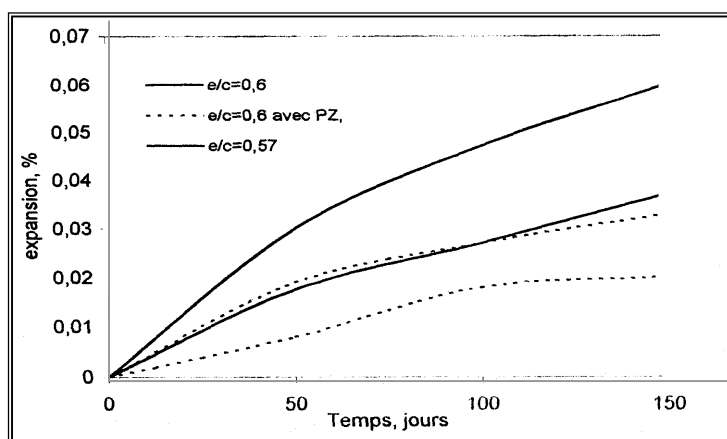


Figure I.15 : Expansion d'un béton à base de ciment Portland (-) et ciment pouzzolanique (---) En fonction de la durée d'immersion dans les eaux agressives, d'après [41].

I.5.2.3. Eaux contenant des chlorures

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur en chlorure de l'eau est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton. Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont le chlorure de sodium et le chlorure de calcium, lesquels sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif.

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs, les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment [30]. Le lessivage de CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments portlands. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme CSH avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments portlands et diminue dans ce qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane [30].

Une solution concentrée de 30% de CaCl_2 endommage les pâtes et les mortiers de ciment portland, avec ramollissement de la surface, fissuration, non seulement après plusieurs cycles de séchage et mouillage, mais aussi, après une simple submersion.

Les pâtes de ciment pouzzolanique montrent une meilleure résistance aux solutions concentrées de chlorure que le ciment portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés [28].

L'attaque indirecte se produit sous certaines conditions de concentration et de PH si les ions des chlorures conduisent à atteindre le ferrailage. Sous ces conditions, le ferrailage s'oxyde. Comme conséquence, le béton est soumis à des contraintes qui conduisent à la fissuration et à la désagrégation. Un autre exemple de l'attaque indirect se produit quand les chlorures sont utilisés comme des sels de dégivrage.

Dans ce cas, des chocs thermiques se produisent avec déplacement de la formation du front de gel lequel peut causer des contraintes nuisibles pour la solidité du béton.

Les chlorures pénétrant au sein du béton à travers des microfissures et par diffusion dans l'eau contenue dans la pâte de ciment et les pores d'agrégat. Le béton ne possède pas de microfissures, la pénétration se produit par la diffusion.

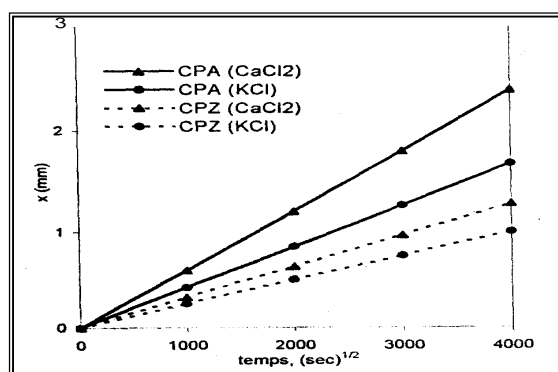


Figure I.16: Pénétration de quelques sels de dégivrage dans les ciments portlands et pouzzolanique, d'après [41].

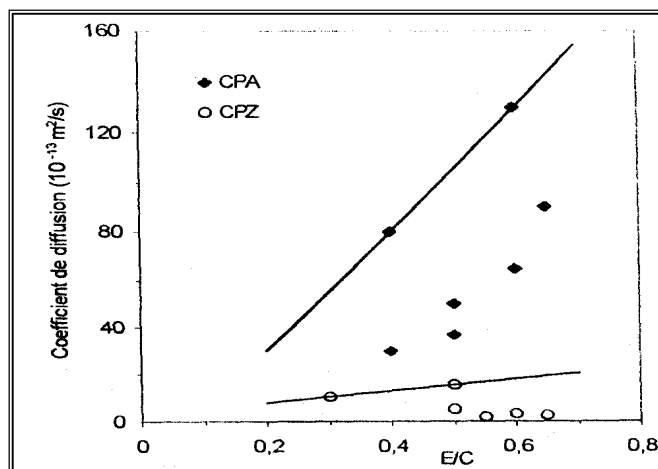


Figure I.17: Coeff. de diffusion d'ions Cl⁻ en fonction de E/C pour des pâtes exposées à une solution de NaCl, d'après [31].

La profondeur de pénétration d'ions des chlorures dépend de tous les facteurs qui influencent la perméabilité des pâtes et bétons. Parmi ces facteurs le type de ciment. (Figure (I.16)). Les bétons à base des ciments pouzzolaniques, aux laitiers et cendres volantes s'opposent généralement à la pénétration d'ions de chlorure, contrairement au ciment portland. Ceci s'explique par le fait que les ciments contenant des matériaux pouzzolaniques sont capables d'immobiliser (dans les aluminates et les silicates) une quantité de Cl⁻ plus grande que celle dans le ciment portland, ainsi que la diffusion de Cl⁻ dans les ciments pouzzolaniques est ralentie. (Voir figure I.17) [49].

I.5.2.4. Eau de mer

L'eau de mer a une forte teneur en sel (3,5 % environ) avec une prédominance de chlorure et sulfate. Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes : dissolution, lixiviation, réaction d'échange de base, précipitation des composés insolubles, cristallisation des sels expansifs.

Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante :

A/- Action des chlorures

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers des bétons armés, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydraté, une autre partie se combine au C₃A sous forme de monochloroaluminate de calcium C₃A.CaCl₂.10H₂O.

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite suivant la réaction d'échange :



La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le CaCl₂ réagit avec les aluminates pour former de monochloroaluminate.

B/- Action des sulfates de magnésium

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca²⁺ par les ions Mg²⁺, soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

C/- Action du dioxyde de carbone

Il réagit sur la portlandite selon la réaction:



Le carbone de calcium précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmatent les pores. Il est très important de noter que les actions de chacun des ions ne sont pas cumulatives. Le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former notamment de l'ettringite. L'ettringite elle-même, en présence de silice dissoute et de carbone, se transforme partiellement en thaumasite: CaCO₃.CaSO₄.CaSiO₃.15H₂O. C'est l'interférence des différents ions qui explique que l'agressivité de l'eau de mer sera bien plus faible que celle des eaux sulfatées [16]. En revanche, pour certains auteurs, cette réduction d'agressivité est liée à la présence des chlorures. Ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallise alors, au moins partiellement, sous une forme non expansive à partir de la solution.

Selon Mehta [47], le remplacement des ions OH^- par des ions Cl^- réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive. Par ailleurs, du fait de leur coefficient de diffusion relativement élevé, les chlorures pénètrent rapidement dans le béton et consomment une partie des aluminates en formant du monochloroaluminate non expansif. Toutefois, les chloroaluminates instable en présence de sulfate, tendent à se transformer en ettringite expansive plus ou moins lessivée par l'eau de mer. Locher [40], attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton.

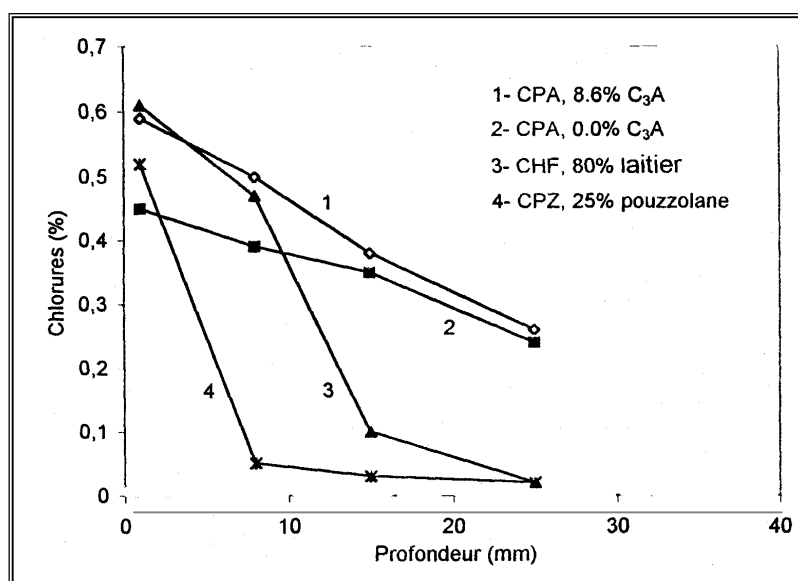


Figure 1.18 : Effet du type de ciment sur la pénétrabilité d'ions de chlorure après mois d'exposition à l'eau de mer, d'après [41].

Toutefois la pénétration d'ions de chlorure est beaucoup plus faible quand les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers sont utilisés à la place du CPA (voir figure I.18). Les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers, dus à leur pâte plus compacte, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments portlands à l'attaque des sulfates, à cause de leur faible teneur en aluminates de calcium hydratés et C-H [18].

1.5.2.5. Action des chlorures seuls

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

Les chlorures liés se trouvent dans le béton sous deux formes:

- Physiquement adsorbée sur les parois solides dans les pores.
- Chimiquement fixés par réaction avec certains composés du ciment, dans ce dernier cas, les composés formés sont le monochloroaluminate hydraté ou sel de Friedel, de formule $C_3A.CaCl_2.10H_2O$.

La capacité de fixation des ions Cl^- par le ciment dépend de la nature de ciment utilisé et principalement de la quantité d'aluminate C_3A présente dans le clinker. D'autres espèces ioniques peuvent intervenir sur la fixation chimique des chlorures. Ainsi les ions sulfates réagissent de préférence aux ions chlore sur le C_3A présent en formant des sulfoaluminates et en diminuant la capacité de fixation des chlorures comme le montre la figure I.19.

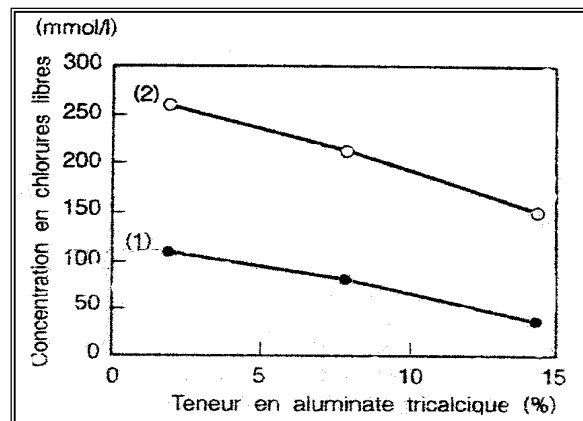


Figure I.19 : Variation de la concentration des chlorures libre en fonction de la quantité de C_3A contenue dans le ciment, d'après [74].

Courbe 1 : 0,4 % de Cl^- sous forme de $NaCl$

Courbe 2 : 0,4 % de Cl^- + 1,5 % SO_3^{2-} sous forme de $NaCl + Na_2SO_4$

Ces résultats expliquent que le CPA à forte teneur en C_3A serait résistant aux milieux chlorurés, mais pas à l'eau de mer à cause de la présence de sulfate.

La pénétration des chlorures dans la structure poreuse de béton : le pourcentage des chlorures libres s'accroît avec le rapport E/C (alors que la quantité de chlorures liés reste sensiblement constante) et avec la concentration en sels du milieu environnant [55, 56].

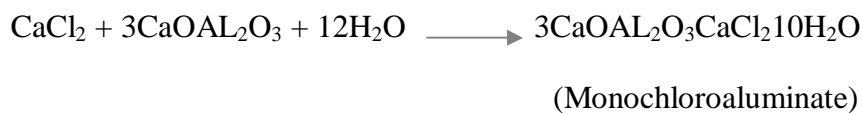
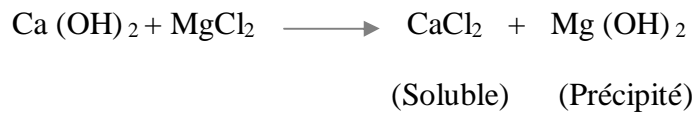
La diffusion d'ions de chlorure dans le béton est le résultat de mécanismes complexes ou l'échange d'ions entre la solution agressive et la solution poreuse (interstitiel) dans le béton joue un rôle important. Il est découvert que le taux de diffusion des chlorures dans le béton est affecté principalement par le type de cation associé avec le chlorure [28].

La dissociation de MgCl_2 , l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère Mg^{2+} lequel substitue Ca^{2+} dans $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et dans C-S-H pour former M-S-H sans propriétés liantes [15].

Son action se résume par sa dissociation en libérant ainsi les ions chlore qui réagissent avec les aluminates, pour former le monochloroaluminate ou (sel de Friedel).

Ces mêmes ions chlores peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de CSH et créer une structure alvéolaire, d'où la formation d'un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la qualité de la chaux dissoute augmente.

Les principales réactions provoquées par l'action du MgCl_2 sont les suivantes:



La formation du monochloroaluminate, instable donne en présence de sulfate l'ettringite ($3\text{CaOAL}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) d'où le gonflement de l'ouvrage et sa dégradation.

Il semble que la diffusion des chlorures combinés aux cations divalents (par exemple CaCl_2) soit plus rapide que celle correspondant aux cations monovalents comme NaCl [3, 55, 61]. Par contre les chloroaluminates se forment en quantité plus importante à partir de CaCl_2 que de NaCl [53, 55].

On peut relever trois conséquences relatives à l'incorporation d'addition minérales dans les ciments sur la pénétration des chlorures.

- La capacité de fixation des chlorures est déterminée par la concentration en (C3A + C4AF) du liant. Or la teneur de ces composés diminue en présence de laitiers ou de cendres volantes puisque les aluminates proviennent de clinker. La quantité de chloroaluminates formée étant réduite, la teneur en chlorure libre devrait être plus élevée pour les ciments incorporant des additions minérales. Or, les informations rapportées par certains auteurs [62, 65]; montrent qu'au contraire, la quantité de chlorure liée est plus élevée dans les ciments composés au laitier et aux cendres volantes que dans le ciment portland. Cette plus grande capacité de

fixation serait due à la forte adsorption des chlorures les pores des ciments hydratés.

- Les additions minérales réduisent sensiblement le PH de la solution interstitielle. Cette diminution conduit à admettre une concentration admissible plus faible en chlorure au niveau de l'armature.
- Le coefficient de diffusion apparent est dépendant des additions minérales. A condition de respecter une cure humide prolongée, l'ajout de laitiers, de cendres volantes ou de fumée de silice réduit dans des proportions sensibles les coefficients de diffusion des chlorures dans le béton.

1.5.2.6. Action des sulfates seuls

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite «secondaire». La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite «primaire» obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments portlands par réaction du gypse, car cette ettringite n'est jamais expansive [16].

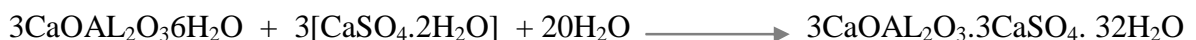
Schématiquement, la formation de l'ettringite en deux étapes est résumée ci-après :

- a) Formation du gypse «secondaire» par opposition au gypse «primaire» ajouté au ciment comme régulateur de prise. La formation de gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate. Par exemple, avec le sulfate de sodium :



- b) Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite.

- Soit à partir de reliquat de C₃A anhydre :



- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C₄AH₁₃ ou de monosulfoaluminate de calcium C₃A.CaSO₄.H₁₂.

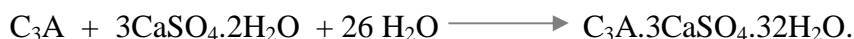
Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4^{2-} par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : Cation

$(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{NH}_4^+, \dots) \longrightarrow \text{Ca}^{2+}$ et formation du gypse en solution ou cristallisé suivant réaction ponctuelle des ions sulfate avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydrates (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$) avec formation, in situ, d'ettringite expansive.

- Cristallisation par « Effet de coin » due à la pression de cristallisation de l'ettringite.
- Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation dont l'épaisseur à tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus ou moins complète du béton.

Les sulfates les plus agressifs vis à vis des bétons sont les sulfates de magnésium, d'ammonium, de calcium et de sodium. Le sulfate de magnésium est très fortement agressif par la double action du cation Mg^{2+} qui s'échange avec Ca^{2+} et l'anion SO_4^{2-} suivant les réactions :



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des C-S-H en un silicate de magnésium hydraté M-S-H sans propriétés liantes.

De plus, la cristallisation d'ettringite, instable en présence de sulfate de magnésium, intensifie la réaction de formation du gypse [67].

Le sulfate de calcium, présent dans les sols sous forme de gypse et d'anhydrite, et dans les eaux souterraines séléniteuses, est agressif pour le béton malgré sa solubilité relativement faible. Le processus de dégradation, plus lent que dans le cas des sulfates de magnésium et d'ammonium, est du essentiellement à la formation d'ettringite expansive.

Le sulfate de sodium, très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et d'ettringite expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment. L'action des eaux sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. Réaction avec la chaux et formation du gypse secondaire.



