



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLÔME DE DOCTORAT (LMD)

Spécialité : GÉNIE CIVIL

Option : Géo-Matériaux

Intitulé :

**Contribution à la production d'un ciment
pétrolier à base de poudre de sable de dunes
et d'autres minéraux**

Présentée et Soutenue publiquement le : 18/03/2018

Par : Saci DAHMANI

Devant le jury composé de :

HACINI Messaoud	Professeur	Université d'Ouargla	Président
BENTEBBA Med Tahar	Professeur	Université d'Ouargla	Examineur
KHENFER Med Mouldi	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
GUETTALA Salim	MCA	Université de Djelfa	Examineur
KRIKER Abdelouahed	Professeur	Université d'Ouargla	Rapporteur

REMERCIEMENT

Je remercie DIEU le tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Je tiens remercier Monsieur **KRIKER Abdelouahed**, Professeur à l'université d'**OUARGLA**, de m'avoir confié ce travail de recherches, pour ses encouragements, son enthousiasme et sa confiance. Ainsi que pour son aide et ses précieux conseils au cours de ces années.*

*J'adresse mes remerciements aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail. Pr. **HACINI** Messaoud comme président, Pr. **BENTEBBA** Med Tahar, Pr. **KHENFER** Med Mouldi et Dr. **QUETTALA** Salim comme xamineurs.*

*Un sincère remerciement à tous les enseignants de l'université d'**OUARGLA** département de **Génie civil** pour leur encouragement durant les années d'études.*

*J'adresse mes remerciements au directeur et tous les ingénieurs et techniciens de la cimenterie **Mascara**, cimenterie **Ain El Kébira** et cimenterie **AIN TOUTA**; laboratoire **LTPS OUARGLA**, Laboratoire géologie de Sahara et tous les laboratoires de recherche de l'université de **OUARGLA**. Un spécial remerciement à notre laboratoire de recherche **EVRNZA** d'avoir domicilié ce projet.*

*À toute l'équipe du Département **Génie civil & hydraulique** : les chercheurs, les techniciens et mes collègues de doctorat pour tous les échanges techniques, scientifiques et pour leur sympathie, pendant ces années de préparation de cette thèse.*

Je remercie aussi mes collègues de formation et mes copains ; Sans oublier tous ceux qui nous aidés de près ou de loin.

Saci DAHMANI



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents pour leurs sacrifices.

À mes chers frères et sœurs et ma famille

DAHMANI sans exception.

*À tous mes copains et ce qui m'ont aidé durant
ce travail.*

*À tous mes enseignants du primaire, à
l'université pour leurs encouragements et leur
patience.*

Saïd DAHMANI



RÉSUMÉ

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

Notre pays possède plusieurs minéraux qui peuvent être incorporés dans la production de ciment pétrolier. À titre d'exemple la pouzzolane le laitier... etc. Malgré cette disponibilité aucune étude n'a abouti à la production d'un ciment pétrolier local ; Et nous continuons d'importer le ciment pétrolier classe G. Remarquons que le prix d'une tonne de ce ciment coûte beaucoup plus chère par rapport à celui d'un ciment CRS. Dans un souci et une réflexion sur les possibilités de produire un ciment pétrolier local. Cette étude a été lancée consiste à étudier le comportement mécanique et rhéologique du clinker avec l'incorporation des ajouts minéraux tels que la pouzzolane naturelle, laitier de haut fourneau et la poudre de sable de dunes selon différentes combinaisons binaire, ternaire et quaternaire qui permettra de produire un ciment pétrolier local.

Les résultats ont démontré que la substitution de 10% de pouzzolane, laitier et de la poudre de sable de dune améliore globalement la résistance de ciment à long terme. Effectivement, l'utilisation des ajouts minéraux améliore la durabilité de ciment contre les agressions chimiques. Le couplage de laitier et de la poudre de sable de dune en pourcentage de 10 à 20% présente une meilleure durabilité de ciment en milieu agressif avec une résistance comparable avec les ciments témoin.

Mots clés :

Ciment ; clinker ; sable ; produit pétrolier ; sable de dunes ; mortier ; ajouts minéraux, laitier, pouzzolane ;

ABSTRACT:

In the cementations industry, the search for a less expensive binder using industrial waste and natural resources has become a major concern to address the shortfall in Portland cement manufacturing. However, despite the technical, economic and ecological advantages reported by the use of compound cements, the latter remain associated with disadvantages. It is therefore necessary to know whether multi-component (ternary and quaternary) cements have synergistic effects so that their ingredients succeed in compensating for their mutual weaknesses.

Our country has several minerals that can be incorporated into the production of petroleum cement. By way of example, pozzolan, the slag ... etc. Despite this availability, no study has resulted in the production of a local oil cement. In addition, we continued to import the class G oil cement, note that the price of one ton of this cement costs much more compared to that of a CRS cement. In a concern and a reflection on the possibilities of producing a local oil well cement. This work was launched to study the mechanical and rheological behavior of clinker with the incorporation of mineral additions such as natural pozzolan, blast furnace slag and dune sand powder in different combinations of binary, ternary and quaternary. That will produce a local oil cement.

The results demonstrated that the substitution of 10% pozzolan, slag and dune sand powder overall improves the compressive strength of cement in long-term. Indeed, the use of mineral additions improves the durability of cement against chemical attack. The coupling of slag and dune sand powder in a percentage of 10 to 20% shows a better durability of cement in an aggressive medium with a comparable resistance with control cements.

Key words:

Cement; Clinker; Sand; Petroleum products; dune Sand; mortar; Mineral additions, slag, pozzolan;

ملخص:

في صناعة الإسمنت أصبح البحث عن رابط (مادة رابطة) بأقل تكلفة باستخدام النفايات الصناعية والموارد الطبيعية مصدر قلق كبير لمعالجة العجز في إنتاج الاسمنت البورتلاندي. ولكن على الرغم من المزايا التقنية والاقتصادية والبيئية التي ساقتها استخدام الاسمنت المركب، لا تزال هذه الاخيرة ترتبط بعيوب. ولذلك فانه من الضروري معرفة ما إذا كانت صناعة اسمنت المركب من عدة مكونات (ثلاثية أو رباعية) لها تأثيرات إيجابية حتى تعوض نقاط ضعف أو سلبيات صناعة الاسمنت البورتلاندي.

تملك الجزائر العديد من المعادن الطبيعية والاصطناعية التي يمكن دمجها في إنتاج الاسمنت البترولي. على سبيل المثال، البزولان، خبث الأفران، الرمل ... الخ ... وعلى الرغم من هذا التوافر، لم تجرى أي دراسات لإنتاج اسمنت بترولي محلي (فئة G)، علما بأن سعر استيراد طن واحد من هذا الاسمنت يكلف أكثر بكثير من سعر إسمنت مقاوم للأملاح. فمن أجل إمكانية إنتاج الاسمنت بترولي محلي، تم إطلاق هذه الدراسة لدراسة السلوك الميكانيكي والريولوجي للكلنكر المحلي مع دمج الإضافات المعدنية مثل البزولان الطبيعي وخبث الفرن العالي ومسحوق الرمل الكثبان الرملية ودمجها في مجموعات ثنائية وثلاثية ورباعية يمكننا ذلك إلى إنتاج أسمنت بترولي محلي.

الكلمات المفتاحية:

اسمنت، كلنكر، بزولان، رمل مطحون، رمل الكثبان، خبث الأفران، إضافات.

LISTE DES NOTATIONS

C_3S	Le silicate tricalcique nommé « alite »
C_2S	Le silicate bi calcique
C_3A	L'aluminate tricalcique
C_4AF	L'alumino-ferrite tétra calcique (Ferro aluminate tétra calcique)
K	Clinker portland
S	Laitier granulé de haut fourneau
CEN	Comité européen de Normalisation
T°	Température
ρ	Masse volumique
SSB	Surface spécifique de Blaine
C_c	Coefficient de courbure
C_u	Coefficient d'uniformité
M_f	Module de finesse
F	Pourcentage de fines
ES	Équivalent de sable
E	Quantité d'eau
C	Quantité de ciment
t	Temps
V	Volume
e	Porosité
M	Masse
R_f	Contrainte de flexion
R_c	Contrainte de compression
F_f	Charge de rupture en flexion
PZ	Pouzzolane
L	Laitier de haut fourneau
PSD	Poudre de sable de dunes
K	Clinker
G	Gypse
RI	Résidu insoluble
PAF	Perte au feu
Classe G	ciment pétrolier classe G

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUME	I
ABSTRACT:.....	II
:ملخص	III
Liste des notations	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	IX
Liste des photos.....	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	- 2 -
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	- 7 -
I.1. INTRODUCTION :	- 7 -
I.2. HISTORIQUE :	- 7 -
I.3. DÉFINITION D'UN CIMENT :	- 8 -
I.4. GÉNÉRALITÉ SUR LES AJOUTS :	- 8 -
I.5. FABRICATION DE CIMENT PORTLAND :	- 8 -
I.6. LES CONSTITUANTS DU CIMENT :	- 11 -
I.5.1. <i>Clinker portland (K)</i> :	- 12 -
I.5.2. <i>Constituants secondaires de ciments</i> :	- 15 -
I.5.3. <i>Additifs</i> :	- 26 -
I.7. BÉNÉFICES D'UTILISATION DES AJOUTS MINÉRAUX :	- 26 -
I.5.4. <i>Amélioration de l'ouvrabilité</i> :	- 27 -
I.5.5. <i>Chaleur d'hydratation</i> :	- 27 -
I.5.6. <i>Durabilité</i> :	- 28 -
I.5.7. <i>Développement des résistances</i> :	- 28 -
I.5.8. <i>Développement des bétons à haute résistance</i> :	- 28 -
I.8. CLASSIFICATION D'APRÈS LEUR COMPOSITION :	- 29 -
I.9. CLASSIFICATION D'APRÈS LEURS RÉSISTANCES :	- 29 -
I.10. CONCLUSION :	- 31 -
CHAPITRE II. HYDRATATION DE CIMENT & CIMENTATION DES PUIITS	- 33 -
II.1. HYDRATATION DE CIMENT :	- 33 -
II.1.1. <i>Généralité</i> :	- 33 -
II.1.2. <i>Hydratation des composants du ciment portland</i> :	- 33 -

TABLE DES MATIÈRES

II.1.3.	Hydratation du silicate tricalcique C3S :	- 34 -
II.1.4.	Hydratation du silicate bi-calcique C2S :	- 34 -
II.1.5.	Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :	- 35 -
II.1.6.	Hydratation d'alumino-ferrite tétra-calcique C4AF :	- 35 -
II.2.	COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINÉRAL :	- 36 -
II.3.	CHIMIE D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUT :	- 37 -
II.4.	CIMENTATION DES PUIITS	- 40 -
II.4.1.	Généralité :	- 40 -
II.4.2.	La cimentation d'un puit de pétrole :	- 40 -
II.4.3.	Objectif de la cimentation des puits :	- 41 -
II.4.4.	Caractérisation de ciment pétrolier :	- 42 -
II.4.5.	Fabrication de la pâte de ciment « classe G » :	- 43 -
II.5.	CLASSIFICATION DE CIMENT SELON API :	- 43 -
II.6.	PROPRIÉTÉS DE CIMENT PÉTROLIER :	- 44 -
II.6.1.	Conditions chimiques :	- 44 -
II.6.2.	Exigences physiques :	- 44 -
II.6.3.	Résistance à la compression :	- 45 -
II.6.4.	Temps d'épaississement :	- 45 -
II.6.5.	Additifs pour les ciments pétroliers :	- 46 -
II.7.	CONCLUSION :	- 46 -
PARTIE EXPÉRIMENTALE		
CHAPITRE III.	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISE	- 49 -
III.	- 49 -
III.1.	INTRODUCTION :	- 49 -
III.2.	LE CLINKER (K) :	- 49 -
III.3.	CIMENT (C) :	- 50 -
III.4.	GYPSE (G) :	- 51 -
III.5.	LA POUZZOLANE NATURELLE (PZ) :	- 51 -
III.6.	LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU (L) :	- 52 -
III.7.	LE SABLE DE DUNES BROYÉ (PSD) :	- 53 -
III.8.	SABLE DE CONSTRUCTION :	- 54 -
III.9.	EAU DE GÂCHAGE :	- 58 -
III.10.	MÉTHODE ET ESSAIS	- 60 -
III.11.	DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE :	- 61 -
III.12.	CONCLUSION :	- 65 -
IV.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS :	- 67 -
IV.1.	INTRODUCTION :	- 67 -
IV.2.	PROTOCOLE EXPÉRIMENTALE :	- 67 -
IV.3.	ÉTUDE DE CLINKER AVEC AJOUTS MINÉRAUX :	- 69 -

TABLE DES MATIÈRES

IV.3.1	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES :	- 69 -
IV.3.2	PROPRIÉTÉS CHIMIQUES :	- 72 -
IV.3.3	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES :	- 76 -
IV.3.3.1.	<i>Résistance de composition binaire :</i>	- 76 -
IV.3.3.2.	<i>Résistance de composition ternaire :</i>	- 78 -
IV.3.3.2.1.	<i>Substitution de 10% +0-30%</i>	- 78 -
IV.3.3.2.2.	<i>Substitution de 20% +0-20%</i> :.....	- 81 -
IV.3.3.2.3.	<i>Substitution de 30% + 0-10%</i> :.....	- 84 -
IV.3.3.3.	<i>Résistance de composition quaternaire :</i>	- 87 -
IV.4.	ÉTUDE DE CIMENT AVEC AJOUTS MINÉRAUX :	- 89 -
IV.4.1	CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES MORTIERS :	- 91 -
IV.4.1.1.	<i>Masse volumique des éprouvettes</i>	- 91 -
IV.4.1.2.	<i>Résistance mécanique :</i>	- 92 -
A.	<i>Résistance de ciment pétrolier :</i>	- 92 -
B.	<i>Résistance de composition binaire :</i>	- 92 -
C.	<i>Résistance de composition ternaire :</i>	- 95 -
❖	<i>Effet de pouzzolane et laitier (PZ+L) :</i>	- 95 -
❖	<i>Effet de pouzzolane et poudre de sable de dunes (PZ+PSD) :</i>	- 98 -
❖	<i>Effet de laitier et poudre de sable de dunes (L+PSD) :</i>	- 100 -
D.	<i>Résistance de composition quaternaire :</i>	- 103 -
IV.4.2	DURABILITÉ DES MORTIERS AUX ATTAQUES CHIMIQUES :	- 105 -
IV.4.3	<i>Analyse macroscopique des éprouvettes :</i>	- 106 -
IV.4.4	<i>Perte de masse :</i>	- 110 -
IV.4.5	<i>Résistance mécanique</i>	- 112 -
IV.5.	CONCLUSION	- 116 -
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE		- 117 -
CONCLUSION GENERALE		- 118 -
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :		- 120 -
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE		- 122 -
Annexe I.	MATERIAUX ET MATERIELS	- 131 -
Annexe II.	DURABILITE	- 138 -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 Composition de la crue [15].....	- 9 -
Tableau I-2 composition chimique et minéralogique du clinker [19]	- 15 -
Tableau I-3 Classification des ajouts selon leur réactivité [17].....	- 16 -
Tableau I-4 la composition chimique moyenne du laitier. [26]	- 19 -
Tableau I-5 Compositions chimiques de certains types fumés de silice [19].....	- 24 -
Tableau I-6 Désignations des différents types de ciment en fonction de leur composition[7].....	- 29 -
Tableau I-7 Spécification et valeurs garanties en fonction de classe de résistance [31, 40]	- 30 -
Tableau I-8 caractéristique exigés de sous-classes de résistances[40]	- 30 -
Tableau II-1 classification de ciment (API) [61, 62].....	- 43 -
Tableau II-2 exigences chimiques (API) [63 ,62 ,56]	- 44 -
Tableau II-3 les exigences physiques (API)[56, 62, 63]	- 45 -
Tableau III-1 composition chimique du clinker[64, 65]	- 50 -
Tableau III-2 compositions minéralogiques du clinker[64, 65]	- 50 -
Tableau III-3 composition chimique de ciment.....	- 50 -
Tableau III-4 composition minéralogique de ciment	- 51 -
Tableau III-5 composition chimique du gypse utilisé	- 51 -
Tableau III-6 caractéristiques de la pouzzolane[65]	- 52 -
Tableau III-7 caractéristiques du laitier[64, 65]	- 52 -
Tableau III-8 caractéristiques du sable de dunes broyée[64, 65]	- 53 -
Tableau III-9 caractéristiques de sable utilisé	- 58 -
Tableau III-10 analyses chimiques de sable de construction	- 58 -
Tableau III-11 analyse chimique de l'eau de gâchage utilisée	- 59 -
Tableau III-12 Caractéristiques globales des matériaux utilisés	- 60 -
Tableau III-13 normes des essais normalisés. [73]	- 61 -
Tableau III-14 Valeurs limitent de temps de conservation.	- 63 -
Tableau IV-1 Compositions binaires de ciment étudié	- 68 -
Tableau IV-2 Composition ternaire de ciment étudié	- 68 -
Tableau IV-3 Composition quaternaire de ciment étudié.....	- 68 -
Tableau IV-4 Caractéristiques physiques des ciments étudiés.....	- 70 -
Tableau IV-5 Caractéristiques chimiques des compositions binaires	- 73 -
Tableau IV-6 Caractéristiques chimiques des compositions ternaires	- 74 -
Tableau IV-7 Caractéristiques chimiques des compositions quaternaires	- 75 -
Tableau IV-8 Composition de ciment à étudier	- 90 -
Tableau IV-9 Masse volumique apparente des compositions binaires et ternaires (g/cm ³)	- 91 -
Tableau IV-10 Masse volumique apparente de compositions quaternaires (g/cm ³)	- 91 -
Tableau IV-11 Analyse chimique de la solution sulfatique	- 106 -

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Schémas de fabrication de ciment par différentes voies [17].....	- 10 -
Figure I-2 constituants de ciment [18, 19].	- 11 -
Figure I-3 Diagramme de KIEL système CaO – SiO ₂ - Al ₂ O ₃ [20].....	- 12 -
Figure I-4 Clinker.....	- 13 -
Figure I-5 Microstructures de clinker Portland [21].....	- 14 -
Figure I-6 Images de clinker en microscopie optique [19].....	- 14 -
Figure I-7 Cendres volantes vues au microscope [38]	- 18 -
Figure I-8 DRX d'une cendre volante [23]	- 18 -
Figure I-9 Laitiers granulés de haut fourneau vu au microscope.	- 21 -
Figure I-10 pouzzolanes naturelles.....	- 21 -
Figure I-11 Images microscopiques de fumée de silice [33].....	- 23 -
Figure II-1 Pâte de ciment hydratée 7 jours : Ca(OH) ₂ et CSH.....	- 35 -
Figure II-2 Formations fibreuses de CSH (pâte de ciment à 7 jours).....	- 37 -
Figure II-3 Morphologies aciculaires d'ettringite (MEB) [42]	- 37 -
Figure II-4 Equation de l'hydratation de ciments et la pouzzolane	- 41 -
Figure II-5 Puit de pétrole (processus de cimentation).	- 42 -
Figure II-6 Dispositifs de cimentation par les tiges.....	- 57 -
Figure III-1 Courbes granulométriques de sable utilisées.....	- 62 -
Figure III-2 Équipements nécessaire pour confectionner le mortier	- 61 -
Figure III-3 Moules pour éprouvettes de mortier prismatique 4x4x16	- 62 -
Figure III-4 Appareil à chocs	- 63 -
Figure III-5 Armoire humide	- 63 -
Figure III-6 machine essais de compression et flexion	- 64 -
Figure III-7 Dispositif pour l'essai de Résistance à la flexion. [74].....	- 64 -
Figure III-8 Dispositif de rupture en compression.[75].....	- 71 -
Figure IV-1 Évolution de la consistance en fonction de pourcentage d'ajout	- 71 -
Figure IV-2 Évolution de la densité en fonction de pourcentage d'ajout	- 76 -
Figure IV-3 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ.....	- 76 -
Figure IV-4 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L	- 76 -
Figure IV-5 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD	- 78 -
Figure IV-6 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% de PZ	- 78 -
Figure IV-7 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% de PZ	- 79 -
Figure IV-8 Evolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% de L	- 79 -
Figure IV-9 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% de L.....	- 79 -
Figure IV-10 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% de PSD	- 80 -
Figure IV-11 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% de PSD.....	- 81 -
Figure IV-12 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 20% de PZ	- 82 -
Figure IV-13 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 20% de PZ	- 82 -

LISTE DES FIGURES

Figure IV-14 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 20% de L	- 82 -
Figure IV-15 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 20% de L.....	- 82 -
Figure IV-16 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 20% de PSD	- 83 -
Figure IV-17 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 20% de PSD.....	- 83 -
Figure IV-18 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 30% de PZ	- 84 -
Figure IV-19 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 30% de PZ	- 84 -
Figure IV-20 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 30% de L	- 85 -
Figure IV-21 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 30% L	- 85 -
Figure IV-22 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 30% PSD	- 85 -
Figure IV-23 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 30% PSD	- 86 -
Figure IV-24 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% PZ et 10% L.....	- 87 -
Figure IV-25 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% PZ et 10% PSD.....	- 87 -
Figure IV-26 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% L et 10% PSD.....	- 87 -
Figure IV-27 Évolution de la résistance mécanique de ciment pétrolier (G).....	- 92 -
Figure IV-28 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ.....	- 93 -
Figure IV-29 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L	- 93 -
Figure IV-30 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD	- 93 -
Figure IV-31 Effet de PZ et L sur la résistance à la flexion.....	- 95 -
Figure IV-32 Effet de PZ et L sur la résistance à la compression.....	- 95 -
Figure IV-33 Effet de L et PZ sur la résistance à la flexion.....	- 96 -
Figure IV-34 Effet de L et PZ sur la résistance à la compression.....	- 96 -
Figure IV-35 Effet de PZ et PSD sur la résistance à la flexion.....	- 98 -
Figure IV-36 Effet de PZ et PSD sur la résistance à la compression	- 98 -
Figure IV-37 Effet de PSD et PZ sur la résistance à la flexion.....	- 99 -
Figure IV-38 Effet de PSD et PZ sur la résistance à la compression	- 99 -
Figure IV-39 Effet de L et PSD sur la résistance à la flexion	- 100 -
Figure IV-40 Effet de L et PSD sur la résistance à la compression	- 101 -
Figure IV-41 Effet de PSD et L sur la résistance à la flexion	- 101 -
Figure IV-42 Effet de PSD et L sur la résistance à la compression	- 102 -
Figure IV-43 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% PZ et 10% L.....	- 103 -
Figure IV-44 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% PZ et 10% PSD.....	- 103 -
Figure IV-45 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% L et 10% PSD.....	- 104 -
Figure IV-46 Perte de masse des éprouvettes de ciment pétrolier après 03 mois	- 110 -
Figure IV-47 Évolution de perte de masse des compositions binaires.....	- 110 -
Figure IV-48 Évolution de la perte de masse des compositions ternaires.....	- 111 -
Figure IV-49 Évolution de la perte de masse des compositions quaternaires	- 111 -
Figure IV-50 Résistance à la compression des éprouvettes de ciment pétrolier après 03 mois.....	- 113 -
Figure IV-51 Effet de pouzzolane sur l'évolution de la résistance à la compression.....	- 113 -
Figure IV-52 Effet de laitier sur l'évolution de la résistance à la compression	- 113 -
Figure IV-53 Effet de poudre de sable de dunes sur l'évolution de la résistance à la compression.....	- 114 -
Figure IV-54 Effet de composition ternaire sur l'évolution de la résistance à la compression à 180 jours	- 115 -

LISTE DES FIGURES

Figure IV-55 Effet de composition quaternaire sur l'évolution de la résistance à la compression - 115 -

LISTE DES PHOTOS

Photo III-1 broyeur à boulets utilisé au broyage des matériaux	- 49 -
Photo III-2 Clinker utilisé	- 50 -
Photo III-3 Gypse utilisé	- 51 -
Photo III-4 Pouzzolane naturelle utilisé	- 52 -
Photo III-5 Laitier utilisé.....	- 53 -
Photo III-6 Sable de dunes utilisé à l'étude	- 53 -
Photo III-7 Images microscopiques de grain de sable de dunes.....	- 54 -
Photo III-8 vues microscopiques de sable de construction	- 54 -
Photo IV-1 Conservation des éprouvettes dans différentes milieux	- 106 -
Photo IV-2 Séchage des éprouvettes dans l'étuve après lavage	- 107 -
Photo IV-3 État de surface des éprouvettes de ciment pétrolier.....	- 107 -
Photo IV-4 État de surface des mortiers après 180 jours de conservation	- 108 -
Photo IV-5 État de surface des compositions quaternaires après 180 jours de conservation.....	- 108 -
Photo IV-6 vue microscopique de surface des éprouvettes après 180 jours de conservation	- 108 -
Photo IV-7 vue microscopique de surface des éprouvettes en ciment G après 90 jours de conservation...	- 109 -
Photo IV-8 couche formée sur les éprouvettes soumise dans l'acide sulfurique	- 109 -
Photo IV-9 rupture des éprouvettes en compression.....	- 116 -
Photo I-1 Broyeur à boulet Photo I-2 Intérieur du broyeur	- 131 -
Photo I-3 Clinker utilisé	- 131 -
Photo I-4 Pouzzolane	- 131 -
Photo I-5 Laitier de haut fourneau	- 132 -
Photo I-6 Sable de dunes.....	- 132 -
Photo I-7 Gypse.....	- 132 -
Photo I-8 substitution des ajouts avec le clinker	- 133 -
Photo I-9 appareil de Blaine.....	- 133 -
Photo I-10 matériel nécessaire pour le malaxage	- 134 -
Photo I-11 préparation du mélange	- 134 -
Photo I-12 remplissage et arasage des moules	- 135 -
Photo I-13 Démoulage des éprouvettes.....	- 135 -
Photo I-14 conservation des éprouvettes.....	- 135 -
Photo I-15 Armoire humide de conservation	- 136 -
Photo I-16 presse hydraulique.....	- 136 -
Photo I-17 essai de flexion et de compression	- 136 -
Photo I-18 microscope	- 137 -
Photo I-19 PH mètre de laboratoire.....	- 137 -
Photo II-1 séchage des éprouvettes après immersion dans milieux agressifs	- 138 -
Photo II-2 état de surface des compositions binaire après 180 jours de conservation	- 139 -

LISTE DES PHOTOS

Photo II-3 état de surface des compositions ternaire après 180 jours de conservation	- 140 -
Photo II-4 état de surface des compositions quaternaire après 180 jours de conservation.....	- 141 -
Photo II-5 rupture des éprouvettes soumis dans la solution témoin (eau douce)	- 142 -
Photo II-6 rupture des éprouvettes soumis dans la solution sulfate de magnésium	- 142 -
Photo II-7 rupture des éprouvettes soumis dans la solution acide sulfurique	- 142 -

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La fabrication des ciments a été développée par l'arrivée de nouveaux minéraux, soit naturels, ou de forme des déchets (ajouts cimentaires) tels que, la pouzzolane, les fumées de silice, les cendres volantes et, les laitiers de haut fourneau[1]. Ces ajouts minéraux ont des propriétés hydrauliques (formation des composés hydratés stables par réaction avec l'eau) et pouzzolaniques (formation des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau à température ordinaire par combinaison avec la chaux et en présence d'eau) intéressantes.[2-4].

L'utilisation des résidus industriels récupérés et recyclés, telle que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles dans la production des ciments portland ont résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique[5]. 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 demandé. L'utilisation de ces résidus industriels présente généralement une durée de vie plus longue que le béton traditionnel. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde. En ce qui concerne l'économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment portland, du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

Les ajouts font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. D'autre part, leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

L'Algérie est un pays producteur de pétrole, l'opération de production de pétrole passé obligatoirement par une phase de cimentation des puits de pétrole pour les consolider. Cette phase de cimentation consomme des quantités énormes de ciment spécifique qui sont usuellement nommés les ciments pétroliers classe G par exemple. Actuellement, ce type de ciment n'est pas produit en Algérie, et chaque année, il importe en grande quantité pour satisfaire aux besoins.

L'objectif de cette thèse est donc de contribuer à une éventuelle production locale des ciments pétroliers en utilisant des produits naturels et artificiels locaux de notre pays.

Ce travail expérimental étudie la possibilité de substitution partielle du clinker par ajout pouzzolane, laitier et sable de dunes broyé dans le ciment pour produire un ciment pétrolier, en mortier de ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par

L'ajout de pouzzolane, laitier et de la poudre de sable de dunes substitué à divers pourcentages (0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 40 %). Dans cette étude, nous voulons faire varier le pourcentage de l'ajout minéral dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker) afin d'étudier son effet sur le comportement mécanique du ciment et afin d'arriver à une contribution à la fabrication d'un ciment pétrolier en comparant les propriétés obtenues par les propriétés exigées par les normes API (American Petroleum Institute) qui s'intéresse aux spécifications des ciments utilisés uniquement pour les puits. Cela nous permet de contribuer à la valorisation des matériaux locaux dans l'industrie de ciment afin d'obtenir un nouveau type de ciment.

L'étude entreprise dans cette thèse vise à atteindre les objectifs principaux suivants :

1. Étude de l'effet de l'incorporation des ajouts minéraux : pouzzolane naturelle, laitier de haut fourneau et poudre de sable de dunes sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des ciments confectionnés à base de clinker et de contribuer à la fabrication d'un ciment pétrolier.
2. Optimiser des dosages optimaux des ajouts minéraux les plus performants du point de vue résistance mécanique qu'en ce qui concerne la durabilité.

La présente étude s'intéresse à l'analyse expérimentale contribuant à la valorisation des matériaux locaux dans la production de ciment. L'étude a nécessité deux parties :

La première partie, à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine de la fabrication ciment : Les étapes de fabrication, les constituants l'hydratation du ciment ainsi que leur classification. Cette partie bibliographique sera divisée en deux chapitres.

Le premier chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ciment et leurs caractéristiques (Les étapes de fabrication, les constituants l'hydratation du ciment ainsi que la classification).

Le deuxième chapitre présente l'ensemble des ajouts cimentaires utilisés dans le ciment, ainsi que l'influence de ces ajouts minéraux sur les performances mécaniques et l'utilisation de ciment dans le domaine pétrolier et spécification de ciment destiné à la cimentation des puits de pétrole et de gaz. (Présentations des normes API).

LA DEUXIÈME PARTIE : consiste à analyser expérimentalement le matériau composite et les résultats. Cette partie sera divisée en deux chapitres.

