

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

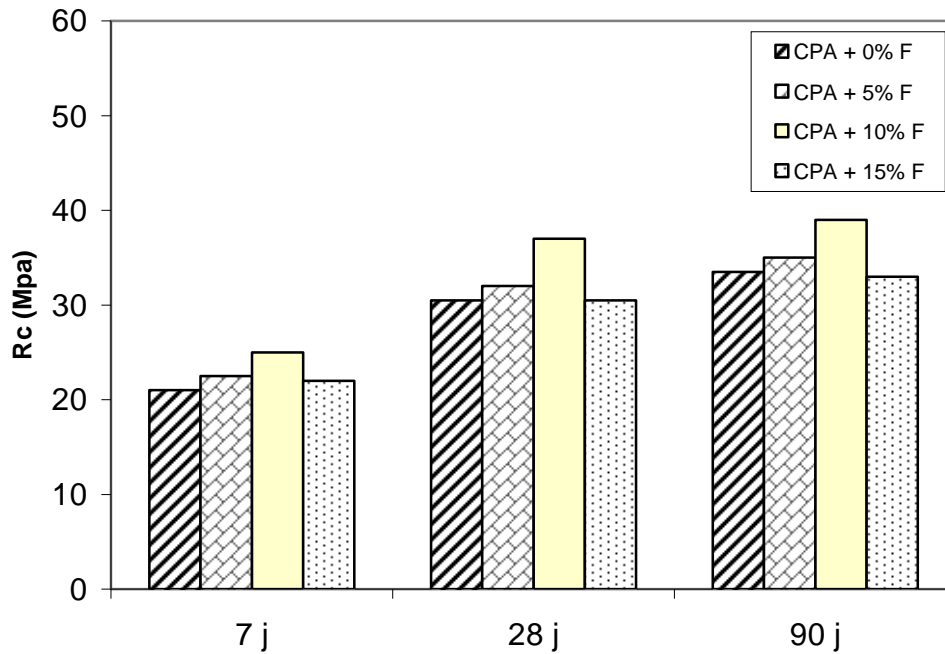


Figure III.1: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,55$)

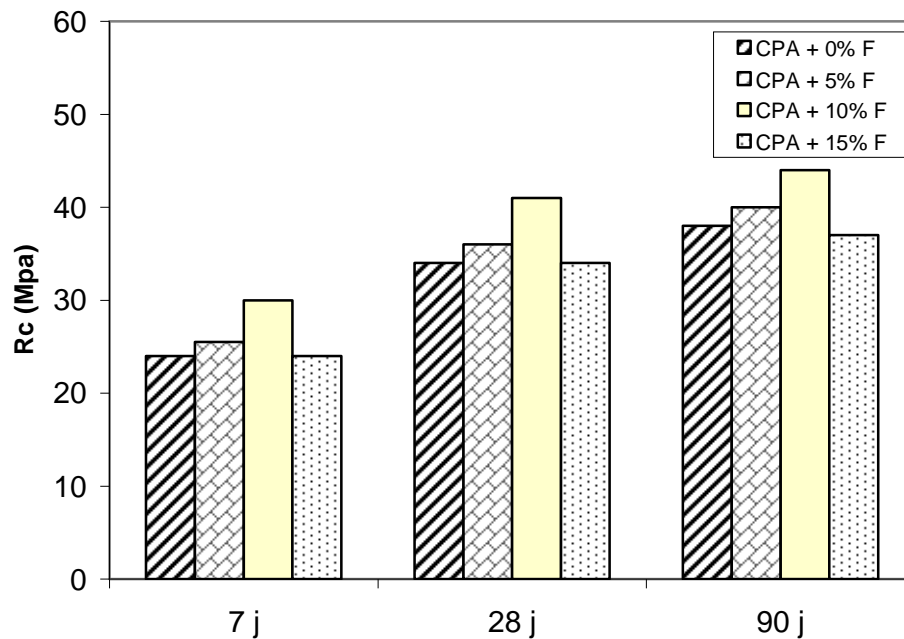


Figure III.2: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,45$)