(Gypse secondaire) (Soluble)

Une partie du gypse secondaire formé au cours de cette réaction précipite et provoque une expansion, l'autre partie soluble entraîne une érosion et une réaction avec l'aluminate tricalcique d'après le schéma de la réaction suivante:



(Ettringite)

L'ettringite ainsi formée provoque une expansion. Il est à noter que l'ettringite se forme normalement lors de la prise du ciment portland, mais elle se transforme rapidement dans les conditions habituelles de conservation en monosulfate. En outre le gypse ajouté au clinker n'est plus à l'état libre dans la pâte durcie. Comme les différents sulfates de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ et le CaSO_4).

Les CSH, moins sensibles que la portlandite, ne sont pas affectés directement par le sulfate de sodium, mais, sont néanmoins, susceptibles de se décomposer dans un deuxième temps par lixiviation partielle de leur chaux et formation de gypse.

Le sulfate de potassium, a une action voisine de celle du sulfate de sodium, mais la vitesse d'attaque est un peu plus lente.

La plupart des sulfates métalliques solubles sont agressifs vis-à-vis du béton, à l'exception des sulfates de plomb et de baryum très peu soluble.

Les phases solides dans le ciment portland bien hydraté, sont C-S-H, C-H et les produits d'hydratation contenant l'alumine. Ces deux derniers qui sont les plus vulnérables contre l'attaque des ions de sulfates.

Des essais ont montré que la percolation des sulfates peut, parfois, être responsable de la dégradation des mortiers. Si on considère le cas où les aluminates sont absents, comme dans le cas des mortiers manufacturés avec C_3S , l'action des sulfates sera beaucoup moins agressive que si on utilise le mélange $C_3S + 10\% C_3A$. (Figure (I.20)).

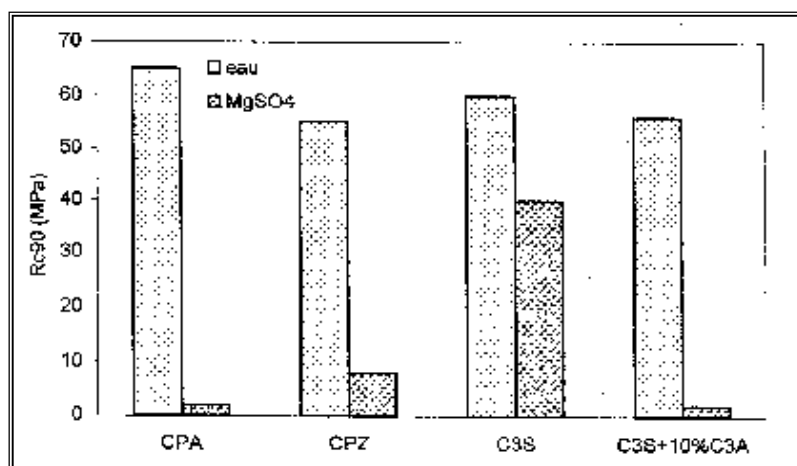


Figure I.20 : Chute de la résistance à la compression de différents types de ciment après la percolation des sulfates, d'après [65].

Il a été montré l'effet de la composition de la pouzzolane naturelle sur la résistance aux sulfates de ciments mélangés. Une pouzzolane naturelle de l'Italie riche en silice ($SiO_2 = 88,25\%$, $Al_2O_3 = 1,8\%$) a donné des résistances meilleures au mélange de ciment exposé à la solution de $MgSO_4$ en comparaison à la pouzzolane qui contient $17,58\% Al_2O_3$.

Evidemment, par réduction de la quantité totale de l'alumine réactive dans le mélange de ciment, La pouzzolane riche en silice était capable de réduire la teneur en aluminat hydraté vulnérable aux sulfates dans la pâte de ciment [49].

Donc, on peut conclure que l'attaque sulfatique peut être réglée quand la présence d'aluminat hydraté dans la pâte de ciment est réduite ou même éliminée par la réduction de la teneur en C_3A ou par la substitution d'une partie de ciment par un matériau convenable.

Mehta [49], remarque que cette dernière méthode est effectivement employée pour réduire en plus la quantité de CH du à l'hydratation de ciment (le cas des matériaux pouzzolaniques).

Ce n'est que récemment que la formation de thaumasite est également reconnue comme un mécanisme entraînant des dégâts. La thaumasite est également un produit expansif, qui est du à la réaction de la pâte de ciment durcie avec les ions de sulfate. Sa formule ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) indique qu'elle n'a pas besoin de C_3A hydratée pour se former. Il en résulte que dans des circonstances défavorables, même les bétons avec des ciments portlands résistant aux sulfates, qui se caractérisent par une faible teneur en C_3A , peuvent être détruits par des ions de sulfate [4].

La réduction de la perméabilité est assurée par l'utilisation des ajouts pouzzolaniques, qui devient un facteur majeur dans l'amélioration de la durabilité du béton exposé aux solutions sulfatiques. Les essais de laboratoire ainsi que les tests in situ montrent que la plupart des pouzzolanes naturelles améliorent la résistance de béton contre l'attaque des sulfates quand elles sont utilisées comme remplacement partiel.

Massaza et Costa [17], ont confectionné des ciments composés de ciment portland avec ajout de 10, 30 ou 40 % de pouzzolane naturelle de l'Italie. Les mesures d'expansion sur des prismes standards de mortiers exposés à une solution de 1% de MgSO_4 pour une période de 5 ans (figure I.21), prouvent que l'expansion engendrée par les sulfates était légèrement réduite par l'addition de 10% de pouzzolane, mais était considérablement réduite quand la proportion ajoutée était 30 ou 40%. Les auteurs ont attribué ces résultats à la haute imperméabilité et la faible teneur en CH du mortier à base de ciment avec 30 ou 40% de pouzzolane. Ils ont observé que dans l'hydratation de la pâte de ciment à la pouzzolane, le CH est présent non seulement en petite quantité mais encore entourée par les produits imperméables de réactions pouzzolaniques.

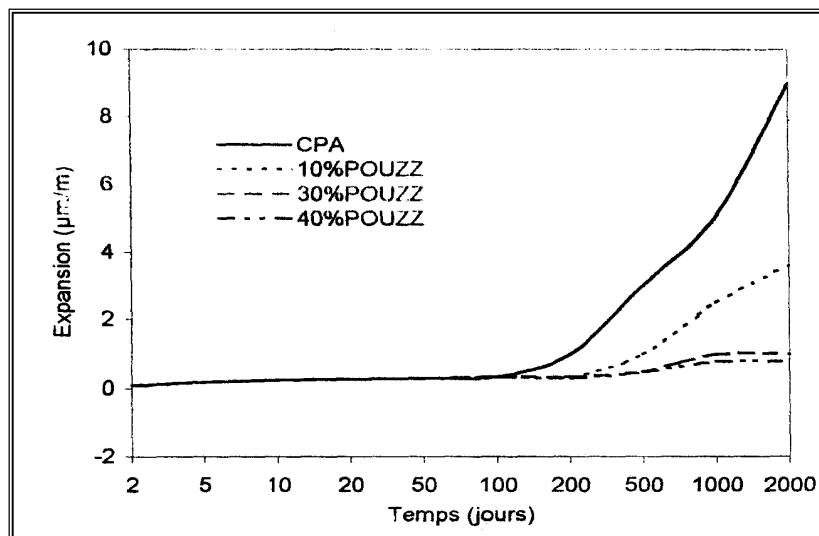


Figure I.21 : Effet de la substitution de ciment portland avec de la pouzzolane naturelle sur l'expansion de mortiers, d'après [41].

D'une étude parallèle pour la résistance aux sulfates, Mehta [49] a constaté que la pâte de référence (CPA) et la pâte avec 10 % de pouzzolane perdent plus de 50 % de leur résistance à la compression, Tandis que pour le cas de 20 et 30 % de pouzzolane la chute de résistance était inférieure à 20 %. Pour étudier l'influence des sulfates sur la résistance à la compression, des pâtes durcies de ciment portland ordinaire, ciment résistant aux sulfates et ciment pouzzolanique (80 % CPA+20 % pouzzolane) sont immergées séparément dans des solutions de 5 % ($MgSO_4$ et Na_2SO_4) jusqu'à un 1 an [5]. La résistance à la compression est mise en corrélation autant que possible avec la composition chimique et minéralogique des ciments utilisés et les cations attachés aux ions des sulfates

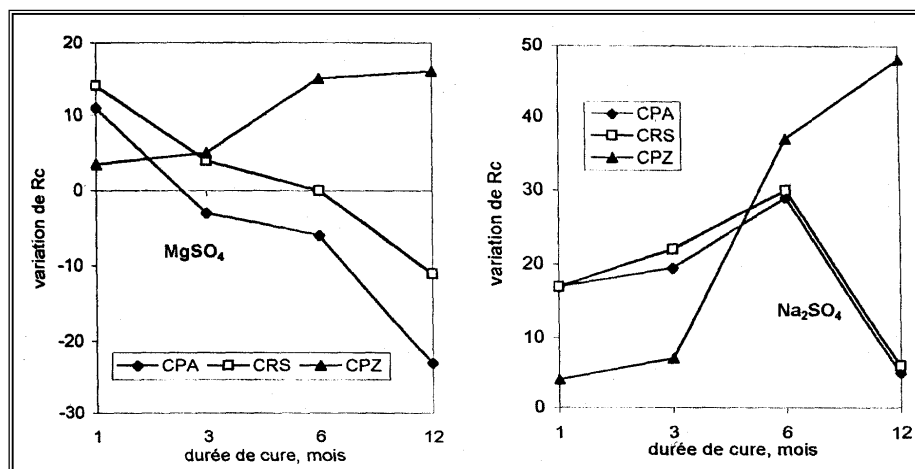


Figure I.22 : La variation de la résistance à la compression de pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatiques en fonction de la durée de cure, d'après [5].

D'après la figure I.22 la résistance de la pâte de ciment pouzzolanique augmente avec la durée de cure, pour les deux autres ciments la résistance diminue jusqu'à 1an (pour les pâtes immergées dans $MgSO_4$), mais augmente jusqu'à 6 mois (le cas de Na_2SO_4), après elle diminue d'une manière aiguë jusqu'à 1 an. Le comportement de la résistance des différentes pâtes de ciments dans les solutions de sulfates est principalement attribué à la pénétration des sulfates et leurs réactions avec les constituants des ciments [5]. Le ciment pouzzolanique est durable dans toutes les solutions sulfatiques à cause de la formation supplémentaire de C-S-H. Ces hydrates précipitent dans les pores et causent la diminution de la porosité. D'autre coté les pâtes immergées dans la solution Na_2SO_4 montrent une augmentation de résistance jusqu'à 6 mois, ceci s'explique du fait de l'augmentation de PH qui est du à la formation de NaOH qui stabilise la formation de C-S-H. [4]. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation des ciments [17], ce qui explique l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment aux jeunes âges.

I.6. CONCLUSION

Les ajouts les plus connus sur le marché actuellement sont les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de hauts-fourneaux, la fumée de silice et les fillers, qui combinés au ciment Portland contribuent, par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois, à améliorer certaines propriétés du béton frais et durci.

La production du ciment Portland, a un coût énergétique élevé, calciné à de hautes températures, sa production coûte chère. Les ciments aux ajouts permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en offrant en plus au béton de meilleures performances.

La combinaison du ciment Portland avec des ajouts cimentaires classe (1 ou 2) permet de développer de nouveaux types de liants hydrauliques (ciments binaires ou ternaires) ayant des propriétés physico-mécaniques et une durabilité supérieure au ciment Portland seul.

Il existe actuellement au CANADA deux ciments ternaires qui sont commercialisés, et un ciment quaternaire à l'étude pour améliorer les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des mortiers et béton.

A la lumière de l'examen de la documentation, le recours aux ajouts est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du ciment, mortier et du béton. Le présent travail traite l'influence des ajouts cimentaires tel que la pouzzolane et le filler, comme substitutions au ciment, sur les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des mortiers et béton.

CHAPITRE II :

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

POUR LA CONFECTION DES BETONS ET DES MORTIES

II.1. INTRODUCTION

II.2. CIMENT PORTLAND

Le ciment a utilisé dans notre travail est un ciment Portland artificiel (CPA-CEM I-42.5), il est composé de 95% de clinker et 5% de gypse, pour la régularisation de la prise. Le clinker qu'on a utilisé est celui de la cimenterie de « M'SILA ».

II.2.1. Analyse chimique et minéralogique

La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de [BOGUE, 1955], elle est contenue dans le tableau II.1.

| <i>Composition chimique (%)</i> | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|--------------------|-------------------------|------------|
| <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>CaO</i> | <i>MgO</i> | <i>CaO (libre)</i> | <i>Résidu insoluble</i> | <i>PAF</i> |
| 22,00 | 5,30 | 3,38 | 65,16 | 1,77 | 2,32 | 1,40 | 0,48 |

| <i>Composition minéralogique (%)</i> | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <i>C₃S</i> | <i>C₂S</i> | <i>C₃A</i> | <i>C₄AF</i> |
| 61.00 | 14.50 | 02.40 | 15.22 |

Tableau II.1: Composition chimique et minéralogique de clinker

L'analyse chimique du ciment montre qu'elle est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir : % [MgO + CaO (libre)] < 5%.

II.2.2. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1130 kg/m³

Masse volumique absolue = 3100 kg/m³

Surface spécifique = 3050 cm²/g

II.3. LES AJOUTS CIMENTAIRES

Les deux ajouts cimentaires utilisés sont :

II.3.1. Pouzzolane

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle en provenance du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf) dans l'ouest de l'algerie. Pour pouvoir la substituer au ciment CPA, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite broyé puis passé au tamisage. Le tamisât de 0.08 mm est récupéré et utilisé en substitution au ciment à différentes proportions et à différentes échéances.

II.3.1.1. Analyse chimique

La composition chimique moyenne de pouzzolane naturelle issue du gisement de Bouhamidi, selon les analyses effectuées par le laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf est donnée par le tableau II.2.

Tableau II.2: Analyse chimique de la pouzzolane utilisée

| Éléments | Pourcentage |
|--------------|-------------|
| SiO_2 | 46.46 |
| Al_2O_3 | 17.45 |
| CaO | 9.03 |
| MgO | 3.88 |
| Fe_2O_3 | 8.36 |
| SO_3 | 1.03 |
| Na_2O_3 | 4.32 |
| K_2O | 1.40 |
| Cl | 0.03 |
| Perte au feu | 4.85 |

II.3.1.2. Analyse minéralogique

La composition minéralogique de la pouzzolane est donnée par le tableau II.2.

Tableau II.3. Analyse minéralogique de la pouzzolane

| Minéraux | Pourcentage |
|---|-------------|
| Feldspath plagioclase (Anorthite : $CaAl_2O_2Si_2O_2$) | 40 |
| Pyroxène (Augite: $(Mg, Fe)_2Si_6O_6$) | 15 |
| Verre volcanique | 14 |
| Analcime (Zéolithe) | 12 |
| Chlorite : $(6Mg_5AlSi_3O_{10})(OH)$ | 6 |
| Hématite : Fe_2O_3 Magnétite : Fe_3O_4 FeO Biotite : $2K(Fe, Mg)_3AlSi_3O_{10}(OH)$ | 8 |
| Autres minéraux: basaltes, calcites, Dolomites, argiles, etc. | 5 |

II.3.1.3. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1.03 g/cm^3

Masse volumique absolue = 2.72 g/cm^3

Surface spécifique Blaine = $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$

II.3.2. Le filler

Les fillers proviennent de la carrière d'El Khroub, wilaya de Constantine. Ils sont de nature calcaire. (Surface spécifique = $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$).

II.3.2.1. Analyse chimique La composition chimique est représentée ci-dessous.

Tableau II.4. Composition chimique d'un filler calcaire.

| SiO_2 | Fe_2O_3 | Al_2O_3 | CaO | MgO | SO_3 | $NaCl$ | PF |
|---------|-----------|-----------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 0.58 | 0.02 | 0.06 | 55.80 | 0.06 | 0.08 | 0.56 | 43.53 |

II.4. LE SABLE

Le sable utilisé provient de la région de Biskra (Rivière d'Oued-Djedi).

II.4.1. Analyse granulométrique

Tableau II.5: Analyse granulométrique du sable

| Ouvertures des mailles (mm) | Refus partiel (g) | Refus cumulé (g) | Refus cumulé (%) | Tamisât (%) |
|-----------------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|
| 5,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2,500 | 190,00 | 190,00 | 9,50 | 90,50 |
| 1,250 | 210,00 | 400,00 | 20,00 | 80,00 |
| 0,630 | 480,00 | 880,00 | 44,00 | 56,00 |
| 0,315 | 610,00 | 1490,00 | 74,50 | 25,50 |
| 0,160 | 290,00 | 1780,00 | 89,00 | 11,00 |
| 0,080 | 120,00 | 1900,00 | 95,00 | 5,00 |
| le fond | 98,00 | 1998 | 99,90 | 0,10 |

II.4.2. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1450 kg/m³

Masse volumique absolue = 2550 kg/m³

Module de finesse = 2,37 (Préférentiel).

Equivalent de sable = 66 (Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante).

Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable s'inscrit dans le fuseau recommandé par le béton courant. (Figure II.1).

II.5. LE PIERRE CONCASSÉE

Nous avons utilisé des pierres concassées de fraction 7/15 et 15/25 de la région d'AIN-TOUTA.

II.5.1. Analyse granulométrique (Figure II.2).