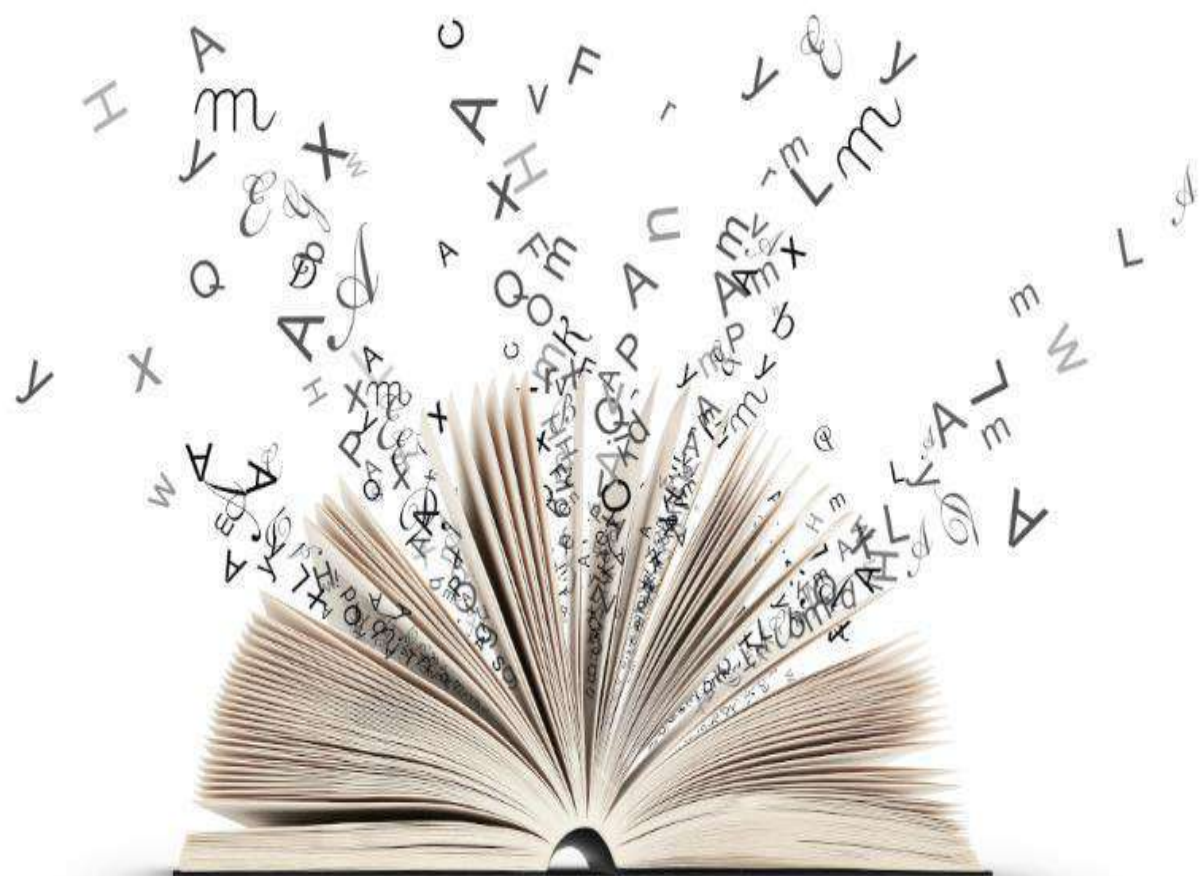
Le troisième chapitre présente une identification des matériaux de l'étude. Il est clair pour un matériau tel que le béton de sable, que des analyses physico-chimiques des constituants sont nécessaires afin de faire ressortir par suite leur influence sur les mortiers frais et durcis.

Le quatrième chapitre décrit l'évolution des caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des ciments confectionné à base des minéraux locaux (pouzzolane naturelle, laitier d'haut fourneau et de la poudre de sable de dune) ; cette analyse tente de relier la composition de ciment à son comportement mécanique et l'effet des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale, dans laquelle nous rappelons les principaux résultats obtenus et proposons des perspectives de développement des matériaux cimentaire composé en Algérie.

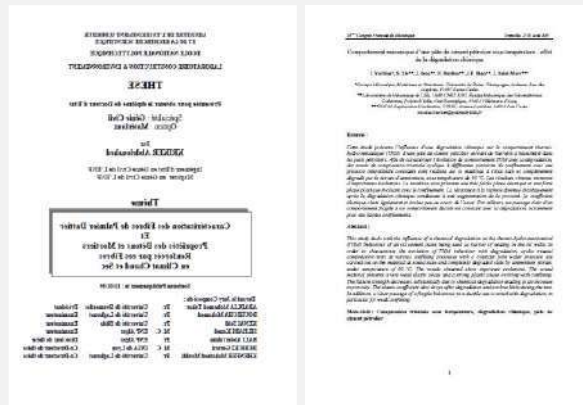
PARTTE

BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I:

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Le ciment est le matériau moderne de construction, il a été découvert par l'ingénieur français Louis VICAT, qui a été produit industriellement pour la première fois en 1817[6, 7]. Pour fabriquer le ciment, il passe par plusieurs étapes qui sont définies dans cette partie sur les processus de fabrication et l'essentiel du ciment.

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carboniques. De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de laitier granulé de haut fourneau (LGHF) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment [8].

I.2. Historique :

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir même sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de pouzzolanique, qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux [6].

En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexplicée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore, en 1817, la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement s'appelle le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née quelques années plus tard [6, 9]. En 1824, l'Écossais ASPDIN dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qui s'appelle commercialement le ciment portland [10].

La première usine de ciment a été créée par DUPONT et DEMARLE en 1846 à Boulogne. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets en particulier [6].

I.3. Définition d'un ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C température de fusion [11, 12].

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau, il se présente sous l'aspect d'une poudre inorganique très fine obtenue par la cuisson à haute température d'un mélange de matériaux naturels de carrière ; qui est gâchée avec l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certaines compositions minérales, notamment des silicates et des aluminates de calcium, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [6, 13].

I.4. Généralité sur les ajouts :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent leurs propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques tout en réduisant le coût de revient [14].

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, le laitier granulé de haut fourneau et les fumées de silice, les fillers... etc. qui 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 [8].

I.5. Fabrication de ciment portland :

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respectivement moyenne de 80 % - 20 % [6]. Le calcaire apporte le carbonate calcium CaCO_3 ; l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3

et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 ; nécessaires au processus de formation du clinker. Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalis K_2S et Na_2O , dont les pourcentages, doivent être contenus en deçà de limites précises [12].

Tableau I-1 Composition de la crue [15]

	notation	taux
Carbonate de calcium	CaCO_3	77 à 83%
Silice	SiO_2	13 à 14%
Oxyde Aluminium	Al_2O_3	2 à 4%
Oxyde ferrique	Fe_2O_3	1,5 à 3%

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau : [11, 12, 16]

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

La Figure I-1 montre les étapes de fabrication de ciment de différentes voies de fabrication.

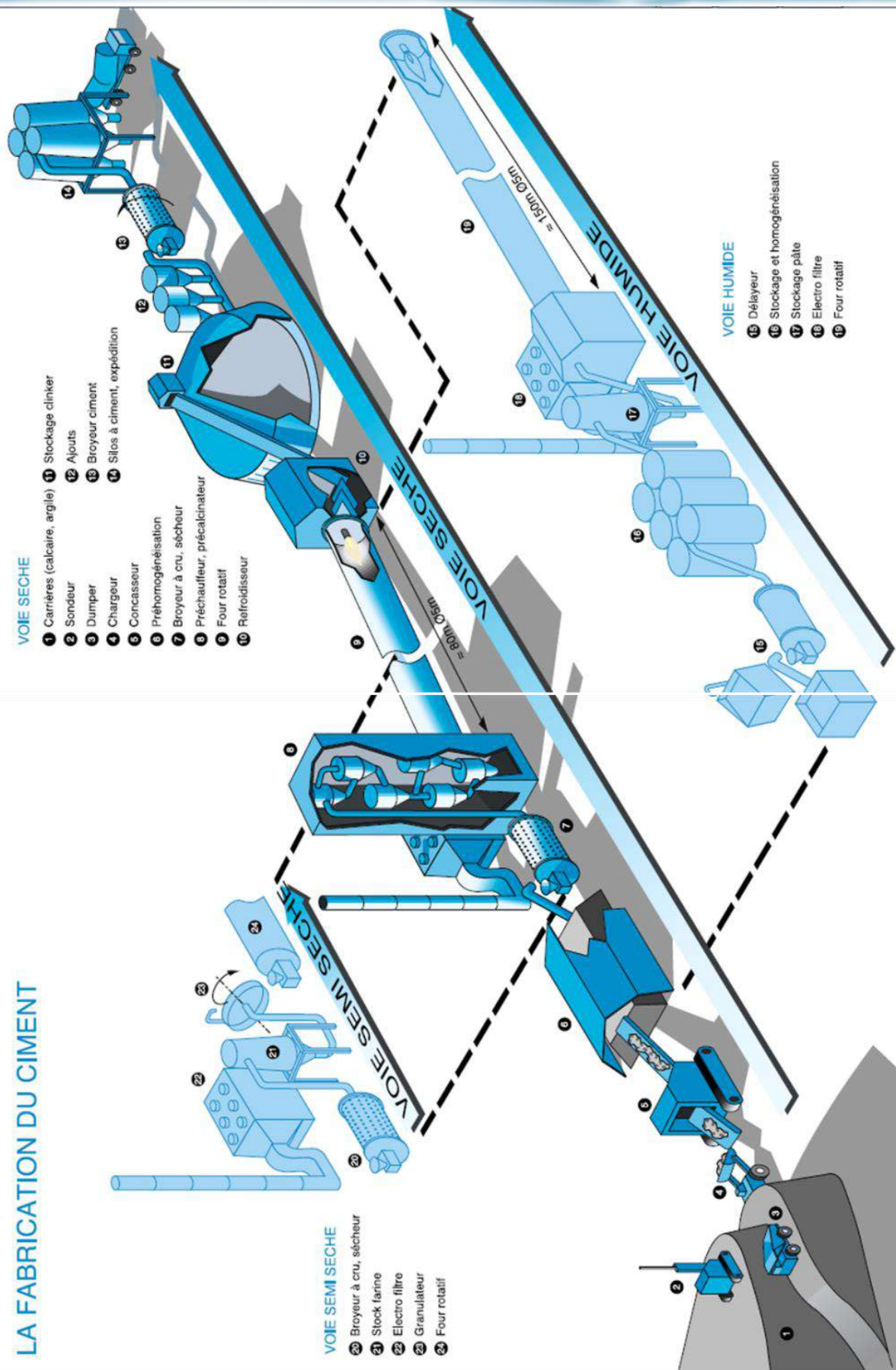


Figure I-1 Schémas de fabrication de ciment par différentes voies [17]

I.6. Les constituants du ciment :

On distingue :

Les constituants principaux sont matériau minéral représentant une proportion supérieure à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires [6].

Les constituants secondaires : matériau minéral représentant une proportion inférieure ou égale à 5 % en masse de la somme de tous les constituants principaux et secondaires [6].

La Figure I-3 montre les types d'ajout minéraux selon leurs compositions chimiques (diagramme de KIEL).

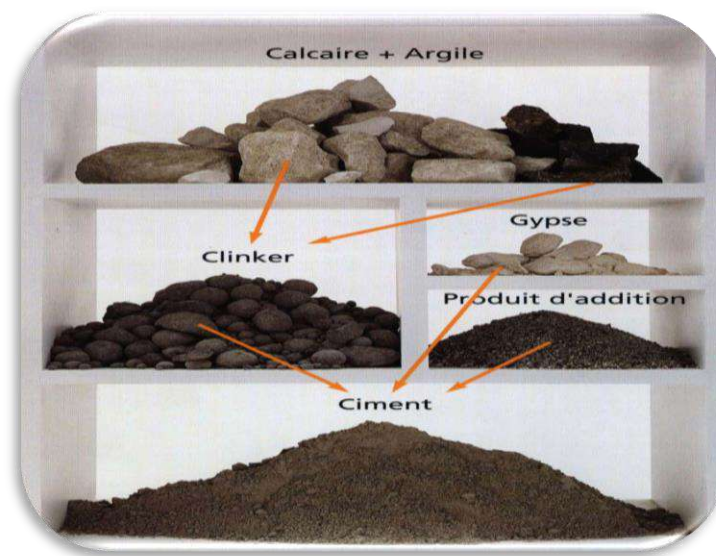


Figure I-2 constituants de ciment [18, 19].

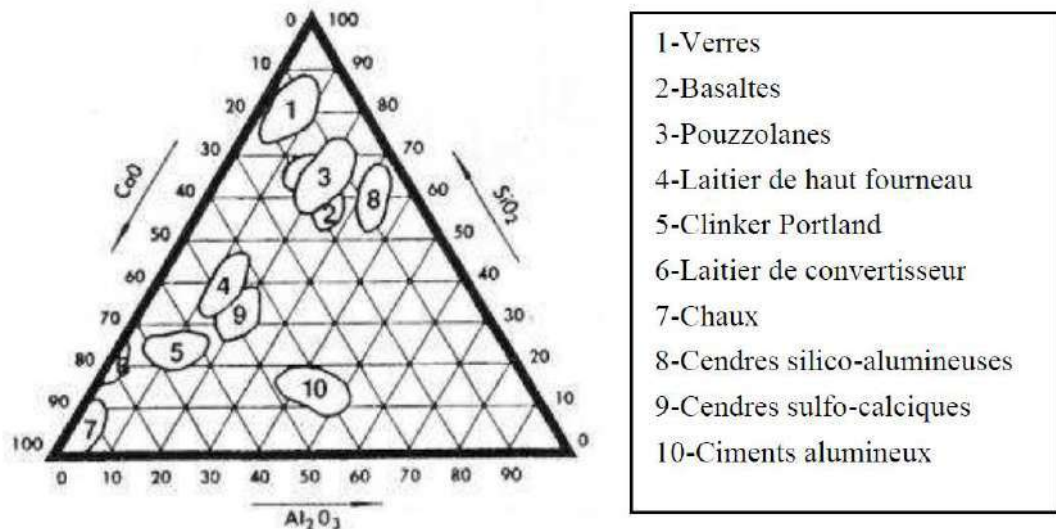
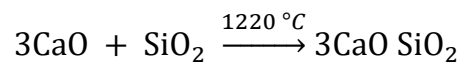


Figure I-3 Diagramme de KIEL système CaO – SiO₂ - Al₂O₃ [20]

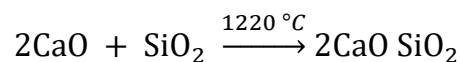
I.5.1. Clinker portland (K) :

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme des petits nodules très durs composés essentiellement des quatre cristallines suivants [12, 16] :

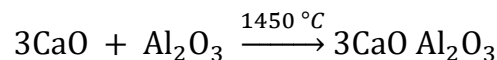
- Le silicate tricalcique nommé « alite » C₃S, dont la formule est 3CaO SiO₂



- Le silicate bi calcique C₂S de formule 2CaO SiO₂.



- L'aluminate tricalcique C₃A de formule 3CaO Al₂O₃.



- L'alumino-ferrite tétra calcique (Ferro aluminate tétra calcique) C₄AF de formule 4CaO Al₂O₃ Fe₂O₃

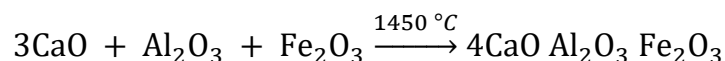




Figure I-4 Clinker

Les propriétés des ciments en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases, voir Tableau I-2:

Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges. [12]

Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible [12].

L'aluminate tricalcique C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait, elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates [12].

L'alumino-ferrite tétra calcique C_4AF , qui forme une solution solide de C_2A et C_2S , réagit moins vite que C_3A : son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

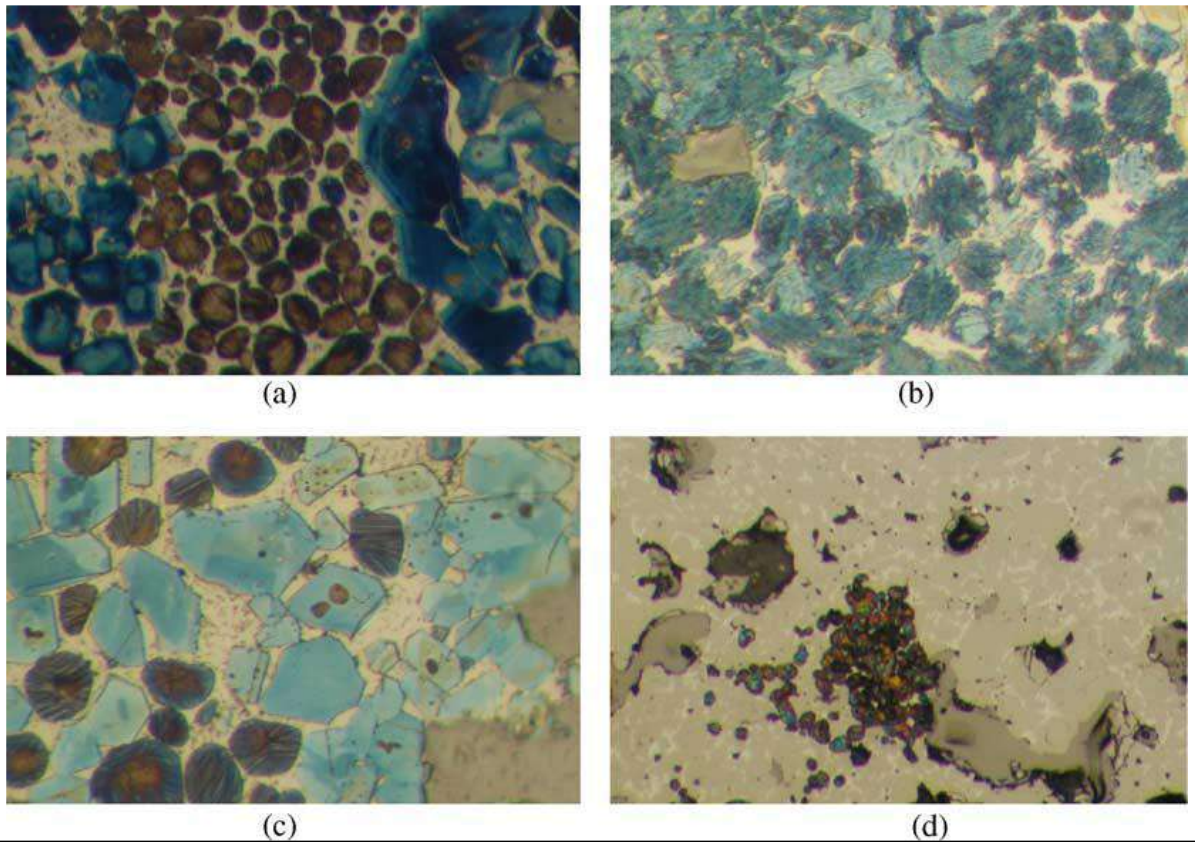
En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

De la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2% dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau ;

De l'oxyde de magnésium MgO , qui est non combiné, peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

De ce qui précède, il ressort qu'un ciment contenant par exemple 60% de C_3S ainsi qu'un pourcentage en C_3A supérieur à 10%, présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé par temps froid, alors qu'un ciment dont le pourcentage en C_3S est

supérieur à 40% et celui en C_3A n'excède pas 5% présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé par temps chaud [12].



a) de gros cristaux C_3S , le groupe C_2S ($\times 500$), (b) de C_2S en raison d'un refroidissement lent ($\times 500$),
 (c) de fins cristaux C_3A ($\times 500$), (d) de petites grappes de CaO ($\times 200$)

Figure I-5 Microstructures de clinker Portland [21].

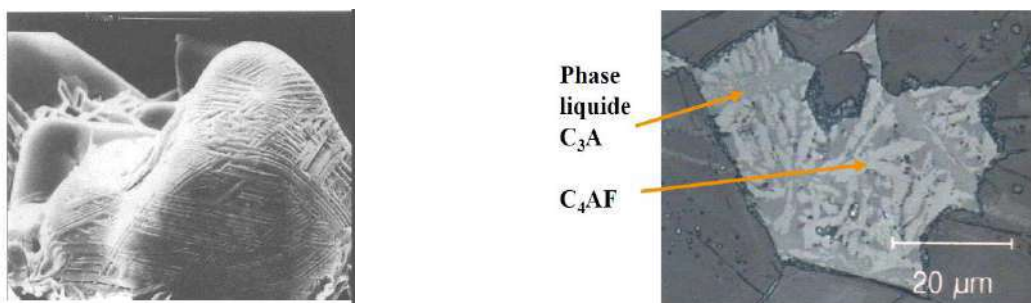


Figure I-6 Images de clinker en microscopie optique [19]

Tableau I-2 composition chimique et minéralogique du clinker [19]

Éléments	Teneur limite (%)	Teneur moyenne (%)
C₃S	40 – 70	60
C₂S	0 – 30	15
C₃A	0 – 15	8
C₄AF	0 – 15	8
Oxydes		
CaO	60 – 69	65
SiO₂	12 – 24	21
Al₂O₃	4 – 8	6
Fe₂O₃	1 – 8	3
MgO	< 5	2
K₂O Na₂O₃	< 2	1
SO₃	< 3	1

On constate que les quatre oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ interviennent pour plus de 95 % de la composition chimique du clinker. On les appelle les oxydes majeurs. Ainsi les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont :

- ✓ La magnésie (MgO) provient de la dolomite qui est souvent présentée avec le calcaire.
- ✓ Les oxydes alcalins K₂O et Na₂O₃ proviennent en général de l'argile et des feldspaths.
- ✓ L'anhydride sulfurique (SO₃) dans le clinker provient des matières telles que la pyrite (FeS₂) mais aussi du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou le gaz naturel.

I.5.2. Constituants secondaires de ciments :

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants artificiels. Ce sont des poudres très fines généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer les caractéristiques de ciment[12]

Tableau I-3 Classification des ajouts selon leur réactivité [17].

<i>TYPE</i>	RÉACTIVITÉ	Matériaux
<i>Hydraulique</i>	Fortement réactif	Ciments spéciaux – chaux hydraulique
<i>Hydraulique Latente</i>		Laitier granulé – cendres volantes riches en calcium (calciques)
<i>Pouzzolanique</i>	Fortement réactif	Fumées de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvres en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcaniques)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
<i>Inerte</i>	Non réactif	Fillers (farine calcaire ...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique ;

A. Les cendres volantes (V)

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales telles que l'argile, le quartz et les feldspaths passent en fusion.

Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique.

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques dépendants des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (norme ASTM C 618-94a) [22].

Cendre volante Classe F : Elles ont une grande proportion de silice et d'alumine. C'est un verre d'aluminosilicate. Sa vitrification est souvent partielle. La présence de cristaux de mellite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), de quartz, d'hématite et de magnétite diminue la réactivité de cette cendre volante.

Cendre volante classe C : Les cendres volantes de la classe C sont plus réactives que celles de la classe F, car tout le Ca est sous forme de phases cristallines réactives (C_3A , CS et C_4A_3S). Par ailleurs, la phase amorphe principale contient suffisamment de Ca pour accélérer la réactivité de l'aluminosilicate.

La majorité des cendres volantes (classes F et C) contiennent approximativement 60% à 85% de verre, 10% à 30% de phases cristallines et 10% de carbone non calciné.

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 μm à 100 μm (50 % < 20 μm). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.

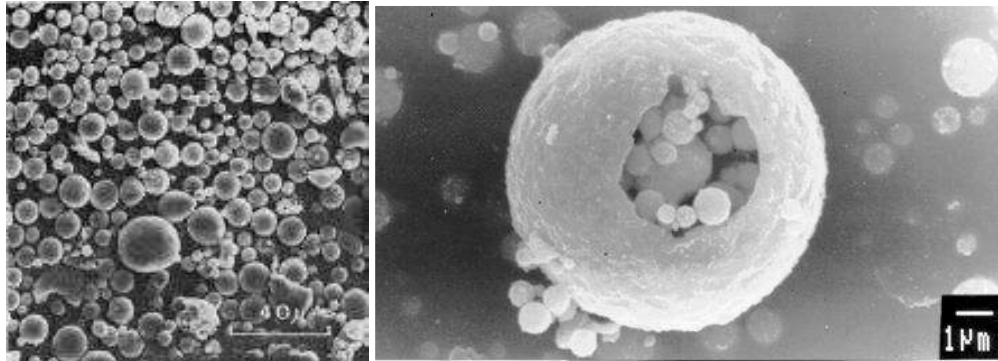


Figure I-7 Cendres volantes vues au microscope [38]

- **Effet des cendres volantes :**

Les cendres volantes confèrent aux bétons les propriétés suivantes :

- Le remplacement du ciment par des cendres volantes dans le béton réduit de façon significative la chaleur d'hydratation.
- La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais.
- Démoulage amélioré.
- Diminue le ressuage.
- Réduit les risques de ségrégations.
- Améliore les performances mécaniques à long terme.
- Réduit le coût des ciments, la quantité de fissures et de défauts.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- Un mariage avantageux pour l'environnement.

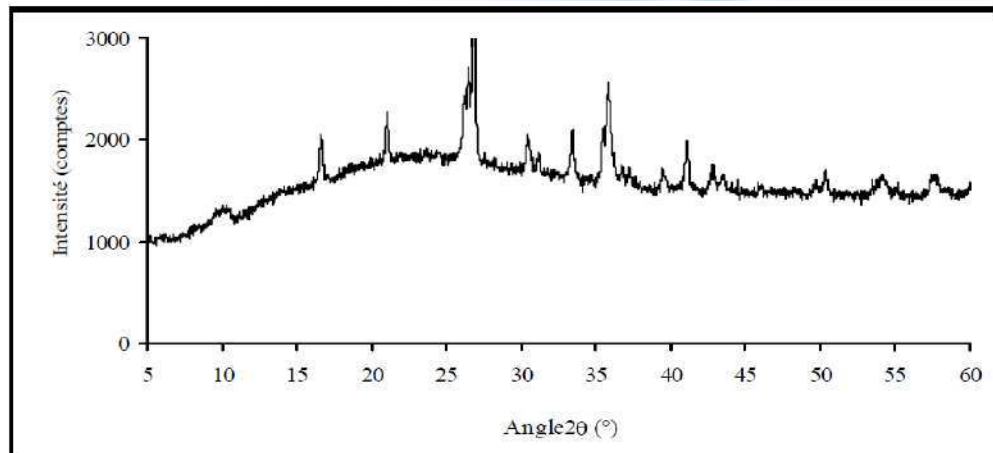


Figure I-8 DRX d'une cendre volante [23]

B. Le laitier de haut fourneau :

Les laitiers de haut fourneau provient de la fusion de la gangue (résidus silico-alumineux du minerai de fer) et des cendre de coke avec un fondant (pierre de chaux ou dolomite) est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Le laitier en fusion flotte au-dessus de la fonte en fusion. Chaque tonne de la fonte produite est nécessairement accompagnée d'une certaine quantité de laitier (environ 0.5 tonnes), variable suivant la nature des produits enfournés (minerai de fer, combustible et fondants). Les quantités de laitier sont par tonne de fonte sont aussi déterminées par les conditions même d'exploitation et par la nature du minerai.

La composition chimique du laitier variera dans des proportions sensibles, cette composition chimique se situe dans une zone précise du diagramme ternaire CaO-SiO₂-Al₂O₃ ou la température de fusion et la plus basse du diagramme ternaire. Selon la valeur de leur rapport CaO/ SiO₂ les laitier peuvent être divisés en laitier acides (CaO/ SiO₂< 1) et en laitiers basiques (CaO/ SiO₂>1) [22, 24].

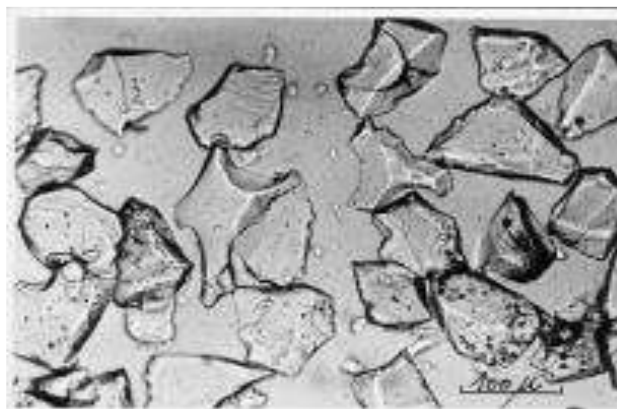


Figure I-9 Laitiers granulés de haut fourneau vu au microscope.

• **Effet du laitier de haut fourneau :**

En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe C. cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours, tandis que les cendres de la classe F ne développent des résistances qu'à partir de 4 semaines [25].

Les particules de laitier <10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45 µm ont de la difficulté à s'hydrater [22].

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai généralement.

Tableau I-4 la composition chimique moyenne du laitier. [26]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	Fe ₂ O ₃ +FeO
30 – 50	28 - 38	12 – 25	02 -18	01-03	1 – 2,5	1 -2.5

• **Laitier concassé :**

C'est un granulat lourd d'aspects anguleux, rugueux, de structure micro alvéolaire de couleur grise il est inattaquable par l'eau, et sa porosité est inférieure à 10% il s'obtient après le coulage des laitiers dans les poches de 1 à 2 m³ qu'on diverse dans fausses de 200 à 300 m de longueur, et de 10 à 12 m de largeur, on laisse refroidir après concassage et criblage, on obtient un granulat [20].

• **Laitier granulé :**

C'est un sable vérifié, très poreux, jusqu'à 60%, il a une couleur gris jaunâtre, de granulométrie jusqu'à 2 mm, et de composition chimique. Silice =29 à 38 %, chaux = 38 à 48%, alumine = 13 à 20 %, magnésie = 06 %. Pour avoir ce type de laitier, la coulée doit être refroidie brusquement dans courant d'air ou d'eau. On obtient un sable sec et finement moulu, qui constitue la base du ciment de laitier. Cette opération a pour but d'empêcher la cristallisation, et de maintenir le laitier à l'état vitreux.

• **Laitier expansé :**

Il a une structure scoriacée alvéolaire ; de teinte grise, après criblage il se présente en trois classes granulaires de densité variable. Il a une composition chimique proche de. Silice= 25 à 40%, chaux= 38 à 50%, alumine =10 à 20%, soufre =01%. Il s'obtient par une puissante injection d'eau, en dessus du laitier en fusion, l'eau vaporise et on obtient des éléments alvéolaires légers.

• **Caractéristiques des laitiers :**

Pour apprécier la qualité du laitier comme adjuvant minéral actif des liants, on se sert de plusieurs modules. D'abord, on distingue deux catégories de laitier. Laitier acide et basique.

Laitier acide : C'est un laitier qui contient en majeure partie la silice fondue de 50 à 60%, avec peu d'alumine en présence de 25 à 30% de chaux. Ce type de laitier subit un refroidissement lent. Le rapport pondéral. (Silice / chaux) ≤ 1.10 .

Laitier basique : Il est très hydraulique pour certaines teneurs en chaux, silice et alumine. Il est obtenu par un refroidissement brusque. Ces laitiers sont caractérisés par un module de basicité qui répond à la formule.

$$M_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

Si $M_b > 1$. Le laitier est acide.

Si $M_b < 1$ le laitier est basique.

Si $M_b = 1$ le laitier est neutre.

Il existe aussi le module d'activité.

$$M_a = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

Si $M_a = 0.017$ à 0.25 , le laitier est basique, et si $M_a = 0.33$ à 0.40 le laitier est acide. Notons que l'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation de ces deux modules c'est-à-dire. Plus le module d'activité est grand, plus la vitesse de durcissement du laitier broyé et rapide.

Pour synthétiser les qualités que doivent avoir les laitiers on peut dire :

- Il faut que le laitier soit à la limite de vérification.
- Il faut qu'il contienne le maximum de chaux et d'alumine.

Il faut que la proportion de chaux, de silice et d'alumine doivent composer au moins 90%, et le restent composé d'autres corps tels que l'oxyde de fer, l'anhydride sulfurique et magnésie [22].

C. La pouzzolane naturelle (Z) ou calcinée (Q) :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce 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. [27]

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions internes et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

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



Figure I-10 pouzzolanes naturelles

- **Types de pouzzolane :**

- i. Pouzzolane naturelle :**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinés dans un four ou transformés, puis broyés pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618). [29]

- ii. Pouzzolane artificielle :**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets de différentes industries. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuile

fabriquées avec des argiles pures à des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [22].