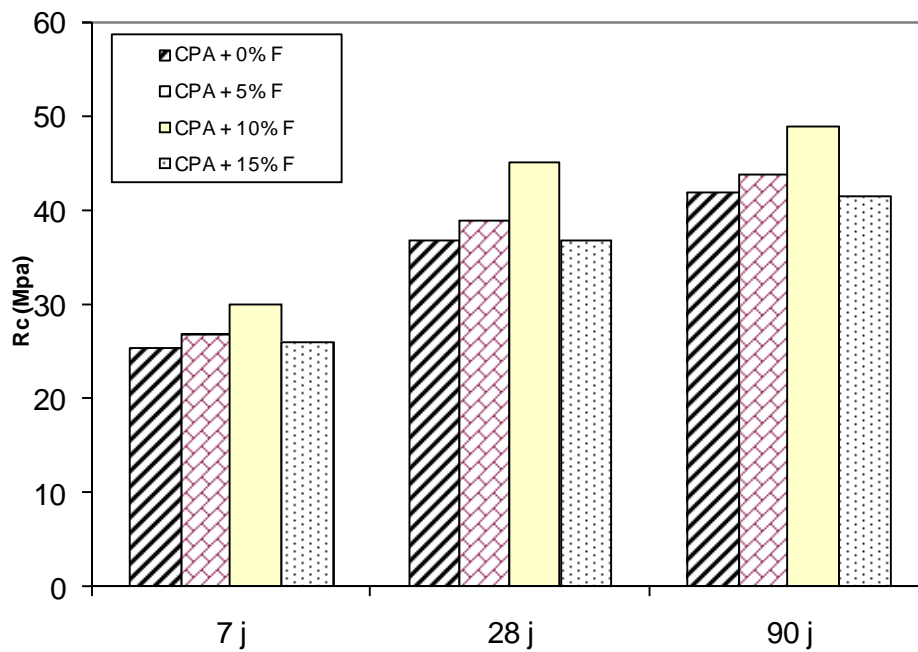


Figure III.3: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du filler ($E/L= 0,35$)

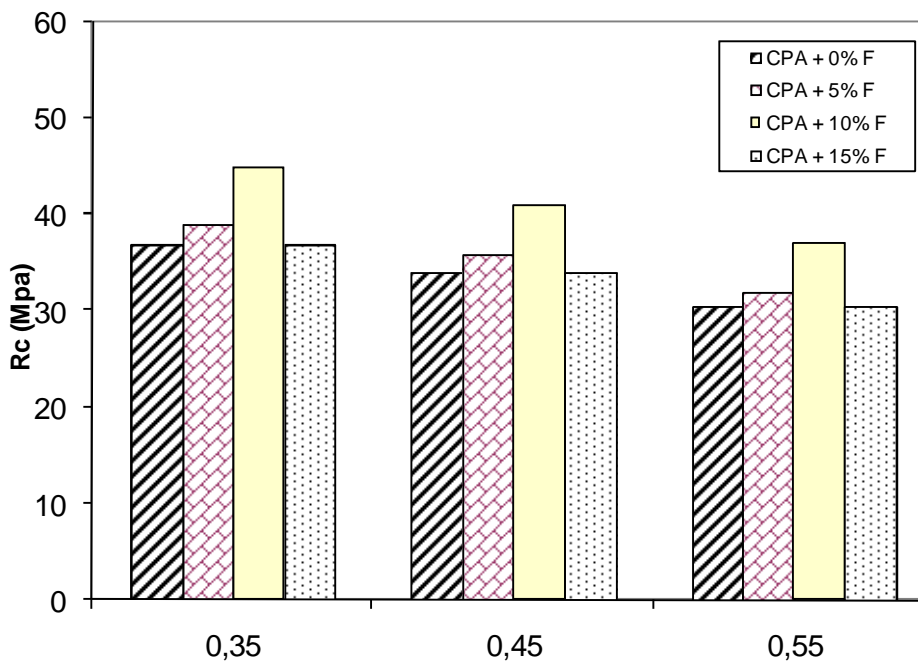


Figure III.4: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de mortier en fonction du rapport E/L et du pourcentage du filler