Tableau II.6: Analyse granulométrique des pierres concassées

| <i>Ouvertures des mailles (mm)</i> | <i>Refus partiel (g)</i> | <i>Refus cumulé (g)</i> | <i>Refus cumulé (%)</i> | <i>Tamisât (%)</i> |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| 25,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20,00 | 805,00 | 805,00 | 16,10 | 83,90 |
| 16,00 | 1915,00 | 2720,00 | 54,40 | 45,60 |
| 12,50 | 950,00 | 3670,00 | 73,40 | 26,60 |
| 10,00 | 753,00 | 4423,00 | 88,46 | 11,54 |
| 8,00 | 410,00 | 4833,00 | 96,66 | 3,34 |
| 6,30 | 160,00 | 4993,00 | 99,86 | 0,14 |
| 5,00 | 4,00 | 4997,00 | 99,94 | 0,06 |
| le fond | 3,00 | 5000,00 | 100,00 | 0 |

II.5.2. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1435 kg/m³

Masse volumique absolue = 2650 kg/m³

Coefficient de Los Angeles = 19 % (Dur).

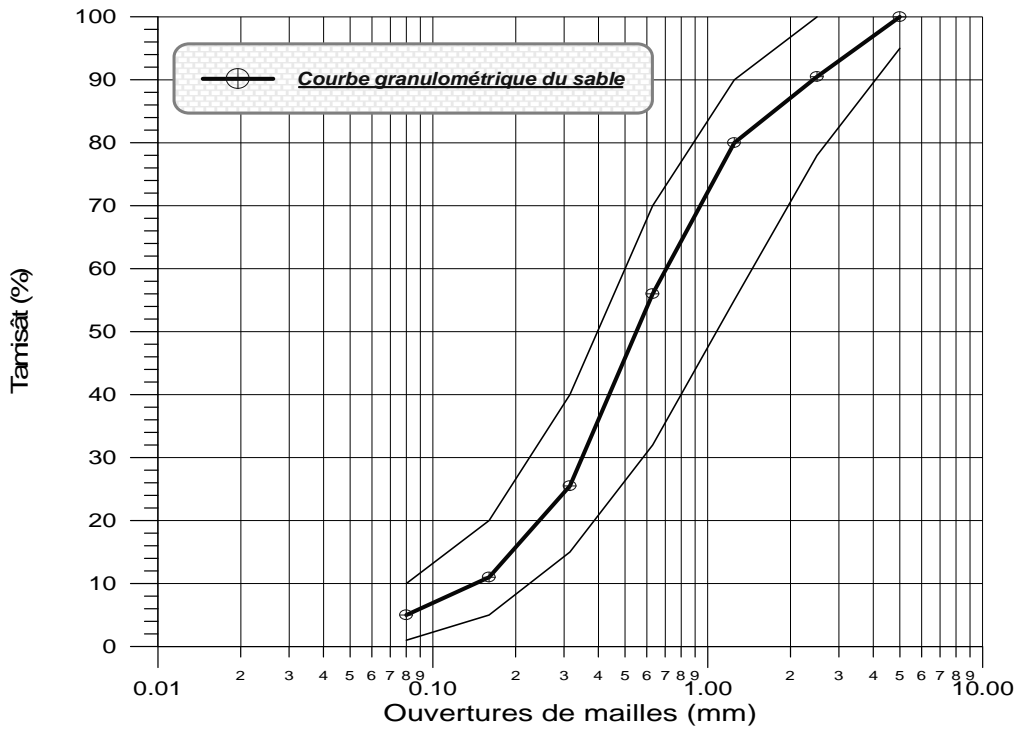


Figure II.1 : Courbe granulométrique du sable

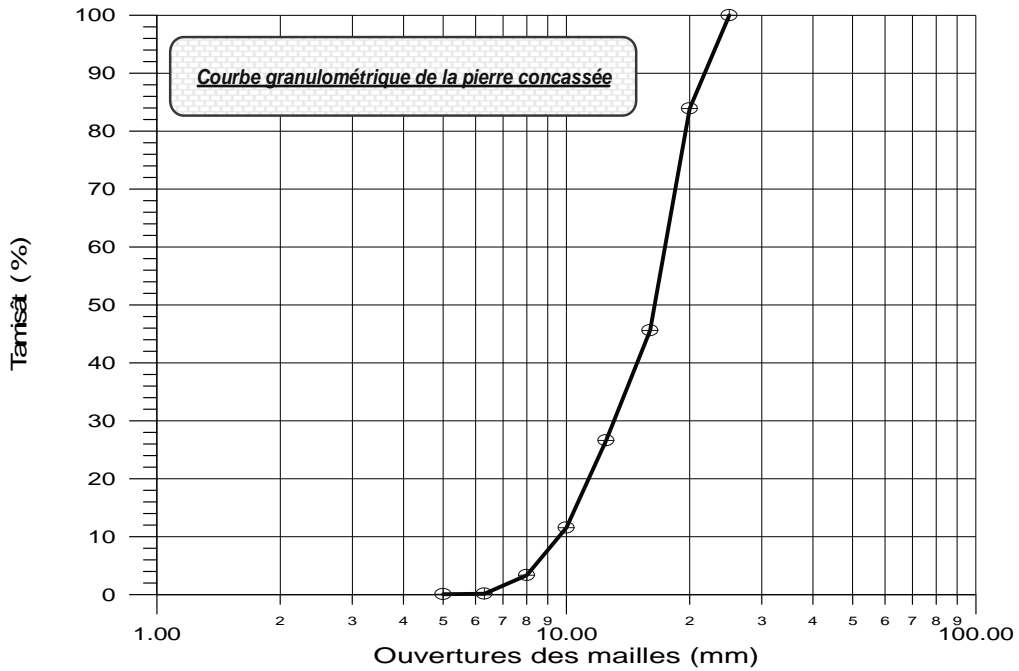


Figure II.2 : Courbe granulométrique de la pierre concassée

II.6. CONCLUSION

CHAPITRE III :

ETUDE DU MORTIER

III.1. INTRODUCTION

III.2. PREPARATION DES EPROUVETTES ET DEROULEMENT DES ESSAIS

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, à raison de trois éprouvettes par essai et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés jusqu'à la période de l'essai dans l'eau à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Les résistances mécaniques des mortiers ont été déterminées à l'âge de 7, 28 et 90 jours selon la norme EN 196-1. Les liants ont été préparés à partir de différents pourcentages d'ajouts de filler et de pouzzolane naturelle. Toutes les substitutions sont faites relativement à la masse de ciment.

III.3. PROPRIETES MECANQUES DU MORTIER

III.3.1. Programme expérimental

Différents mortiers, préparés à base de ciment Portland seul ou mélangés à un ou à deux ajouts minéraux, ont été examinés. On note la codification suivante:

- Un ciment (CPA).
- Un ciment binaire composé de (CPA et de filler: CPAF).
- Un ciment binaire composé de (CPA et de pouzzolane: CPAP).
- Un ciment ternaire composé de (CPA et de filler et de pouzzolane: CPAFP).

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages des ajouts, ainsi que l'influence du rapport ($E/L = 0.55, 0.45$ et 0.35) sur la résistance mécanique à la compression du mortier, on a choisi pour le filler trois pourcentages (5%, 10% et 15%) pour les additionner au ciment CPA, et tirer le taux optimum de filler. Pour les mêmes raisons les différents pourcentages de la pouzzolane choisis sont (10%, 20% et 30%).

III.3.2. Compositions des mortiers

Le tableau III.1 donne les différents dosages des matériaux entrant dans la confection des différents mélanges de mortiers:

Tableau III.1. Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques

| Type de ciment | Ciment (g) | Pouzzolane (g) | Filler (g) | Sable (g) | Eau (g) | E/L |
|----------------|---------------|-------------------|---------------|--------------|------------|------|
| CPA | 450 | - | - | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 5%F | 427.5 | - | 22.5 | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 10%F | 405 | - | 45 | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 15%F | 382.5 | - | 67.5 | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 10%P | 405 | 45 | - | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 20%P | 360 | 90 | - | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |
| CPA + 30%P | 315 | 135 | - | 1350 | 157.5 | 0.35 |
| | | | | | 202.5 | 0.45 |
| | | | | | 247.5 | 0.55 |

III.3.3. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III-1 à III-8 ci-dessous:

□ **L'effet du filler sur la résistance à la compression**

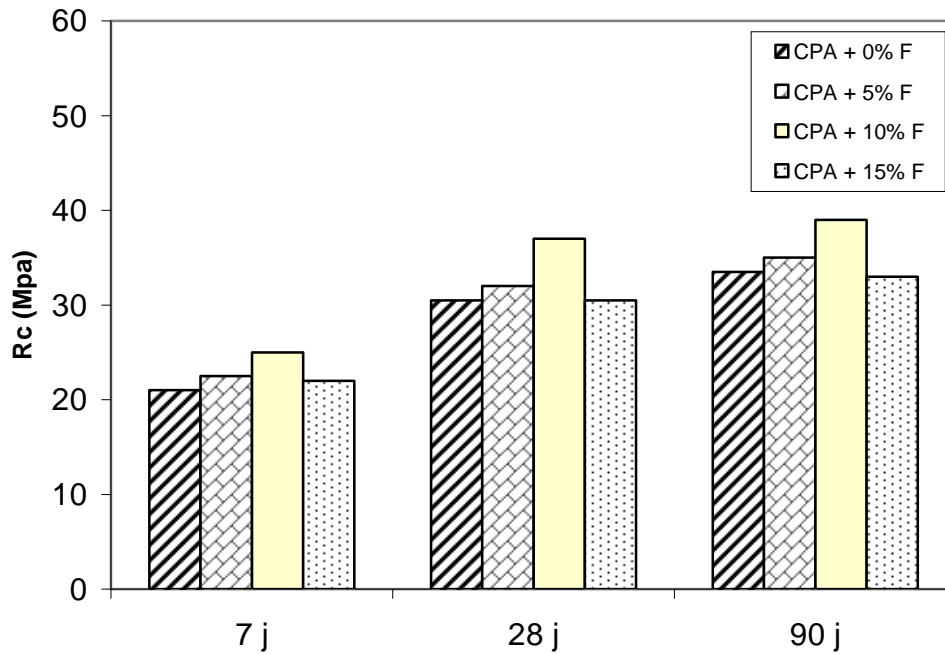


Figure III.1: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,55$)

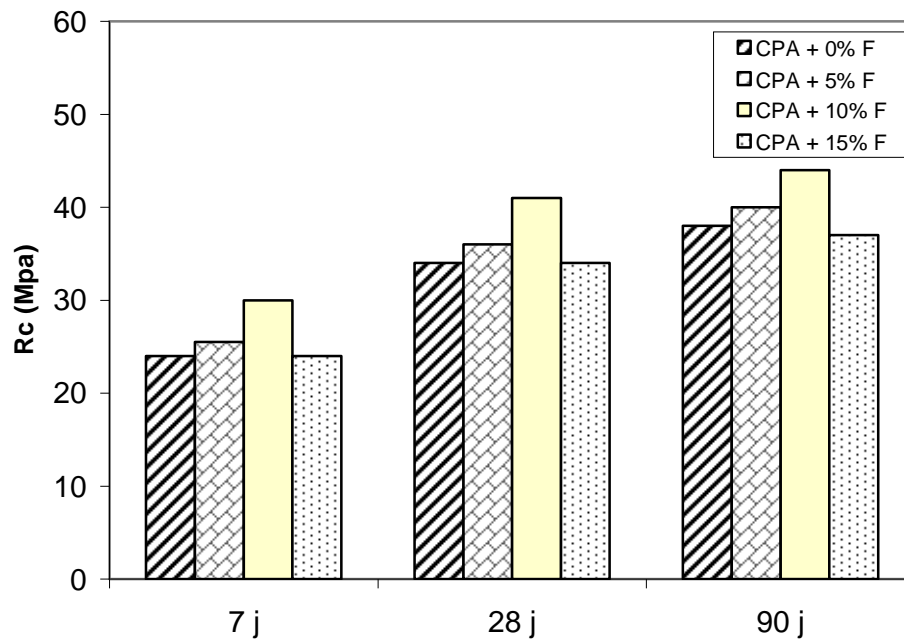


Figure III.2: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,45$)

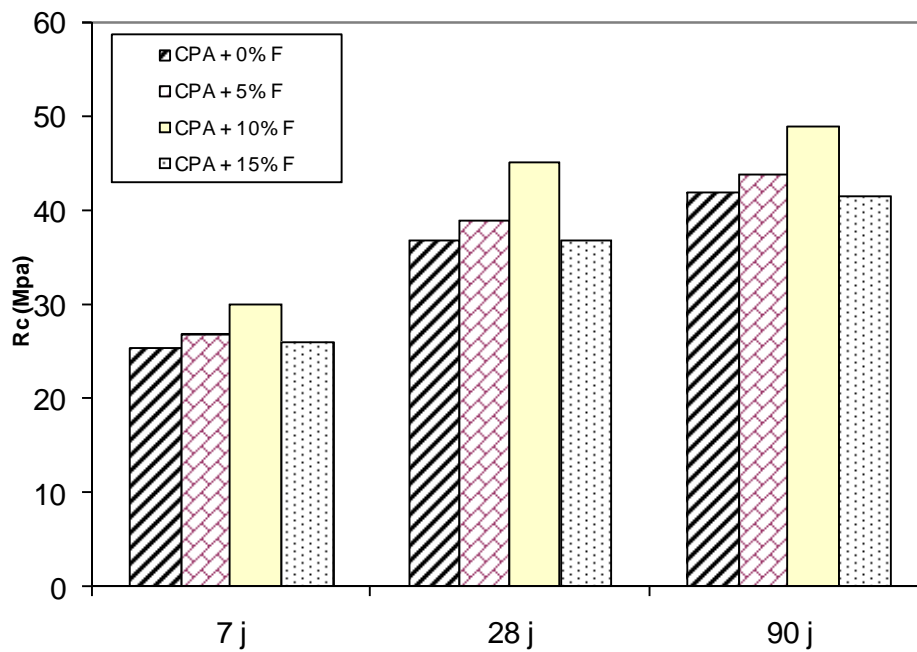


Figure III.3: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,35$)

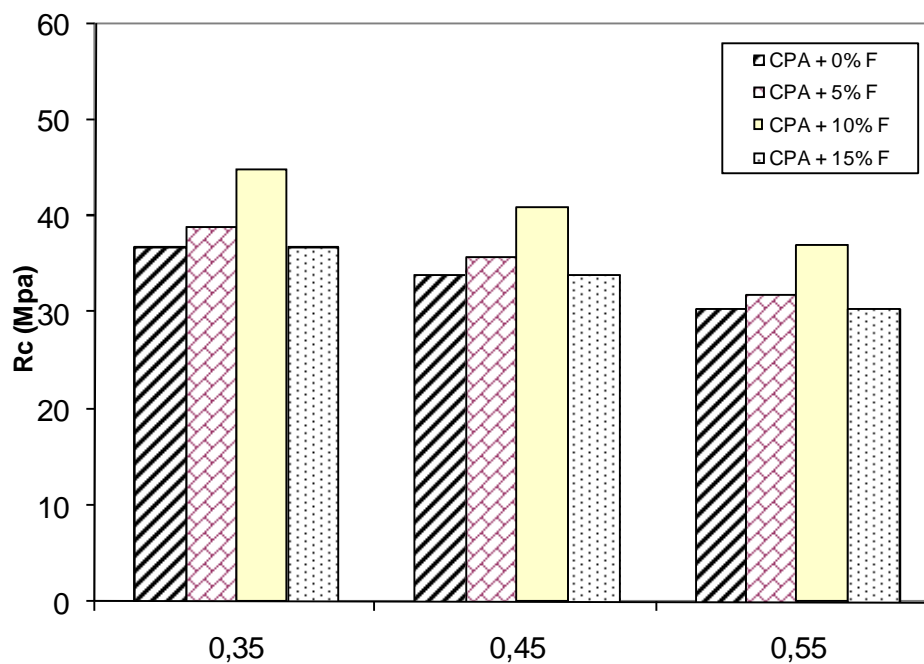


Figure III.4: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de mortier en fonction du rapport E/L et du pourcentage du filler

Les résultats obtenus montrent que le remplacement d'une partie du ciment par les fillers peut améliorer de manière sensible les résistances mécaniques à la compression surtout pour des valeurs de substitution de l'ordre de 10%. Au delà de cette valeur, on observe des chutes de résistance proportionnelles (voir figures III-1, III-2, III-3).

Les résistances en compression augmentent lors de l'addition des fillers calcaires comme ajout traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des mortiers par double effet physique et chimique.

- L'effet physique: porte sur l'amélioration des propriétés mécaniques par un remplissage des pores et en corrigeant la granulométrie des éléments fins du ciment (l'effet intergranulaire).
- L'effet chimique (faible): se manifeste par l'augmentation des résistances par la formation de nouveaux composés tels que les carboaluminates.

Concernant l'influence de E/L d'après la Figure III.4, il est nettement visible que la résistance mécanique à la compression de tous les mortiers durcis à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport E/L.