- **Effet de la pouzzolane :**

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes.

- i. État frais :*

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [30].

- ii. État durci :*

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice-ciment se traduit par une série d'effets très favorables [30].

- 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 aux 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.

D. Schistes calcinés (T) :

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzalaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières. Ils ont des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques [6, 31].

E. Les fillers calcaires (L) :

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 P15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment [32].

• Effet des Fillers :

Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment.

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

F. Les fumées de silice (D) :

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de Ferro silicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 μm . Leur surface spécifique est de 20 m^2/g à 25 m^2/g . La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95% [22] .

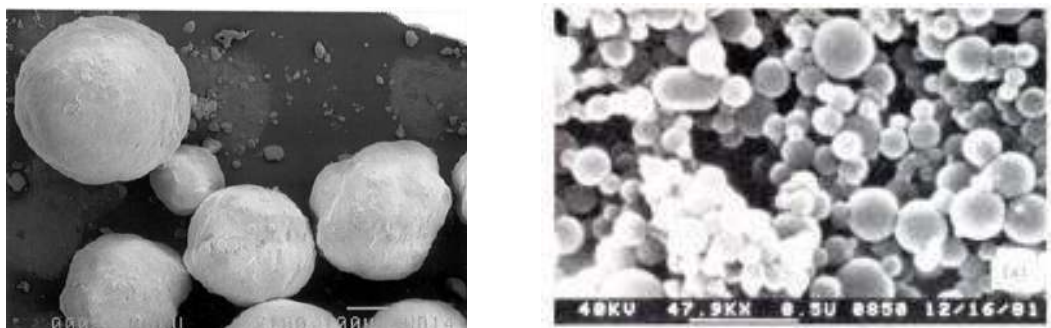


Figure I-11 Images microscopiques de fumée de silice [33]

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces «poussières» étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge [34].

Tableau I-5 Compositions chimiques de certains types fumés de silice [19]

<i>Composée</i>	Silicium	Ferro silicium	
		grise	blanche
<i>SiO₂</i>	93,7	87,30	90,00
<i>Al₂O₃</i>	0,60	1,00	1,00
<i>CaO</i>	0,20	0,40	0,10
<i>Fe₂O₃</i>	0,30	4,40	2,90
<i>MgO</i>	0,20	0,30	0,20
<i>Na₂O</i>	0,20	0,20	0,90
<i>K₂O</i>	0,50	0,60	1,30
<i>Perte au feu</i>	2,90	0,60	1,20

Au départ, son utilisation a été motivée par des arguments économiques, car pour une même résistance, il était possible de produire un béton à moindre coût si une partie des matériaux cimentaires étaient remplacés par la fumée de silice dont le prix de vente était initialement bas. Dans les années 1990, la dégradation des infrastructures a placé l'accent sur des préoccupations au niveau de la durabilité du béton et ainsi, la fumée de silice a trouvé application dans la production de béton à haute performance.

Aujourd'hui, la fumée de silice est peut-être un matériau de choix pour les ingénieurs qui conçoivent des bétons aptes à résister à des conditions d'exposition agressives.

Les fumées de silice jouent un rôle particulier du fait, de leur composition (taux de silice) à (70 %) et, d'autre part de leur finesse (supérieure à 10 000 m² /Kg).

Pierre-Claude Aïtcin explique : La dernière génération de (BHP), les bétons de poudres réactives (BPR) faites de sable, de quartz et de fumée de silice broyées, le tout soigneusement dosé, pousse la performance encore plus loin [35].

La maîtrise de cette technologie permet d'obtenir des bétons dont la résistance à la compression varie de 200 à 800 MPA, ce qui se compare aux meilleurs aciers et composites sur le marché. Les BPR sont déjà très compacts, beaucoup moins poreux que les autres BHP et ils constituent une barrière quasi impénétrable contre le sel.

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'ajout et de stabilisateur.

Les microsilices sont un sous-produit de la fabrication du silicium et du ferro-silicium.

Au cours de ce processus, on vaporise du sable siliceux à l'arc électrique et puis il est condensé sous forme de fumée de silice dont la taille des particules est comprise entre 0.05 et 0.5 μm . Les micros silices ont composé à 85-95 % d'oxyde de silicium vitreux / hyalin (SiO_2 amorphe) ont une très grande surface spécifique, qui est du même ordre de grandeur que la fumée de cigarette [36].

Qu'on l'appelle micro silicate, fumée de silice condensée ou plus régulièrement fumée de silice, tous ces termes représentent la même pouzzolane et celle-ci possède des propriétés qui sont bénéfiques au béton.

Les nano silices sont un précipité siliceux avec une surface spécifique d'environ 200 m^2/g . Ils se composent de SiO_2 amorphe dont les particules ont un diamètre environ 10x inférieurs à celui des micros silices et sont utilisées en qualité de stabilisateur et d'agent de pompage [37].

- **Effet de la fumée de silice :**

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le SiO_2 amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté (CSH-Gel) avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation du ciment [38].

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolane conduit à une diminution du PH par rapport à un béton exempt de silices. C'est la raison pour laquelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de poussières de silice admissibles, par exemple à 11% de la teneur en matières solides de silice, prise par rapport à la quantité de ciment, afin de garantir la protection anticorrosion de l'armature. Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice par la forme sphérique de ses grains, permettent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité et augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant [39].

Dans le béton frais, les fumées de silice induisent les effets suivants [30] :

- Faible tendance au ressuage, à la sédimentation.
- Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope.
- Bon pouvoir de rétention d'eau.

- Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- Meilleure adhérence sur le support.
- Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.
- L'évolution de la résistance s'avère plus lente pour des bétons contenant de la fumée de silice que pour des bétons sans fumée. Pourtant la résistance de bétons avec la fumée de silice augmente même au-delà de 450 jours.
- Augmenter la fluidité des bétons hauts performances, et diminue la perméabilité.

La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes [38] :

- Améliorer les performances mécaniques à long terme. Résistances en compression, flexion et traction.
- Augmenter le module d'élasticité.
- Réduis le fluage.
- Améliorer la résistance à l'abrasion et à l'érosion et la durabilité en milieux agressifs.
- Diminuer les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- Diminuer la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Faciliter le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment.
- Réduisez les risques de ségrégations et la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

I.5.3. Additifs :

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs (à l'exception des pigments éventuellement ajoutés) doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment [6, 31].

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible. Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise. Le pourcentage admis ne devant pas dépasser 05 % de la masse totale du ciment [12].

I.7. Bénéfices d'utilisation des ajouts minéraux :

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

- **Bénéfices fonctionnels.**

- ✓ incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse)
- ✓ il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- ✓ Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.
- ✓ Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- ✓ Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

- **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.

- **Bénéfices écologiques et environnementaux**

- ✓ Diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- ✓ Élimination des sous-produits de la nature.

I.5.4. Amélioration de l'ouvrabilité :

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance, l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire [23].

La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépendent de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules > 45 µm à un maximum de 34 %.

I.5.5. Chaleur d'hydratation :

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.

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland [23].

I.5.6. Durabilité :

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH [23].

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont : la perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange.

À cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C_3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier diminue l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

I.5.7. Développement des résistances :

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajouts. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H [23].

I.5.8. Développement des bétons à haute résistance :

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur d'eau. Tous les ajouts utilisés en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis

que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [23].

I.8. Classification d'après leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Le Tableau I-6 montre les types de ciments en fonction de pourcentage de leurs constituants.

Tableau I-6 Désignations des différents types de ciment en fonction de leur composition[7]

Principaux types		Constituants principaux (pourcentage en masse) ^(a)											Constituants secondaires				
		Notation des 27 produits (Types de ciment courant)	Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumé de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire						
						Naturel le	Naturel le calcinée	Siliceus e	Calciq u e		L	LL					
K	S	D ^(b)	P	Q	V	W	T	L	LL								
CEM I	Ciment portland	CEM I	95 - 100	-	-	-	-									0 - 5	
	Ciment portland au laitier	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20													0 - 5
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35													0 - 5
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90 - 94		6 - 10												0 - 5
		CEM II/A-P	80 - 94			6 - 20											0 - 5
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/B-P	65 - 79			21 - 35											0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94				6 - 20										0 - 5
		CEM II/B-Q	65 - 79				21 - 35										0 - 5
		CEM II/A-V	80 - 94					6 - 20									0 - 5
	Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/B-V	65 - 79					21 - 35									0 - 5
		CEM II/A-W	80 - 94						6 - 20								0 - 5
		CEM II/B-W	65 - 79						21 - 35								0 - 5
		CEM II/A-T	80 - 94							6 - 20							0 - 5
	Ciment portland au schiste calciné	CEM II/B-T	65 - 79							21 - 35							0 - 5
		CEM II/A-L	80 - 94								6 - 20						0 - 5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/B-L	65 - 79								21 - 35						0 - 5
CEM II/A-LL		80 - 94									6 - 20					0 - 5	
CEM II/B-LL		65 - 79										21 - 35				0 - 5	
CEM II/A-M		80 - 94														0 - 5	
Ciment portland composée ^(c)	CEM II/B-M	65 - 79														0 - 5	
	CEM III/A	35 - 64	36 - 65													0 - 5	
CEM III	CEM III/B	20 - 34	66 - 80													0 - 5	
	CEM III/C	5 - 19	81 - 94													0 - 5	
	Ciment pouzzolanique ^(c)	CEM IV/A	65 - 89													0 - 5	
CEM IV	CEM IV/B	45 - 64														0 - 5	
	Ciment composé ^(c)	CEM V/A	40 - 64	18 - 30												0 - 5	
CEM V	CEM V/B	20 - 38	31 - 50													0 - 5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.
 b) La proportion des fumées de silice est limitée à 10%
 c) Dans le cas des ciments portland composé CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment

I.9. Classification d'après leurs résistances :

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa [31], comme indiqué dans le Tableau I-7.

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevées (indiquée par la lettre R) [31].

La conformité d'un lot de ciment est appréciée pour ce qui concerne la résistance à la compression en fonction des valeurs du tableau suivant qui sont des limites absolues applicables à chaque résultat d'essai.

Tableau I-7 Spécification et valeurs garanties en fonction de classe de résistance [31, 40]

classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 j	Début de prise	stabilité
	Au jeune âge		À 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	Minimal	maximal	($\mu\text{m/m}$)	(min)	(mm)
32,5 N	8	17.5	32.5	42.5	≤ 800	90	≤ 10
32,5 R	12	-	32.5	42.5	≤ 1000	90	≤ 10
42,5 N	10	-	42.5	52.5	≤ 1000	60	≤ 10
42,5 R	15	-	42.5	52.5	≤ 1000	60	≤ 10
52,5 N	15	-	52.5	-	-	60	≤ 10
52,5 R	28	-	52.5	-	-	60	≤ 10

Tableau I-8 caractéristique exigés de sous-classes de résistances[40]

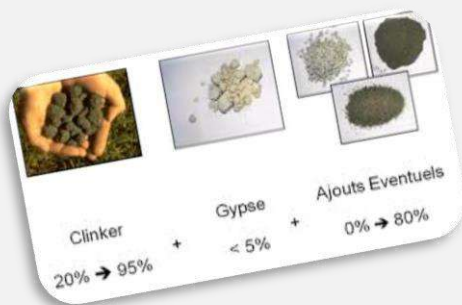
Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences recommandées
Perte au feu	CEM I CEM III	Toutes classes	$\leq 5,00 \%$
Résidus insolubles	Tous types	Toutes classes	$\leq 5,00 \%$
Sulfates	CEM I CEMII	32,5 N 32,5 R 42,5 N	$\leq 3,50 \%$
	CEM VI CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	$\leq 4,00 \%$
	CEM III	Toutes classes	
Chlorure	Tous types	Toutes classes	$\leq 0,10 \%$
pouzzolanicité	CEM IV	Toutes classes	Pas nécessaire

I.10. Conclusion :

L'utilisation des ajouts minéraux permet d'économiser le coût de production et l'énergie fournis lors de la production de ciment et de valoriser les ressources naturelles existant dans la nature qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

CAHPITRE II :

HYDRATATION DE CIMENT & CIMENTATION DES PUIITS



CHAPITRE II. HYDRATATION DE CIMENT & CIMENTATION DES PUITES

II.1. Hydratation de ciment :

II.1.1. Généralité :

Les constituants de ciment portland sont hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils donnent en présence d'eau des hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. On appelle « hydratation de ciment » l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Les principales réactions procèdent simultanément ou successivement, et le processus physico-chimique est généralement plus complexe que la simple conversion des composés anhydre en leur composé hydraté correspondant. Les couplages entre les différentes réactions sont encore mal connus. Dans ce texte, nous allons voir séparément les processus d'hydratation de chaque composant majeur de ciment. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri LECHATÉLIER. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [41]:

- La dissolution des composants du ciment dans l'eau.
- La formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inters granulaires.

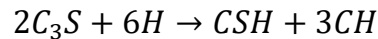
II.1.2. Hydratation des composants du ciment portland :

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'introduction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 – 8 heures [42, 43].

La période de l'introduction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment. Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates [42, 43].

II.1.3. Hydratation du silicate tricalcique C₃S :

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction de C₃S avec de l'eau est la suivante :



Ou CSH représente le 3CaO 2SiO₂ 3H₂O (silicate de calcium hydraté) et CH représente le Ca(OH₂) (portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S sont :

Les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 – 700 m²/g).

L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou portlandite) qui occupe entre 20 à 25 % du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut-être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [42, 43].

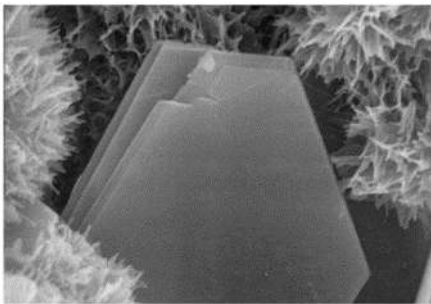


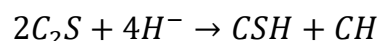
Figure II-1 Pâte de ciment hydratée 7 jours : Ca(OH)₂ et CSH



Figure II-2 Formations fibreuses de CSH (pâte de ciment à 7 jours)

II.1.4. Hydratation du silicate bi-calcique C₂S :

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par :



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de la stœchiométrie, l'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH, alors que l'hydratation de C₂S produirait 82%

de gel¹ de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant plus de C₃S sont nécessaires, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée [42, 43].

II.1.5. Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄·2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le tri-sulfoaluminate hydraté (étrangeté) qui se cristallise en aiguilles à base hexagonale [42, 43]. La réaction est donnée par :

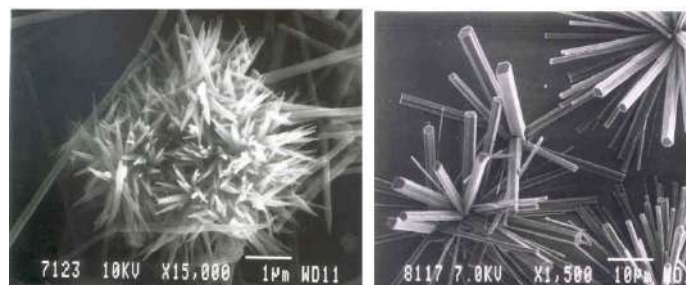
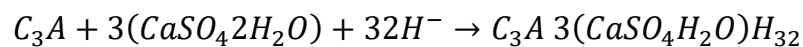
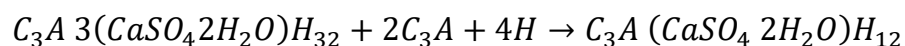


Figure II-3 Morphologies aciculaires d'étranté (MEB) [42]

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en étranté. Il apparaît donc secondairement un mono-sulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [42, 43].

II.1.6. Hydratation d'alumino-ferrite tétra-calcique C₄AF :

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfo-aluminate. Ces sulfo-aluminates occupent environ 15 à 20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu de développement de la

¹ Substance constituée de particules de dimensions nanométriques avec un ordre structurel interne.

résistance [44]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise de ciment.

II.2. Comportement d'un ciment avec ajout minéral :

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

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [8].

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, 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 [36].

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance.

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. [45]

II.3. Chimie d'hydratation du ciment portland avec ajout :

a. Définition :

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 pouzzolaniques se produit par consommation de portlandite, la fumée de silice (SiO_2) permet une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par conséquent une augmentation de la résistance du mélange. En même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau, une petite réaction immédiate du laitier se produit et libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite, le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les CSH [46].

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent.

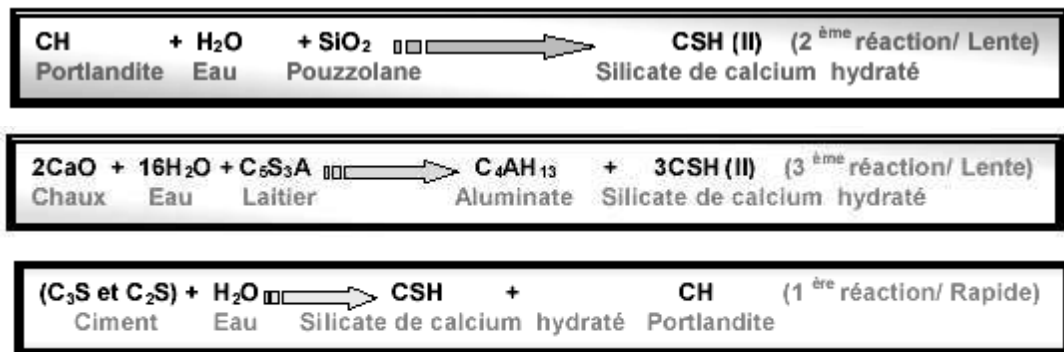


Figure II-4 Equation de l'hydratation de ciments et la pouzzolane

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 ; parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du 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 [30].

b. Hydratation et réaction pouzzolanique :

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combiné et ils sont pauvres en CaO , 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 SiO₂ de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca (OH)₂ créées par l'hydratation du ciment portland.

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 (C₅H, C₄AH₁₃, C₈AFH₂₆, C₆AS₃H₃₂). Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée.

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

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

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [47].

c. Hydratation du laitier :

Les laitiers du haut fourneau sont des matériaux hydrauliques les plus utilisés, car leur production est très importante et leurs propriétés sont stables, comparées à celles des autres sous-produits industriels. Plus de cent ans d'expérience sur les ciments aux laitiers du haut fourneau a montré clairement leur efficacité dans la confection des structures en béton, et en particulier les structures maritimes [48].

Seul le laitier granulé est utilisé en cimenterie. Il est ajouté au moment du broyage aux autres constituants (clinker, gypse). Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (90 % et plus) de quatre oxydes (SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO) et contenant en quantité insignifiante des oxydes. TiO₂, MnO, FeO et les sulfures. CaS, MnS, FeS [49].

La composition chimique du laitier est schématisée par la formule C_5S_3A reflétant la répartition courante des trois oxydes. L'hydratation du ciment au laitier est étudiée suivant les cas. Absence de gypse, par activation sulfatique et par activation alcaline. Les différents types d'activation conduisent à des produits d'hydratation stables [50].

Le contenu du ciment au laitier en CSH est considérablement supérieur par rapport au ciment portland, à cause de la production inférieure de la chaux, cette dernière présente dans le ciment au laitier durci seulement en quelques points, tandis qu'elle représente 25% dans le ciment portland [51].

d. Chaleur d'hydratation du laitier :

Le ciment au laitier a un développement de chaleur lent sous les conditions adiabatiques que le ciment portland, ce qui est bénéfique pour protéger le jeune béton de l'apparition des fissures thermiques.

La forme de courbes de l'évolution de la chaleur dépend fortement de l'activant utilisé, le verre soluble est le meilleur activant, il accélère le processus de l'évolution de la chaleur, qui signifie l'occurrence rapide de l'hydratation pendant les quelques premières heures du traitement thermique [52].

e. Influence de la finesse de mouture sur l'activité du laitier :

L'activité du liant remonte avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 2000 cm^2/g à 4800 cm^2/g .

Il a été établi que le laitier trop broyé ne se prête pas à un stockage de longue durée. Il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication du liant, d'où l'utilité d'utiliser des laitiers broyés ayant une surface spécifique de 2200 cm^2/g à 3000 cm^2/g qui est rentable du point de vue économique [52].

II.4. CIMENTATION DES PUITES

II.4.1. Généralité :

La cimentation d'un tubage et plus particulièrement d'une colonne de production est une opération d'une extrême importance, car elle conditionne en grande partie l'exploitation future du puits. La cimentation consiste après le forage d'un puit de fixer le tubage au terrain, en introduisant dans l'espace annulaire une certaine quantité de laitier (coulis de ciment). Mais l'hétérogénéité géologique de la formation confère à cette dernière des particularités qu'il faut prendre en considération durant la réalisation des puits : le forage et la cimentation. Le programme de cimentation est très important. Son objectif essentiel réside dans la séparation des diverses zones productrices ou fissurées mises en communication au cours du forage. La cimentation des forages est effectuée afin de prévenir la migration des fluides dans des zones pièges et d'éviter ainsi des pertes ayant pour effet une baisse de production ou encore pour isoler des zones productrices à exploiter ultérieurement. Le programme standard de puits est présenté dans le schéma du programme standard de puits [53].

Le ciment fixe mécaniquement le tubage dans le trou et fournit ainsi un point d'ancrage. Ceci est surtout vrai pour le tubage de surface qui est cimenté sur toute sa hauteur : le ciment supporte tout le poids des tubages qui vont suivre. Le ciment protège le tubage contre la corrosion due aux fluides contenus dans les couches traversées [53].

II.4.2. La cimentation d'un puit de pétrole :

La cimentation des puits est l'une des opérations les plus importantes effectuées sur un puit de pétrole ou de gaz. La première tâche d'un emploi du ciment est de garder le boîtier en place, pour empêcher par exemple la corrosion de l'eau formation saline, et, plus importante, pour éviter l'afflux de fluides ou de gaz dans l'espace annulaire et de les empêcher de migrer vers les zones supérieures ou inférieures ("isolation zonale", Figure II-5). Une bonne isolation zonale est la clé pour la production sécuritaire des hydrocarbures. En fonction des conditions de profondeur, température, pression et salinité, des adjuvants chimiques différents (y compris l'additive perte de liquide, des dispersants, des ralentisseurs, les migrations de gaz anti-polymères, etc) sont utilisés pour obtenir les propriétés requises complexes du coulis de ciment [54].

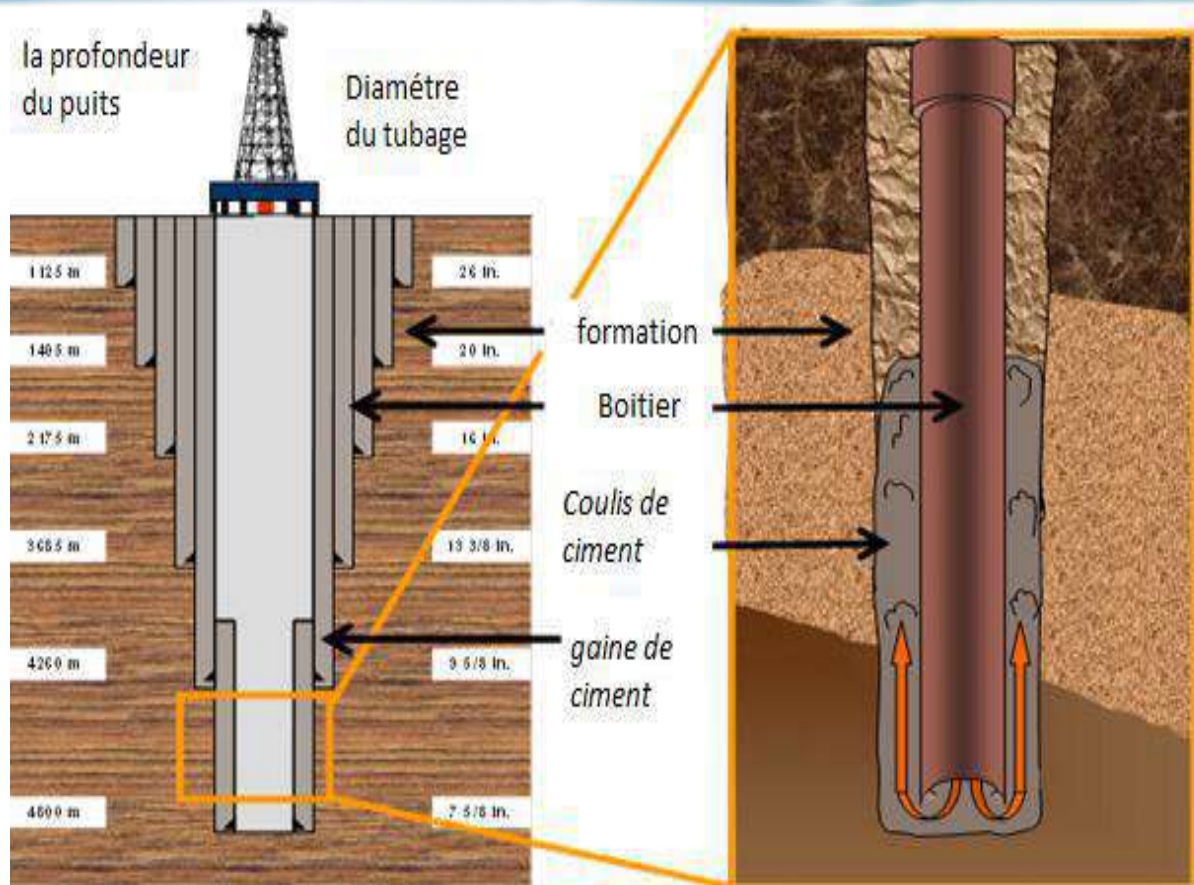


Figure II-5 Puit de pétrole (processus de cimentation).

II.4.3. Objectif de la cimentation des puits :

Les puits de pétrole et de gaz sont forés à des profondeurs diverses et dans des environnements souvent difficiles. Le ciment pétrolier est présent dans tous ces puits. Il sert à former un sceau hydraulique entre le tubage et la formation souterraine. Ce sceau doit être exempt d'orifices et imperméable aux gaz pour que le puit atteigne sa capacité de production maximale. Le ciment pétrolier peut remplir de nombreuses fonctions dans le cadre d'un projet de forage [55].

La première de ces fonctions est la protection de l'environnement, et en particulier celle des nappes phréatiques souterraines. Le ciment pétrolier empêche les liquides et les gaz de production de parvenir à l'eau souterraine, ce qui préserve nos sources d'eau [55, 56].

La structure de soutien du tubage et des trains de tige est tout aussi importante. Le ciment pétrolier sert à mettre en place une gaine entre le trou de forage et le tubage. Une liaison s'établit entre l'infrastructure souterraine et le tubage, ce qui immobilise ce dernier et offre un appui pour la structure souterraine du puits [55, 56].

Les ciments pétroliers servent à prévenir la corrosion du tubage souterrain et des trains de tiges. Sans la protection du ciment pétrolier, les gaz et les liquides souterrains risquent d'entraîner la

corrosion et la défaillance du tubage et des trains de tige. Dans ces nombreux cas, des acides puissants servent à stimuler la production des puits. Les ciments pétroliers protègent les tubages et les trains de tiges de l'action corrosive de ces acides [55].

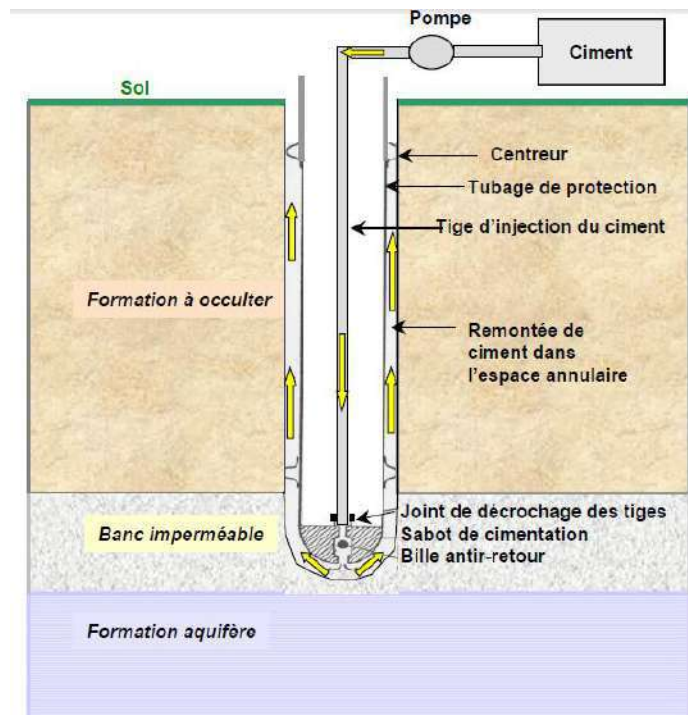


Figure II-6 Dispositifs de cimentation par les tiges

II.4.4. Caractérisation de ciment pétrolier :

La cimentation des puits de pétrole et de gaz est l'étape la plus importante pour la réalisation des puits. Ce procédé est utilisé partout dans le monde. Il existe une variété des matériaux et de techniques utilisées dans la cimentation des puits, puisque les matériaux rencontrent des conditions de température et de pression importantes dont la profondeur peut dépasser 2000 mètres. L'Algérie, pour la cimentation des puits, utilise le ciment pétrolier classe « G » qui est importé à énorme quantité et en prix exorbitant [53].

Le ciment pétrolier se caractérise par une prise retard, donc sa teneur en C_3S doit être très faible et sa teneur en C_4AF doit être élevée. Le ferro-aluminate et tetra-calcique à la différence de C_3A , C_3S et C_2S ne contribue pas à la résistance du laitier. Cependant, la contribution de ferro-aluminate varie en fonction de la température et les additifs présents. Dans certaines conditions cette contribution est analogue à celle de l'aluminate tricalcique. Le laitier de ciment va donc donner un augmentation rapide de la résistance [57].

II.4.5. Fabrication de la pâte de ciment « classe G » :

Les pâtes du ciment pétrolier " Classe G " ont un rapport massique (E/C de 0,44). Avec ce rapport, la quantité d'eau introduite est supérieure à la quantité d'eau stœchiométrique nécessaire à l'hydratation totale du ciment anhydre ($E/C > 0,38$) [54, 58, 59]. Un adjuvant anti-mousse NF3 a été également ajouté pour la fabrication du coulis. Ces trois composants sont d'abord mélangés dans un malaxeur pendant 60 s à une vitesse de 4000 tr/min puis à une vitesse de 12000 tr/min pendant 35s. Afin d'expulser les bulles d'air entraînées pendant la fabrication du coulis, une agitation mécanique à 250 tr/min pendant 20 min est réalisée [59].

II.5. Classification de ciment selon API :

American petroleum institutes for materials fixe les spécifications et essais pour les ciments à puits (spécifications d'API 10A) comprend des exigences pour huit classes de ciments des puits de pétrole (classes A à H) et trois classes principales (ordinaire, haute résistance aux sulfates et modérée résistance aux sulfates). Chaque classe est applicable pour une utilisation à une certaine gamme de profondeurs de puits, les températures, pressions, et les environnements de sulfates. L'industrie pétrolière utilise également les types classiques de ciments portland avec modificateur selon les conditions de puit. Le

Tableau II-1 montre les différentes classes de ciments pétroliers [56, 60-62].