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**

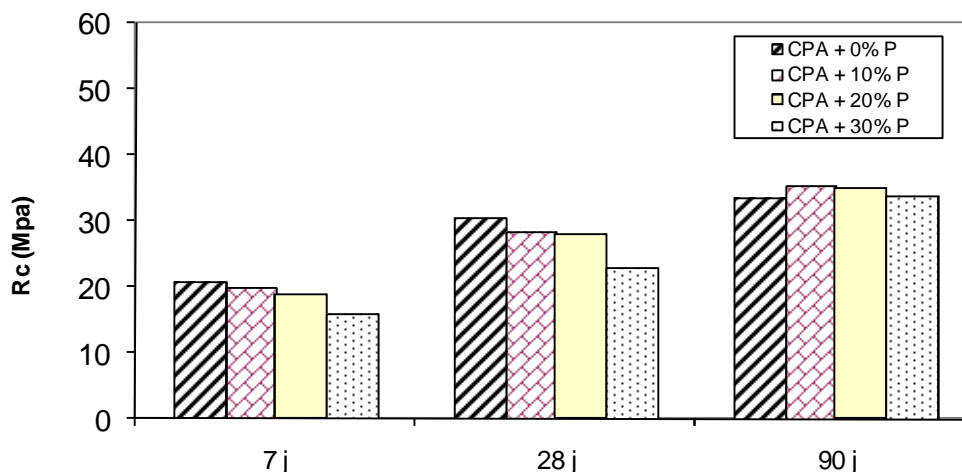


Figure III.5: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,55)

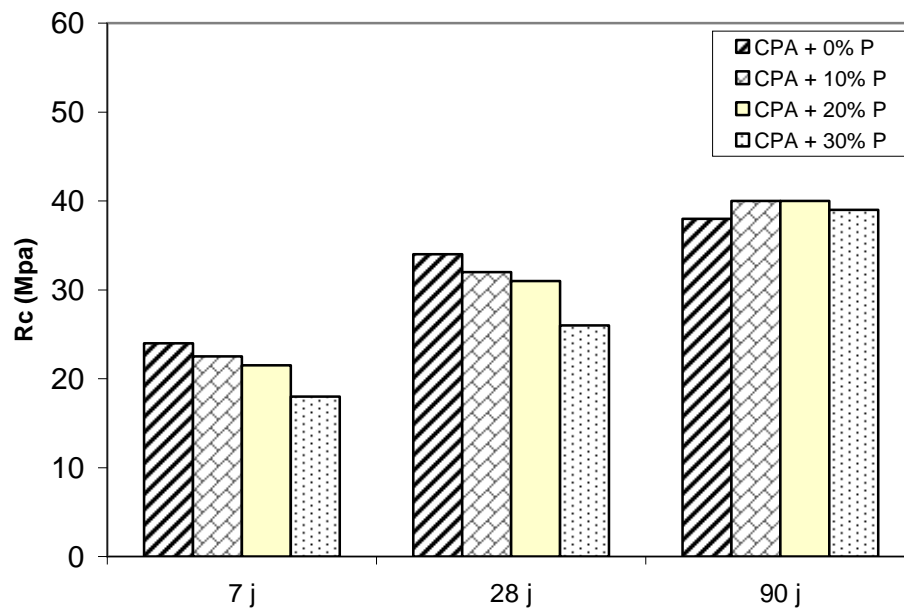


Figure III.6: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,45)

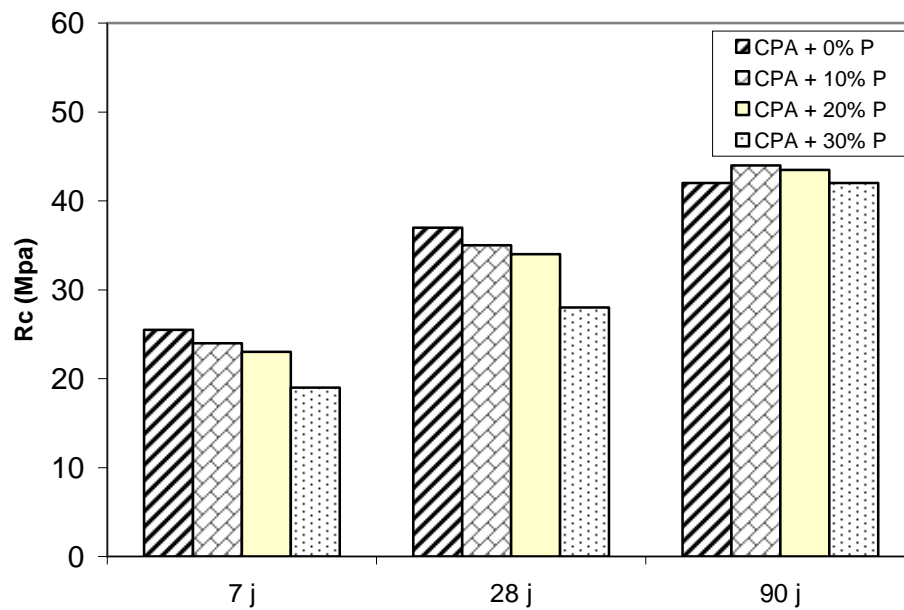


Figure III.7: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (E/L= 0,35)