□ **L'effet du pouzzolane sur la résistance à la compression**

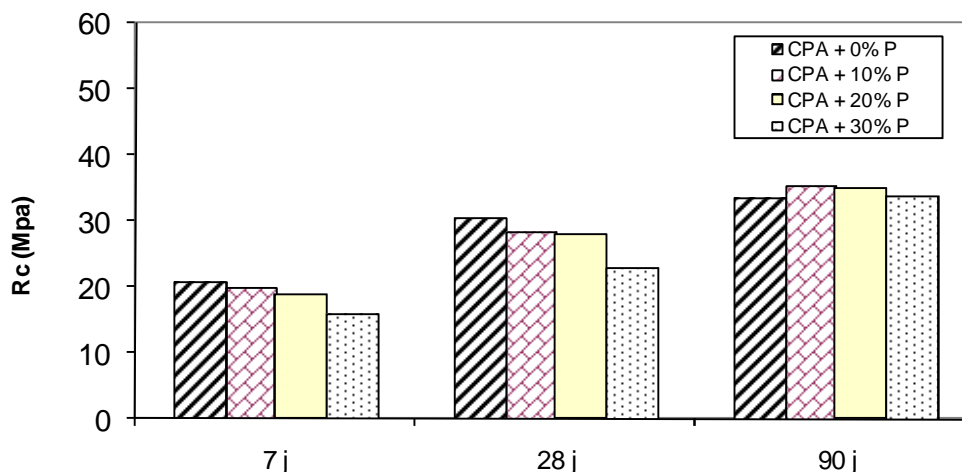


Figure III.5: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,55)

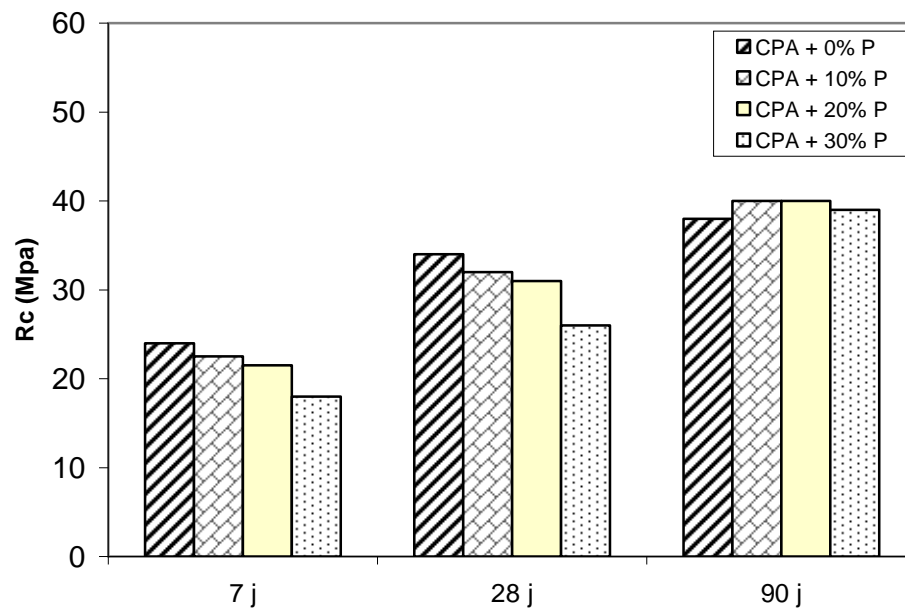


Figure III.6: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane ($E/L = 0,45$)

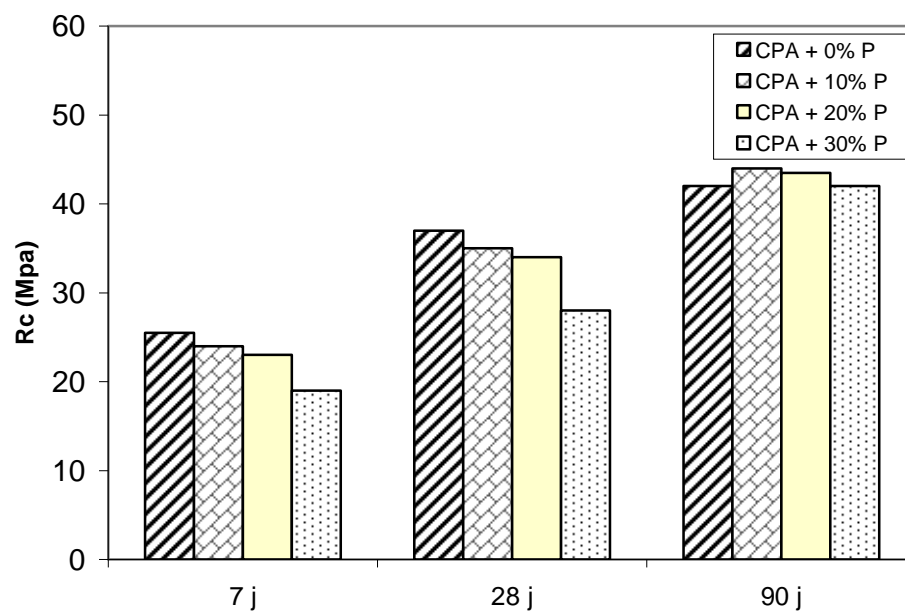


Figure III.7: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane ($E/L = 0,35$)

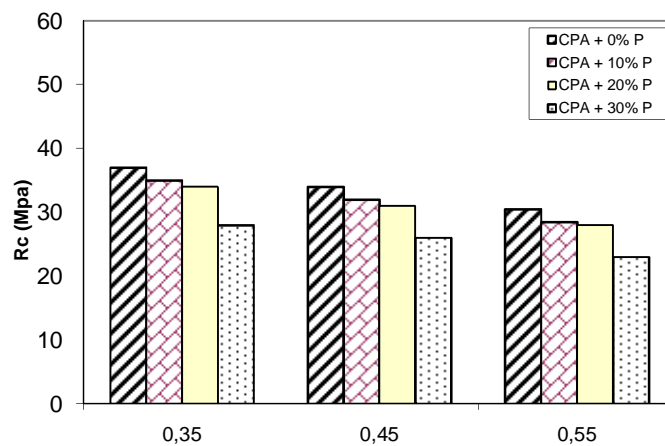


Figure III.8: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de mortier en fonction du rapport E/L et du pourcentage de pouzzolane

Les résultats de notre étude montrent l'intérêt d'utiliser la pouzzolane en substitution partielle au ciment sur les performances mécaniques des mortiers. Le ciment à base de la pouzzolane naturelle, accroît la résistance mécanique par sa réactivité avec la chaux libérée par hydratation du ciment.

À jeune âge (avant 28 jours) les résistances des différents mortiers sont inversement proportionnelles à la quantité de la pouzzolane substituée. Alors qu'au-delà de 28 jours, la résistance du mortier à base de ciment binaire composé de (CPA + 10% pouzzolane) dépasse celle du mortier à base de CPA seul, et le mortier à base de (CPA + 30% pouzzolane) développe des résistances intéressantes et croissantes pouvant probablement dépasser celle du mortier de référence à long terme, à cause de la réaction pouzzolanique lente qui pourrait se déclencher tardivement en améliorant les performances mécaniques de compression.

Ces résultats montrent qu'en fonction du temps, et pour les 28 premiers jours, il y a une faible augmentation de la résistance. Au delà de 28 jours la progression de la résistance est plus prononcée.

Concernant l'influence de E/L on voit clairement sur la Figure III.8 que la résistance mécanique à la compression de tous les mortiers durcis à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport E/L. Ce rapport exerce une grande influence sur la porosité (constituée d'un réseau

de pores plus fin et plus discontinu), car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

□ **L'effet combiné du pouzzolane- filler sur la résistance à la compression**

Pour des raisons de disponibilité et du coût modéré de filler d'une part et l'effet positif sur l'amélioration de la résistance à long terme d'autre part ; la combinaison des deux ajouts (filler + pouzzolane) comme substitution partielle au ciment paru intéressant .

Dans cette partie, on a fixé 10% de filler (taux optimal) avec $E/L = 0,35$ et varier le pourcentage de pouzzolane pour obtenir des liants ternaire en visant à optimiser le taux de pouzzolane qui donne des résistances meilleures pour notre mortier.

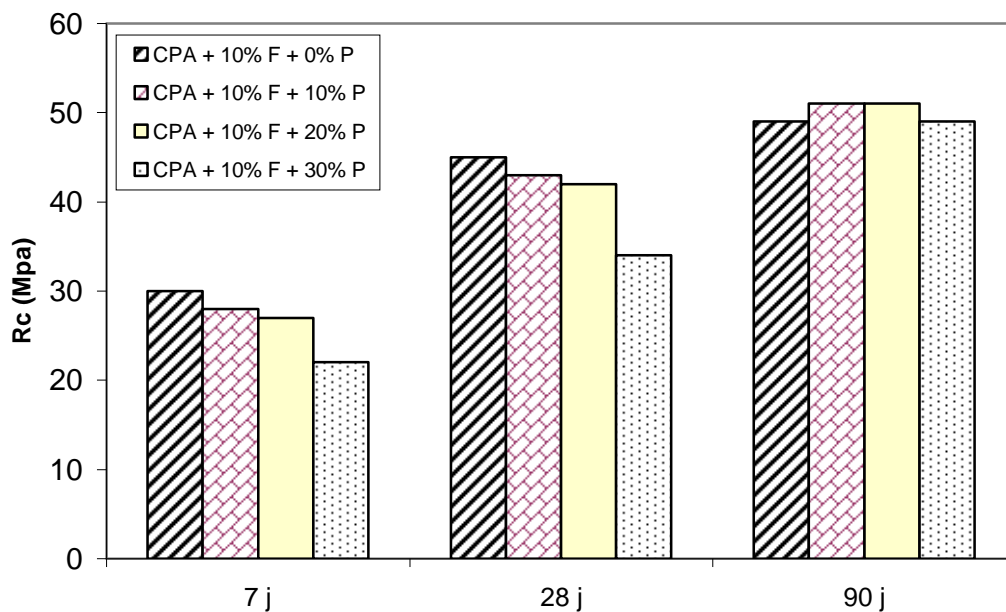


Figure III.9: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (%filler = 10%, $E/L = 0,35$)

Ces résultats montrent que l'ajout de la pouzzolane diminue les résistances mécaniques des ciments à base de 10% de filler calcaire aux jeunes âges, mais à long terme les résistances sont comparables (voir figure III-9).

□ Etude comparative des mortiers

Dans cette partie, on a étudié l'effet des ajouts utilisés sur la résistance à la compression, à la flexion et la traction par flexion des différents mortiers. De point de vue économique, pour cette raison l'étude comparative a été faite sur les mortiers conçus à base des taux de remplacement de ciment jugés optimaux définis ci dessous:

- Mortier témoin à base de Ciment (CPA).
- Mortier à base de ciment binaire composé de (CPA et 10% de filler).
- Mortier à base de ciment binaire composé de (CPA et 30% de pouzzolane).
- Mortier à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane).

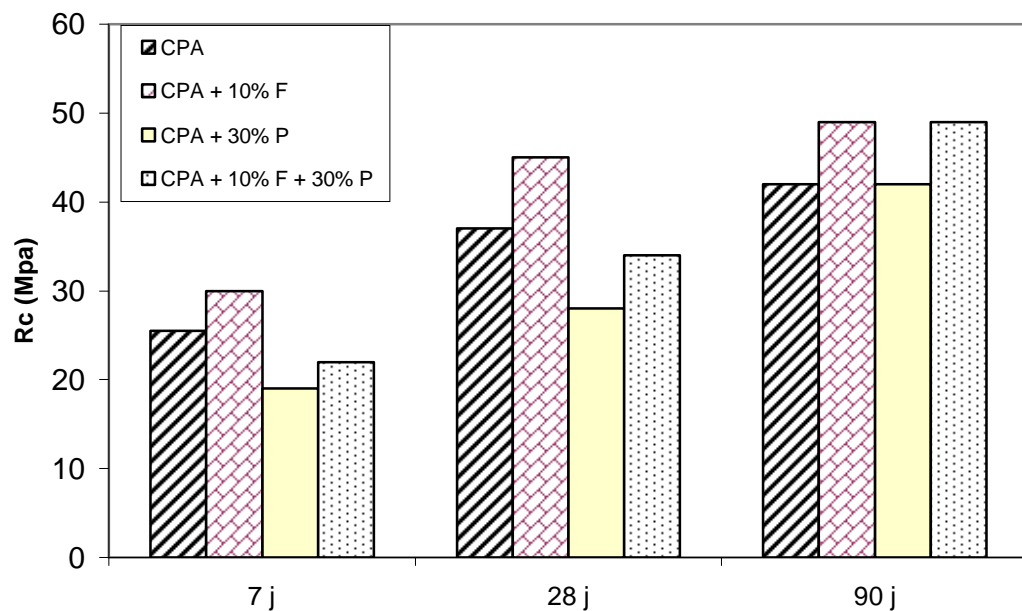


Figure III.10: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

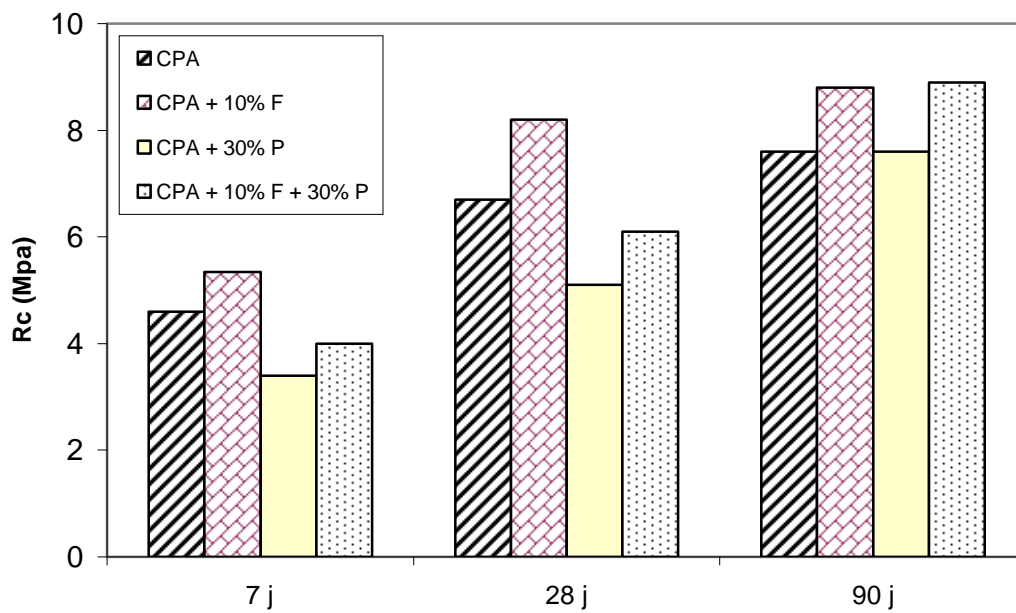


Figure III.11: Evolution de la résistance à la flexion de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

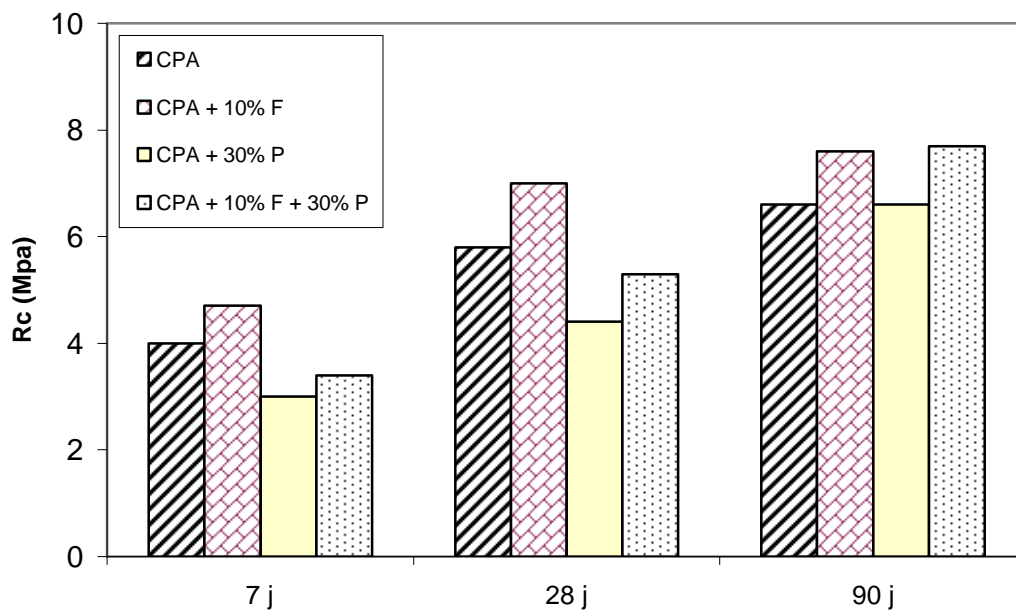


Figure III.12: Evolution de la résistance à la traction de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

D'après la figure III-10 on remarque que le taux de développement de la résistance du CPA seul à 28 et 90 jours, par rapport à 7 jours, est de 45 % et 65 % respectivement, les résistances du mortier à 10% en filler développent un taux égal à [50 %] à 28 j et [63 %] à 90 j respectivement, cela traduit le rôle physique joué par le filler à moyen terme mais d'après le

taux de développement à 90j on constate que le CPA seul présente un taux supérieur que celui avec 10% de filler ce qui explique que le filler a un effet chimique faible.

Les résistances de mortier à 30% en pouzzolane développent un taux égal à [47 %] à 28 j et [120 %] à 90 j respectivement, cela traduit le rôle chimique joué par la pouzzolane à long terme.

Le ciment ternaire (CPA + 10% filler + 30% pouzzolane) développe un taux égal à [55%] à 28 j et [123 %] à 90 j respectivement, cela traduit le rôle physique et chimique à moyen terme et surtout à long terme des ajouts.