Tableau II-1 classification de ciment (API) [61, 62]

<i>Classe (API)</i>	Mélange d'eau (%)	Coulis de ciment (g/cm³)	Profondeur de puits (m)	T° statique (°C)
<i>A (portland)</i>	46	1,87	0-1830	27-77
<i>B (portland)</i>	46	1,87	0-1830	27-77
<i>C (high early) accéléré</i>	56	1,77	0-1830	27-77
<i>D (retarded) lent</i>	38	1,96	1830-3050	77-110
<i>E (retarded) lent</i>	38	1,96	3050-4270	77-144
<i>F (retarded) lent</i>	38	1,96	3050-4880	110-160
<i>G (basic – calf)</i>	44	1,89	0-2440	27-94
<i>H (basic – calf coast)</i>	38	1,96	0-2440	27-94

II.6. Propriétés de ciment pétrolier :

II.6.1. Conditions chimiques :

Les ciments pétroliers doivent répondre aux exigences chimiques référencier aux spécifications d'API, respectives des conditions de l'environnement et des catégories de ciment référencés dans le

Tableau II-2:

Tableau II-2 exigences chimiques (API) [63 ,62 ,56]

			Classe de ciment					
			A	B	C	D.E.F	G	H
Type ordinaire (O)	Magnésie (MgO)	% max	5	-	5	-	-	-
	Anhydride sulfatique (SO ₃)	% max	3.5	-	4.5	-	-	-
	Perte au feu	% max	3	-	3	-	-	-
	Résidu insoluble	% max	0.75	-	0.75	-	-	-
	C ₃ A	% max	-	-	15	-	-	-
Moyenne résistance aux sulfates (MRS)	Magnésie (MgO)	% max	-	5	5	5	5	5
	Anhydride sulfatique (SO ₃)	% max	-	3	2.5	2.5	2.5	2.5
	Perte au feu	% max	-	3	3	3	3	3
	Résidu insoluble	% max	-	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	C ₃ S	%	-	-	-	-	48 - 58	48 -58
	C ₃ A	% max	-	8	8	8	8	8
	Alcalis (exprime en Na ₂ O)	% max	-	-	-	-	0.75	0.75
Haute résistance aux sulfates (HRS)	Magnésie (MgO)	% max	-	5	5	5	5	-
	Anhydride sulfatique (SO ₃)	% max	-	3	3.5	2.5	2.5	-
	Perte au feu	% max	-	3	3	3	3	-
	Résidu insoluble	% max	-	0.75	0.75	0.75	0.75	-
	C ₃ S	%	-	-	-	-	48 - 65	-
	C ₃ A	% max	-	3	3	3	3	-
	C ₄ AF + 2C ₃ A	% max	-	24	24	24	24	-
	Alcalis (exprime en Na ₂ O)	% max	-	-	-	-	0.75	-

II.6.2. Exigences physiques :

Le ciment doit être conforme aux caractéristiques physiques respectives et exigences de performance spécifiées par API illustré dans le Tableau II-3.

Tableau II-3 les exigences physiques (API)[56, 62, 63]

Classe de ciment			A	B	C	D	E	F	G
Eau de malaxage (%)			46	46	56	38	38	38	44
Surface spécifique, minimum. (m ² /kg)	Turbidimètre		150	160	220	-	-	-	-
	Perméabilité à l'air		280	280	400	-	-	-	-
Teneur en fluide libre ; % max			-	-	-	-	-	-	5.9
	Condition de durcissement final		Résistance à la compression minimale MPa						
	Température °C	Pression MPa							
résistance à la compression (8 h temps de séchage)	38	Atm	1.7	1.4	2.1	-	-	-	2.1
	60	Atm	-	-	-	-	-	-	10.3
	110	20.7	-	-	-	3.4	-	-	-
	143	20.7	-	-	-	-	3.4	-	-
	160	20.7	-	-	-	-	-	3.4	-
Résistance à la compression (24h temps de séchage)	38	atm	12.4	10.3	13.8	-	-	-	-
	77	20.7	-	-	-	6.9	6.9	-	-
	110	20.7	-	-	-	13.8	-	6.9	-
	143	20.7	-	-	-	-	13.8	-	-
	160	20.7	-	-	-	-	-	6.9	-

II.6.3. Résistance à la compression :

- Pour soutenir la colonne de tubage, une résistance en compression de 3,45 MPa est généralement suffisante.
- Le temps requis pour le ciment pour atteindre la force et de régler derrière le boîtier et le sabot de tubage ne devrait pas être percé jusqu'à ce que la force soit atteinte.
- la résistance à la compression dépend de :
 - ✓ Température
 - ✓ Pression
 - ✓ Quantité d'eau
 - ✓ Le temps écoulé.

II.6.4. Temps d'épaississement :

- C'est le temps requis pour un coulis de ciment à pomper et déplacées dans l'espace annulaire.
- La boue devrait avoir suffisamment de temps pour permettre à un épaississement de mélange, de pompage et le déplacement avant le durcissement.

- Généralement deux à trois heures épaissements de temps qui comprend un facteur de sécurité pour tenir compte des retards et des interruptions en fonctionnement.

II.6.5. Additifs pour les ciments pétroliers :

Il est possible d'ajuster certaines caractéristiques du ciment au moment de sa fabrication. Toutefois ces modifications restent trop faibles pour adapter le ciment à tous les cas pouvant se présenter lors d'un forage. On est donc couramment amené à utiliser un certain nombre d'additifs, pour adapter les caractéristiques du ciment aux différentes conditions d'utilisation.

Ces additifs peuvent être classés en sept grandes familles :

- ☛ Accélérateurs
- ☛ Retardateurs
- ☛ Fluidifiants
- ☛ Réducteurs de filtrat
- ☛ Allégeant
- ☛ Alourdissant
- ☛ Additifs spéciaux et spécifiques

II.7. CONCLUSION :

L'utilisation des ajouts minéraux permet d'économiser le cout de production et l'énergie fournie lors de la production de ciment et de valoriser les ressources naturelles existant dans la nature qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

PARTIE EXPERIMENTALE



CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISE



CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISE

'''

Introduction :

Afin de témoigner l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés chimiques et physiques des mortiers, des essais de caractérisation des matières sont effectués. Dans ce chapitre, nous allons examiner les caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail expérimental. Nous avons effectué un stage pratique à la cimenterie d'Ain El-Kébira Sétif et AIN TOUTA Batna au sein de laboratoires de contrôle de qualité de ciment (physique et chimique) durant 50 jours pour préparer les matériaux (clinker, pouzzolane, laitier de haut fourneau et la poudre de sable de dunes et le gypse). Nous avons fait le séchage des matériaux dans une étuve puis le broyer à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité de 5kg (voir Photo III-1).

Les essais de caractérisations des matériaux ont été réalisés conformément aux normes AFNOR au sein du laboratoire sous les conditions climatiques $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR=43-55\%$.



Photo III-1 broyeur à boulets utilisé au broyage des matériaux

III.2. Le clinker (K) :

Le clinker utilisé dans notre étude est un clinker CRS (Photo III-2) de couleur grise provenant de la cimenterie de ZAHANA MAASCARA de compositions chimiques et minéralogiques regroupées dans le Tableau III-1 et le Tableau III-2, ces essais sont réalisés au laboratoire de la cimenterie d'Ain El Kébira.

Tableau III-1 composition chimique du clinker[64, 65]

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	RI	PAF
(%)	66,59	22,07	3,58	5,91	0,06	0,41	0,428	1,29	0,13	0,27

Tableau III-2 compositions minéralogiques du clinker[64, 65]

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
(%)	70,18	6,93	0	17,97

De même laboratoire, nous avons mesuré :

La surface spécifique du Blaine du clinker est : $SSB = 3700-4300 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue du clinker est : $\rho = 3,250 \text{ g/cm}^3$.



Photo III-2 Clinker utilisé

III.3. Ciment (C) :

Dans notre travail nous avons confectionné un ciment ordinaire par le malaxage de 96,5% de clinker CRS de la cimenterie de ZAHANA et 3,5% de gypse de ROUINA. Ce ciment est caractérisé par la composition chimique et minéralogique représentée dans le Tableau III-3 et le Tableau III-4. Ces essais ont été effectués au sein de laboratoire de la cimenterie d'AIN ELKEBIRA SETIF.

Tableau III-3 composition chimique de ciment

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	cl	MgO	RI	PAF
(%)	65,78	20,87	3,61	5,18	1,69	0,26	0,111	0,001	1,41	0,37	0,49

Tableau III-4 composition minéralogique de ciment

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
(%)	72,62	5,071	0,812	15,75

La surface spécifique du Blaine du ciment est : $SSB = 4000-4100 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue du ciment est : $\rho = 3,18 \text{ g/cm}^3$.

III.4. Gypse (G) :

Le gypse est un minéral composé de sulfate hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$, c'est un minéral très connu des séries sédimentaires et peut former des roches mono. L'addition de gypse au ciment a pour but de régulariser le temps de prise de ciment.

Dans notre étude nous avons utilisé le gypse de provenance de gisement de ROUINA région d'AIN DEFLA ALGERIE. Il se caractérise par la composition dans le Tableau III-5. Les essais sont effectués dans le même laboratoire cité précédemment :

Tableau III-5 composition chimique du gypse utilisé

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	PAF
(%)	25,19	13,94	1,24	1,76	40,2	0,6	1,01	5,25	0.008	11,97

La surface spécifique de gypse est : $SSB = 4230 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue de gypse est : $\rho = 2,39 \text{ g/cm}^3$.



Photo III-3 Gypse utilisé

III.5. La pouzzolane naturelle (PZ) :

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi (BENI-SAF AIN TIMOUCHENTE). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches

concassées de type pierre ponce et scorie de diamètres variant de 5 à 10 mm. Pour pouvoir la substituer au ciment 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 complètement broyé.

Le Tableau III-6 montre la composition chimique de la pouzzolane naturelle.

Tableau III-6 caractéristiques de la pouzzolane[65]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PAF
(%)	39,72	15,76	12,44	14,96	2,31	0,36	1,495	0,008	10,25

La surface spécifique de pouzzolane est : $SSB = 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue de pouzzolane est : $\rho = 2,59 \text{ g/cm}^3$.



Photo III-4 Pouzzolane naturelle utilisé

III.6. Le laitier de haut fourneau (L) :

Le laitier granulé utilisé est produit par le haut fourneau de l'usine sidérurgique d'EL-HADJAR ANNABA. La composition chimique de laitier est représentée dans le Tableau III-7 :

Tableau III-7 caractéristiques du laitier[64, 65]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PAF
(%)	30,53	9,91	0,09	31,73	1,36	1,12	1,082	0,016	11,66

La surface spécifique de laitier de haut fourneau est : $SSB = 4322 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue de laitier de haut fourneau est : $\rho = 2,92 \text{ g/cm}^3$.



Photo III-5 Laitier utilisé

III.7. Le sable de dunes broyé (PSD) :

Le sable de dunes utilisé est de provenance d'AIN EL-BEIDA OUARGLA. C'est un sable fin doré dont la dimension maximale des gros grains est de 2 mm.

Ce sable a été broyé au laboratoire jusqu'à une finesse de 4600 cm²/g.

La composition chimique du SD est représentée dans le tableau ci-dessous:

Tableau III-8 caractéristiques du sable de dunes broyé[64, 65]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	Na ₂ O	PAF
(%)	89,67	0,24	0,25	3,70	0,61	1,03	0,07	0,02	0,22	1,09

La surface spécifique de poudre de sable de dunes est : SSB = 4600 cm²/g.

La masse volumique absolue de poudre de sable de dunes est : $\rho = 2,66 \text{ g/cm}^3$



Photo III-6 Sable de dunes utilisé à l'étude

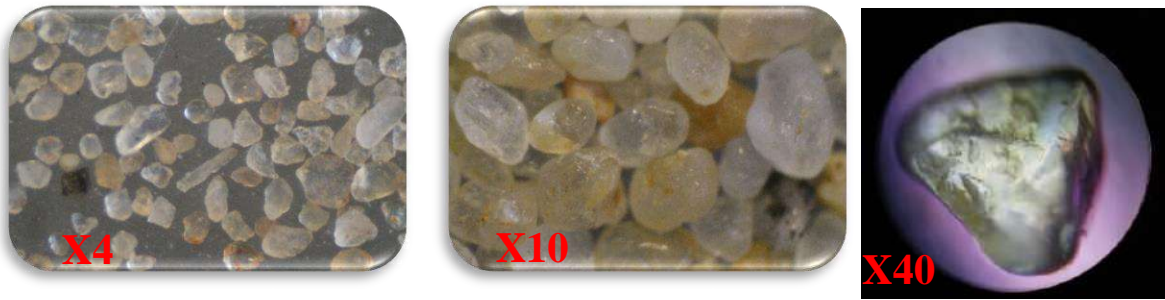


Photo III-7 Images microscopiques de grain de sable de dunes

III.8. Sable de construction :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a l'impact sur les qualités du béton et du mortier [66]. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et de ne pas contenir d'éléments nocifs.

Dans notre étude, nous avons utilisé un sable alluvionnaire de fraction 0/5 de SIDI SLIMANE TOUGGOURT Nord OUARGLA. Avant son utilisation, nous avons effectué une correction granulaire de ce sable afin d'avoir une granulométrie continue conformément à la norme du sable normalisé.



Photo III-8 vues microscopiques de sable de construction

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique. Avant d'exposer les différentes caractéristiques de notre sable, nous tenons à rappeler quelques spécifications des normes spécifiées concernant les sables. Il est préférable que la courbe granulométrique du sable appartienne au fuseau proposé pour la granularité optimale de sable à béton qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2,2 et 2,8. La teneur en sulfates doit être inférieure à 0,7% conformément à la norme NF EN 196-2 [67]. La présence de sulfates dans les granulats est à l'origine des réactions expansives dues à la formation d'ettringite.

La norme NF P 18-583 stipule que le pourcentage des chlorures doit être indiqué par le fournisseur s'il est égal ou supérieur à 0,02% [68].

Le pourcentage d'éléments coquilliers dans un sable doit être inférieur ou égale à 5% conformément à la norme NF P 18-540 [69]. Si les éléments coquilliers sont en trop grandes proportions, ils peuvent diminuer sensiblement les résistances et l'ouvrabilité des bétons.

- Caractéristiques physiques et minéralogiques :

Pour l'identification physique du sable, nous avons réalisé les essais classiques suivants :

- **L'analyse granulométrique** selon la norme NF EN 933-2 [70]. Elle est caractérisée par les éléments suivants :

- **Coefficient de courbure** : défini par
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Où D_{10} , D_{30} et D_{60} représentent respectivement les diamètres des grains correspondant à 10%, 30% et 60% des tamisât cumulés.

- **Coefficient d'uniformité** : définis par :
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$
- **Module de finesse (MF)** : Il est égal au centième de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5.
- **Pourcentage de fines** : Le pourcentage de fine (F) passant à travers le tamis de 0.08 mm est égale à :

$$F(\%) = \frac{M_1 - M_2 + P}{M_1} \times 100$$

M_1 : masse de la prise d'essai, en Kg.

M_2 : masse séchée du refus à 0.08 mm, en Kg.

P : masse du tamisât dans le fond, en Kg.

- **Équivalent de sable** selon la norme NF P 18 598 [71].

On peut estimer qu'un équivalent de sable visuel inférieur à 65 ou E.S. piston inférieur à 60 correspond à un sable argileux présentant des risques de retrait ou de gonflement et doit être rejeté.

Un sable pour lequel on a un E.S. visuel supérieur à 65 mais inférieur à 75 est très légèrement argileux pouvant présenter un retrait légèrement plus fort.

Les sables dont le E.S. visuel est compris entre 75 et 85 (ou E.S. piston compris entre 70 et 80) conviennent parfaitement pour des bétons de haute qualité. Enfin pour les sables présentant des valeurs supérieures, signe d'un manque presque total de fines argileuses.

- **Masse volumique absolue et apparente** selon la norme NF P 18 555 [71].

Le sable utilisé dans cette étude provient de gisement de sable de construction de SIDI SLIMANE TOUGGOURT OUARGLA, ce sable est d'origine dunaire cristallisée en forme roulée arrondie et de surfaces lisses. Il se caractérise par sa finesse, granulométrie, pureté et son diamètre maximal qui n'excède pas 5 mm.

La Figure III-1 représente la distribution granulaire des grains de sable de construction ; et le

Tableau III-9 et le Tableau III-10 montrent les caractéristiques physiques et chimiques de ce sable de construction. Ces essais sont exécutés dans le laboratoire de département de génie civil et hydraulique de l'université de OUARGLA et au laboratoire LTPS OUARGLA.

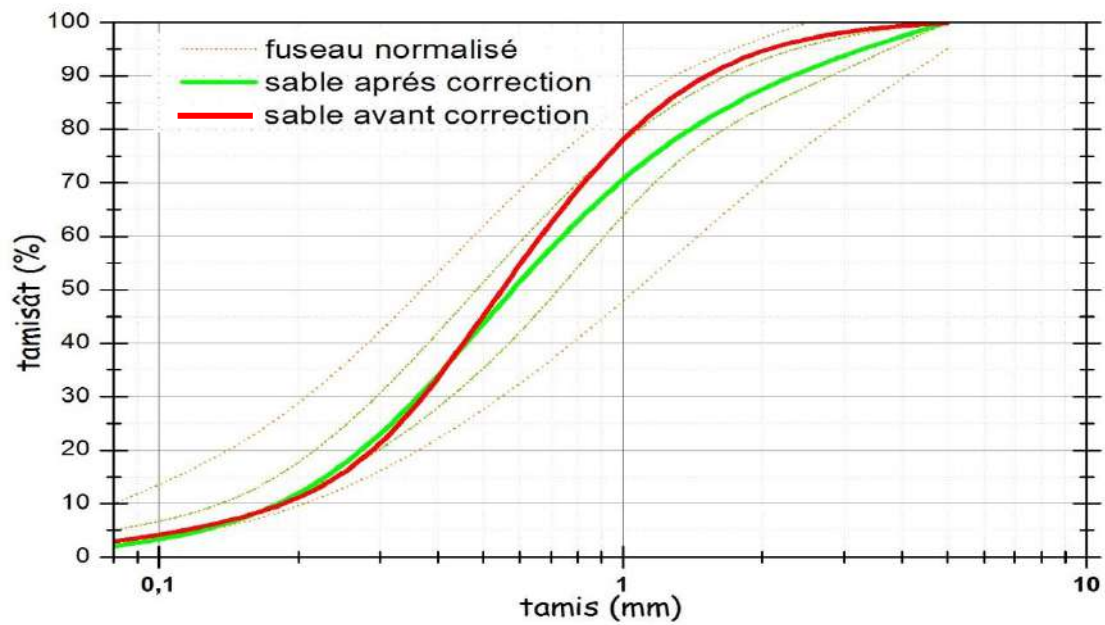


Figure III-1 Courbes granulométriques de sable utilisées

Tableau III-9 caractéristiques de sable utilisé

Module de finesse (M_f)	2,50
Pourcentage de fines (F)	2,93
Coefficient de courbure (C_c)	0,94
Coefficient d'uniformité (C_u)	4,00
Masse volumique apparente (ρ_{app})	1,527 g/cm ³
Masse volumique absolue (ρ_{abs})	2,581 g/cm ³
Équivalent de sable visuel (ES)	91,15%
Équivalent de sable piston (ES)	88.72%

Tableau III-10 analyses chimiques de sable de construction

Insolubles NF P15-461	Insoluble	93.48%
Sulfates (BS 1377)	SO ₃	0,77%
	CaSO ₄ 2H ₂ O	4,16%
	SO ₄ ⁻²	0,93%
Carbonates NF P15-461	CaCO ₃	0,00%
Chlorures (méthode de MOHR)	Cl ⁻	0,026%
	NaCl	0,043%

III.9. Eau de gâchage :

Toutes les eaux ne peuvent être utilisées pour gâcher les bétons et les mortiers, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces impuretés sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables.

- L'excès d'impuretés détériore les propriétés du béton : les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures).

- La teneur en chlorures admise ne doit pas dépasser 500mg. Les chlorures peuvent provenir de l'eau de gâchage, du ciment, des granulats et éventuellement de l'adjuvant. Les chlorures en faible proportion peuvent modifier légèrement la prise et le durcissement du ciment, par contre la forte

proportion peut réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton, leurs effets sont néfastes sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton.

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été effectuée dans le laboratoire de société algérien des eaux unité d'OUARGLA (ADE), le Tableau III-11 regroupe les caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage utilisé.

Tableau III-11 analyse chimique de l'eau de gâchage utilisée

CE	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	TH ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Résidus sec	PH
3,580 ms/cm	293,27 mg/l	77,63 mg/l	23 mg/l	950 mg/l	260,52 mg/l	72,915 mg/l	760 mg/l	232 mg/l	7,95

Selon la norme NF P 18-303 [72] la quantité maximale des ions chlores est fixée aux valeurs suivantes :

- 4500 mg/l pour les bétons non armés
- 1000 mg/l pour les bétons armés
- 500 mg/l pour les bétons précontraints.

La norme NF P 18-303 stipule que :

- * la teneur en sulfate de l'eau (SO₄⁻²) ne doit pas dépasser 2000 mg/l.
- * Les matériaux en suspension doivent être inférieurs à 0.5% de l'eau en masse pour le béton non armé.
- * L'argile en suspension fait diminuer les caractéristiques mécaniques.
- * Les matières organiques doivent être inférieures à 0.5% .Les micros algues diminuent les résistances et ont un effet d'entraînement d'air diminuant la compacité.
- * Les sulfates doivent être inférieurs à 0.1% pour le béton non armé. Ils réagissent avec le ciment pour former de l'ettringite qui s'accompagne de gonflement.
- * Les nitrates doivent être inférieurs à 0.05%.
- * Les sels de sodium (Na) et de potassium (K) doivent être inférieurs à 0.1%. Ils interviennent dans la rhéologie du béton, la prise du ciment et la durabilité du matériau durci.
- * L'acidité en pH doit être supérieure à 4.

Dans notre travail, nous avons utilisé l'eau de robinet de laboratoire qui se conforme à la norme.

Tableau III-12 Caractéristiques globales des matériaux utilisés

	Clinker K	Ciment K +3,5G	Laitier L	Pouzzolane PZ	Poudre de sable PSD	Gypse G
ρ (g/cm ³)	3,25	3,18	2,92	2,59	2,66	2,395
SSB (cm ² /g)	3700- 4300	4000- 4100	4322	4500	4600	4230
CL (%)	1,5	1	-	-	-	-
RI (%)	0,13	0,37	-	-	-	-
PAF (%)	0,27	0,49	11,66	10,25	1,09	11,97
SiO ₂ (%)	22,07	20,87	30,53	39,72	89,67	13,94
Al ₂ O ₃ (%)	3,58	3,61	9,91	15,76	0,24	1,24
Fe ₂ O ₃ (%)	5,91	5,18	0,09	12,44	0,25	1,76
CaO (%)	66,59	65,78	31,73	14,96	3,7	25,19
MgO (%)	1,29	1,41	1,36	2,31	0,61	5,25
SO ₃ (%)	0,06	1,69	1,12	0,36	1,03	40,2
K ₂ O (%)	0,41	0,262	1,082	1,495	0,07	0,6
Cl (%)	0,007	0,001	0,016	0,008	0,02	0,008
Na ₂ O (%)	0,428	0,111	-	-	0,22	1,01
C ₃ S (%)	70,18	72,63	-	-	-	-
C ₂ S (%)	6,93	5,071	-	-	-	-
C ₃ A (%)	0	0,812	-	-	-	-
C ₄ AF (%)	17,97	15,75	-	-	-	-
C ₄ AF+2C ₃ A	17,97	17,37	-	-	-	-

III.10. MÉTHODE ET ESSAIS

Pour la détermination des propriétés physico-mécaniques et chimiques des ciments étudiés avec ajouts minéraux, nous avons travaillé dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire physique et chimique de la cimenterie d'Ain El Kébira Sétif.
- Laboratoire physique et chimique de la cimenterie d'AIN TOUTA Batna.
- Laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université d'OUARGLA.
- Laboratoire de recherche EVRNZA Ouargla.

La norme européenne EN 197 sur les ciments fait référence à une autre norme EN 196 décrivant les méthodes d'essais applicables à tous les ciments. Les essais exécutés dans l'étude sont illustré dans le tableau

Tableau III-13 normes des essais normalisés. [73]

	Propriétés mesurées	Référence
ciments	la consistance normalisée	NF EN 196-3
	temps de prise et l'expansion de pâte	NF EN 196-3 NF P 15-431
	la finesse par perméabilité de l'air (méthode Blaine)	NF EN 196-6
	Masse volumique réelle	NF EN 196-6 ASTM C188-72
	Analyse chimique –spectrométrie F-R-X	NF EN 196-2
sable	Équivalent de sable	NF EN 933-8
	Détermination de la granularité	NF EN 933-1
	Masse volumique apparente et absolue	NF P18-555
mortier	Maniabilité de mortier	NF P18-452
	Résistance à la flexion	NF EN 196-1
	Résistance à la compression	NF EN 196-1

III.11. Détermination de la résistance mécanique :

✚ Équipements nécessaires

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1 (voir annexe I). L'ensemble des équipements nécessaires pour l'étude est comme suite :

- Une chambre ou une armoire humide Maintenu à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ et de longueur 16cm.
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essais de Résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$.
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400\text{ N/s} \pm 200\text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression.

✚ **Préparation du mortier normal**

Pesé des constituants nécessaires aux essais avec précision de 0.5%

1. Sable =1350 g
2. Ciments =450 g de ciment (soit d'un rapport S/L=3)
3. Eau =225 ml, soit (E/C = 0.5),

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.



Figure III-2 Équipements nécessaire pour confectionner le mortier

✚ **Confection de l'éprouvette**

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.



Figure III-3 Moules pour éprouvettes de mortier prismatique 4x4x16

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.



Figure III-4 Appareil à chocs



Figure III-5 Armoire humide

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.



Figure III-6 machine essais de compression et flexion

Tableau III-14 Valeurs limitent de temps de conservation.

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	28 j
Précision	± 15 min	± 30 min	± 45 min	± 2 h	± 8 h

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la Figure III-7.

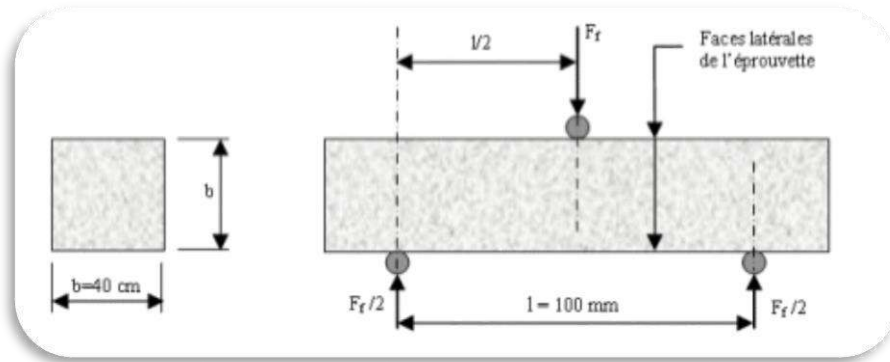


Figure III-7 Dispositif pour l'essai de Résistance à la flexion. [74]

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1,5F_f l}{b^3}$$

Cette contrainte est appelée la Résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{MPa}) = 0,234F_f(N)$$

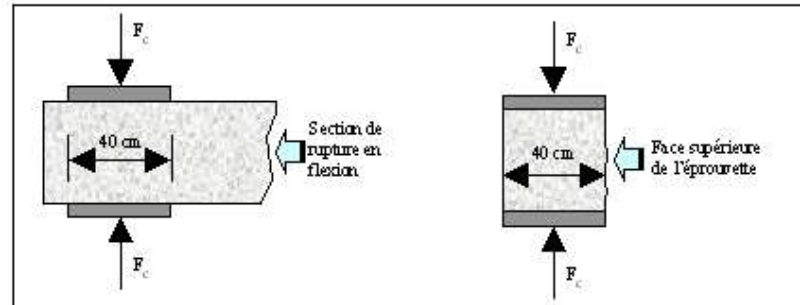


Figure III-8 Dispositif de rupture en compression.[75]

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la Figure III-8. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée Résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

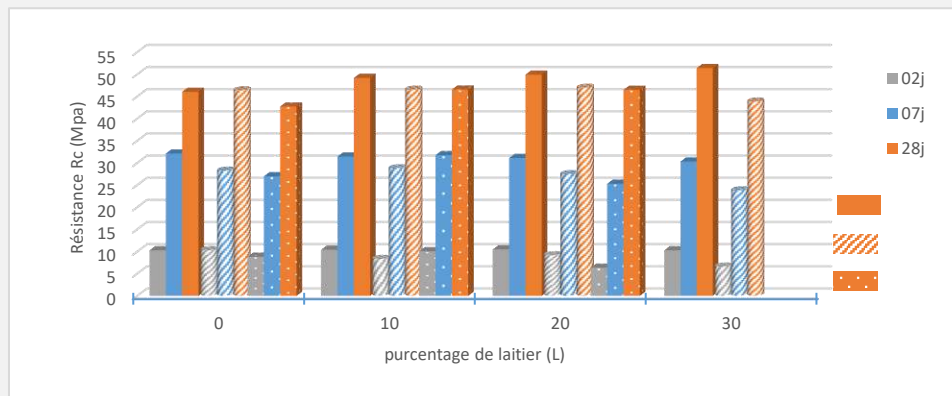
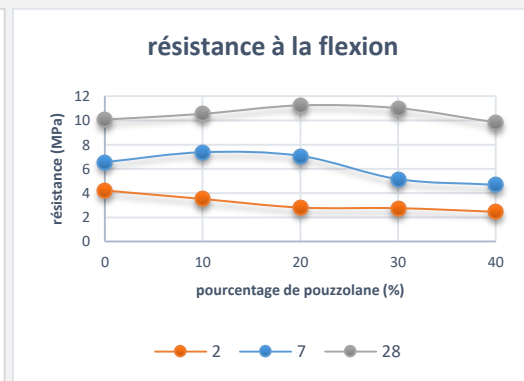
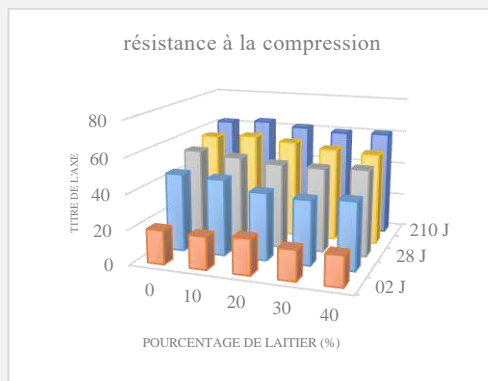
$$R_c(\text{MPa}) = \frac{F_c(N)}{1600}$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 MPa près et on en fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conversation lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré. [75]

III.12. Conclusion :

Les essais effectués dans cette partie nous donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux utilisés pour la formulation des mortiers étudiés de point de vue mécanique et durabilité. La connaissance de ces caractéristiques nous aide de manière significative à commenter les résultats expérimentaux de l'étude de matériau composite. Le liant est caractérisé par une faible proportion de C_3A de provenance de cimenterie de ZAHANA ; pouzzolane de Beni Saf, laitier de ANNABA, sable de dunes de OUARGLA, sable de construction de Sidi Slimane et eau de robinet ; qui sont conformes aux spécifications des normes de béton.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS



IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

IV.1. Introduction :

Le quatrième chapitre de notre étude, propose d'examiner par voie expérimentale l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité des mortiers confectionnés à base de clinker et de ciment ; des essais physiques et chimiques et minéralogiques ont été effectués sur les ciments confectionnés selon différentes combinaisons par méthode de substitution de (clinker, pouzzolane, laitier, poudre de sable de dunes et de gypse). Ce chapitre est divisé en trois parties :

La première partie aura pour objectif d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques de clinker avec les ajouts sans addition de gypse en compositions binaire, ternaire et quaternaire par des essais physiques et chimiques.