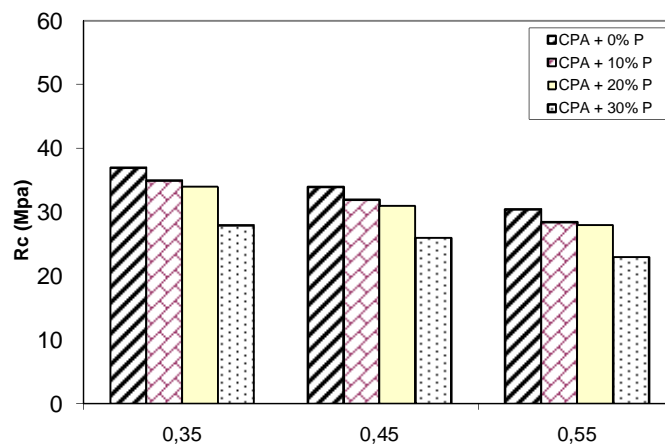


Figure III.8: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de mortier en fonction du rapport E/L et du pourcentage de pouzzolane

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.

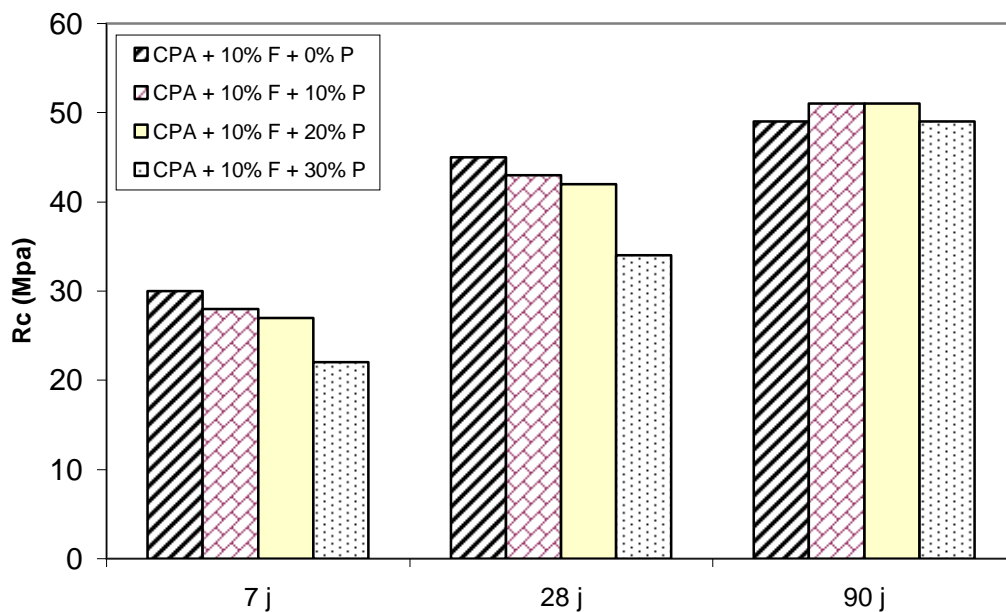


Figure III.9: Evolution de la résistance à la compression de mortier en fonction du temps et du pourcentage du pouzzolane (%filler = 10%, $E/L = 0,35$)

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).