- *Un effet physique (filler):* Une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice cimentaire.
- *Un effet chimique (pouzzolanique):* Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore les performances mécaniques à long terme des mortiers. Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [72 et 73].

Les mortiers faits à partir de liant ternaire, malgré des faibles performances à jeune âge, ont tendance à se rattraper dans le temps et à rejoindre le ciment binaire avec 10% de filler à 90 jours et même à dépasser le CPA et le ciment binaire avec 30% de pouzzolane. La réaction d'hydratation qui se manifeste entre un ciment Portland et un ajout cimentaire est plus lente.

D'après les Figures III.11 et III.12 on remarque que l'effet des ajouts utilisés sur la résistance à la flexion et à la traction par flexion est similaire à celui sur la résistance à la compression.

III.4. PROPRIETES PHYSIQUES DU LIANT

Il y a lieu de connaître deux choses:

- ☞ La quantité d'eau nécessaire au gâchage (par l'essai de consistance).
- ☞ La durée de prise (par l'essai de prise).

III.4.1. Résultats et interprétation

La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise ($T=29^{\circ}\text{C}$) de la pâte de ciment sont illustrés dans les figures ci-dessous:

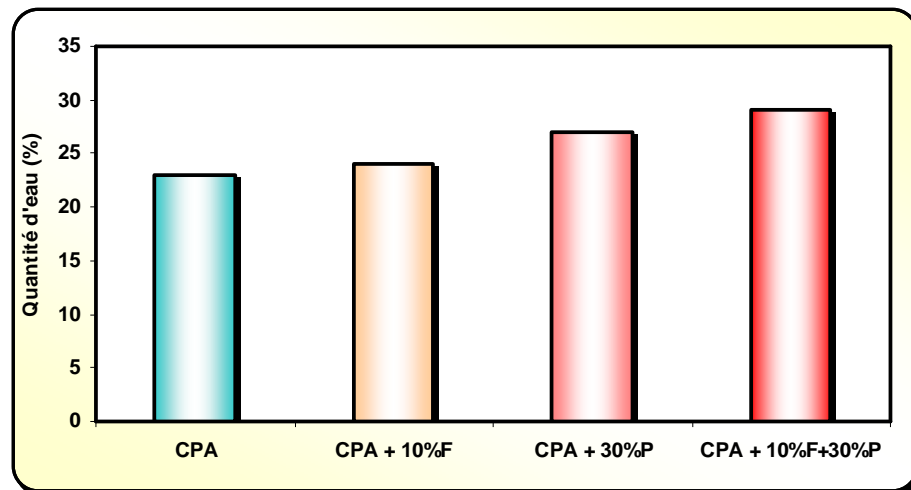


Figure III.13 : Variation de la consistance de la pâte en fonction du type de ciment.

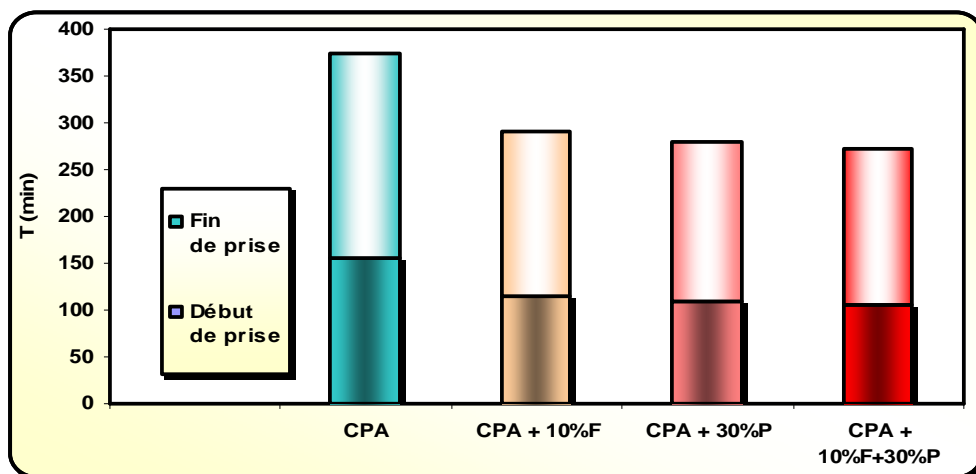


Figure III.14: Temps de début et de fin de prise de la pâte en fonction du type de ciment.

On constate nettement que la consistance normale augmente proportionnellement avec le pourcentage d'ajout (figure III-13) en raison de sa grande surface spécifique. Par contre, une diminution du temps de prise est observée (figure III-14).

On remarque que la pouzzolane ajoutée accélère la prise de la pâte, ce retard devient plus important, notamment pour (CPA + 10% F + 30% P) où le taux de substitution est élevé. Ces retards des temps de prise pourraient être dû à la diminution de la vitesse du processus d'hydratation: une partie de la quantité d'eau nécessaire au durcissement du ciment seul est consommée par la pouzzolane et le filler ou à l'effet de dilution des grains de ciment. La quantité de la portlandite libérée par le ciment hydraté et nécessaire pour la réaction pouzzolanique serait donc insuffisante.

III.5. ETUDE DU MORTIER NORMALISE

Dans le but de caractériser les liants qui font part de notre étude; l'essai sur les mortiers normalisés est indispensable. Ce dernier permet de mesurer l'activité des liants. Il s'agit des essais de compression à 28 jours. Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable normalisé. Dans cette partie on a procédé à un durcissement naturel suivi d'une conservation des éprouvettes dans de l'eau à température ambiante (20°C en moyenne) jusqu'à leur test.

Les essais se sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions (4×4×16) cm³, à raison de trois éprouvettes par essai.

III.5.1. Résultats et interprétation

Les résultats de compression en fonction du type de liant à 28 jours, sont illustrés dans la figure III.15:

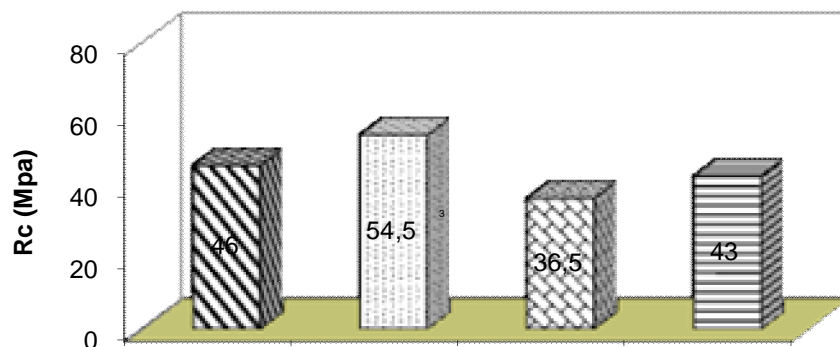


Figure III.15: Résistance du mortier à la compression à 28 jours en fonction du type de liant

Le mortier à base de (CPA + 10% F) présente la meilleure résistance à la compression que celle des autres mortiers.

Les mortiers faits à partir de liant ternaire (CPA + 10% F + 30% P) ont une résistance à la compression proche de celle de mortier à base de (CPA) et supérieure le ciment à 30% de pouzzolane.

III.6. POROSITE DU MORTIER

La porosité est déterminée par la méthode de « L'échange de méthanol » effectuée sur des tranches de $(4 \text{ mm} \pm 1)$ provenant de la subdivision d'un prisme de $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$ de mortier. La résistance à la compression est déterminée par l'écrasement des éprouvettes à chaque âge approprié.

III.6.1. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous:

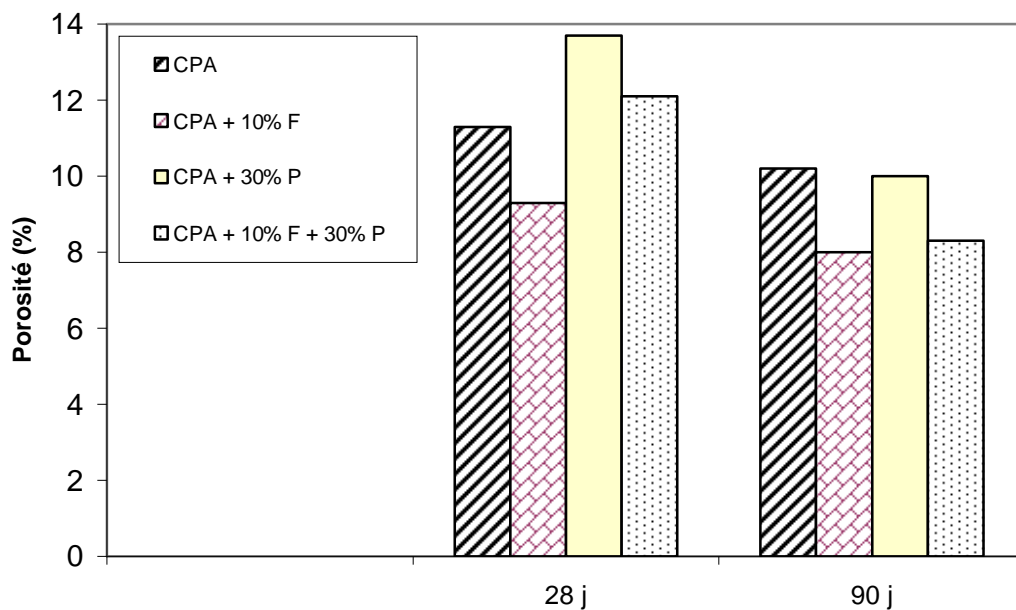


Figure III.16 : Variation de la porosité en fonction du temps et du type de ciment.

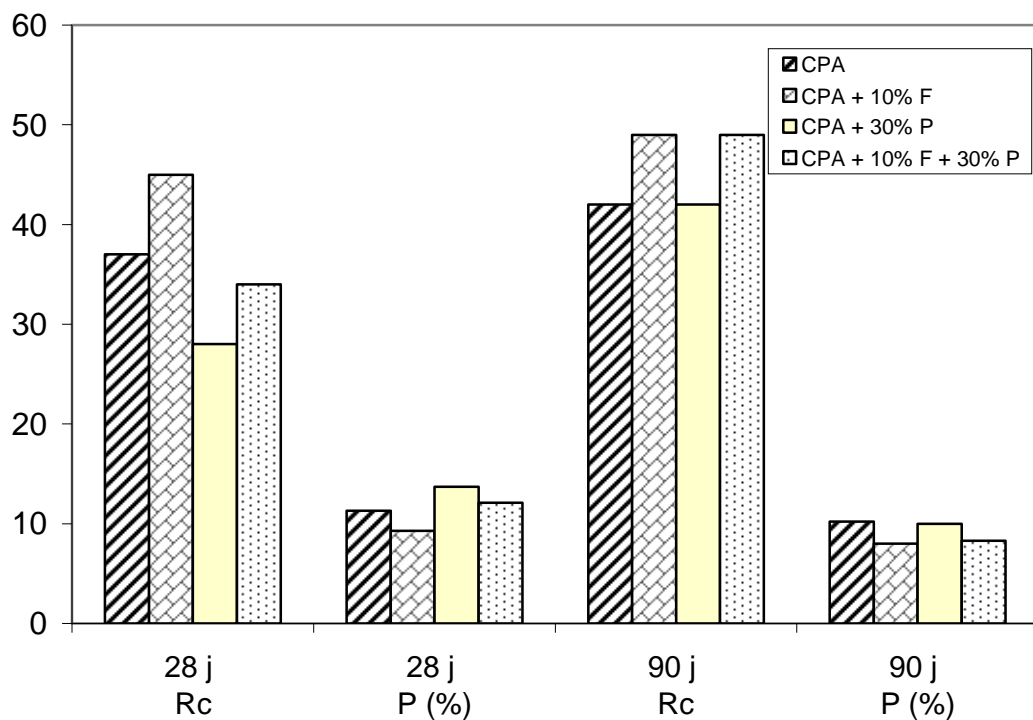


Figure III.17 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité

D'après les résultats précédents en ce qui concerne la porosité à base de méthanol, on peut remarquer ce qui suit:

À 28 jours, la porosité de mortier à base de ciment (CPA + 10% de filler) est inférieure à celle des autres mortiers.

À 90 jours, les mortiers faits à partir de liant ternaire (CPA + 10% F + 30% P) ont une porosité proche de celle de mortier à base de ciment (CPA + 10% de filler), à cause de la réaction pouzzolanique lente qui peut changer la structure des pores, en faisant diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse de la pouzzolane, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace.

D'après la Figure III.17 on remarque que les résistances à la compression des différents mortiers sont inversement proportionnelles à la porosité.

III.7. Action des eaux agressives

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification-dessiccation, ...) ou mécaniques.

Le sulfate de sodium, très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et d'ettringite expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment.

La dissociation de MgCl_2 , l'agent le plus actif dans l'attaque des ciments, libère Mg^{2+} qui substitue Ca^{2+} dans $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et dans C-S-H pour former M-S-H sans propriétés liantes. Son action se résume par sa dissociation en libérant ainsi les ions chlore qui réagissent avec les aluminates, pour former le monochloroaluminate [ou sel de Friedel]. Ces mêmes ions chlores peuvent s'insérer dans le réseau cristallin de C-S-H et créer une structure alvéolaire, d'où la formation d'un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus fragiles quand la qualité de la chaux dissoute augmente.

Il faut déterminer le coefficient de qualité (A) qui est défini par la formule suivante:

$$A = R_s/R_{ep}$$

R_s : Résistance à la compression de ciment immergé dans différentes solutions agressives.

R_{ep} : Résistance à la compression de ciment immergé dans l'eau potable.

Le ciment est d'autant plus durable que le coefficient de qualité est plus élevé.

La résistance aux eaux agressives est déterminée avec un rapport fixe ($E/L = 0,35$). Le durcissement des éprouvettes se fait dans les conditions naturelles (cure sous l'eau) pendant 7 jours (temps zéro), puis les mortiers durcis sont immergées séparément pendant 28 j et 90 j dans les solutions suivantes : Eau potable, MgCl_2 (5 %) et Na_2SO_4 (5 %).

III.7.1 Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous:

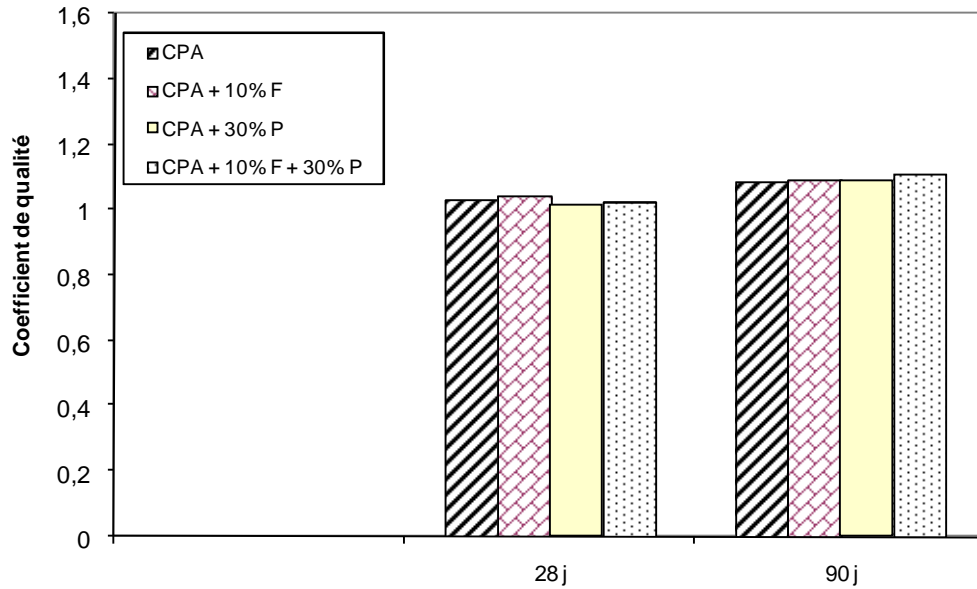


Figure III.18 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution $MgCl_2$ en fonction du temps et du type de ciment

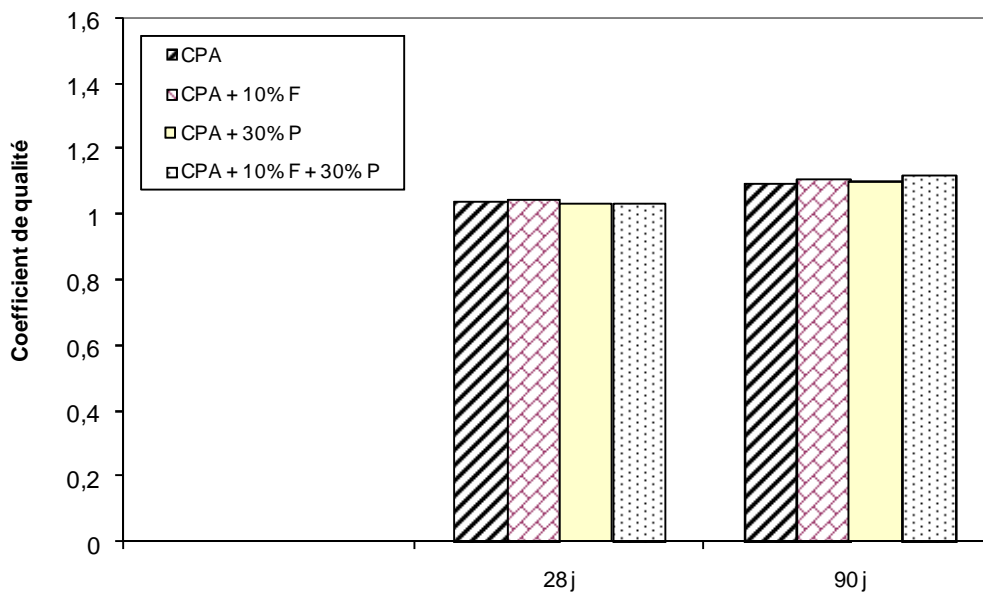


Figure III.19 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du type de ciment

L'une des raisons initiales pour utiliser divers ajouts minéraux est leur influence sur la résistance aux attaques chimiques. Cette résistance n'est pas seulement due à la composition chimique de ciment, mais aussi à sa microstructure.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que le coefficient de qualité (A), dans les deux solutions agressives, explique nettement la résistance au lessivage des ciments avec ajouts aux agents agressifs.