La deuxième partie de cette partie de notre étude sera consacrée à l'évaluation de la résistance mécanique pour la substitution de gypse avec le (K, PZ, L, PSD) les différentes échéances courtes et long terme pour (02, 07, 28, 120 et 210 jours).

La troisième partie et le dernier chapitre de cette présente partie seront entièrement destinés à l'analyse de la durabilité des ciments confectionnés aux agressions chimiques (attaques acides et sulfatiques).

IV.2. Protocole expérimentale :

La présente partie a pour but d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques clinkers avec les ajouts en diffèrent compositions binaire, ternaire et quaternaire. Pour cet effet 35 compositions de ciment sont confectionné comme indiqué dans le tableau

Tableau IV-1 Compositions binaires de ciment étudié

Notation	K (%)	PZ (%)	L (%)	PSD (%)
Classe G	Ciment pétrolier Classe G			
Témoin	100	0	0	0
10PZ	90	10	0	0
20PZ	80	20	0	0
30PZ	70	30	0	0
40PZ	60	40	0	0
10L	90	0	10	0
20L	80	0	20	0
30L	70	0	30	0
40L	60	0	40	0
10PSD	90	0	0	10
20PSD	80	0	0	20
30PSD	70	0	0	30
40PSD	60	0	0	40

Tableau IV-2 Composition ternaire de ciment étudié

Notation	K (%)	PZ (%)	L (%)	PSD (%)
10PZ+10L	80	10	10	0
20PZ+10L	70	20	10	0
30PZ+10L	60	30	10	0
10PZ+20L	70	10	20	0
20PZ+20L	60	20	20	0
10PZ+30L	60	10	30	0
10PZ+10PSD	80	10	0	10
20PZ+10PSD	70	20	0	10
30PZ+10PSD	60	30	0	10
10PZ+20PSD	70	10	0	20
20PZ+20PSD	60	20	0	20
10PZ+30PSD	60	10	0	30
10L+10PSD	80	0	10	10
20L+10PSD	70	0	20	10
30L+10PSD	60	0	30	10
10L+20PSD	70	0	10	20
20L+20PSD	60	0	20	20
10L+30PSD	60	0	10	30

Tableau IV-3 Composition quaternaire de ciment étudié

Notation	K (%)	PZ (%)	L (%)	PSD (%)
10PZ+10L+10PSD	70	10	10	10
10PZ+20L+10PSD	60	10	20	10
10PZ+10L+20PSD	60	10	10	20
20PZ+10L+10PSD	60	20	10	10

- Clinker « K »
- pouzzolane naturelle « PZ »
- laitier de haut fourneau « L »
- Poudre de sable de dunes broyé « PSD »
- Gypse « G »

Remarque :

Dans notre étude, nous avons composé deux séries de ciment. La première série est composée uniquement de clinker avec substitution des ajouts minéraux ; la deuxième série à base de ciment CEM I (composée de 96,5% clinker et 3.5% de gypse) en substituant un pourcentage de l'ajout.

Dans cette partie, nous avons étudié :

- Caractérisation et optimisation de la substitution de clinker par l'addition de 0 à 40% d'ajouts.
- Caractérisation et durabilité des ciments composées de (clinker +3.5% gypse) avec autres pourcentages d'ajouts minéraux.

IV.3. Étude de clinker avec ajouts minéraux :**IV.3.1 Propriétés physiques :**

Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques physiques de différents mortiers composés de (K, PZ, L PSD) en différents pourcentage par substitution.

Tableau IV-4 Caractéristiques physiques des ciments étudiés

	notation	Consistance normale E/C %	temps de prise		Expansion (mm)	Densité (g/cm ³)
			début	fin		
	Classe G	24,40	2h45	6h	0,75	3,18
binaire	Témoin	26,6	3h20	6h	2	3,25
	10PZ	26,6	3h00	6h	1	3,18
	20PZ	26,6	3h55	>6h	2	3,08
	30PZ	26,6	2h30	>6H	1	3
	40PZ	28,6	6h	>6h	0,5	2,97
	10L	24,4	3h50	6h	1	3,19
	20L	24,4	5h20	>6h	1	3,12
	30L	25,4	5H50	>6h	1	3,1
	40L	25,0	4h15	>6h	0,5	3,04
	10PSD	21,8	4h30	>6h	3,5	3,12
	20PSD	24,2	4h30	>7h	0,75	3,08
	30PSD	24,8	50MIN	3H40	1	3
	40PSD	26,2	1h	>6h	1	2,91
	ternaire	10PZ+10L	26,8	3h30	>7h	0
10PZ+10PSD		25,6	2h00	>6h	0	3,08
10L+10PSD		26,0	5h15	>6h	1	3,04
20PZ+10L		26,8	2h50	>6h	0,5	3,08
10PZ+10PSD		27,2	1h10	6h	0	3,05
20L+10PZ		26,2	2h00	>6h	0,5	-
20L+10PSD		25,4	2h45	>6h	0,5	-
20PSD+10PZ		25,4	1h00	6h10	0,5	-
20PSD+10L		24,7	2h20	>6h	0,5	-
quaternaire	10PZ+10L+10PSD	25,8	3h10	>6h	1,5	-

La Figure IV-1 et Figure IV-2 représentent l'évolution de la consistance normale de la pâte de ciment et la densité de poudre de ciment, cette caractérisation a été faite au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de AIN TOUTA BATNA.

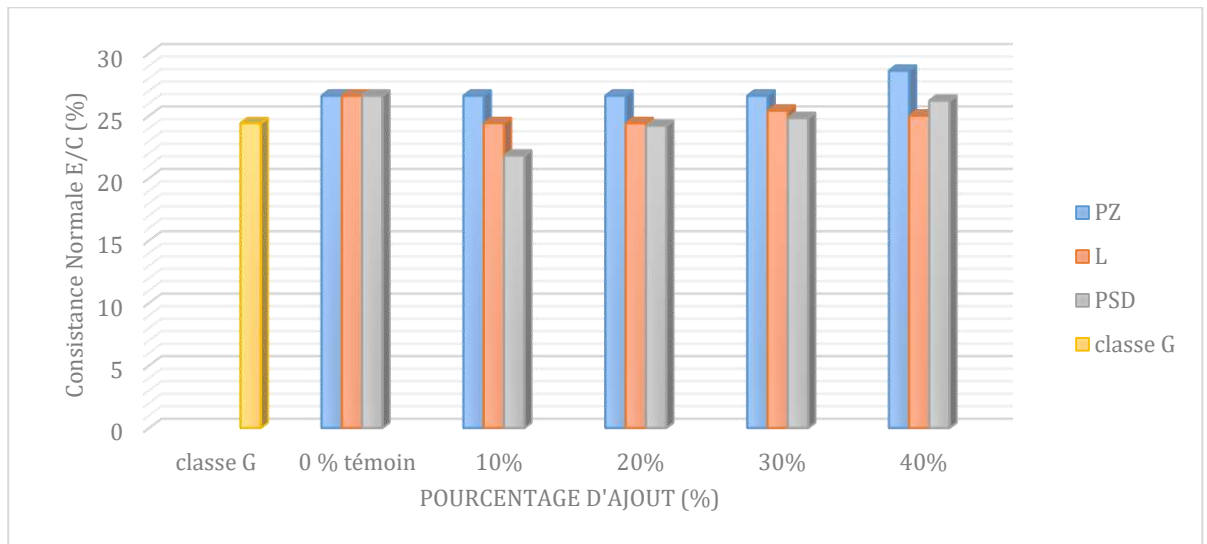


Figure IV-1 Évolution de la consistance en fonction de pourcentage d'ajout

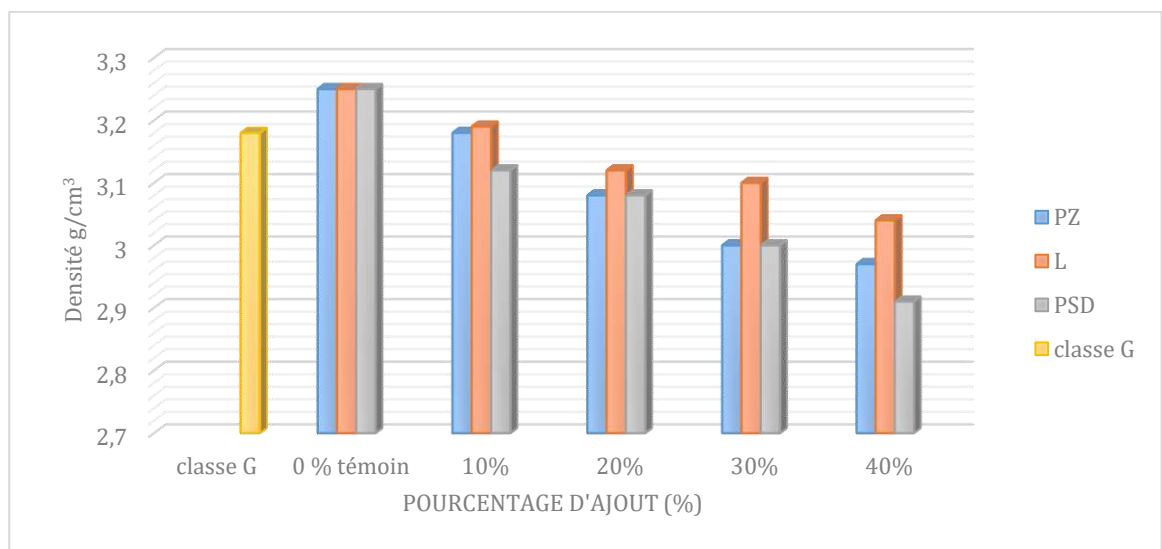


Figure IV-2 Évolution de la densité en fonction de pourcentage d'ajout

Les Figure IV-1 et Figure IV-2 représentent l'évolution de la consistance normale et diminution de la densité de composition binaire de ciment confectionné à base de clinker en substituant la pouzzolane, laitier de haut fourneau et la poudre de sable de dunes de taux de 0 à 40% d'ajout.

D'après la Figure IV-2 nous remarquons que la substitution de PZ, L et PSD a réduit nettement la densité de ciment de l'ordre de 9,42, 6,90 et 11,68% respectivement par rapport au ciment témoin en faisant augmenter le pourcentage d'ajout à 40% ce qui est en accord avec [76], cette évolution est due à la différence de la densité des ajouts qui est inférieure à celle du clinker. Dont, la densité de pouzzolane, laitier de haut fourneau et la poudre de sable de dunes sont faible de l'ordre de 20,30% ; 10,15% et 18,15% par rapport à la densité de clinker.

La Figure IV-1 montre l'évolution de la consistance normale des compositions contenant (PZ, L et PSD) en différents pourcentages. La consistance s'accroître avec l'augmentation du

pourcentage de pouzzolane par rapport au ciment témoin, cette augmentation est due à la capacité d'absorption de pouzzolane [77, 78]. Effectivement, l'addition de laitier et de la poudre de sable de dunes a réduit la consistance normale des ciments par rapport au ciment témoin [76, 79] et reste comparable à celle de ciment classe G. Cette réduction due à l'effet d'absorption de L et PSD et ainsi à la surface spécifique et peut modifier le processus d'hydratation des liants (chaleur et temps de prise). Donc pour pouvoir travailler avec une consistance normale fixe, il faut ajouter un super-plastifiant pour garder la quantité d'eau (E/C) fixe.

IV.3.2 Propriétés chimiques :

Le Tableau IV-5, le Tableau IV-6 et le Tableau IV-7 montrent les propriétés chimiques des différents ciments étudiés (binaire, ternaire et quaternaire), les essais d'identification chimique sont réalisés au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie d'AIN TOUTA.

On définit :

RI : résidus insoluble.

PAF : perte au feu.

Tableau IV-5 Caractéristiques chimiques des compositions binaires

	Exigence API	PÉTROLIER	TÉMOIN	POUZZOLANE				LAITIER				POUDRE DE SABLE DE DUNES			
				10PZ	20PZ	30PZ	40PZ	10L	20L	30L	40L	10PSD	20PSD	30PSD	40PSD
Chaux libre	1	1,20	1,50	0,69	0,91	1,00	0,82	0,51	0,64	1,64	0,73	0,91	0,56	1,00	0,96
RI	0,75	0,55	0,74	6,15	12,30	16,19	20,41	0,28	0,57	1,04	0,48	9,21	18,43	26,20	37,38
PAF	3	0,27	0,55	0,84	0,77	3,76	4,56	0,37	0,41	0,48	0,15	0,66	0,73	0,62	0,60
SiO₂	-	23,87	21,06	26,16	28,95	30,50	32,58	24,92	26,36	27,43	22,56	32,97	42,14	50,62	55,41
Al₂O₃	-	3,48	3,83	4,11	4,87	5,35	5,92	3,80	4,15	4,43	4,75	3,15	2,94	2,71	2,62
Fe₂O₃	-	3,61	6,00	4,60	4,89	4,95	5,18	4,24	3,93	3,75	3,54	4,00	3,54	3,33	3,06
CaO	-	64,75	65,25	61,26	57,14	51,94	48,09	63,23	60,69	58,83	57,40	56,97	48,76	41,35	37,05
MgO	6	1,21	1,16	2,49	2,66	2,74	2,84	2,95	3,90	4,48	4,95	1,86	1,57	1,10	0,99
K₂O	-	0,42	0,23	0,20	0,30	0,37	0,46	0,13	0,15	0,16	0,18	0,13	0,13	0,13	0,15
Na₂O	0,75	0,47	0,50	0,54	0,60	0,59	0,58	0,48	0,46	0,46	0,41	0,38	0,28	0,18	0,11
SO₃	3	1,93	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	-	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
C₃S	48-65	48,02	71,02	16,34	0,00	0,00	0,00	36,34	13,14	0,00	25,24	0,00	0,00	0,00	0,00
C₂S	-	32,23	6,83	62,67	83,01	87,44	93,39	44,05	65,68	78,64	45,64	94,52	-	-	-
C₃A	3	3,12	0,00	3,11	4,64	5,81	6,92	2,91	4,35	5,40	6,60	1,60	1,81	1,56	1,77
C₄AF	-	10,98	18,24	13,98	14,87	15,03	15,75	12,89	11,96	11,39	10,76	12,14	10,75	10,11	9,30
C₄AF+2C₃A	24	17,22	18,24	20,20	24,16	26,65	29,60	18,71	20,65	22,19	23,96	15,35	14,37	13,22	12,84

NB : les valeurs dans le tableau sont exprimées en pourcentage (%)

Tableau IV-6 Caractéristiques chimiques des compositions ternaires

	10PZ+10L	10PZ+10PSD	10L+10PSD	20PZ+10L	20PZ+10PSD	20L+10PZ	20L+10PSD	20PSD+10PZ	20PSD+10L	30PZ+10L	30PZ+10PSD	30L+10PZ	30L+10PSD	10PZ+30PSD	10L+30PSD	20PZ+20L	20PZ+20PSD	20L+20PSD
C libre	0,56	0,56	0,73	0,69	0,60	0,60	0,78	0,69	0,82	0,73	0,87	0,91	0,82	0,82	0,96	0,82	0,87	0,96
RI	5,86	14,55	8,60	11,03	23,61	5,96	10,15	24,34	19,54	16,07	26,43	6,18	9,58	33,85	28,32	10,35	29,52	19,10
PAF	1,44	1,53	0,42	2,49	2,70	2,03	4,08	2,07	0,74	3,55	3,65	1,14	0,59	1,56	0,44	2,72	2,45	0,71
SiO₂	27,61	35,81	35,16	29,57	37,50	28,30	34,07	41,46	41,19	-	38,94	21,87	28,73	41,80	41,58	30,14	45,43	43,99
Al₂O₃	4,52	3,84	3,51	5,07	4,41	4,70	3,69	3,58	3,29	5,42	4,70	5,83	4,36	2,67	2,42	5,27	3,89	3,60
Fe₂O₃	4,27	4,08	3,68	4,56	4,35	4,06	3,43	3,84	3,45	4,63	4,70	3,03	2,35	2,87	2,31	4,32	3,96	3,20
CaO	58,24	52,13	54,12	54,39	48,29	56,38	51,13	46,81	48,65	51,08	45,37	37,96	36,40	29,95	30,83	53,04	42,08	45,12
MgO	3,31	21,36	2,67	3,21	2,13	3,90	3,11	1,75	2,27	3,44	2,12	3,45	3,05	1,10	0,51	3,96	1,69	2,91
K₂O	0,23	0,19	0,14	0,31	0,30	0,22	0,15	0,21	0,14	0,36	0,35	0,29	0,21	0,28	0,23	0,13	0,28	0,17
Na₂O	0,51	0,42	0,37	0,52	0,45	0,48	0,35	0,32	0,28	0,51	0,42	0,16	0,13	0,09	0,08	0,46	0,30	0,25
SO₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,41	0,24	0,33	0,00	0,00	0,03
Cl	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
C₃S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C₂S	79,16	-	-	84,77	-	81,12	97,67	-	-	-	-	62,70	82,37	-	-	86,41	-	-
C₃A	4,75	3,27	3,10	5,73	4,33	5,58	3,97	2,99	2,88	6,53	4,52	10,33	7,58	2,23	2,51	6,66	3,62	4,13
C₄AF	12,98	12,41	11,18	13,87	13,22	12,35	10,43	11,66	10,49	14,07	14,27	9,21	7,14	8,72	7,02	13,13	12,04	9,73
C₄AF+2C₃A	22,48	18,95	17,37	25,34	21,89	23,51	18,36	17,64	16,25	27,14	23,32	29,87	22,31	13,18	12,04	26,46	19,27	17,99

NB : les valeurs dans le tableau sont exprimées en pourcentage (%).

Tableau IV-7 Caractéristiques chimiques des compositions quaternaires

COMPOSITION	10PZ+10L+10P SD	200PZ+10L+10P SD	10PZ+20L+10P SD	100PZ+10L+20P SD
C libre	0,78	1,04	1,04	0,96
RI	14,88	20,45	15,47	24,45
PAF	1,57	2,64	1,72	1,46
SiO₂	35,52	37,93	37,57	44,54
Al₂O₃	4,09	4,49	4,36	3,73
Fe₂O₃	3,99	4,12	3,71	3,57
CaO	51,53	47,44	48,65	43,92
MgO	2,76	2,78	3,40	2,31
K₂O	0,22	0,29	0,23	0,22
Na₂O	0,40	0,39	0,34	0,28
SO₃	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,02	0,02	0,02	0,02
C₃S	0,00	0,00	0,00	0,00
C₂S	-	-	-	-
C₃A	4,09	4,94	5,28	3,85
C₄AF	12,12	12,52	11,28	10,85
C₄AF+2C₃A	20,30	22,40	21,85	18,56

NB : les valeurs dans le tableau sont exprimées en pourcentage (%).

D'après le Tableau IV-5, Tableau IV-6 et Tableau IV-7, nous remarquons que la substitution de pouzzolane (PZ), laitier (L) et la poudre de sable de dunes (PSD) a provoqué une diminution du chaux libre, oxyde de fer (Fe₂O₃), la chaux (CaO), l'aluminate tricalcique (C₃A) et l'alumino-ferrite (C₄AF) contenant dans le ciment ; par contre, nous remarquons une augmentation de taux de résidus insoluble au compositions contenant la pouzzolane(PZ). Cela due à la nature de la pouzzolane (roche volcanique).

La substitution de L et PSD et le couplage de ces deux ajouts réduit le taux de perte au feu. En effet l'incorporation de pouzzolane avec le laitier et la poudre de sable de dunes en composition ternaire et quaternaire augmente le pourcentage de perte au feu. Effectivement, les résultats des compositions chimiques des ciments étudiés restent acceptables selon les spécifications recommandés par les normes API correspondant aux ciments destinés aux travaux de cimentation des puits pétroliers.

IV.3.3 Propriétés mécaniques :

IV.3.3.1. Résistance de composition binaire :

Les Figure IV-3, Figure IV-4 et Figure IV-5 présentent l'évolution de la résistance en compression et flexion des compositions binaires contenant la pouzzolane (PZ), laitier d'haufourneau (L) et la poudre de sable de dunes (PSD) au différent pourcentage (0 – 40%).

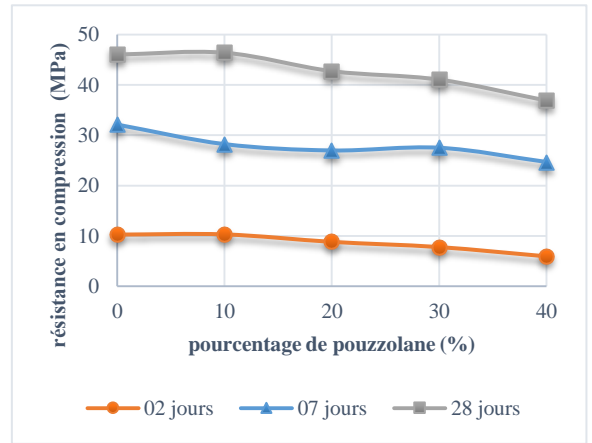
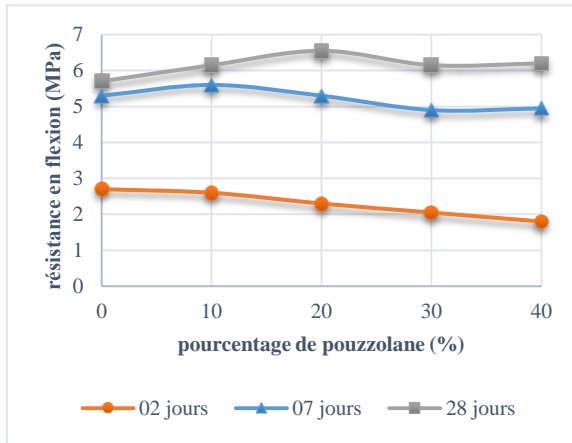


Figure IV-3 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ

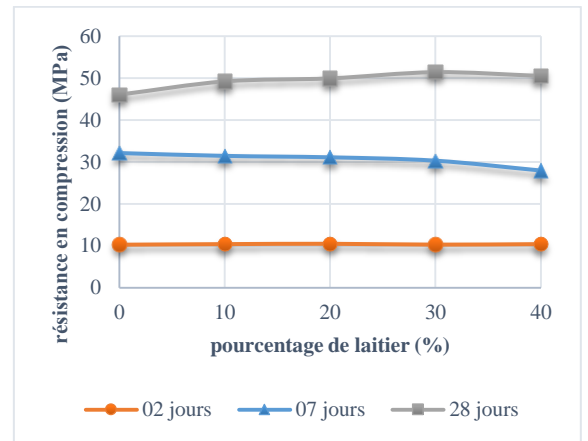
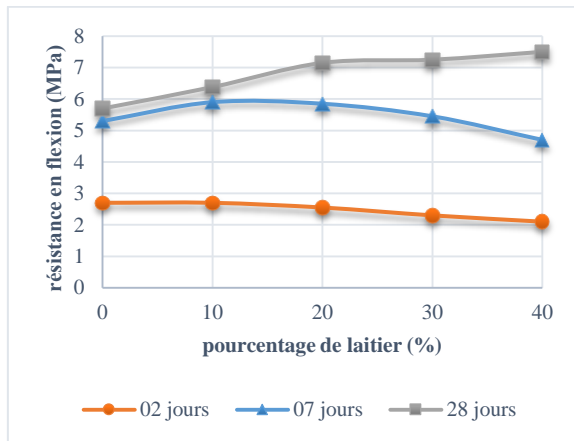


Figure IV-4 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L

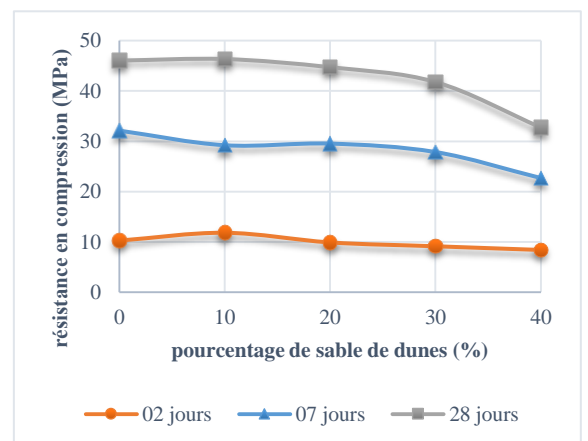
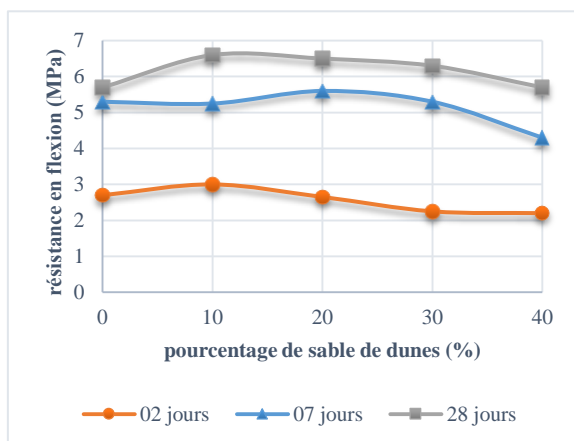


Figure IV-5 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD

L'analyse des graphes ci-dessus montrent le développement des performances des ciments aux différents pourcentages d'ajouts (composition binaires) par substitution en fonction de différents âges de durcissement.

L'analyse des différents graphes permet d'apporter les points suivants :

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge de durcissement et ne présentent aucune chute.

La substitution des ajouts contribue positivement sur l'évolution de la résistance à la flexion à 28 jours, il montre une augmentation jusqu'au 15% à la substitution de pouzzolane, une augmentation jusqu'au 32% pour la substitution de laitier et une augmentation jusqu'au 40% pour la substitution de poudre de sable dune. Pour la résistance à la flexion, La composition 20% pouzzolane et 20-40% de laitier et 10% de poudre de sable de dunes montre les meilleurs résistances.

Les résistances aux flexions à l'âge de 02 et 07 jours restent toujours inférieures à celle de composition témoin pour toutes les compositions.

L'évolution de la résistance à la compression de mortier à base de poudre de sable de dunes donne des résistances restent toujours faible à celle de mortier témoin en faisant augmenter le pourcentage d'ajout de 0 – 40%, soit une chute de 28.9% à 28 jours, 29.3% à 07 jours et 18.1% à 02 jours. Ce résultats est en conforme avec GUETTALA et Mechti.[80, 81] . Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants de ciment.

L'évolution de la résistance à la compression de mortier à base de pouzzolane donne des résistances restent toujours faible à celle de mortier témoins, avec une chute de 19.9% à 28 jours, 23.1% à 07 jours et 42.1% à 02 jours ; ce qui accord avec [82].

L'évolution de la résistance à la compression de mortier à base de laitier donne une chute résistance de 13% à 07 jours, avec une légère évolution à 02 et 28 jours ; ce qui approuvé par les résultats de Achoura [26].

L'influence de C_3A et SO_3 sur la prise de ciment, qui nous avons remarqué au cours de préparation des éprouvettes que le ciment caractérise par un temps de prise lente et de la résistance a courte terme faible.

La chute de résistance des compositions à long terme est influencée peut être par le taux de C_3S ou C_2S dans les ciments étudiés.

La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge. À titre d'exemple, un remplacement du ciment par 30% de PZ diminue la résistance à la compression de 41.68%, 26.31% et 19.74% à 2j, 7j et 28 jours, respectivement. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle.

IV.3.3.2. Résistance de composition ternaire :

IV.3.3.2.1. Substitution de 10% +0-30%

Les Figure IV-6, Figure IV-7, Figure IV-8, Figure IV-9, Figure IV-10 et Figure IV-11 montrent l'évolution de la résistance à la compression (R_c) et à la flexion (R_f) en fonction de pourcentage de l'ajout (10PZ+L), (10PZ+PSD), (10L+PZ), (10L+PSD), (10PSD+PZ) et (10PSD+L) respectivement.