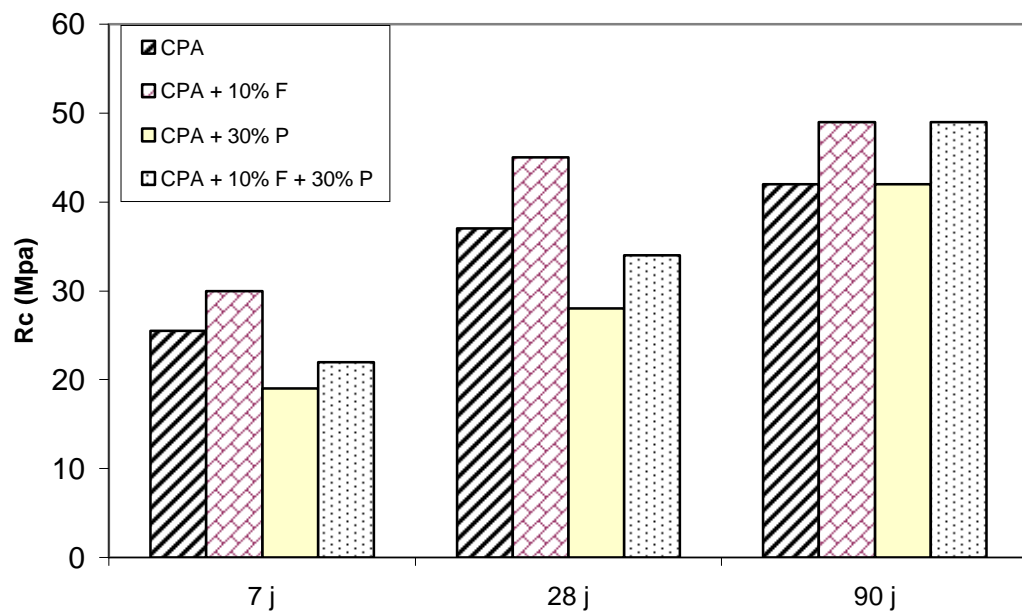


Figure III.10: Evolution de la résistance à la compression de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

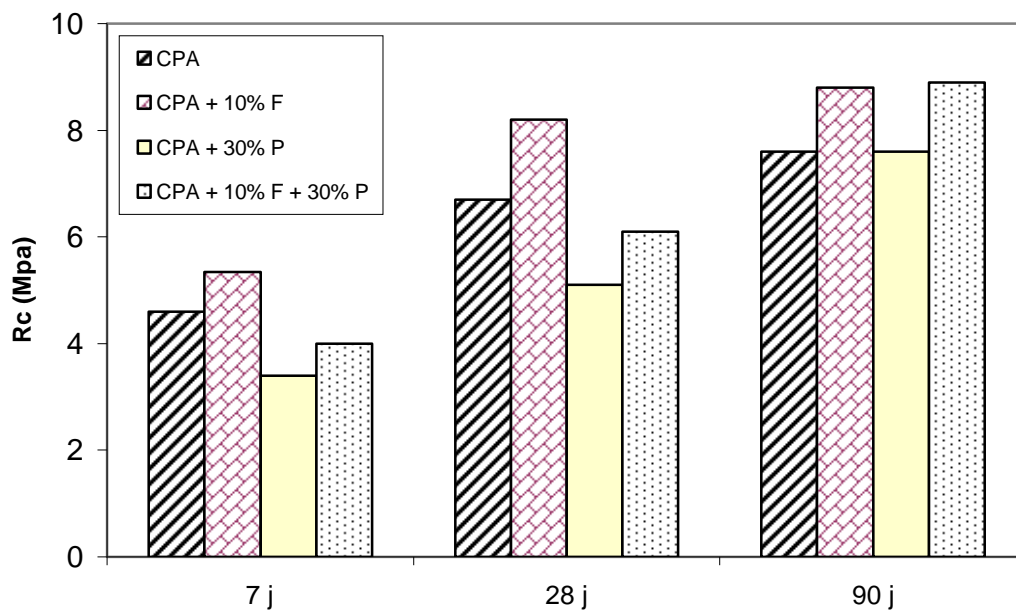


Figure III.11: Evolution de la résistance à la flexion de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

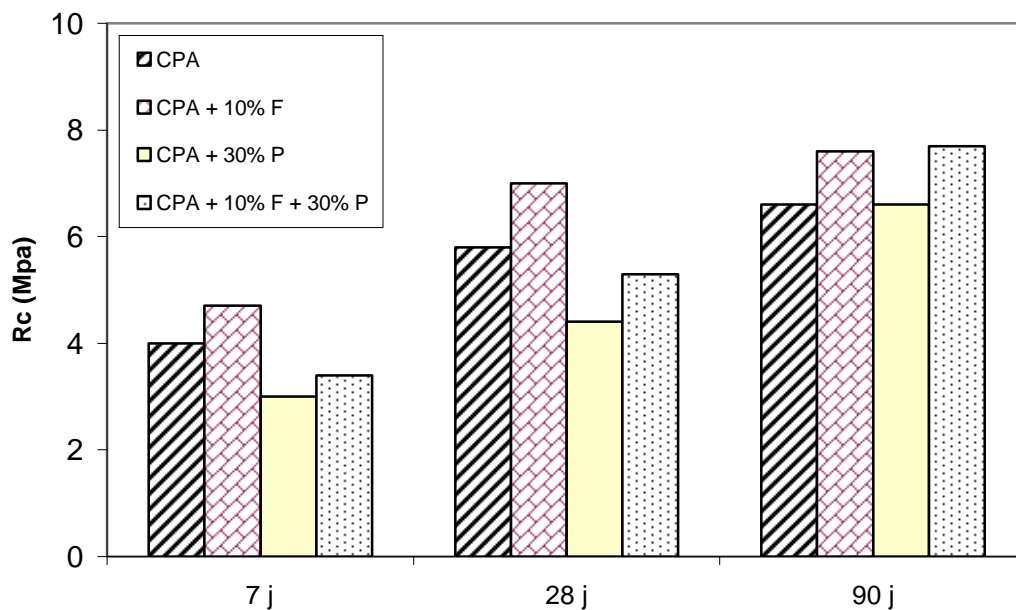


Figure III.12: Evolution de la résistance à la traction de ciment en fonction du temps et du type de ciment ($E/L= 0,35$)