À 90 jours, les ciments avec ajouts se comportent mieux que le ciment Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface, riche en gel de silice et d'alumine.

Les ciments immergés dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 90 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation de ciment.

Pour la solution de MgCl_2 , la réduction d'agressivité est directement liée à la présence des chlorures. Ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallise au moins partiellement, sous une forme non expansive à partir de la solution.

III.8. CONCLUSION

A la lumière des essais réalisés dans le cadre de cette étude nous avons permis d'extraire certains nombres de points:

Les résistances en compression augmentent lors de la substitution des fillers calcaires traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des mortiers par double effet: physique et chimique.

- Un effet physique: Une amélioration des propriétés mécaniques par un remplissage en corrigeant la granulométrie des éléments fins du ciment (l'effet intergranulaire).
- Un effet chimique (faible): Augmentation des résistances par la formation de nouveaux composés tel que les carboaluminates.

Les résultats de notre étude montrent l'intérêt d'utiliser la pouzzolane en substitution partielle au ciment sur les performances mécaniques des mortiers. Le ciment à base de la pouzzolane naturelle, accroît la résistance mécanique par sa réactivité avec la chaux libérée par hydratation du ciment.

Le ciment ternaire (CPA + 10% filler + 30% pouzzolane) développe un taux égal à [55%] à 28 j et [123 %] à 90 j respectivement, cela traduit le rôle physique et chimique à moyen terme et surtout à long terme des ajouts.

- *Un effet physique (filler):* Une amélioration des propriétés mécaniques par une densification de la matrice cimentaire.
- *Un effet chimique (pouzzolanique):* Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore les performances mécaniques à long terme des mortiers. Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains). [72 et 73].

Les mortiers faits à partir de liant ternaire, malgré des faibles performances à jeune âge, ont tendance à se rattraper dans le temps et à rejoindre le ciment binaire avec 10% de filler à 90 jours et même à dépasser le CPA et le ciment binaire avec 30% de pouzzolane. La réaction d'hydratation qui se manifeste entre un ciment Portland et un ajout cimentaire est plus lente.

La consistance normale augmente proportionnellement avec le pourcentage d'ajout en raison de sa grande surface spécifique. Par contre, une diminution du temps de prise est observée.

On remarque que la pouzzolane ajoutée retarde la prise de la pâte, ce retard devient plus important, notamment pour (CPA + 10% F + 30% P) où le taux de substitution est élevé. Ces retards des temps de prise pourraient être dû à la diminution de la vitesse du processus d'hydratation: une partie de la quantité d'eau nécessaire au durcissement du ciment seul est consommée par la pouzzolane et le filler ou à l'effet de dilution des grains de ciment. La quantité de la portlandite libérée par le ciment hydraté et nécessaire pour la réaction pouzzolanique serait donc insuffisante.

Les mortiers faits à partir de liant ternaire à 90 jours, (CPA + 10% F + 30% P) à une porosité proche de celle de mortier à base de ciment (CPA + 10% de filler), à cause de la réaction pouzzolanique lente qui peut changer la structure des pores, fait diminuer le nombre de gros pores et elle augmente celui de petits pores. Ce changement est fonction de la finesse de la pouzzolane, plus les particules sont fines, plus leur rôle est efficace.

L'une des raisons initiales pour utiliser divers ajouts minéraux est leur influence sur la résistance aux attaques chimiques. Cette résistance n'est pas seulement due à la composition chimique de ciment, mais aussi à sa microstructure.

Les ciments avec ajouts se comportent mieux que le ciment Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface, riche en gel de silice et d'alumine.

Les ciments immergés dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 90 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation de ciment.

Pour la solution de MgCl_2 , la réduction d'agressivité est directement liée à la présence des chlorures. Ceux-ci accroissent la solubilité du gypse et de l'ettringite qui cristallise au moins partiellement, sous une forme non expansive à partir de la solution.

Pour compléter notre programme d'essais, on a confectionné des éprouvettes cubiques, prismatiques et cylindriques dans le chapitre prochain pour tester les caractéristiques suivantes: la résistance de compression, de flexion et de traction par fendage du béton.

CHAPITRE IV

ETUDE DU BÉTON

IV.1. INTRODUCTION

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte de ciment hydratée. L'étude de la technique du béton amène à celle de la structure du mélange et des facteurs déterminant la résistance, la durabilité du béton.

On doit rechercher un mélange compact, c'est-à-dire une haute compacité et une faible quantité d'eau de gâchage. Si l'on recherche une résistance à la traction, on devra en outre, s'assurer d'une bonne adhérence entre les liants et l'agrégat et d'un parfait enrobage. Une qualité qui paraît avoir aussi une grande importance est l'étanchéité, c'est elle qui s'oppose au passage des fluides et à la corrosion des armatures. Le béton est d'autant plus étanche, qu'il est plus compact et gâché avec moins d'eau.

IV.2. COMPOSITION ET DOSAGE

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal de différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en question.

Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui donne des résultats exacts et qui semble être la moins connue. C'est la méthode de « *B.SCRAMTAIV* ».

Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé.

IV.2.1. Données de base

- ✎ D_{max} (diamètre des granulats).
- ✎ Résistance à la compression après 28 jours.
- ✎ Ouvrabilité (AC).
- ✎ Caractéristiques techniques des matières premières.

IV.2.2. Méthode de calculDétermination du dosage en eau

$E = F$ (AC, D_{max}, Nature des granulats)

Calcul du rapport C/E

Pour un béton courant : $C/E \leq 2.5$, pour béton plastique et fluide.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Pour un béton de qualité : $C/E > 2.5$, pour béton ferme et très ferme.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A_1 \cdot R_c} - 0,5$$

R_b : La résistance à la compression à 28 jours de durcissement normal.

R_c : L'activité du ciment.

(A, A₁) : coefficients de qualité des matériaux utilisés (granulats et ciment)

- Bonne qualité : A= 0,65, A₁=0,43
- Qualité moyenne : A= 0,60, A₁=0,40
- Mauvaise qualité : A= 0,55, A₁=0,37

Calcul du dosage en ciment $C = C/E \times E$

Calcul du dosage en agrégats (pierres concassées)

$$G = 35G_1 + 65G_2$$

G₁ : (7/15)

G₂ : (15/25)

$$G = \frac{1000}{V_V \cdot \frac{\alpha}{\gamma_{app}^G} + \frac{1}{\rho_{abs}^G}}$$

V_V : porosité des pierres concassées. $V_V = 1 - \frac{\gamma_{app}}{\rho_{abs}}$

Coefficient d'écartement de grains $\alpha = 1.24$ (d'après l'abaque).

Calcul du dosage en sable

$$S = \left[1000 - \left(\frac{G}{\rho_{abs}^G} + \frac{C}{\rho_{abs}^C} + E \right) \right] \cdot \rho_{abs}^S$$

IV.2.3. Composition du béton

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne R_{b28j} et dont la consistance soit telle que son affaissement au cône de 5 cm. Dans tous les essais le rapport $L/E \leq 2,5$, $A = 0.6$, $D_{max} = 20$ mm et $G/S = 2.4$. Le tableau IV.1 donne les différents dosages des matériaux entrant dans la confection des différents bétons:

Tableau IV.1. Compositions des bétons relatifs aux essais de résistances mécaniques

| Type de ciment | Ciment (g) | Pouzzolane (g) | Filler (g) | S (g) | G (g) | E/L |
|----------------------|---------------|-------------------|---------------|----------|----------|------|
| CPA | 370 | / | / | 534 | 1280 | 0.50 |
| CPA + 10%F | 333 | / | 37 | 534 | 1280 | 0.53 |
| CPA + 30%P | 259 | 111 | / | 534 | 1280 | 0.55 |
| CPA + 10%F + 30%P | 222 | 111 | 37 | 534 | 1280 | 0.57 |

IV.3. PROPRIETES MECANIQUES

IV.3.1. Programme expérimental

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm³, prismatiques ($10 \times 10 \times 40$) cm³ et cylindriques (16×32) cm², respectivement.

On a confectionné quatre sortes de béton (béton témoin (CPA), béton à base de ciment binaire composé de (CPA + 10% filler), béton à base de ciment binaire composé de (CPA + 30% pouzzolane) et béton à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane)), chaque série comprend trois échantillons.

Les éprouvettes sont conservées à l'eau potable pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température est maintenue constante à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, car l'évaporation précoce de l'eau peut interrompre rapidement l'hydratation du ciment.

IV.3.2. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus des résistances à la compression, flexion et traction par fendage à 7 j, 28 j et 90 j, pour les trois sortes de béton, sont illustrés dans les figures ci-dessous:

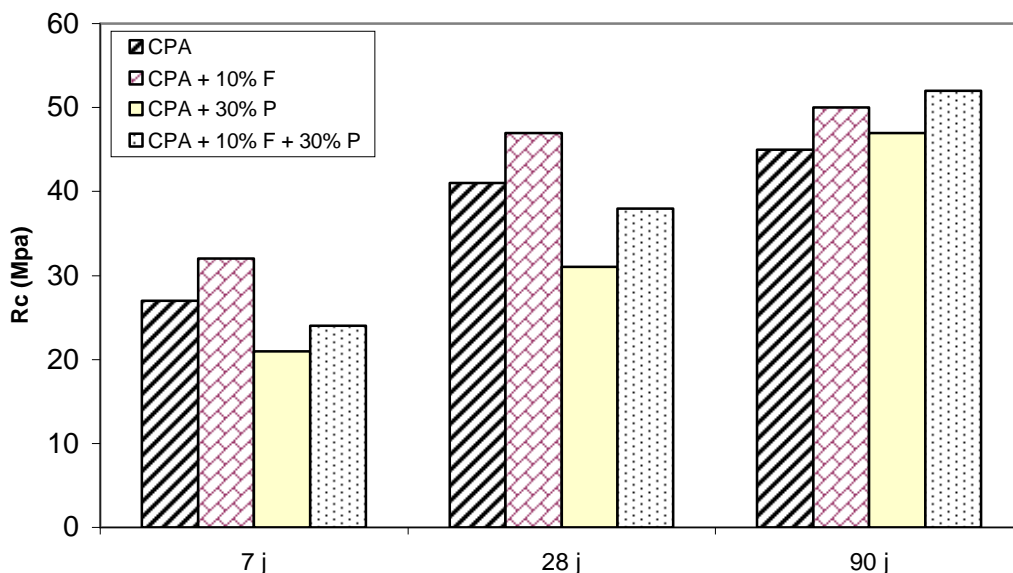


Figure IV.1 : Résistance à la compression du béton en fonction du temps et du type de ciment

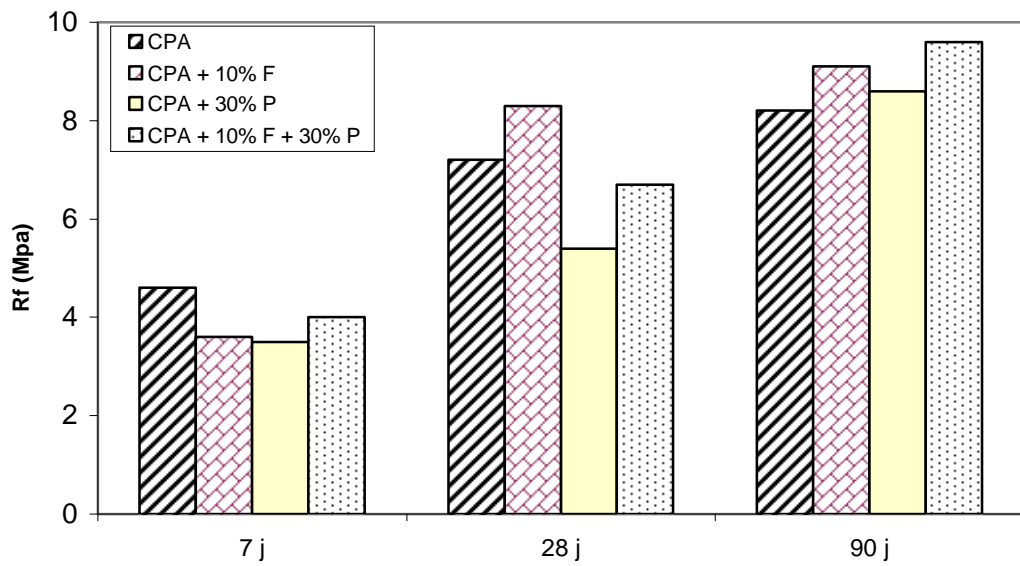


Figure IV.2 : Résistance à la flexion du béton en fonction du temps et du type de ciment

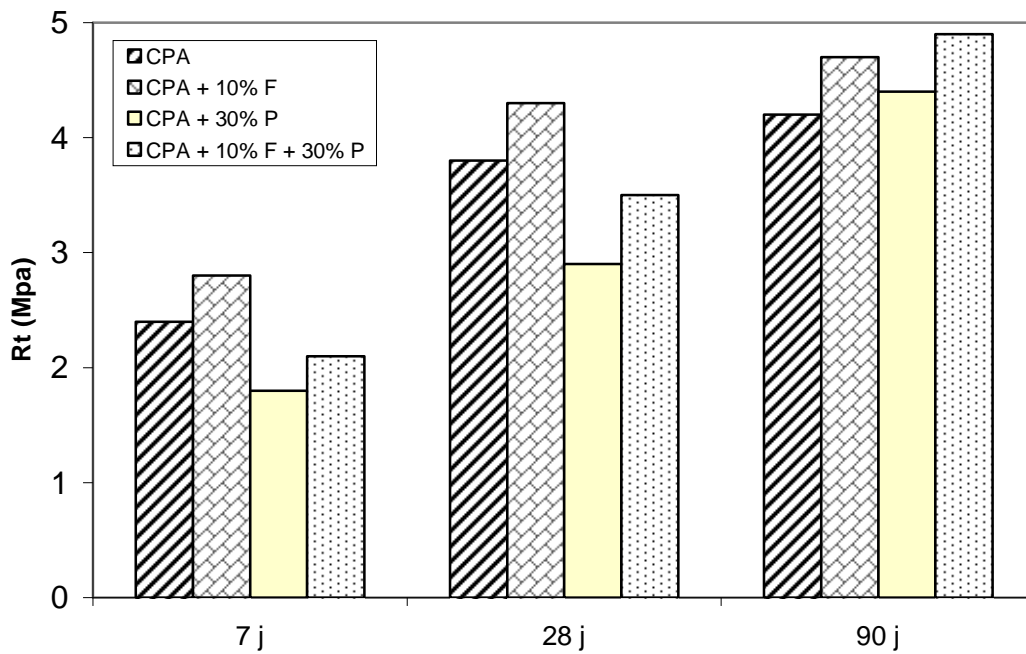


Figure IV.3 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction du temps et du type de ciment

Pour confirmer le résultat de mortier, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de béton qui ont donné par suite la même variation de résistance de compression que celle donnée par le mortier.

L'évolution des résistances en fonction de l'âge montre, que pendant les premiers âges, les résistances sont faibles pour tous les échantillons. Tandis que les périodes qui suivent, les résistances augmentent sensiblement (Figure IV.1, IV.2 et IV.3) Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction pouzzolanique avec la portlandite (CH).

Les résistances en compression à long terme d'un béton préparé avec des ciments composés sont généralement meilleures que celles d'un béton avec un ciment Portland seul, traduisant ainsi l'amélioration de la compacité de béton.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que la résistance à la compression, montre que le béton à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane) est supérieur que les autres bétons, ce qui permet d'économiser 40% de la teneur de ciment, ainsi en obtient une réduction de prix de revient de ciment et de béton.

La résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. Comme on a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.

IV.4. L'INFLUENCE DU MODE DE CONSERVATION SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance mécanique à la compression augmente dans le milieu humide, du fait que ce dernier empêche l'évaporation de l'eau du béton durant son durcissement, et permet la continuité des réactions d'hydratation et par suite le développement de la résistance mécanique. Donc le milieu humide est favorable pour les bétons.

IV.4.1. Résultats et interprétation

Les résultats des essais à la rupture en compression à 28 et 90 jours de durcissement des éprouvettes conservées dans l'eau et d'autres conservées à l'air sont représentés sur les figures IV.4 et IV.5.