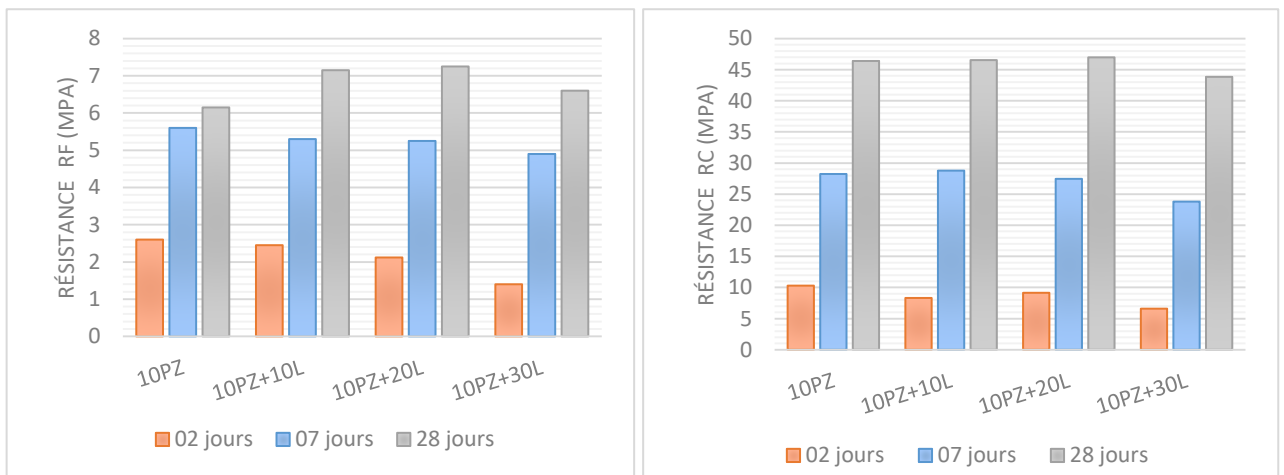


Figure IV-6 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% de PZ

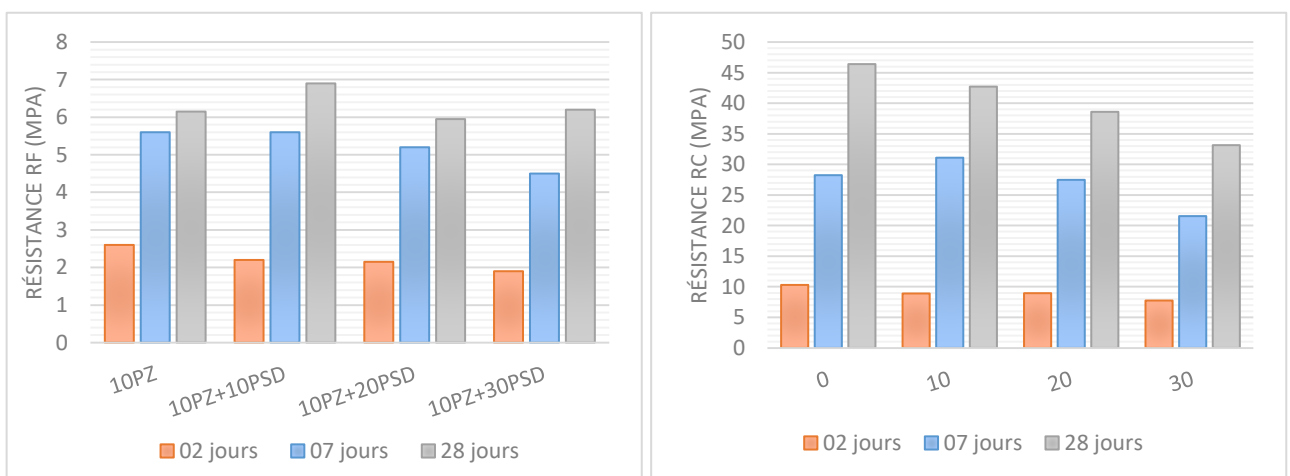


Figure IV-7 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% de PZ

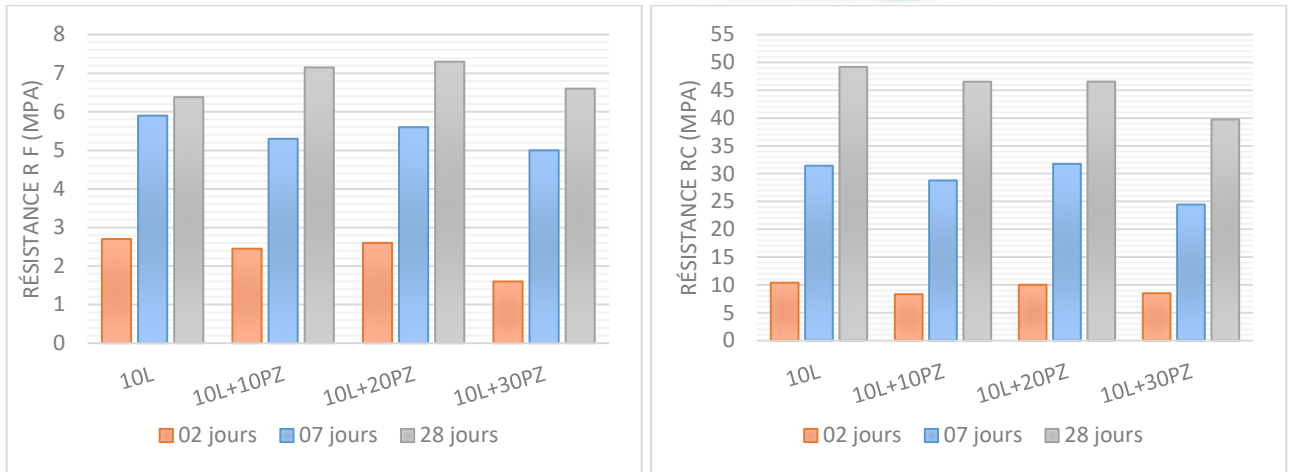


Figure IV-8 Evolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% de L

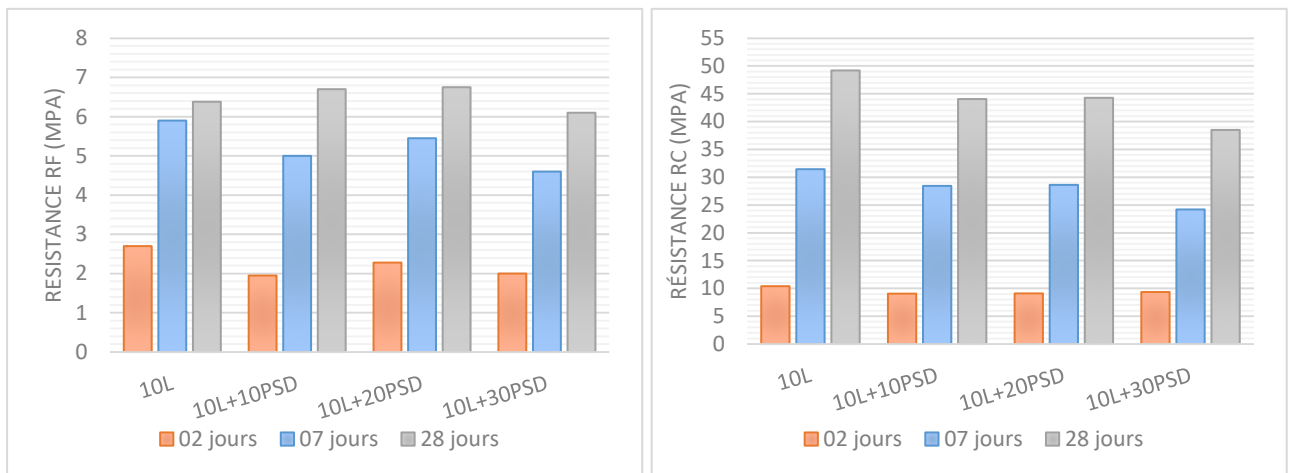


Figure IV-9 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% de L

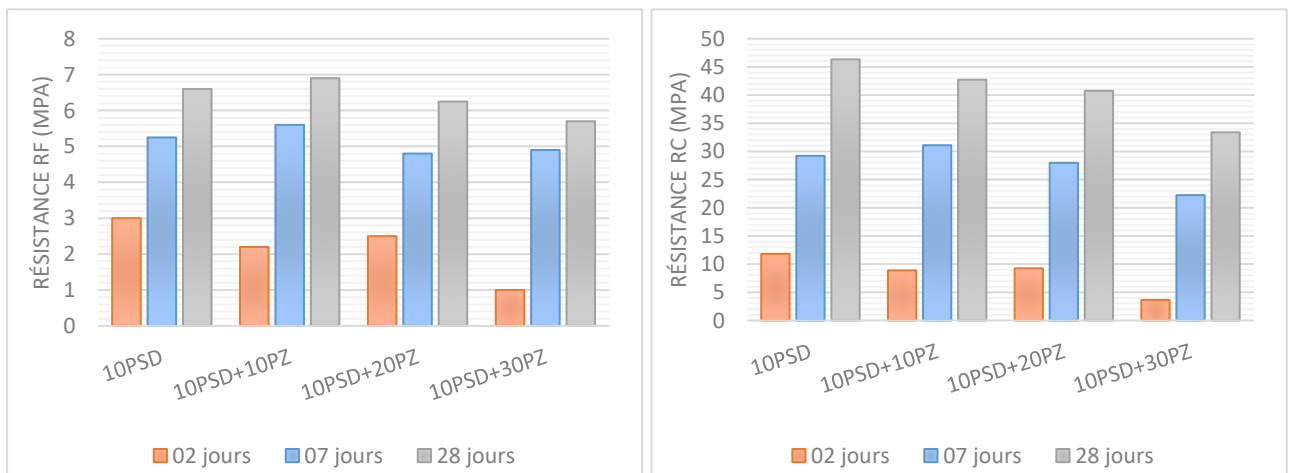


Figure IV-10 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% de PSD

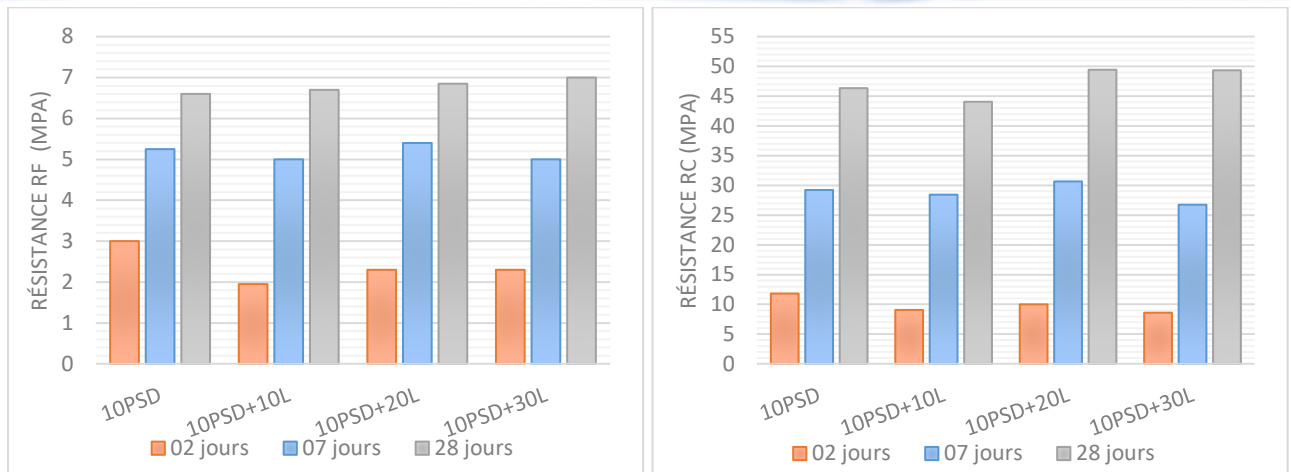


Figure IV-11 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% de PSD

Les figures ci-dessus présentent l'effet de taux de substitution des compositions ternaire sur la résistance à la compression et flexion.

D'après ces figures nous remarquons que les résistances des mortiers élaborés ont une évolution successive en fonction de temps de durcissement. À l'âge de 02 jours en flexion, nous remarquons que les mortiers contenant (10PZ+L), (10PZ+PSD), (10L+PZ), (10L+PSD), (10PSD+PZ) et (10PSD+L) figurent une diminution progressive de la résistance à la flexion en fonction de l'augmentation de la quantité d'ajout. Cette résistance toujours inférieure au mortier témoin (inférieur à 3MPa) à titre d'exemple : un écart de 5.7 à 46% pour (10PZ+L) ; 15 à 26.9% pour (10PZ+PSD) ; 3.7 à 40% pour (10L+PZ) ; 15.55 à 27.77% pour (10L+PSD) ; de 16.66 à 66.66% pour (10PSD+PZ) et de 23.33 à 35% pour (10PSD+L).

À 07 jours en flexion, l'augmentation du pourcentage d'ajout à un effet négative sur la résistance à la flexion. Elle passe d'un écart de 5.6 à 12.5% pour (10PZ+L) ; 0 à 19.6% pour (10PZ+PSD) ; de 5.1 à 15.31% pour (10L+PZ) et de 7.6 à 22% pour (10L+PSD). Par contre, les compositions (10PSD+10PZ) et (10PSD+20L) a donner une évolution positif de 6.7 et 2.9% respectivement à celle de mortier témoin.

À 28 jours en flexion, l'addition des ajouts montrent un effet positif sur la résistance R_F , nous citons par exemple les compositions (10PZ+10L) et (10PZ+20L) qui donne un écart de 16 et 18% plus de mortier témoin. La composition (10PZ+10PSD), (10L+10PZ) et (10L+20PZ) montrent une évolution effective d'un écart de 12 à 14% par rapport au mortier témoin. Pour les autres compositions nous remarquons une faible évolution de la résistance.

La résistance à la compression au jeune âge de durcissement reste toujours faible et inférieure à celle de mortier témoin, soit à un écart de 4 à 35% pour toutes les compositions ternaires sauf aux compositions (10PZ+10PSD) et (10 L+20PZ)

À 07 jours la résistance à la compression, la substitution de (10PZ+10L) et (10PZ+20L) nous a donner une résistance similaire au mortier témoin, au-delà on observe une chute de 15 à 70% à la composition (10PZ+30L). Par contre la substitution de PSD développe une chute successive de 45 à 32 MPa d'un écart de 27 à 23.7%. Pour La substitution de (10L+PZ) et (10L+PSD) nous observons un écart de 8.5 à 22.2% en fonction de pourcentage de PZ et d'un écart de 9 à 23% en fonction du pourcentage de PSD. En effet, à 07 jours la substitution de (10PSD+PZ) et (10PSD+L) montrent les meilleurs résultats de résistance, il figure une augmentation de 6.4-4.9 pour la composition (10PSD+10 L) et (10PSD+20 L) respectivement par rapport au mortier témoin.

À 28 jours, la résistance à la compression pour les compositions contenant (10PZ+10L) et (10PZ+20L) ont donné des résultats similaires à celle de mortier témoin, au-delà de ces pourcentages on observe une chute de résistance. Effectivement, la substitution de (10PSD+20L) et (10PZD+30L) nous a donné une évolution positive de la résistance à la compression soit d'un écart de 6.7 et 6.5% respectivement par rapport au mortier témoin. Par contre, les autres compositions, l'augmentation du pourcentage de l'ajout provoque une réduction systématique des résistances à 28 jours.

IV.3.3.2.2. Substitution de 20% +0-20% :

Les figures ci-dessus regroupent l'effet de l'ajout de 20%+0-20% avec le ciment par substitution sur le comportement mécanique des éprouvettes aux différents âges de durcissement.

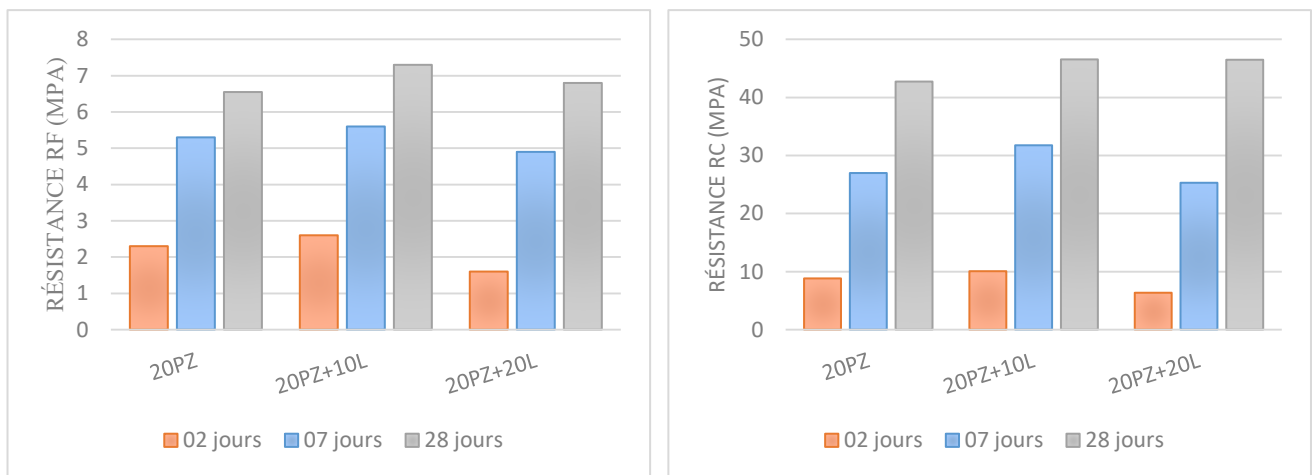


Figure IV-12 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 20% de PZ

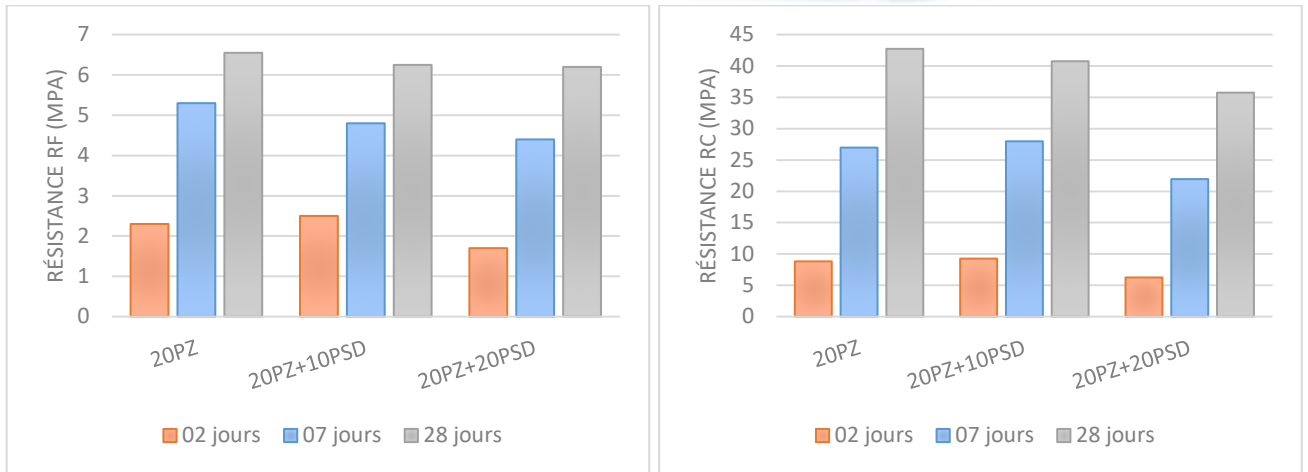


Figure IV-13 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 20% de PZ

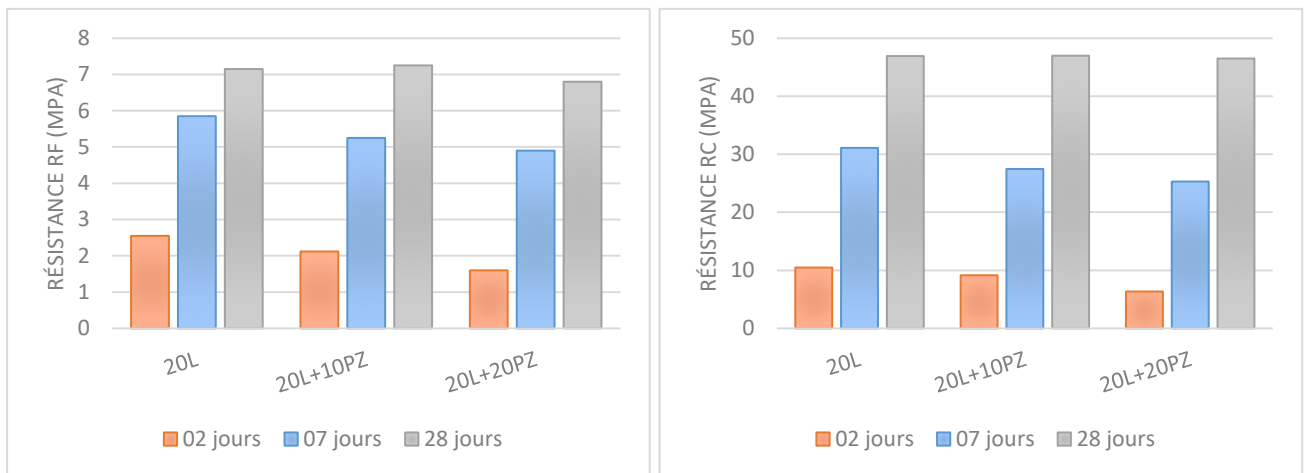


Figure IV-14 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 20% de L

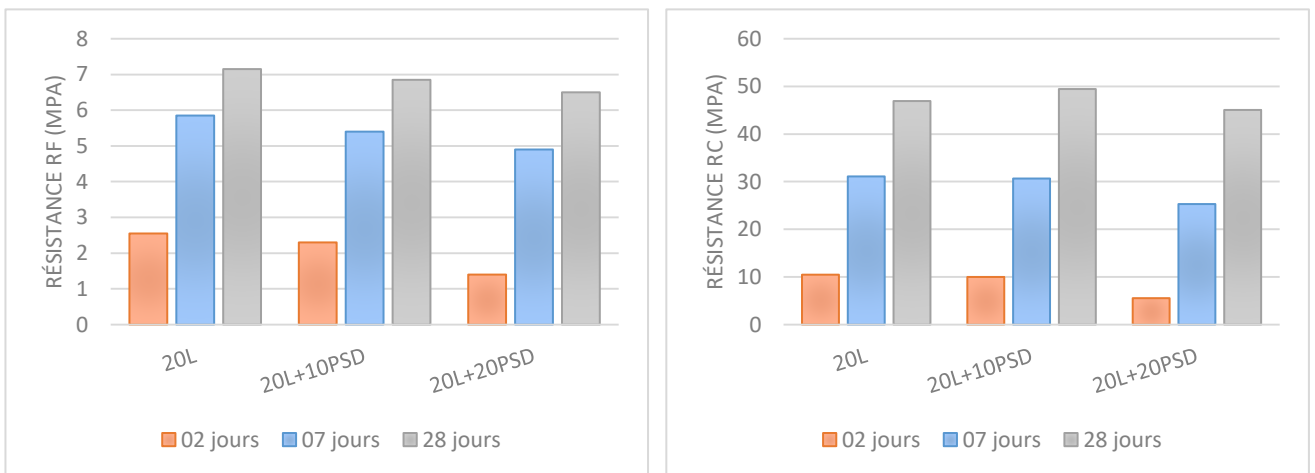


Figure IV-15 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 20% de L

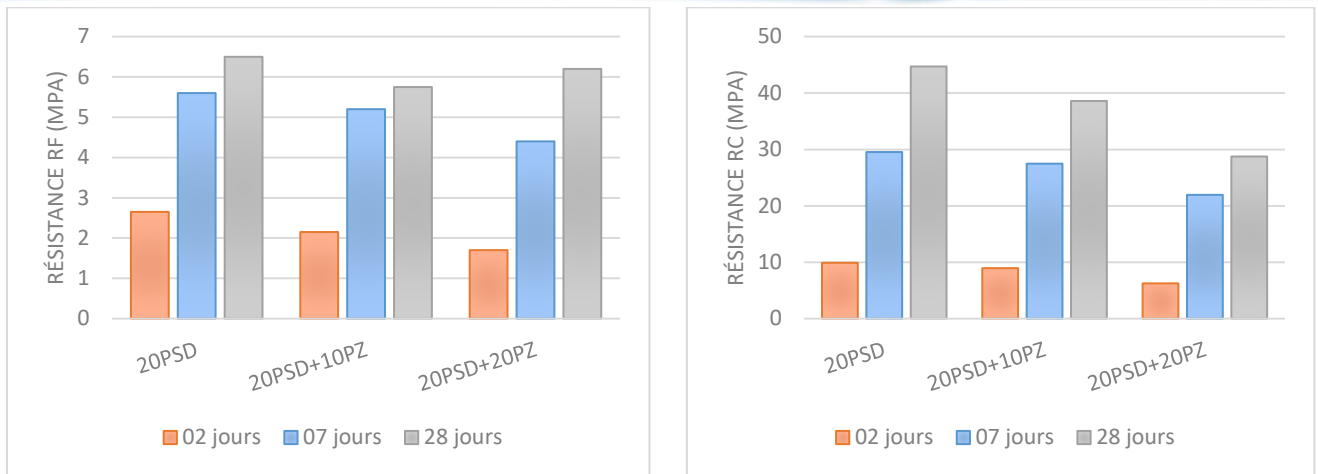


Figure IV-16 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 20% de PSD

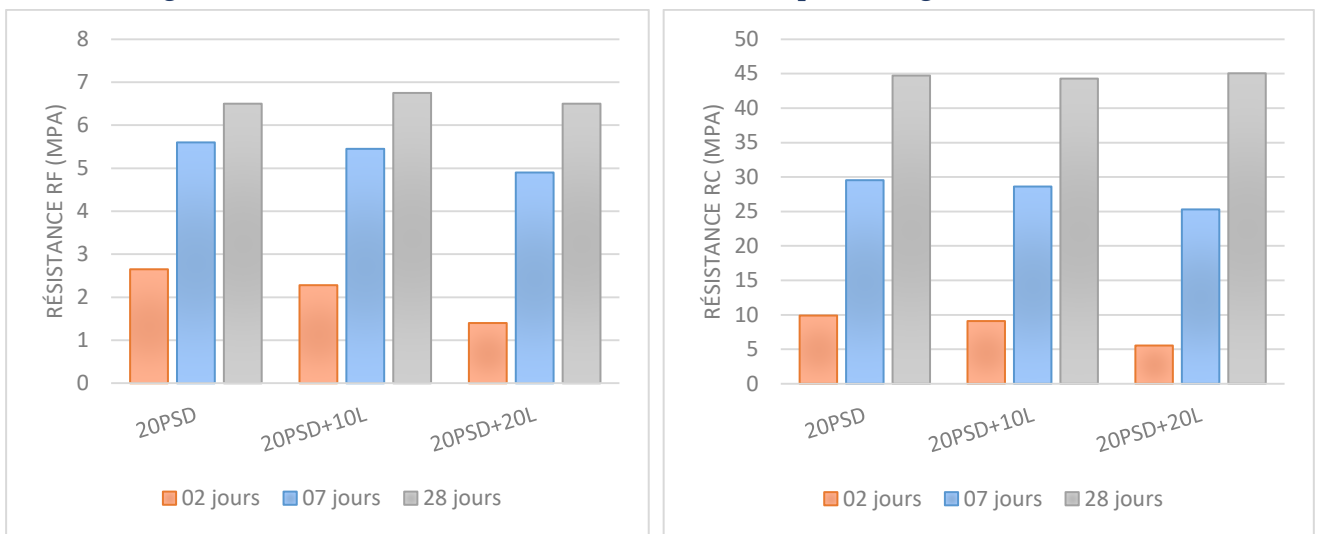


Figure IV-17 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 20% de PSD

D'après ces figures nous notons les remarques suivantes :

L'incorporation de (20PZ+10L) et (20PZ+10PSD) s'avère à une bonne résistance en flexion au jeune âge avec un écart de 5.7 et 11.5% en augmentation par rapport au mortier témoin. La substitution de (20L+PZ), (20L+PSD), (20PSD+PZ) et (20PSD+L) à 02 et 07 jours, il figure un décroissement successive de par rapport au mortier témoin soit d'un écart allant jusqu'au 45%. À 28 jours, on remarque une légère évolution de résistance à la flexion ; à titre d'exemple la substitution de (20PZ+10L), (20L+10PZ) et (20PSD+10PZ) d'un écart de 11.5, 1.4 et 3.8% par rapport au mortier témoin respectivement.

L'influence de différentes combinaisons sur la résistance à 02 jours en compression diminue progressivement par rapport au mortier témoin, en faisant augmenter le pourcentage de l'ajout. En effet, la substitution de (20PZ+10L) et (20PZ+10PSD) contribue positivement sur la résistance en compression à l'âge de 07 jours, à un écart de 17.7, 3.7% respectivement. Par contre, les autres compositions comportent une réduction de résistance à la compression en fonction de l'augmentation de pourcentage d'ajout.

À 28 jours, l'addition de (20PZ+L) contribue positivement sur la résistance à la compression, soit d'une augmentation d'ordre de 8.8% par rapport au mortier témoin. Effectivement, l'ajout de (20L+PZ) et (20PSD+L) nous donne des résultats similaire à celle de mortier témoin, par contre l'ajout de ((20PZ+PSD) et (20PSD+PZ) ont montré un effet négative pour la résistance à long terme en compression.

IV.3.3.2.3. Substitution de 30% + 0-10% :

Les graphes ci-dessus montent l'évolution de la résistance mécanique en fonction de substitution de l'ajout au différent pourcentage.