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:

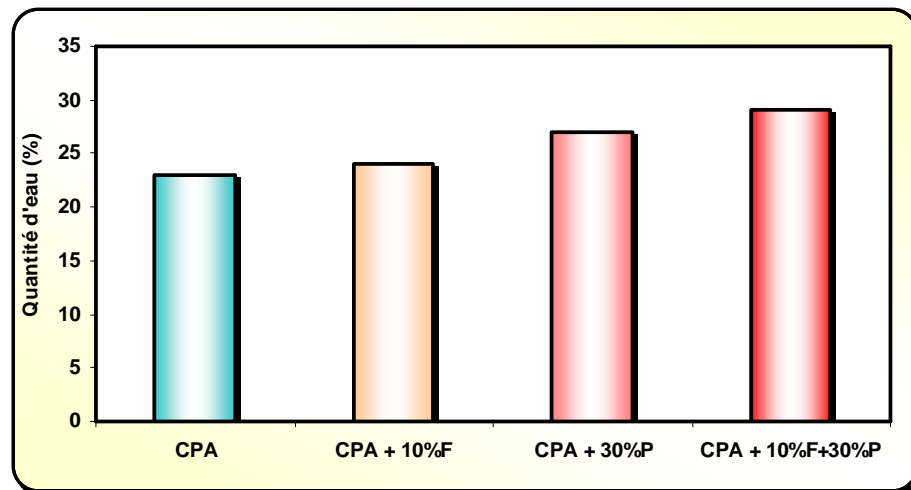


Figure III.13 : Variation de la consistance de la pâte en fonction du type de ciment.

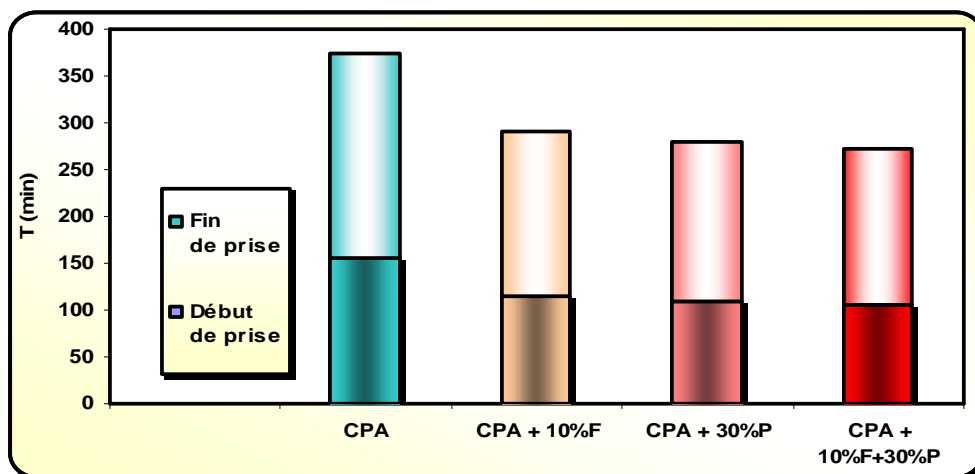


Figure III.14: Temps de début et de fin de prise de la pâte en fonction du type de ciment.

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:

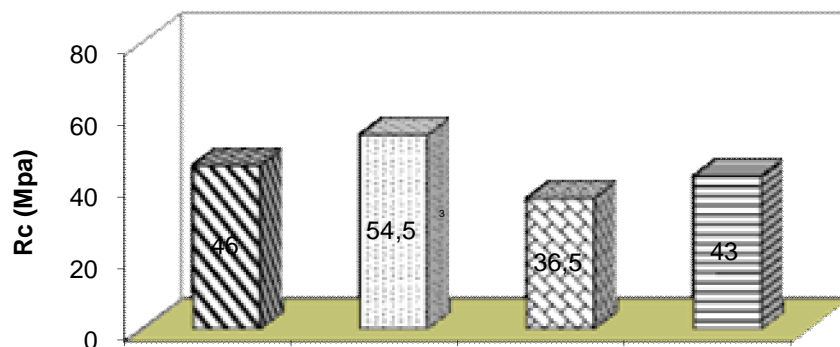


Figure III.15: Résistance du mortier à la compression à 28 jours en fonction du type de liant