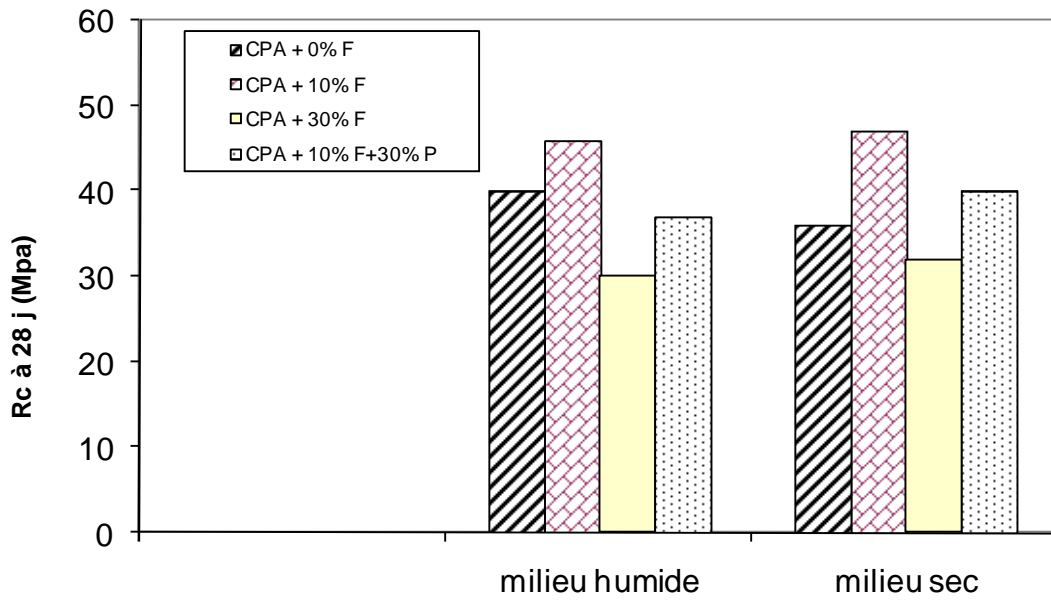


Figure IV.4 : La résistance en compression après 28 jours de durcissement en fonction du mode de conservation.

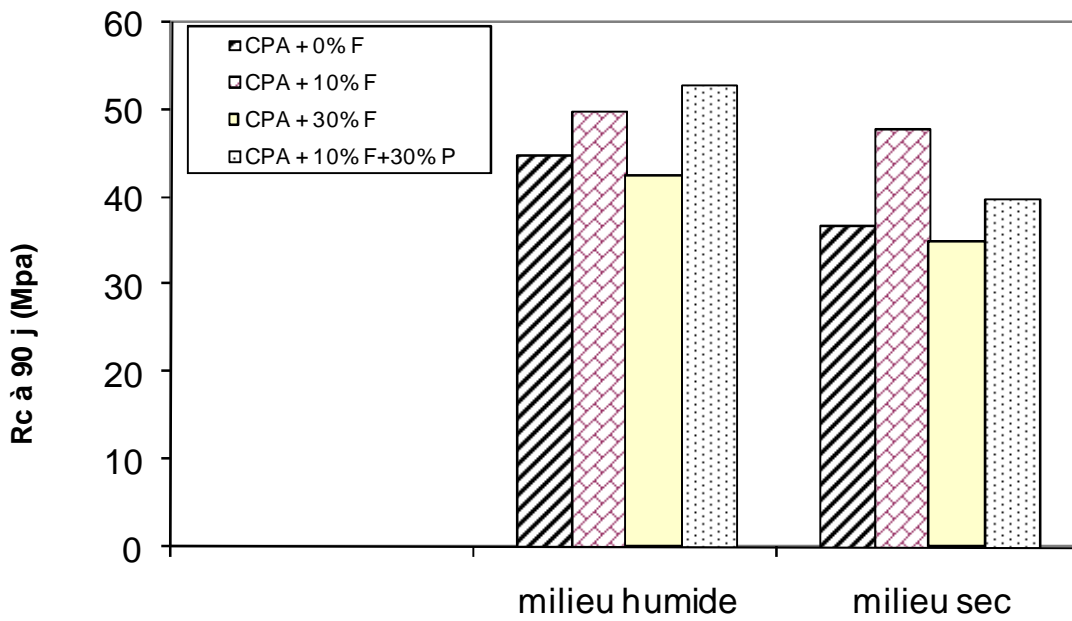


Figure IV. 5 : La résistance en compression après 90 jours de durcissement en fonction du mode de conservation.

Le béton avec ajout conservé à l'air à 28 jours développe des résistances presque supérieures à celles du béton humide, ce qui peut être expliqué par l'évolution des réactions d'hydratation activées par la température ambiante assez élevée par rapport à celle d'eau.

Au-delà de 28 jours le milieu humide est indispensable pour augmenter les résistances. La figure IV.5 présente la résistance en compression après 90 jours de durcissement dans les deux milieux sec et humide.

La résistance obtenue après 90 jours de durcissement en milieu sec reste presque du même ordre que celle obtenue à 28 jours de durcissement ce qui est lié à la limitation des réactions d'hydratation par l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, ce qui a été confirmé par [1].

IV.5. ATTAQUE SULFATIQUE

L'attaque externe, la cristallisation de l'hydrate se fait dans un milieu confiné tel que les pores et capillaires et son expansion donne naissance sur les parois du réseau poreux à des pressions de traction causant inévitablement expansion, fissuration et éclatement du béton [9]. Les sulfates peuvent altérer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques [26].

- Expansion.
- Perte de propriétés liantes des C-S-H.

Dans ce cadre, le durcissement des éprouvettes se fait dans les conditions naturelles (cure sous l'eau) pendant 7 jours (temps zéro), puis les bétons durcis sont immergés séparément pendant 28 j et 90 j dans les solutions suivantes : Eau potable et Na_2SC_4 (5 %).

IV.5.1. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous :

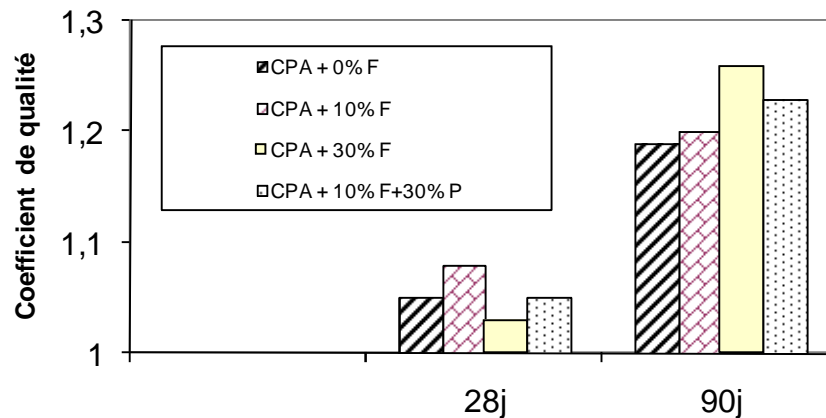


Figure IV. 6: La variation du coefficient de qualité des bétons immergés dans la solution en fonction du temps et du type de ciment

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que le coefficient de qualité (A) dans la solution Na_2SO_4 , explique nettement la résistance des bétons avec ajouts au sulfate.

Les bétons immergés dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 90 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, probablement à cause de la compacité élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation de ciment.

IV.6. CONCLUSION

A la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, des points majeurs méritent d'être soulignés:

Pour confirmer le résultat de mortier, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de béton qui ont donné par suite la même variation de résistance de compression que celle donnée par le mortier.

Les résistances en compression à long terme d'un béton préparé avec des ciments composés sont généralement meilleures que celles d'un béton avec un ciment Portland seul, traduisant ainsi l'amélioration de la compacité de béton.

La résistance à la compression, montre que le béton à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane) est supérieur que les autres bétons, ce qui permet d'économiser 40% de la teneur de ciment, ainsi on obtient une réduction de prix de revient de ciment et de béton.

La résistance à la flexion et à la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. Comme on a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.

Le béton avec ajout conserve a l'air a 28 jours développe des resistances presque supérieures a celles du béton humide, ce qui peut être explique par l'évolution des réactions d'hydratation activées par la temperature ambiante assez élevée par rapport à celle d'eau. Au-delà de 28 jours le milieu humide est indispensable pour augmenter les resistances.

Le coefficient de qualité (A) dans la solution Na_2SO_4 , explique nettement la resistance des bétons avec ajouts au sulfate.

Les bétons immerges dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 90 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, probablement à cause de la compacité élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats obtenus dans la présente étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

Les résistances en compression de la pâte du ciment augmentent lors de la substitution des fillers calcaires traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des mortiers par double effet: physique et chimique.

Les résultats de notre étude montrent l'intérêt d'utiliser la pouzzolane en substitution partielle au ciment sur les performances mécaniques des mortiers. Le ciment à base de la pouzzolane naturelle, accroît la résistance mécanique par sa réactivité avec la chaux libérée par hydratation du ciment.

Les mortiers faits à partir de liant ternaire, malgré des faibles performances à jeune âge, ont tendance à se rattraper dans le temps et à rejoindre le ciment binaire avec 10% de filler à 90 jours et même à dépasser le CPA et le ciment binaire avec 30% de pouzzolane. La réaction d'hydratation qui se manifeste entre un ciment Portland et un ajout cimentaire est plus lente.

La consistance normale augmente proportionnellement avec le pourcentage d'ajout en raison de sa grande surface spécifique. Par contre, une diminution du temps de prise est observée.

On remarque que la pouzzolane ajoutée retarde la prise de la pâte, ce retard devient plus important, notamment pour (CPA + 10% F + 30% P) où le taux de substitution est élevé. Cette substitution provoque un retard considérable des temps de prise, ce qui peut être une qualité recherchée pour les gâchages en temps froid.

La contribution liante des additions minérales à un double effet, l'une un rôle structurant des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique et l'autre un rôle quantitatif sur la réduction de la porosité. Cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité à une meilleure résistance à l'agression chimique.

Pour confirmer le résultat de mortier, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de béton qui ont donné par suite la même variation de résistance de compression que celle donnée par le mortier.

Les résistances en compression à long terme d'un béton préparé avec des ciments composés sont généralement meilleures que celles d'un béton avec un ciment Portland seul, traduisant ainsi l'amélioration de la compacité de béton.

La résistance à la compression, montre que le béton à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane) est supérieure que les autres bétons, ce qui permet d'économiser 40% de la teneur de ciment, ainsi on obtient une réduction de prix de revient de ciment et de béton.

La résistance à la flexion et à la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. Comme on a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.

Le béton avec ajout conserve à l'air à 28 jours développe des résistances supérieure à celles du béton humide, ce qui peut être expliqué par l'évolution des réactions d'hydratation activées par la température ambiante assez élevée par rapport à celle de l'eau. Au-delà de 28 jours le milieu humide est indispensable pour augmenter les résistances.

Le coefficient de qualité A dans la solution Na_2SO_4 explique nettement la résistance des bétons avec ajouts au sulfate.

Une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 90 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact, probablement à cause de la compacité élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs.

RECOMMANDATIONS

Pour compléter ce travail nous recommandons de:

- Faire des analyses par diffraction aux rayons (X) sur des mortiers à base de ciment ternaire composé de (10% de filler + 30% de pouzzolane) à long terme afin de voir l'évolution de la réaction pouzzolanique dans le temps.
- Faire des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) pour déterminer la morphologie des hydrates formés.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences et à de nouveaux besoins.

La société et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation d'énergie lors de la fabrication du ciment.

Les besoins des divers intervenants dans un projet de construction ont évolué. Ainsi, les maîtres d'ouvrages exigent un béton durable. Cette notion de durabilité inclut à la fois son intégration dans l'environnement, la durée de vie du matériau et le processus de vieillissement.

Face à ces besoins, une des caractéristiques les plus importantes des ciments est la texture, c'est à dire la façon dont s'arrangent la matière et les pores qui composent le matériau. Elle influence à la fois leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés de transport. Ces dernières sont intimement liées à la résistance mécanique et chimique du ciment dans de nombreux problèmes de durabilité (transport de chlore,...). La compacité du matériau ainsi que la taille et la répartition des pores a une grande influence sur la résistance mécanique et par conséquent sur les performances des bétons.

L'accroissement des performances mécaniques des matériaux cimentaires hydratés a été jusqu'ici obtenu par la réduction de la porosité. Cette baisse de la porosité est obtenue grâce à l'emploi des ajouts cimentaires.

L'utilisation des ajouts dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde.

Actuellement en Algérie la pouzzolane est seulement utilisée comme simple ajout pendant la fabrication du ciment alors qu'il est possible de faire meilleur usage en le considérant comme étant une addition minérale partiellement substituable au ciment aussi bien que les autres additions connues.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle disponible en grandes quantités dans la région ouest de l'Algérie n'est qu'à ses débuts. Dans nos cimenteries, notamment celle de Béni-Saf et de Zahana, elle est utilisée en faibles quantités (15% en moyenne) comme ajouts au clinker seulement lors du broyage, alors que les études faites sont concluantes sur les revalorisations de ce matériau, tant technique qu'économique, et préconisent une meilleure utilisation comme substitution au ciment à différentes proportions.

Dans le monde, l'utilisation de la pouzzolane connaît une grande évolution pour sa valorisation et s'applique à l'utiliser dans divers domaines en dehors des cimenteries et des constructions.

Dans le domaine de la construction du bâtiment, les fines calcaires issues du concassage des granulats ont longtemps été considérées comme des résidus inutilisables et l'une des principales causes de rejet des sables de construction concassés alors qu'ils peuvent avoir un rôle bénéfique dans les matrices cimentaires.

La valorisation peut passer par l'introduction de fines dans les matrices cimentaires, ces fines pouvant éventuellement remplacer une partie du ciment, comme l'ont montré certaines recherches dans d'autres pays.

A travers cette étude on distingue les objectifs principaux suivants:

- Caractérisation physique et chimique des ajouts cimentaires utilisées (pouzzolane et filler).
- Etude de l'influence de ces ajouts sur les propriétés physiques et mécaniques ainsi que sur la durabilité des mortiers.
- Une étude sur le béton à partir des taux de substitution optimaux trouvés pour les mortiers a fin d'apprécier les caractéristiques mécaniques de ce dernier.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, qui comporte une synthèse bibliographique sur les méthodes de productions des ajouts naturels ou artificiels, suivie par une bibliographie concernant l’hydratation de ciment portland avec les différents ajouts, ainsi que la composition des hydrates obtenus, clôturée par un certain nombre de connaissance de base sur les performances de durabilité. Ce chapitre décrit les caractéristiques physico-chimiques des composants du béton: l’eau, les granulats, le ciment et les ajouts. Les ressources de ces ajouts naturels ou artificiels avec leur historique, les méthodes de production de ces ajouts et leur classification, et une bibliographie concerne les principales réactions chimiques, les facteurs qui affectent la réactivité des ajouts, ainsi que les transformations physico-mécaniques liées aux processus d’hydratation, telles que la porosité et les travaux réalisés sur ce dernier, suivis par des synthèses bibliographiques sur les performances de durabilité.
- Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, pouzzolane, filler, sable et gravier) pour la confection des bétons et des mortiers.
- Le troisième chapitre concerne l’étude du mortier. Des essais ont été effectués sur des éprouvettes pour déterminer les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des différents mortiers utilisés.
- Le quatrième chapitre consiste à l’étude du béton à base du ciment à la pouzzolane, au filler et à base des deux liants combinés.
- Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| <i>Figure I.1 : Pouzzolane naturelle granulée</i> | 18 |
| <i>Figure I.2: Teneur en chaux libre dans différentes pâtes de ciment pouzzolaniques</i> | 20 |
| <i>Figure I.3 : Hydratation du clinker de ciment Portland</i> | 28 |
| <i>Figure I.4 : Hydratation du ciment à la pouzzolane</i> | 28 |
| <i>Figure I.5: Effet de pouzzolane sur la chaleur d'hydratation de ciment Portland</i> | 29 |
| <i>Figure I.6: Chaleur d'hydratation en fonction du temps</i> | 29 |
| <i>Figure I.7: Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton</i> | 33 |
| <i>Figure I.8 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci</i> | 34 |
| <i>Figure I.9 : Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80 % d'hydratation dans l'eau</i> | 35 |
| <i>Figure I.10 : Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau</i> | 36 |
| <i>Figure I.11 : Influence du degré d'inter connectivité sur la perméabilité de la pâte</i> | 36 |
| <i>Figure I.12 : Lessivage de la chaux dans une éprouvette de béton en fonction d'eau percolée et la teneur en pouzzolane du ciment</i> | 40 |
| <i>Figure I.13 : Pertes de masse en fonction du temps d'éprouvettes de mortier confectionné avec différents ciments, conservées dans une eau douce de PH 5 à 5.5</i> | 40 |
| <i>Figure I.14 : L'efficacité de laitiers à réduire les expansions dues aux sulfates</i> | 42 |
| <i>Figure I.15 : Expansion d'un béton à base de ciment Portland (-) et ciment pouzzolanique (- --) en fonction de la durée d'immersion dans les eaux agressives</i> | 43 |
| <i>Figure I.16: Pénétration de quelques sels de dégivrage dans les ciments portlands et pouzzolanique</i> | 44 |
| <i>Figure I.17: Coefficient de diffusion d'ions Cl⁻ en fonction de E/C pour des pâtes exposées à une solution de NaCl</i> | 45 |
| <i>Figure I.18 : Effet du type de ciment sur la pénétrabilité d'ions de chlorure après mois d'exposition à l'eau de mer</i> | 47 |
| <i>Figure I.19 : Variation de la concentration des chlorures libre en fonction de la quantité de C3A contenue dans le ciment</i> | 48 |