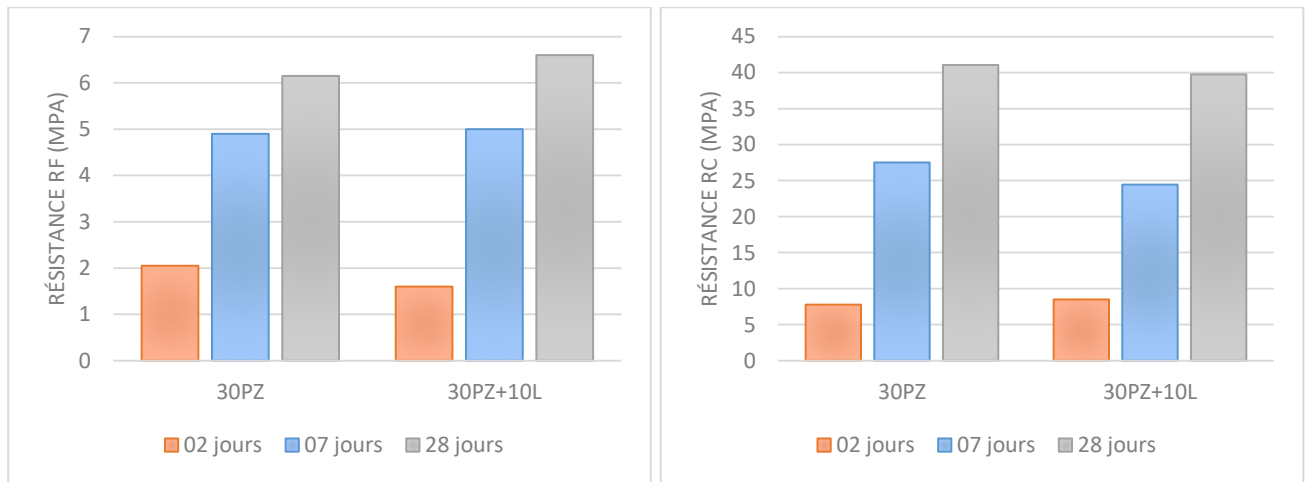


Figure IV-18 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 30% de PZ

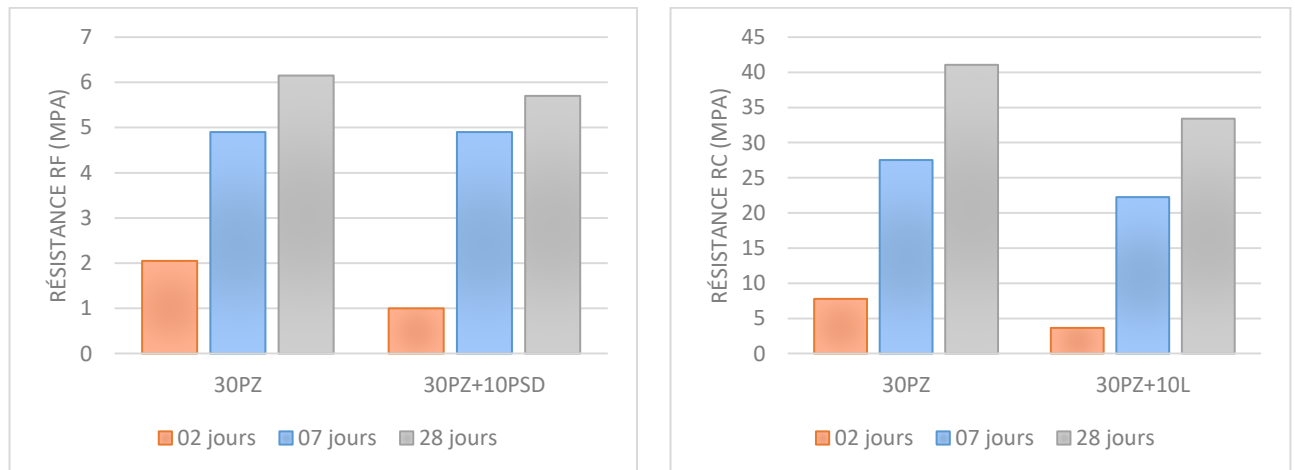


Figure IV-19 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 30% de PZ

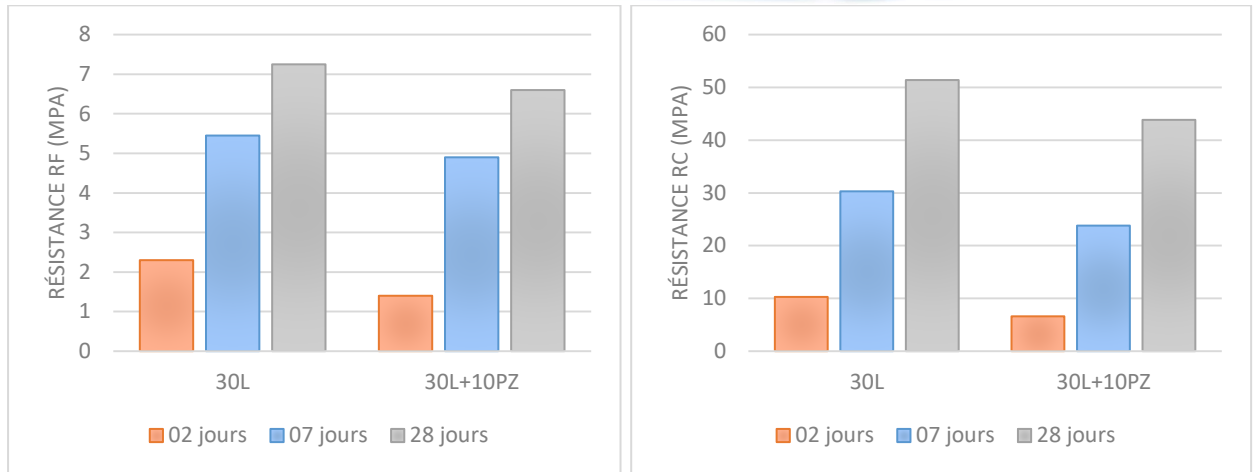


Figure IV-20 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 30% de L

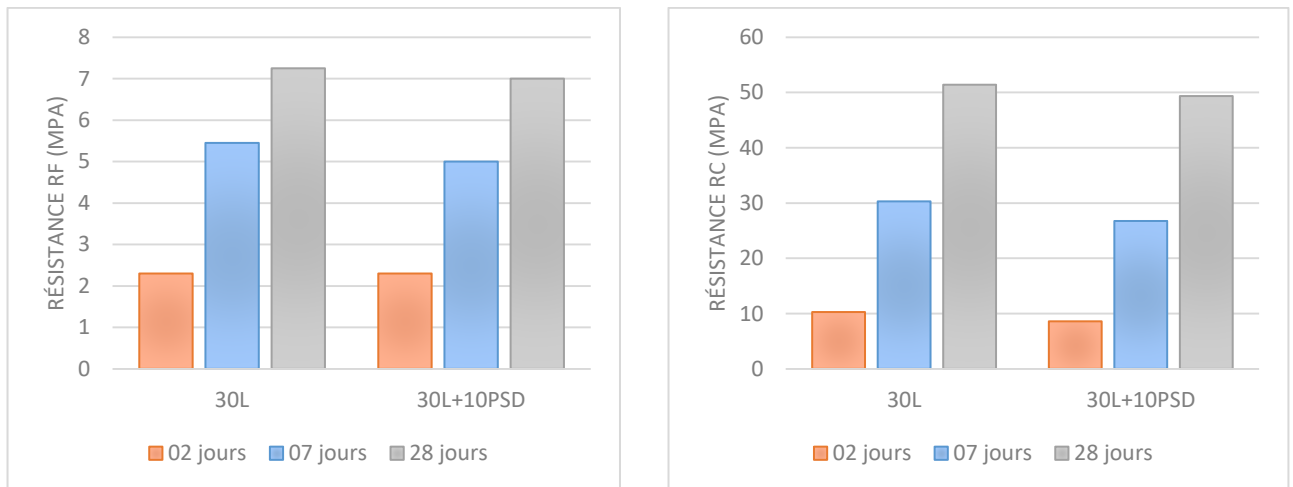


Figure IV-21 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 30% L

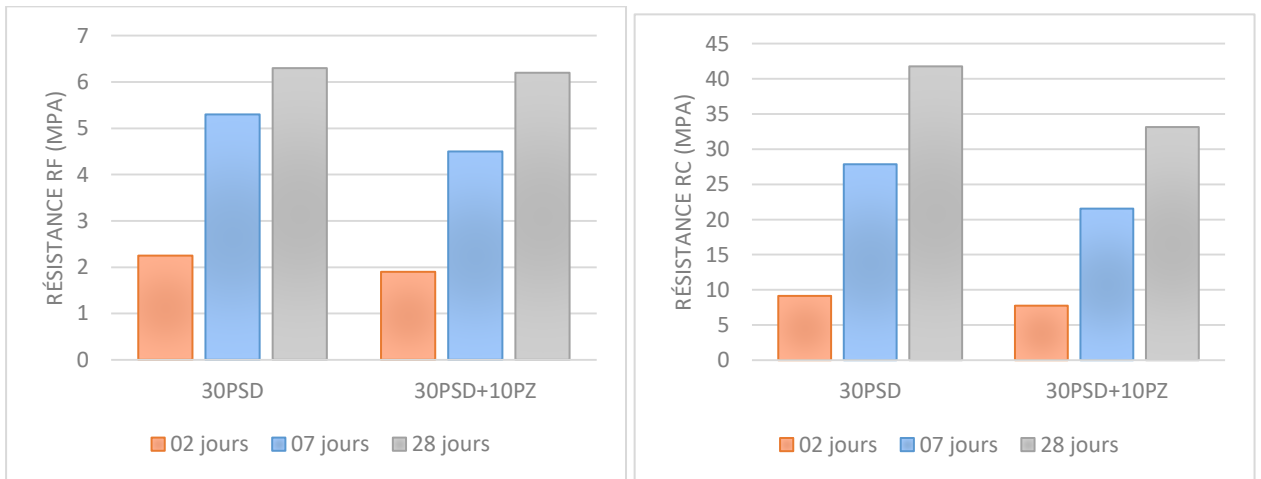


Figure IV-22 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 30% PSD

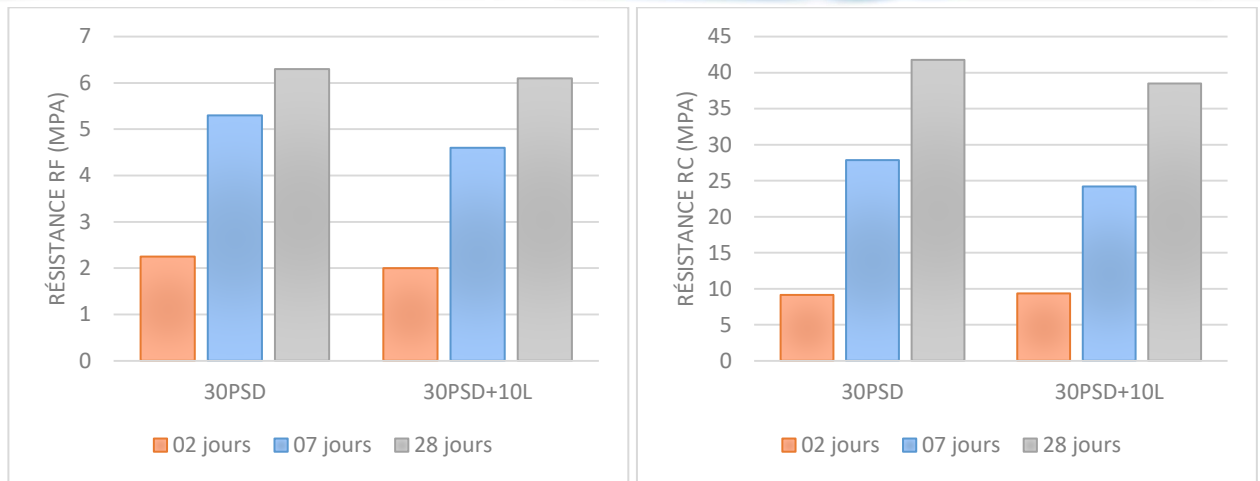


Figure IV-23 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 30% PSD

D'après ces derniers histogrammes nous constatons :

La substitution de (30L+PSD) ne donne aucun effet sur la résistance à la flexion à l'âge de 02 jours, par contre les autres compositions montrent un décroissement à la résistance au même âge de durcissement d'un écart comprise entre 11 et 51% par rapport au mortier témoin.

À 07 jours, les compositions (30PZ+L) et (30PZ+PSD) donne un effet positif sur la résistance à la flexion d'un écart de 2 et 0% respectivement par rapport au mortier témoin. Par contre à 28 jours la composition (30PZ+10L) donne la meilleure résistance en flexion d'écart de 7.3% par rapport au mortier témoin. Effectivement, la composition (30PSD+10PZ) ne comporte aucune chute à 28 jours.

Les compositions (30PZ+10PSD), (30L+10PZ), (30L+10PSD) et (30PSD+10L) contribue négativement sur la résistance à la flexion à un écart de 7.3, 9, 3.4, 1.6 et 32% respectivement par rapport au mortier témoin.

LA résistance mécanique, et pour les compositions (30PZ+10PSD), (30L+10PZ), (30PSD+10PZ) et (30PSD+10L) ne figurent aucune amélioration de résistance mécanique à courte et à long terme, en effet, les compositions (30PZ+10L) et (30L+10PSD) montrent une faible réduction de résistance à la compression par rapport au mortier témoin.

À 02 jours, on observe une légère réduction pour la substitution de (30L+10PZ), (30L+10PSD), (30PSD+10PZ) et (30PSD+10L) nous a donné des résistances à la compression inférieur à celle de mortier témoin avec un faible écart par rapport au mortier témoin. Effectivement, une augmentation de 9.3% par rapport au mortier témoin correspond à la composition (30PZ+10L).

IV.3.3.3. Résistance de composition quaternaire :

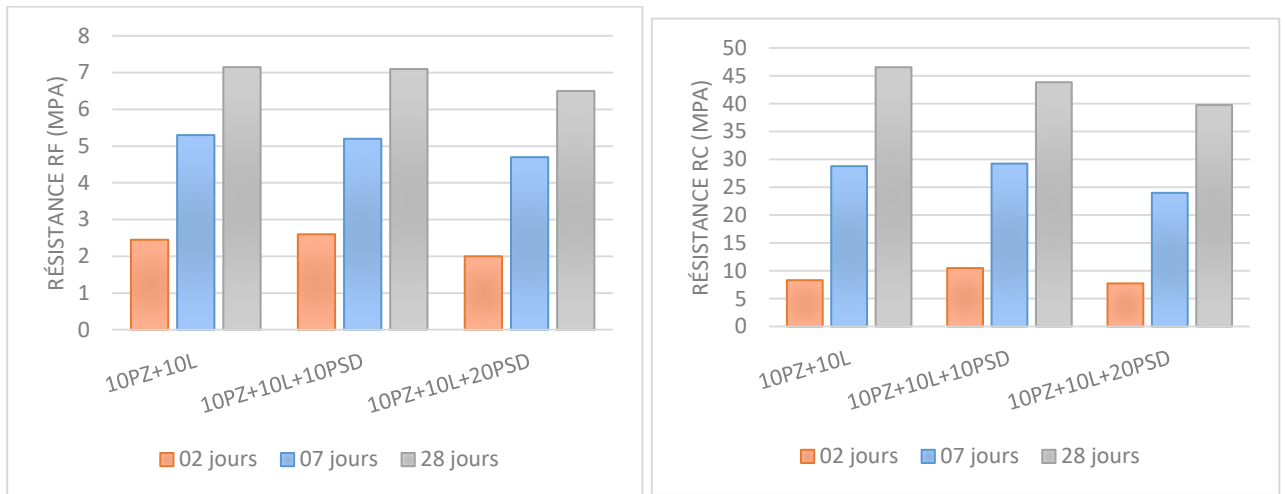


Figure IV-24 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% PZ et 10% L

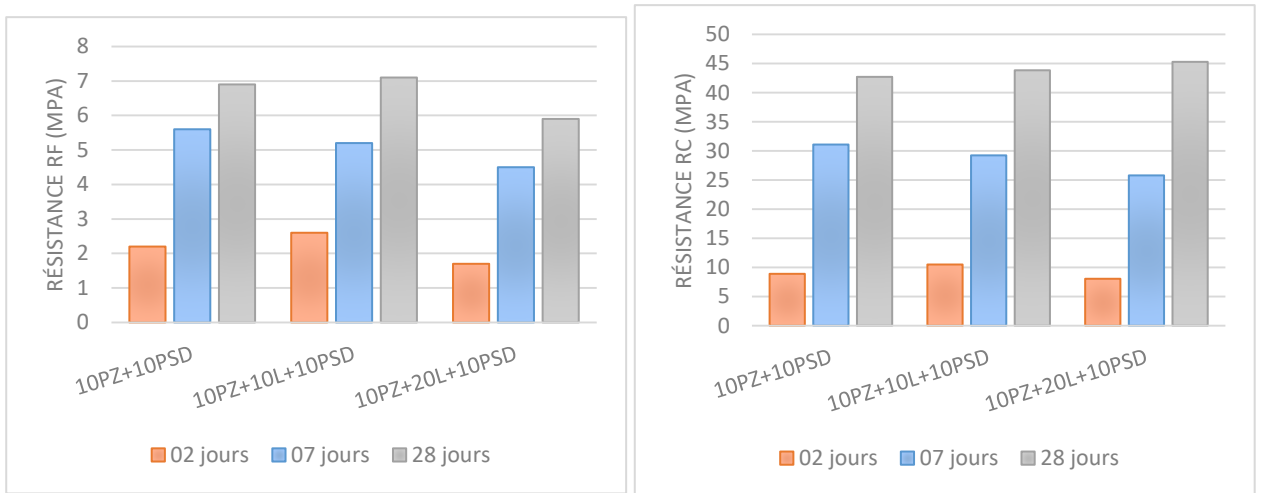


Figure IV-25 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% PZ et 10% PSD

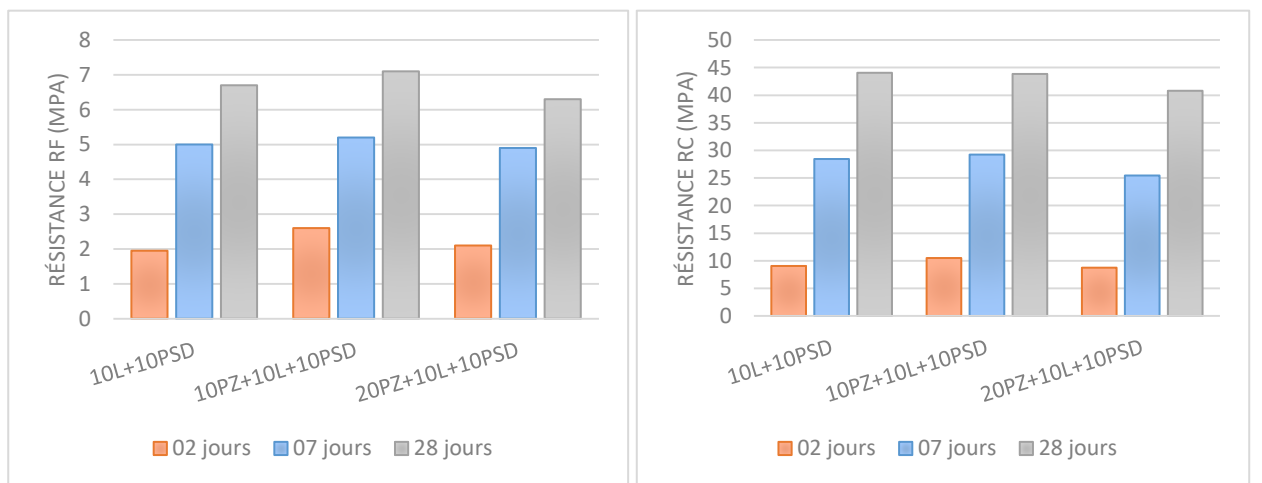


Figure IV-26 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% L et 10% PSD

La substitution de (10PZ+10L+10PSD) nous donne les meilleures résistances à la compression et de compression à tous les âges de durcissement. En effet la résistance à la flexion est assez faible pour les mortiers contenant (10PZ+10L) et (10L+10PSD) en comparaison avec la composition quaternaire contient (10PZ+10L+10PSD) en différents âge de durcissement, cette résistance tant à réduire en faisant ajouter 20% d'autres ajout comme le PSD et PZ respectivement. La résistance à la compression pour les compositions ternaire contient (10PZ+10L), (10PZ+10PSD) et (10L+10PSD) montrent la plus efficace résistance en compression. Donc nous pouvant dire que la substitution des ajouts à la composition (10PZ+10 L+10PSD) influe négativement sur le comportement mécanique en flexion et compression.

Dans cette partie, et d'après les résultats obtenus, nous remarquons que la substitution de PZ, L, et PSD a présenté un effet positif sur la pâte de ciment concernant le comportement de la pâte de ciment et la densité de la poudre de ciment. En effet, les ciments confectionnées ont représentent des résistances comparable par le ciment témoin ; nous citons par exemple, la substitution de PZ, L et PSD en composition binaire est contribué positivement sur l'amélioration de la résistance mécanique au jeune âge ; et la substitution de couplage (PZ+L) à 30%, (PZ+PSD) à 20% et (L+PSD) à 20% et (PZ+L+PSD) à 30%. Malgré Cette amélioration du comportement mécanique, la résistance à la compression à 02 jours reste inférieure à celle recommandé par la norme NF P18-325.

IV.4. Étude de ciment avec ajouts minéraux :

D'après les résultats de résistances en compression obtenus dans la partie précédente ; nous constatons que les compositions obtenus représentent des faibles résistances à l'âge de 02 jours. Cet effet est causé par le faible taux de SO_3 dans les compositions étudié (Tableau IV-5, Tableau IV-6 et Tableau IV-7). pour cela, et d'après les spécifications IANOR (NA442- NA443) de la fabrication de ciment portland le taux de SO_3 doit être inférieur à 3% [83, 84]. Donc, Dans la suite de l'étude, nous avons confectionné un ciment CPA composé de 96,5% de clinker et 3,5% de gypse (96,5% K +3,5% G).

La caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés sont présentés dans le chapitre III, et sont regroupé dans le Tableau III-12.

Les compositions de ciment préparé dans cette partie sont regroupées dans le Tableau IV-8 en utilisant la pouzzolane (PZ), laitier (L) et la poudre de sable de dunes (PSD) en substitution avec le clinker et 3,5% de gypse (96,5K+3,5G).

À titre comparatif, nous avons aussi réalisé des essais sur un ciment pétrolier Classe G de LAFARGE destiné à la cimentation des puits pétroliers de Hassi Messaoud.

Tableau IV-8 Composition de ciment à étudier

		composition	96,5K+3,5G	PZ	L	PPSD
	1	classe G	ciment pétrolier classe G			
binaire	2	témoin	100	0	0	0
	3	10PZ	90	10	0	0
	4	20PZ	80	20	0	0
	5	30PZ	70	30	0	0
	6	40PZ	60	40	0	0
	7	10L	90	0	10	0
	8	20L	80	0	20	0
	9	30L	70	0	30	0
	10	40L	60	0	40	0
	11	10PSD	90	0	0	10
	12	20PSD	80	0	0	20
	13	30PSD	70	0	0	30
	14	40PSD	60	0	0	40
	ternaire	15	10PZ+10L	80	10	10
16		10PZ+10PSD	80	10	0	10
17		10PZ+20L	70	10	20	0
18		10PZ+30L	60	10	30	0
19		10L+20PZ	70	20	10	0
20		10L+10PSD	80	0	10	10
21		10L+20PSD	70	0	10	20
22		20PZ+10PSD	70	20	0	10
23		20L+10PSD	70	0	20	10
24		30L+10PSD	60	0	30	10
25		20PZ+20L	60	20	20	0
26		20L+20PSD	60	0	20	20
quaternaire	27	10PZ+10L+10PSD	70	10	10	10
	28	10PZ+20L+10PSD	60	10	20	10
	29	20PZ+10L+10PSD	60	20	10	10
	30	10PZ+10L+20PSD	60	10	10	20

Nous avons préparé des mortiers normaux selon la norme (EN 196-1) ; la préparation des mortiers est effectuée dans les laboratoires de génie civil de l'Université KASDI MERBAH OUARGLA et laboratoire EVRNZA. Le mortier est constitué de :

- 1350 g de sable de construction (sable de Sidi Slimane)
- 450 g de ciment (en substituant les ajouts)
- 216 ml d'eau (E/C=0,48 ; maniabilité normale mesurée à l'aide de maniabilimètre)

IV.4.1 Caractérisation physique des mortiers :

IV.4.1.1. Masse volumique des éprouvettes

Le Tableau IV-9 et Tableau IV-10 montrent la masse volumique apparente des mortiers confectionnés en différent pourcentage d'ajouts (96,5K+3,5 G, PZ, L et PSD). Ces essais sont réalisés au laboratoire de département de génie civil et hydraulique de l'université d'OUARGLA.

Tableau IV-9 Masse volumique apparente des compositions binaires et ternaires (g/cm³)

		PZ (%)					L (%)					PSD (%)					
		0	10	20	30	40	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40	
PZ (%)	0	2,279	2,265	2,252	2,233	2,207	2,279	2,269	2,255	2,261	2,242	2,279	2,273	2,262	2,235	2,201	
	10	2,265					2,265	2,240	2,253	2,288		2,265	2,258				
	20	2,252					2,252	2,276	2,252			2,252	2,256				
	30	2,233					2,233					2,233					
	40	2,207					2,207					2,207					
L (%)	0	2,279	2,265	2,252	2,233	2,207	2,279	2,269	2,255	2,261	2,242	2,279	2,273	2,262	2,235	2,201	
	10	2,269	2,240	2,276			2,269					2,269	2,275	2,271			
	20	2,255	2,253	2,252			2,255					2,255	2,258	2,273			
	30	2,261	2,288				2,261					2,261	2,264				
	40	2,242					2,242					2,242					
PSD (%)	0	2,279	2,265	2,252	2,233	2,207	2,279	2,269	2,255	2,261	2,242	2,279	2,273	2,262	2,235	2,201	
	10	2,273	2,258	2,256			2,273	2,275	2,258	2,264		2,273					
	20	2,262					2,262	2,271	2,273			2,262					
	30	2,235					2,235					2,235					
	40	2,201					2,201					2,201					
Masse volumique apparente de composition en ciment pétrolier											2,186 g/cm ³						

Tableau IV-10 Masse volumique apparente de compositions quaternaires (g/cm³)

	0	10	20
10PZ+10L	PSD		
	2,240	2,258	2,240
10PZ+10PSD	L		
	2,258	2,258	2,241
10L+10PSD	PZ		
	2,275	2,258	2,230

Les tableaux ci-dessus montrent l'évolution de la masse volumique apparente des éprouvettes confectionnées en différents combinaisons binaire, ternaire et quaternaire. La masse volumique

des compositions est inférieur à celle de mortier témoin. Cette diminution est due à la faible densité des ajouts minéraux utilisés en comparant avec la densité de clinker. En outre, la masse volumique apparente des éprouvettes en ciment pétrolier est inférieurs aux compositions produite d'un écart de 4,25%.

IV.4.1.2. Résistance mécanique :

L'évaluation de la résistance mécanique des compositions aux différentes échéances sont regroupé dans cette partie ; dont nous avons «examiner la caractérisation de la résistance de ciment pétrolier classe G de LAFARGE et du ciment avec ajout qui nous avons confectionné, puis faire une comparaison entre ces résultats.

A. Résistance de ciment pétrolier :

La Figure IV-27 représente l'évolution de la résistance mécanique à la compression et flexion de mortier à base de ciment pétrolier classe G.

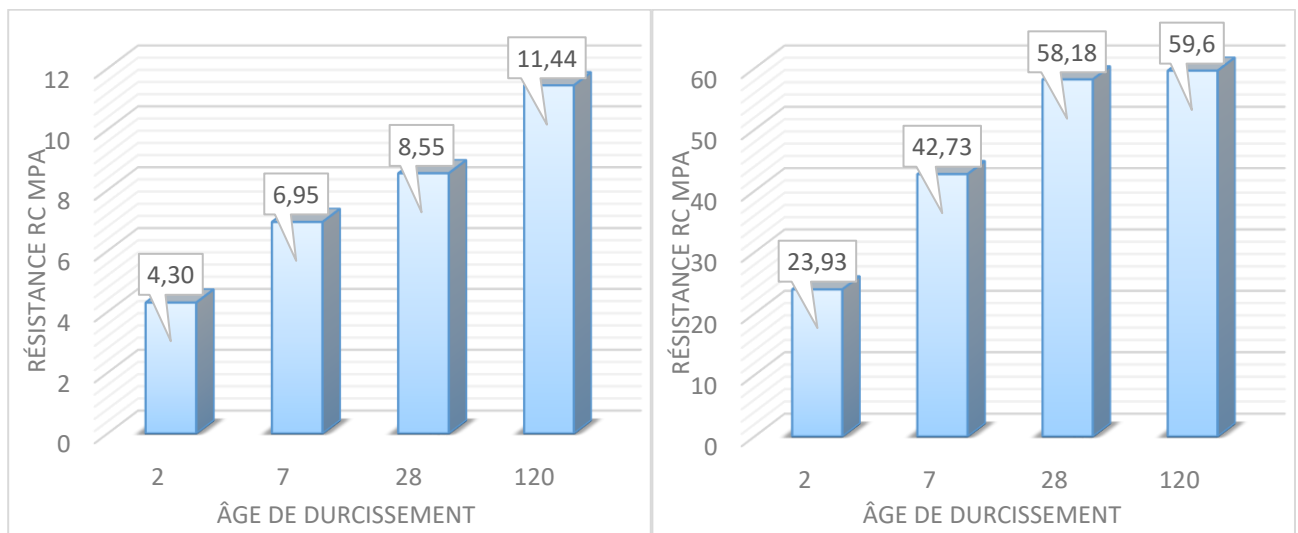


Figure IV-27 Évolution de la résistance mécanique de ciment pétrolier (G)

D'après cet histogramme, nous remarquons que l'évolution de la résistance est en fonction de l'âge de durcissement. A 02 jours, nous avons obtenu une résistance à la compression atteint à 24 MPa et à 28 jours 58 MPa, ce qui signifie que ce ciment est un ciment rapide classe 52.5R selon les spécifications de la norme EN 196-1[67].

B. Résistance de composition binaire :

Les Figure IV-28, Figure IV-29 et Figure IV-30 l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers contenant différents substitutions de la pouzzolane (PZ), laitier (L) et poudre de sable de dunes(PSD).

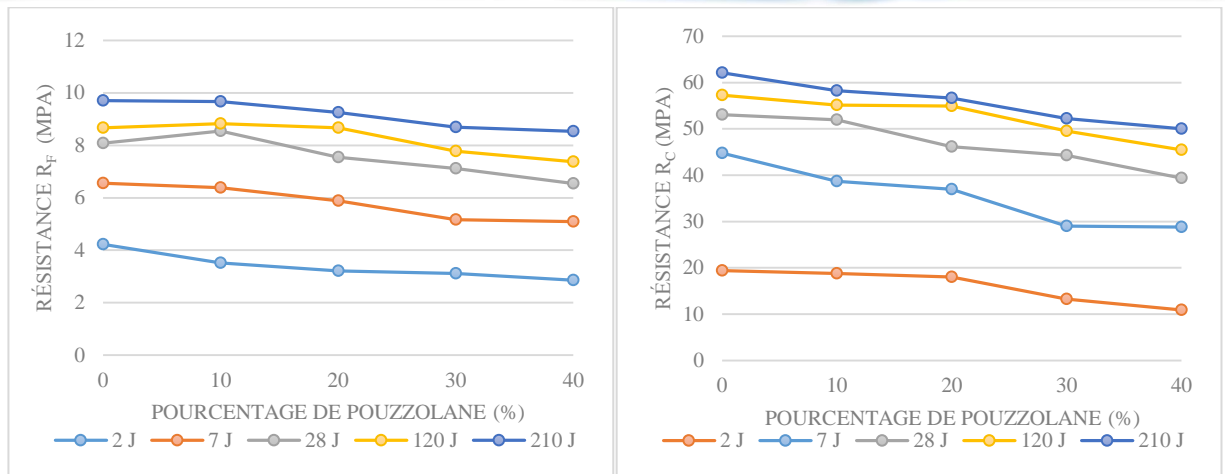


Figure IV-28 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ

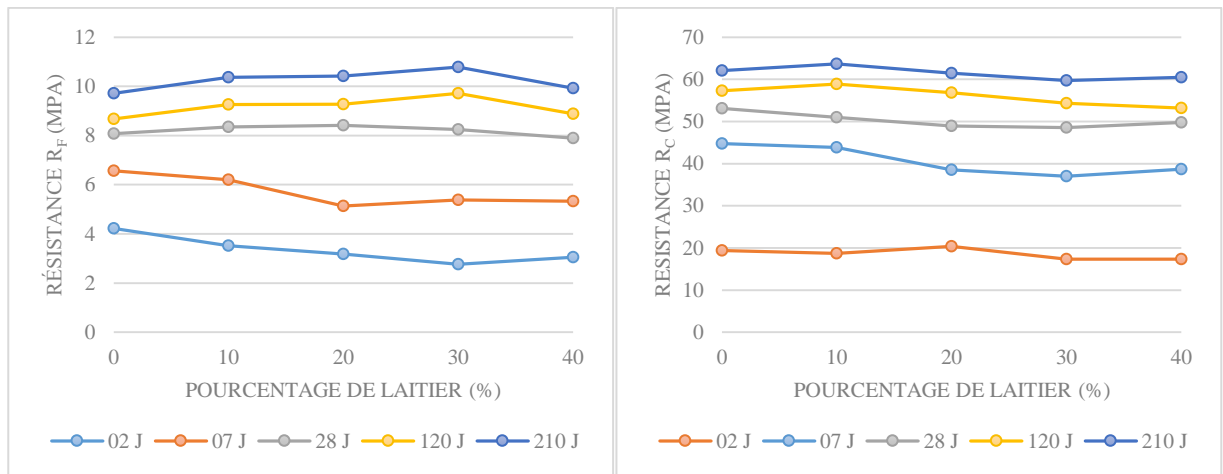


Figure IV-29 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L

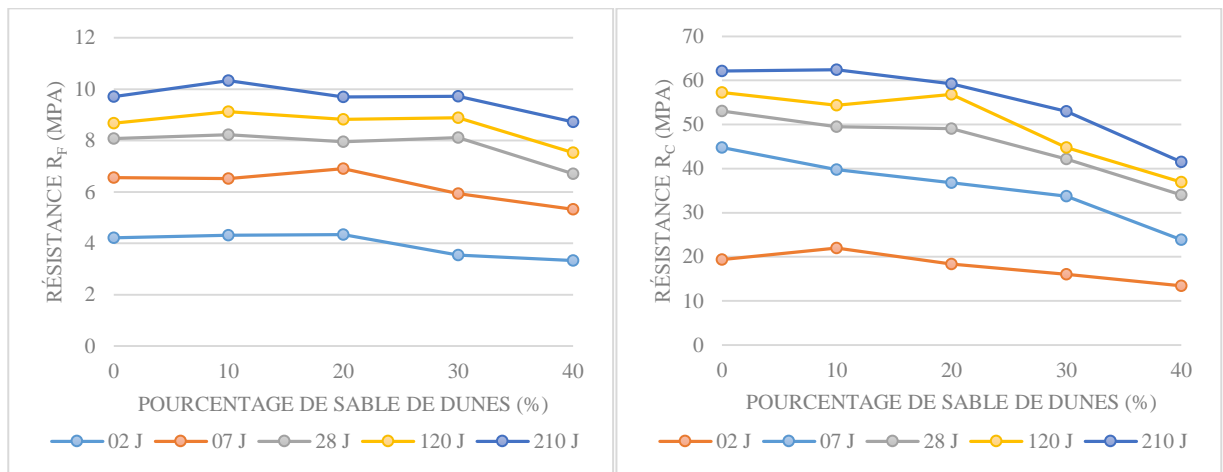


Figure IV-30 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD

D'après ces figures nous constatons que :

Les mortiers développent des résistances évoluées progressivement en fonction de l'âge de durcissement de mortier.