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:

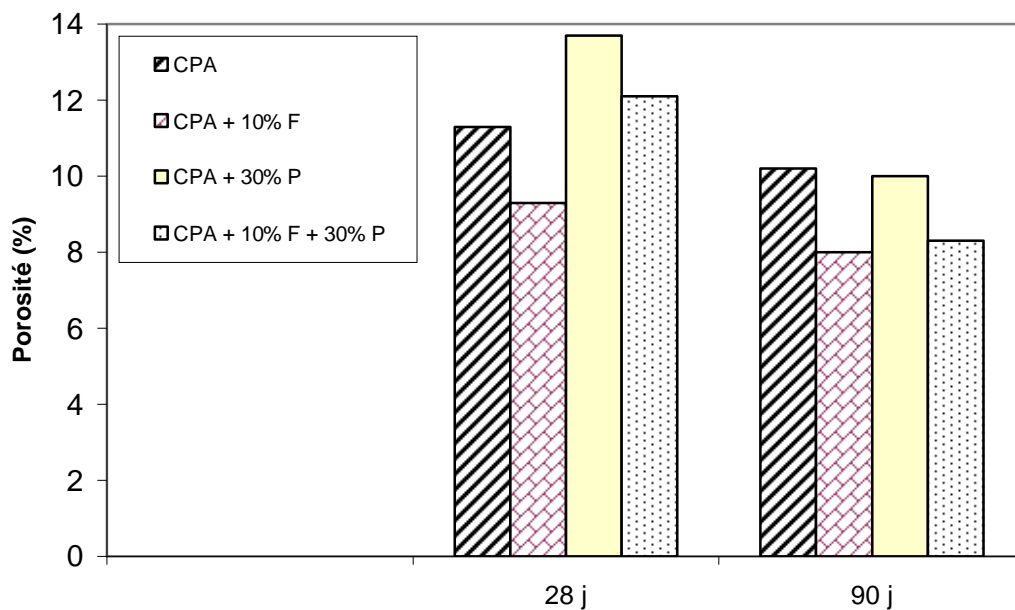


Figure III.16 : Variation de la porosité en fonction du temps et du type de ciment.

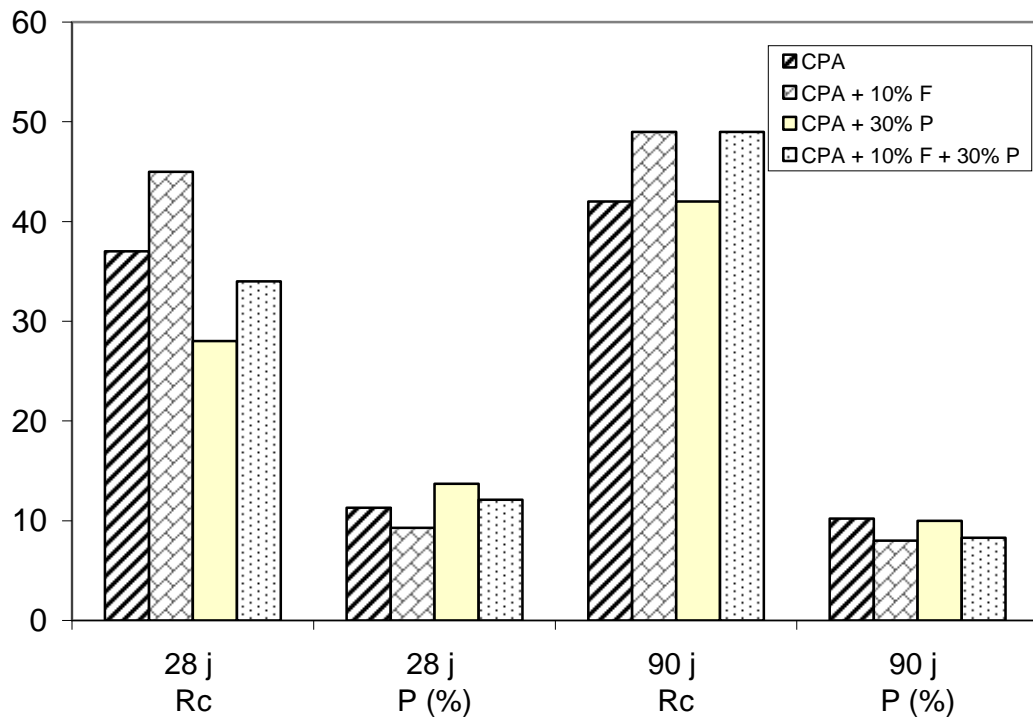


Figure III.17 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité

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:

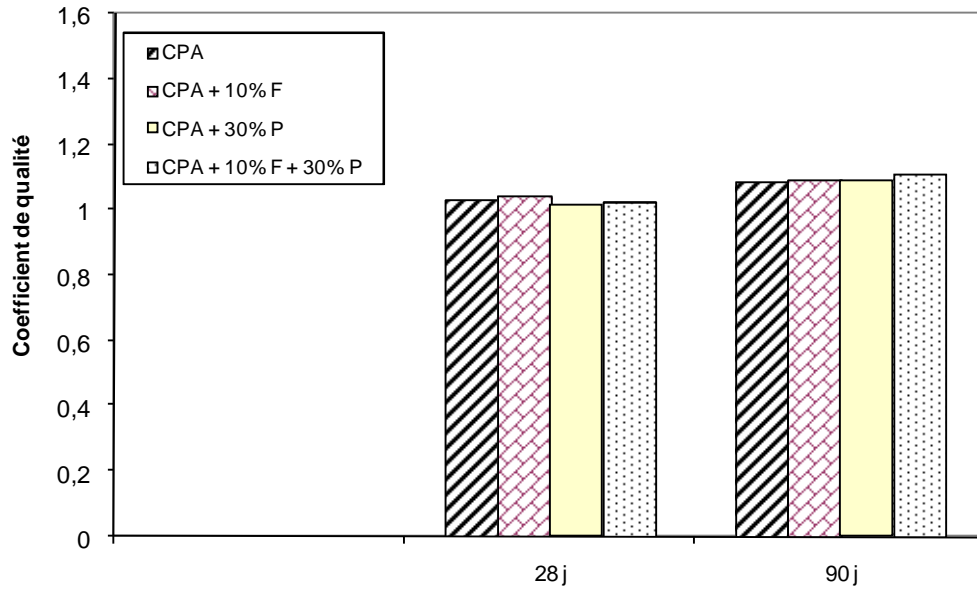


Figure III.18 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution $MgCl_2$ en fonction du temps et du type de ciment

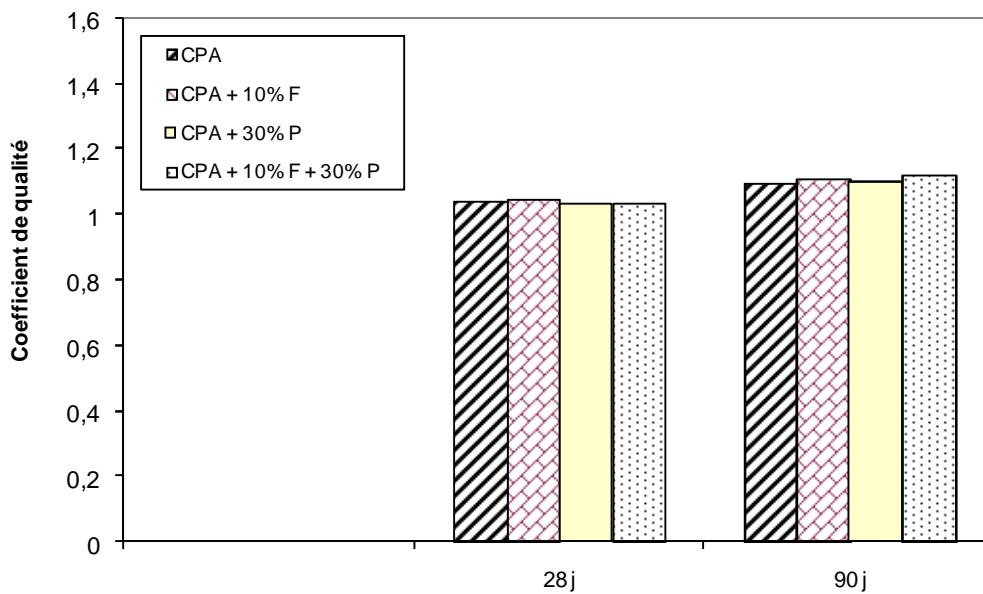


Figure III.19 : La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergées dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du type de ciment

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.