| | |
|--|----|
| <i>Figure I.20 : Chute de la résistance à la compression de différents types de ciment après la percolation des sulfates</i> | 53 |
| <i>Figure I.21 : Effet de la substitution de ciment portland avec de la pouzzolane naturelle sur l'expansion de mortiers</i> | 55 |
| <i>Figure I.22 : La variation de la résistance à la compression de pâtes de ciment immergées dans des solutions sulfatique en fonction de la durée de cure</i> | 55 |
| <i>Figure II.1 : Courbe granulométrique du sable</i> | 64 |
| <i>Figure II.2 : Courbe granulométrique de la pierre concassée</i> | 64 |
| <i>Figure III.1: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du filler (E/L= 0,55)</i> | 69 |
| <i>Figure III.2: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du filler (E/L= 0,45)</i> | 69 |
| <i>Figure III.3: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du filler (E/L= 0,35)</i> | 70 |
| <i>Figure III.4: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du rapport E/L et du pourcentage du filler</i> | 70 |
| <i>Figure III.5: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,55)</i> | 71 |
| <i>Figure III.6: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,45)</i> | 72 |
| <i>Figure III.7: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,35)</i> | 72 |
| <i>Figure III.8: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de ciment en fonction du rapport E/L et du pourcentage du pouzzolane</i> | 73 |
| <i>Figure III.9: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (%filler = 10%, E/L= 0,35)</i> | 74 |
| <i>Figure III.10: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du type de ciment (E/L= 0,35)</i> | 75 |
| <i>Figure III.11: Evolution de la résistance à la flexion de ciment en fonction du temps et du type de ciment (E/L= 0,35)</i> | 76 |
| <i>Figure III.12: Evolution de la résistance à la traction de ciment en fonction du temps et du type de ciment (E/L= 0,35)</i> | 76 |

| | |
|---|----|
| <i>Figure III.13 : Variation de la consistance de la pâte en fonction du type de ciment</i> | 78 |
| <i>Figure III.14: Temps de début et de fin de prise de la pâte en fonction du type de ciment</i> | 78 |
| <i>Figure III.15: Résistance du mortier à la compression à 28 jours en fonction du type de ciment</i> | 79 |
| <i>Figure III.16 : Variation de la porosité en fonction du temps et du type de ciment</i> | 80 |
| <i>Figure III.17 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité</i> | 81 |
| <i>Figure III.18 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution MgCl₂ en fonction du temps et du type de ciment</i> | 83 |
| <i>Figure III.19 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution Na₂SO₄ en fonction du temps et du type de ciment</i> | 83 |
| <i>Figure IV.1 : Résistance à la compression du béton en fonction du temps et du type de ciment</i> | 91 |
| <i>Figure IV.2 : Résistance à la flexion du béton en fonction du temps et du type de ciment</i> | 92 |
| <i>Figure IV.3 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction du temps et du type de ciment</i> | 92 |
| <i>Figure IV.4 : La résistance en compression après 28jours de durcissement en fonction du mode de conservation</i> | 94 |
| <i>Figure IV.5 : La résistance en compression après 90 jours de durcissement en fonction du mode de conservation</i> | 94 |
| <i>Figure IV.6 : La variation du coefficient de qualité des bétons immergés dans la solution en fonction du temps et du type de ciment</i> | 96 |

LISTE DES SYMBOLES

C : masse de ciment

E : masse d'eau

L : masse de liant

P : pouzzolane

F : le filler

A : coefficient de qualité.

Por : la porosité

Pm : porosité basée sur l'échange du méthanol

R : coefficient de corrélation

Ma : poids de l'échantillon a l'état sec

Mss : poids de l'échantillon saturé superficiellement sec

Mm : poids de l'échantillon immergé dans le méthanol

γ_m : densité du méthanol

Va : volume d'air

Vc : volume spécifique du ciment

Vm : volume du méthanol introduit dans la pate de ciment ou de mortier

Vp : volume des pores

Vt : volume total

Vu : volume du ciment anhydre

Vuc : volume du ciment non hydraté

Vps : volume des produits solides

Vc : volume de ciment.

Vce : volume des capillaires en eau.

Vcv : volume des capillaires vide.

Ve : volume de l'eau.

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| <i>Tableau I.1 : Classification des ajouts selon leur réactivité</i> | 15 |
| <i>Tableau II.1: Composition chimique et minéralogique de clinker</i> | 59 |
| <i>Tableau II.2: Analyse chimique de la pouzzolane utilisée</i> | 61 |
| <i>Tableau II.3. Analyse minéralogique de la pouzzolane</i> | 61 |
| <i>Tableau II.4. Composition chimique d'un filler calcaire.</i> | 62 |
| <i>Tableau II.5: Analyse granulométrique du sable</i> | 62 |
| <i>Tableau II.6: Analyse granulométrique des pierres concassées</i> | 63 |
| <i>Tableau III.1. Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques</i> | 68 |
| <i>Tableau IV.1. Compositions des bétons relatifs aux essais de résistances mécaniques</i> | 90 |

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Arya C, Buenfeld N.R and Newman J.B**, « *Factors influencing chloride-binding in concrete* », *Cem. Concr. Res*, 1990, 20, 2, 291-300.
2. **Amine N**, « *Incidence de l'adjonction de la pouzzolane sur les propriétés des bétons de haut résistance* », *Mémoire d'ingéniorat, Boumerdes 1998*.
3. **Ashby M.F, Jones D.R.H**, « *Materiaux.2* », *Dunod, édition 1991*.
4. **Ali A, Amine A.M, Sharara A.M, El-Didamony H**, « *The behaviour of different cement pastes in various sulphate solutions* », *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol.1, pp. 169-172, June 1994.
5. **Adam M. Neville**, « *Propriétés des bétons* », *Ed. Eyrolles, 1992, p.805*.
6. **Anissa Bessa**, « *Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers* » *Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise cedex, 2004*.
7. **Adams, L.D., Race, R.M.** (1990) *Effect of limestone additions upon drying shrinkage of Portland cement mortar*, tiré de *Carbonate additions to cement*, *Klieger P. et Hooton D. Éditeurs, STP 1064, ASTM*.
8. **Bombled J-P**, « *Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment* », *Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973*.
9. **Bidjocka C, Tusset J, Messi A, Perra J**, (1993), « *Etude et évaluation de l'activité pouzzolanique des pouzzolanes de Djoungo (Cameroun)* », *Ann. Fac. Sc. HSI, Chimie et Sciences de la Terre, PP. 133-145*.
10. **Buchner W, Schliebs R, Winter G, Buchel K.H**, (1989), « *Industrial Inorganic Chemistry* », *VCH, PP. 370-399*.

11. **Bai J, Chaipanich Kinuthia J. M, O'Farrell M, Sabir B.B, Wild S. Lewis M. A** (2003), « *Compressive strength an hydratation of waste paper sludge ash ground granulated blast furnace slag blended paste* », *Cement and Concrete Research* 33, PP. 1189-1202.
12. **Bakker. REM**, « *permeability of blended cement concretes* », paper SP-79-30 from ACI sp 79, Detroit 1983, PP. 589-605.
13. **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.
14. **Baron J, Ollivier J.P**, « *La durabilité des béton* », Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
15. **Chang Z, Aiqin W, Mingshu T**, « *The filing role of pozzolanic material* », *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, N°. 6, PP. 943-947, 1996.
16. **Costa U, Massaza F**, « *From materials science to construction materials engineering* », *Proc. 1st Int. Rilem congress*, Vol. 1 (Versailles, 1987), 159.
17. **CIM béton**, *Fiche technique: « le ciment et ses applications* », *Technical Report*, 2001.
18. **C.Vernet**, « *Introduction to Portland cement chemistry* », In P. Colombet and A.R. Grimmer, editors, *Application of NMR spectroscopy to cement science*, pages 29-53. Gordon and Breach, London, 1994.
19. **Douglas E**, « *Mortier de ciment au laitier et béton de laitier : caractéristique de durabilité* », *Matériaux complémentaires en cimentation*, CANMET, V. M. Malhotra Ed, Chapitre. 6, PP. 6, 1989.
20. **D. Moore**. *The Roman Pantheon: « The Triumph of Concrete »*. 1995.

- 21. D. Damidot, A. Nonat, P. Barret, D. Bertrandie, H. Zanni, and R. Rassem,** « C3S hydration in diluted and stirred suspensions. 3. NMR study of C-S-H precipitated during the two kinetic steps ». *Advances in cement research*, 7(25):1-8, 1995.
- 22. F. Gabrysiak** – *Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.*
- 23. Galal A, Taha A.S, Helmy I.M,** « Rice husk ash in Portland blended cement », *Silicates industriels*, Nr. 1-2, PP. 55-58, 1990.
- 24. Gagné et Aïtcin,** 1993, « Superplasticizers for durable concrète, *Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton* », Monterrey, Octobre, Mexique, P. 200-217.
- 25. GCI 712,** Chapitre 7, « Ajout dans le ciment », Université de Sherbrooke.
- 26. H.F.W. Taylor,** « *Cement Chemistry* », Academic Press, London, 1990.
- 27. Hermann K,** « Les ajouts : Les cendres volantes », *Bulletin du ciment*, Bruxelles, N°6/Juin 1995.
- 28. Hermann K,** « Les ajouts : Les fumées de silice », *Bulletin du ciment*, Bruxelles, N°7/Juillet 1995.
- 29. Hjorth L,** « *Durability of concrete structures* », CEB-Rilem, (Copenhagen, 1983), 229.
- 30. Hansen,** « *Physical composition of hardened Portland cement paste* », *ACI Journal*, mai 1970, p. 404-407.
- 31. <http://as.degussa-cc.ch/dictionary/French/lexicon/hochl.htm>.**
- 32. http://www.enpc.fr/de/travelev/béton/Pages/histoire_béton_armé.htm.** Historique.

- 33. ILienko V. M,** « *Effektivnost ispolzovania chlako chtchelot chykh betono vchaknom stroitelstv Cashton estritelstvo* », N°. 10, PP. 15-18, 1969.
- 34. Ingram, K., Poslusny, M, Daugherty, Rowe, W. (1990):** *Carboaluminate reactions Influenced by limestone additions*, tiré de *Carbonate additions to cement*, Klieger P. ET Hooton D. éditeurs, STP 1064.
- 35. Kobayashi K, Uno Y,** « *Influence of alkali on carbonation of concrete, 2. Influence of alkali in cement on rate of carbonatio of concrete* », *Cem. Concr. Res.*, 20, 4, PP. 619-622, 1990.
- 36. Klemm, W.A., Adams, L.D. (1990) :** *An investigation of the formation of carboaluminates*, tiré De *Carbonate additions to cernent*, Klieger P. et Hooton D. éditeurs, STP 1064, ASTM
- 37. Konecny L, Frost,** « *Leaching of concrete* », *Advances in cementitious materials, Ceramic transactions, Vol. 16, PP, 477-487, 1991.*
- 38. Locher, F.W,** « *Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack* », *Proc.5th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo, Vol, 3, PP. 328-335, 1968.*
- 39. Lea F.M,** « *The chemistry of cement and concrete* », Edward Arnold td, Ed., Londres, 1956, 2e. p. 637. LEA F.M. *The chemistry of cement and concrete*, Edward Arnold td, Ed, Londres, 1956, 2e. P. 637.
- 40. Longuet, P., Beuglen, L, .Zelwer, A, 1982:** *La phase liquide du ciment hydraté*, Publication Technique CERILH n°2 19
- 41. Mehta P.K,** « *Pouzzolanes naturelles, matériaux complémentaires en cimentation pour le béton* », centre canadien de la technologie, rédacteur V. Malhotra, Canmet 1987.

- 42. Meason M.** (1981), « *Etude de l'activité pouzzolanique des matériaux naturels et traités thermiquement en vue de la réalisation des liants hydrauliques* », Thèse Doct. Université Paul Sabatier, Toulouse, PP. 133-145.
- 43. Moll H.L.**, « *Über die Korrosion von stahl in beton*, Deutscher ausschuss für Stahlbeton », 1964, 169, 23-61.
- 44. Mehta, P. K.**, « *Concrete: structure, properties and materials* », Prentice-Hall. Ed, PP. 105-169, 1986.
- 45. Midgley H.G. and ILLSTON J.M.**, « *The penetration of chlorides into hardened cement pastes*, Cem, Concr, Res », 1984, 14, 4, 546-558.
- 46. Massazza F, Costa U.**, « *Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements* », Il Cemento, V. 76, PP. 3-18, 1979.
- 47. Mehta P. K.**, « *Sulfate résistance of blended cements* », Concrete workshop, Sydney 1988.
- 48. Miller E. W.**, « *Blended cements - Applications and implications* », Cement and Concrete Composites, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.
- 49. Menetrier, D. Sorrentino** 1986 : *Particle-size distribution in blended cements*, 8^{ème} Congrès international sur la chimie des ciments, Rio, vol. IV, p.60-65
- 50. Mellas, M.** 2003 : *L'utilisation du Microscope électronique à balayage et les diffractions par rayons x dans l'étude des ciments et bétons (Thèse de doctorat)*, université de Biskra
- 51. Nasser K. W. and Ghosh S.**, « *Durability properties of high strength concret containing silica fume and lignite fly ash, in durability of concret* », Ed. V. M. Mlhotra, ACI SP-145, PP. 191-214(Detroi, Michingan, 1994).

- 52. Ny Riana Andriamanantsilavo**, 2003-131P, « *Comportement Des Matériaux Cimentaires Dans Un Coffrage : Expérimentation, Modélisation et Simulation de la poussée et du processus de maturation*, thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'université de Bretagne sud », Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux Centre de Recherche de Lorient, Rue St Maudé, 56325 Lorient cedex.
- 53. Pigeon**, « *Composition et hydratation du ciment portland* », Séminaire progrès dans le domaine du béton, PP. 36-72, Québec, septembre 1981.
- 54. Proposed report**: « *Use of natural pozzolan in concrete* », ACI Materials, Vol. 91, No. 4, PP. 410-426, 1994.
- 55. Powers, T.C, Copeland, L.E., Hayes, J.C. et Mann, H.M.** 1954 « *Permeability of Portland cement paste* », Journal of American Concrete Institute, Vol. 51, N°. 3, P. 285-298.
- 56. P. Acker**, « *Comportement mécanique du béton* »: apports de l'approche physicochimique, Rapport de recherche LPC, N°152, 1988.
- 57. PLASSAIS. Arnaud**, « *Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments* » thèse de doctorat, pour obtenir le grade de Docteur de l'université paris 6, 2003- 167P.
- 58. Parrot.L.J;** 1981: *Effect of drying history upon the exchange of the pores water with methanol and upon subsequent methanol sorption behavior in hydrated alite cement. Cement&concrete research*, vol 11.1981.
- 59. Roy D.M**, « *Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume* ». Proc. Of meeting institute of concrete technology, Coventry, UK, 29PP. (29 April-1 May 1987).
- 60. Razoug R, Zine-eddine W**, « *La technologie du béton* ».

- 61. Ramachandran, V S, Zhang Chun-mei** 1986: *Hydration kinetics and microstructural Development in the $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system*, *Matériaux et Constructions*, vol.19, n°114, p.437-444
- 62. Rostasy F.S., Weiss R. et Wiedmann G.** (1980), *Changes of pore structure of cement mortars due to temperature*. *Cement and Concrete Research*, 1980, vol 10, n°2. p 157-164
- 63. Riccardo S, Giuseppe F,** « *The action of some aggressive solutions on Portland, pozzolanic and blast furnace slag cement mortar* », *Cement and concrete research*, Vol. 19, pp. 885-893, 1989.
- 64. R. Dupain et R. Lanchon et J. C. Saint arroman,** « *Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire (granulats, sols, ciment et bétons), castelle, 2000* ».
- 65. Sánchez M.I., Frias M.,** « *The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars* », *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, N°. 2, pp. 203-213, 1996.
- 66. S.G. Boivin,** « *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène* », thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, P. 251, 1999.
- 67. Situation environnementale des industries,** « *L'industrie cimentière* », Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
- 68. SAID-MANSOUR. M, GHRICIM, KENAI .S.** " *Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et des bétons*" Congrès international réhabilitation des constructions et développement durable, Alger 3 et 4 Mai 2005.
- 69. Soroka I, Setter, N,** 1977: *The effects of filler on strength of cement mortars,-* *Cement and Concrete Research*, vol.26, n°4, p.449-456.

- 70. Salim GUETTALA, B. MEZGHICHE and R. CHEBILI, 2007.** *Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete.* SUN LIGHT PUBLISHING CANADA, *World Journal of Engineering* 4 (1) 45-53.
- 71. Salim GUETTALA, B. MEZGHICHE et M. MELLAS, 2008.** *Performances physico-mecaniques et la durabilité du ciment prémélangé du sable de dune finement broyé. Troisième Conférence International à Biskra sur l'Architecture et la Durabilité (BASC 2008), «Stratégies et Perspectives», Université Mohamed Khider Biskra, 8-10 Avril. Thème 4: La recherche et le transfert technologique, 396-407.*
- 72. Treadaway K. W, Page C.L. and Macmillan G.L,** «*The prediction of reinforcement corrosion: from laboratory studies to exposure trials* », *Proc. 1st Intern. RILEM Congers, Versailles, 1987, 3, 1323-1329.*
- 73. Véronique Baroghel-Bouny,** « *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations* ». LCPC, 1994.