Les résistances mécaniques des mortiers contenant le laitier de haut fourneau aux proportions de 0 à 40% sont comparables à celle de mortier témoin. Ces compositions ont donné les meilleurs résultats de résistance mécanique ; ce qui accord avec [79, 85, 86], en effet les mortiers contenant

la pouzzolane naturelle sont faible par rapport au mortier témoin. Cet abaissement est augmenté en faisant augmenter le pourcentage de pouzzolane. Ce qui accord avec [82, 87]; cette évolution s'accroît de l'ordre de 16% et 8% en compression et flexion respectivement à long terme.

Par contre, les mortiers contenant 10 à 20% de poudre de sable de dunes développent des résistances comparables à celle de mortier témoin ; au-delà de ces pourcentages, nous remarquons un décroissement de résistance ; ce qui approuve avec [88, 89].

L'évolution de la résistance des mortiers avec ajouts est due à la variation cinétique de l'hydratation de C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bi calcique) ; et à l'activité pouzzolanique lente des ajouts au jeune âge et se développent à long terme par la fixation de portlandite $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation de ciment.

La substitution de 10-30% de laitier et 10% de poudre de sable de dunes nous a donné des meilleurs résultats de la résistance à la flexion à long terme.

C. Résistance de composition ternaire :

❖ Effet de pouzzolane et laitier (PZ+L) :

Les histogrammes des Figure IV-31 , Figure IV-32 , Figure IV-33 et Figure IV-34 représentent l'évolution de la résistance à la flexion et à la compression des compositions ternaire contenant la pouzzolane (PZ) avec le laitier de haut fourneau (L).

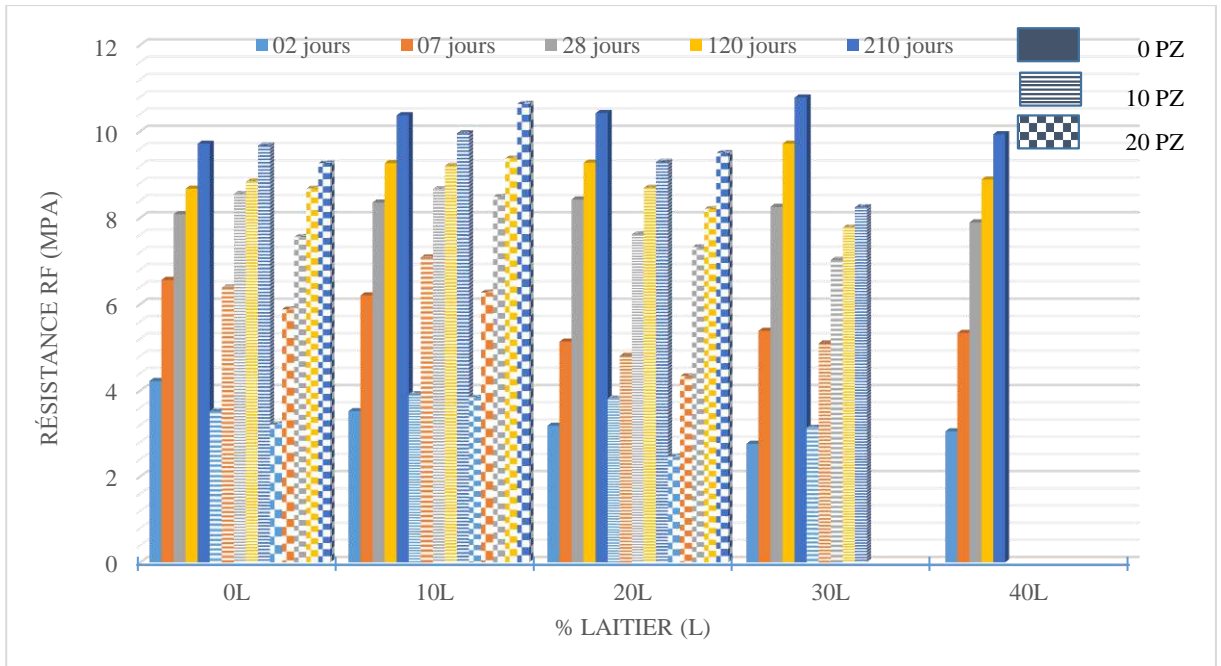


Figure IV-31 Effet de PZ et L sur la résistance à la flexion

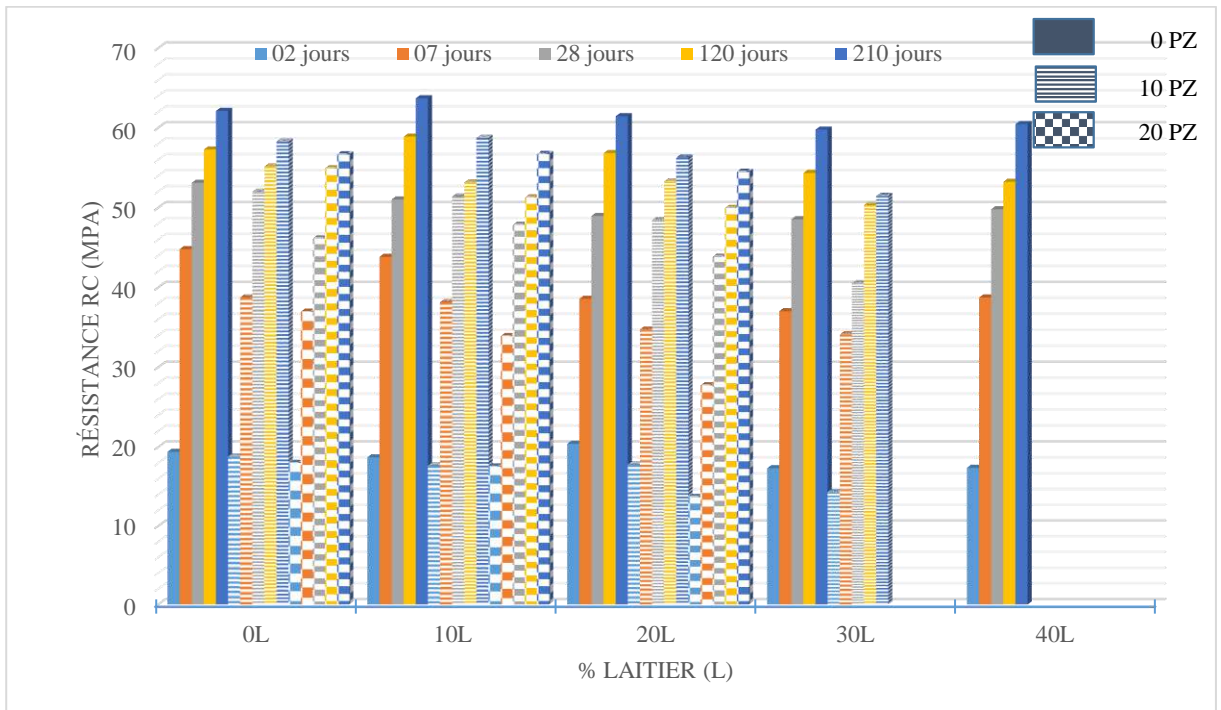


Figure IV-32 Effet de PZ et L sur la résistance à la compression

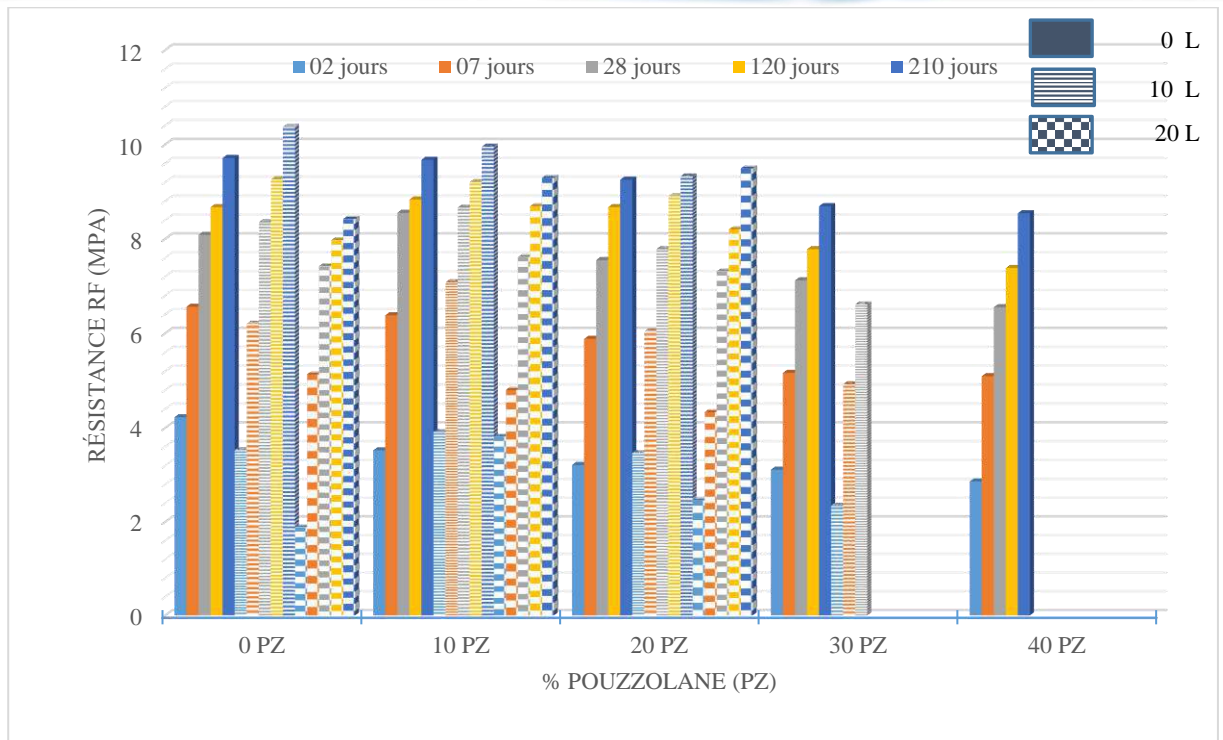


Figure IV-33 Effet de L et PZ sur la résistance à la flexion

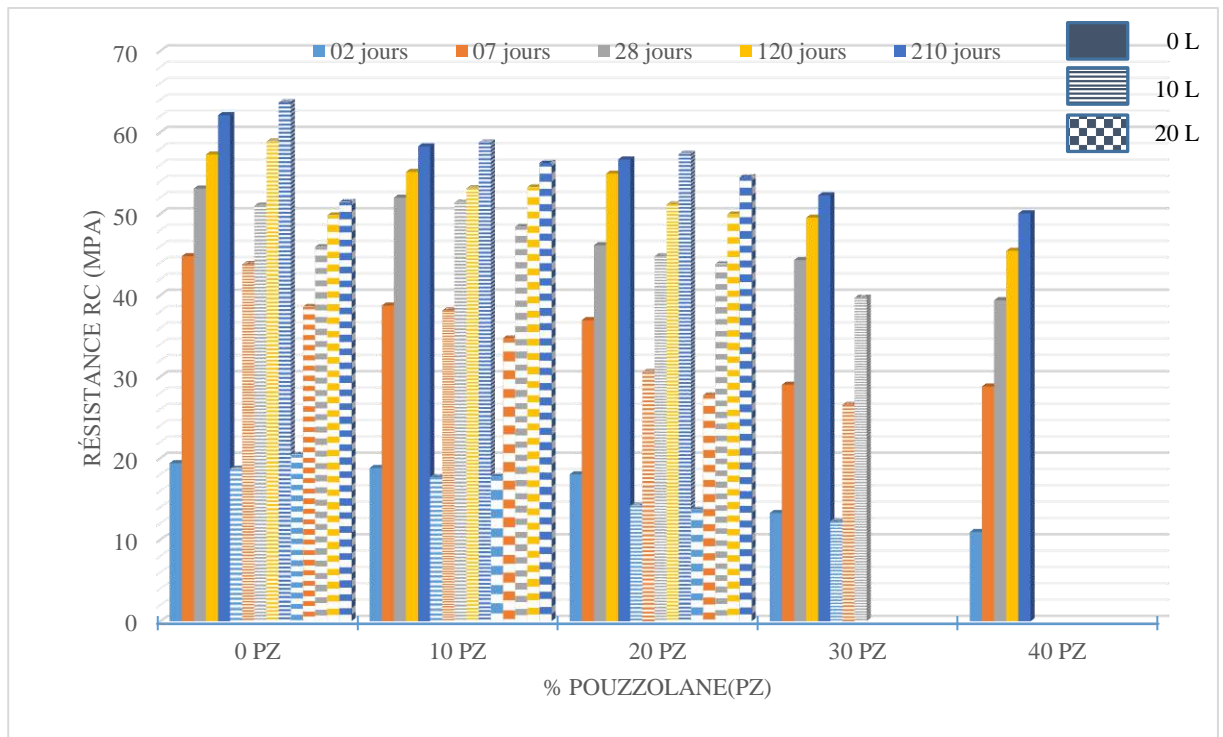


Figure IV-34 Effet de L et PZ sur la résistance à la compression

Les histogrammes ci-dessus montrent l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane (PZ) et le laitier de haut fourneau (L). L'évolution de la résistance est croissante en fonction de l'âge de durcissement et ne présente aucune chute. Au jeune âge, la résistance à la flexion des compositions contenant le laitier en proportion de 0 – 30% influe négativement à la résistance à la flexion, soit à un décroissement de l'ordre de 60 et 22% par rapport au mortier témoin à 02 et 07 jours respectivement ; à long terme on observe une évolution

de cette résistance qui atteint jusqu'aux 12% positivement. Par contre, les mortiers contenant la pouzzolane à la proportion de 0 – 20% présente un chute de résistance qui reste inférieure à celle de mortier témoin au jeune âge, mais à long terme ces résistances ont comparable au mortier de témoin.

Le couplage des ajouts de PZ et L (en composition ternaire). À long terme, la substitution de (10L+10PZ) et (10L+20PZ) influe positivement sur la résistance à la flexion et montrent les meilleurs résultats de résistance par rapport au mortier témoin, par contre à court terme, il figure une faible résistance et reste comparable à celle de mortier témoin. Cela figure la contribution de couplage de L et PZ sur la résistance à long terme.

Au jeune âge de 02 jours, la résistance à la compression des mortiers en différentes échéances de pouzzolane (PZ) et de laitier (L) et le couplage de ces derniers en pourcentage inférieur à 30% développe des résistances comparables à celle de mortier témoin. À 07 jours, les compositions contenant la pouzzolane et le couplage de pouzzolane et de laitier influent négativement avec l'augmentation de pourcentage de ces derniers ; effectivement, les mortiers contenant de laitier en différents pourcentages développent des résistances efficaces que le mortier témoin.

Les compositions contenant 10%PZ, 20%PZ, 10PZ+10L, 20PZ+10L et 10PZ+20L développent des résistances comparables entre eux, mais restent toujours inférieure à celle de mortier témoin, nous remarquons que l'utilisation des ajouts de PZ et L influe à au comportement mécanique au jeune âge et pas à long terme.

❖ Effet de pouzzolane et poudre de sable de dunes (PZ+PSD) :

Les histogrammes des Figure IV-35, Figure IV-36, Figure IV-37 et Figure IV-38 représentent l'évolution de la résistance à la flexion et à la compression des compositions ternaire contenant la pouzzolane (PZ) avec poudre de sable de dunes (PSD).

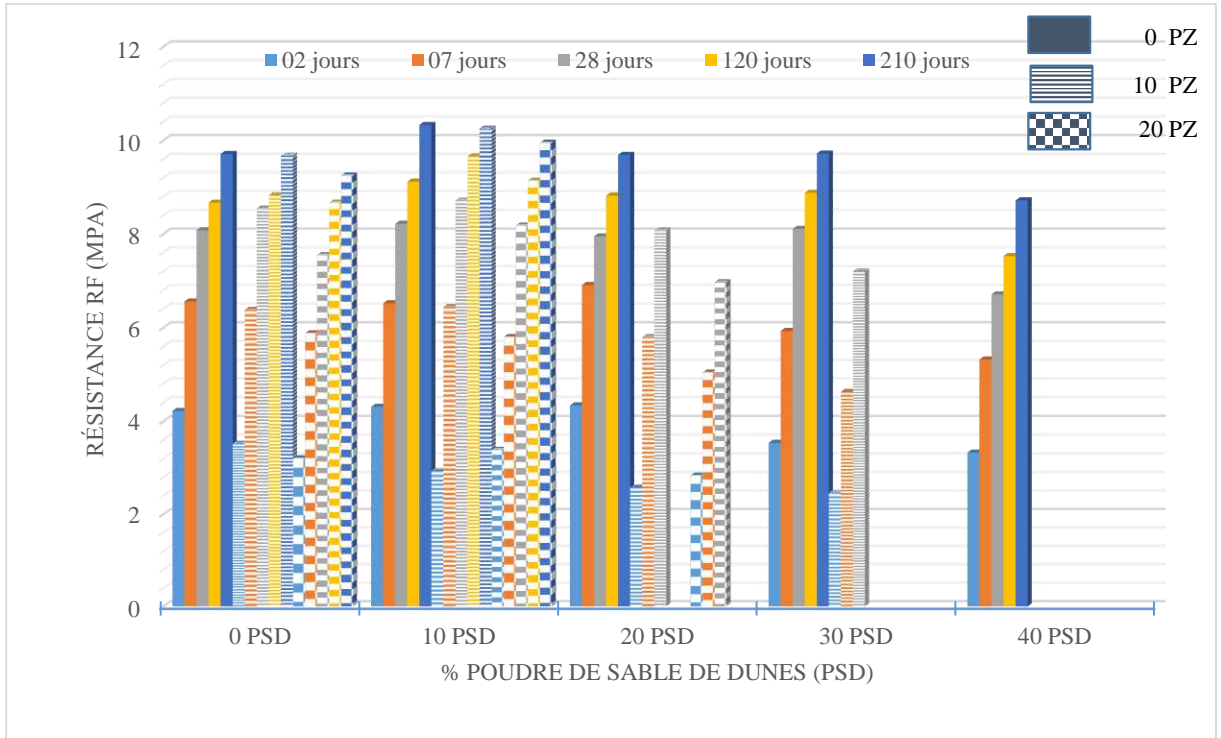


Figure IV-35 Effet de PZ et PSD sur la résistance à la flexion

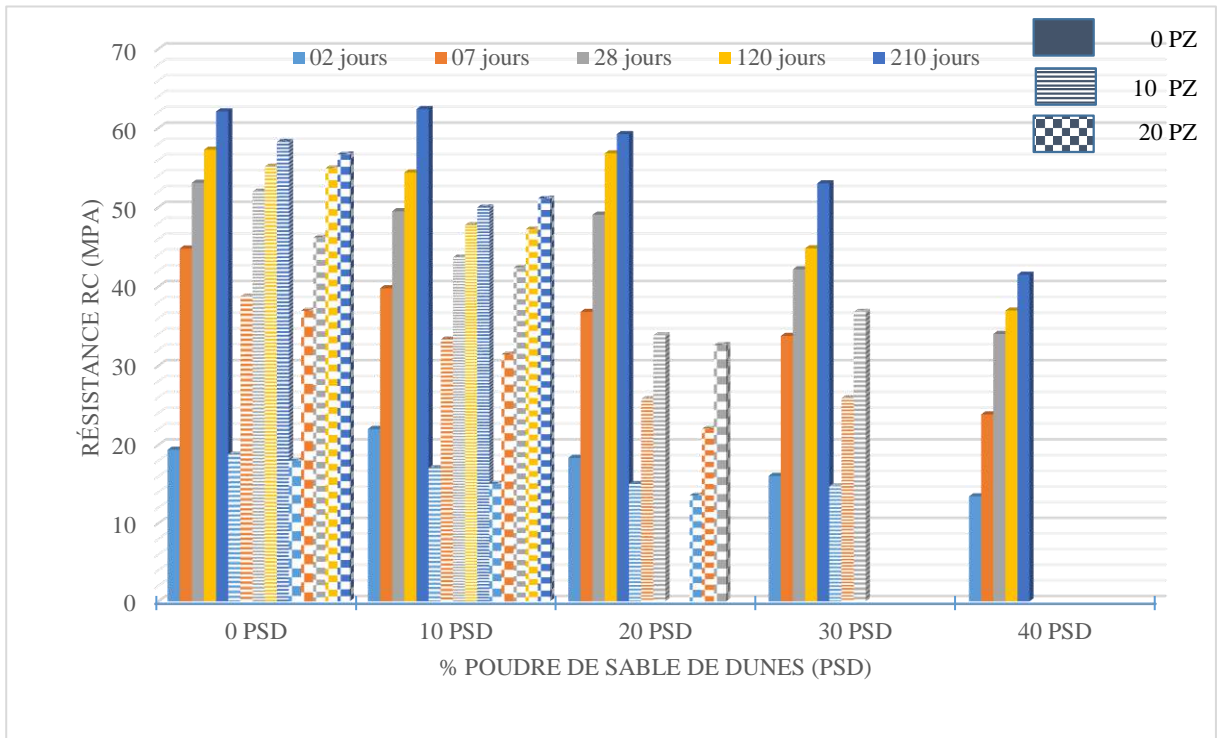


Figure IV-36 Effet de PZ et PSD sur la résistance à la compression

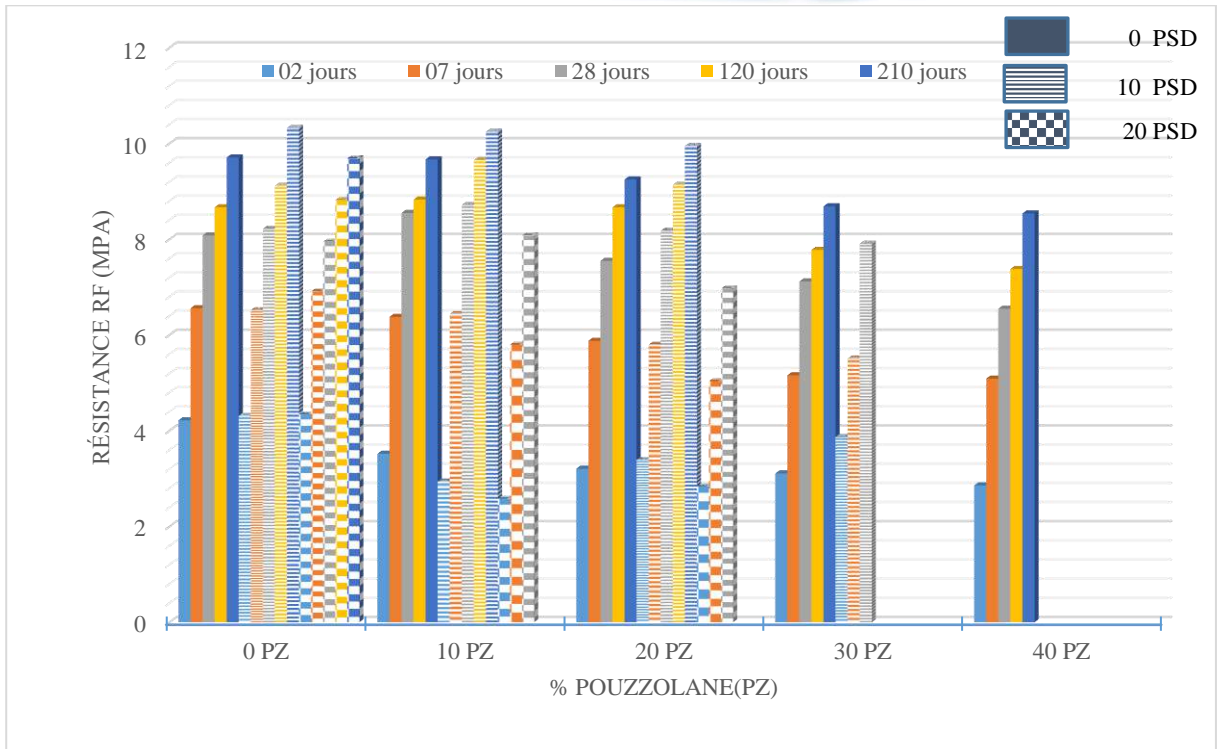


Figure IV-37 Effet de PSD et PZ sur la résistance à la flexion

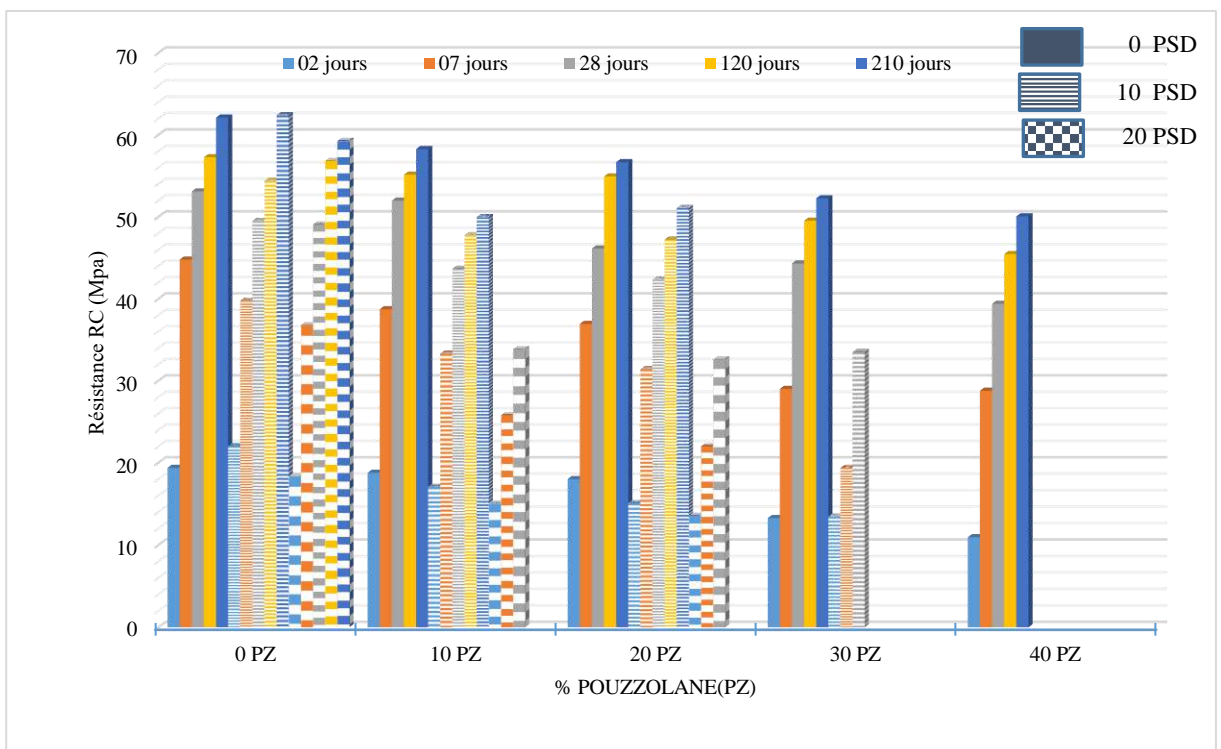


Figure IV-38 Effet de PSD et PZ sur la résistance à la compression

L'évolution de la résistance mécanique des mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons CPA / PZ / PSD est présentée à la figure ci-dessus. La résistance mécanique est évoluée successivement en fonction de l'âge de durcissement et ne figure aucune chute.

Au jeune âge (2 et 7 jours), l'incorporation du couplage PZ+PSD développe des résistances comparables à celles de mortier témoin en flexion et en compression, par contre, les compositions contenant la poudre de sable de dunes PSD montrent les meilleures résistances mécaniques ce qui accord avec [89].

À long terme (120 et 210 jours), la substitution de PSD à taux de (10 à 20%) contribué positivement sur la résistance mécanique en flexion et compression. Effectivement, le couplage de (10PZ+10PSD) et (20PZ+10PSD) développe des résistances en flexion comparable à celles de mortier témoin soient d'un taux de 3 à 7% par rapport au mortier témoin, par contre, on observe une réduction d'ordre de 24 et 22% respectivement par rapport au mortier témoin en compression.

❖ Effet de laitier et poudre de sable de dunes (L+PSD) :

Les histogrammes des Figure IV-39, Figure IV-40, Figure IV-41 et Figure IV-42 représentent l'évolution de la résistance à la flexion et à la compression des compositions ternaire contenant le laitier de haut fourneau (L) avec la poudre de sable de dunes (PSD).

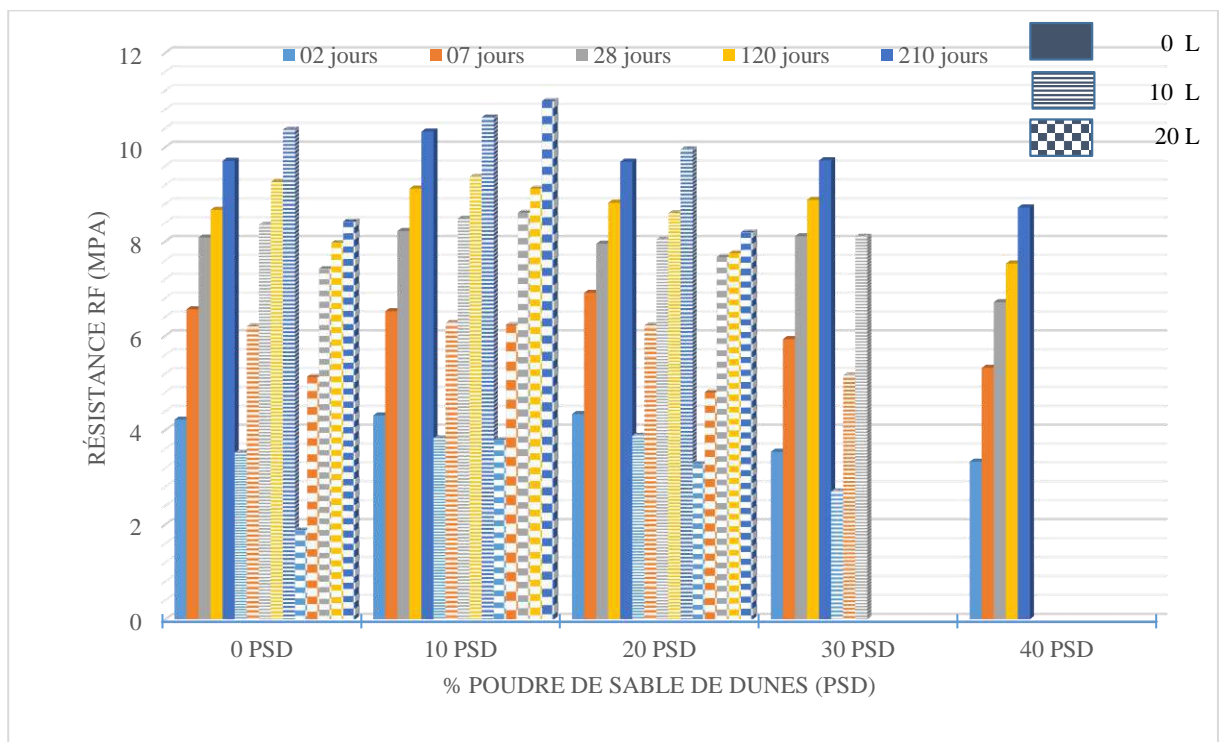


Figure IV-39 Effet de L et PSD sur la résistance à la flexion

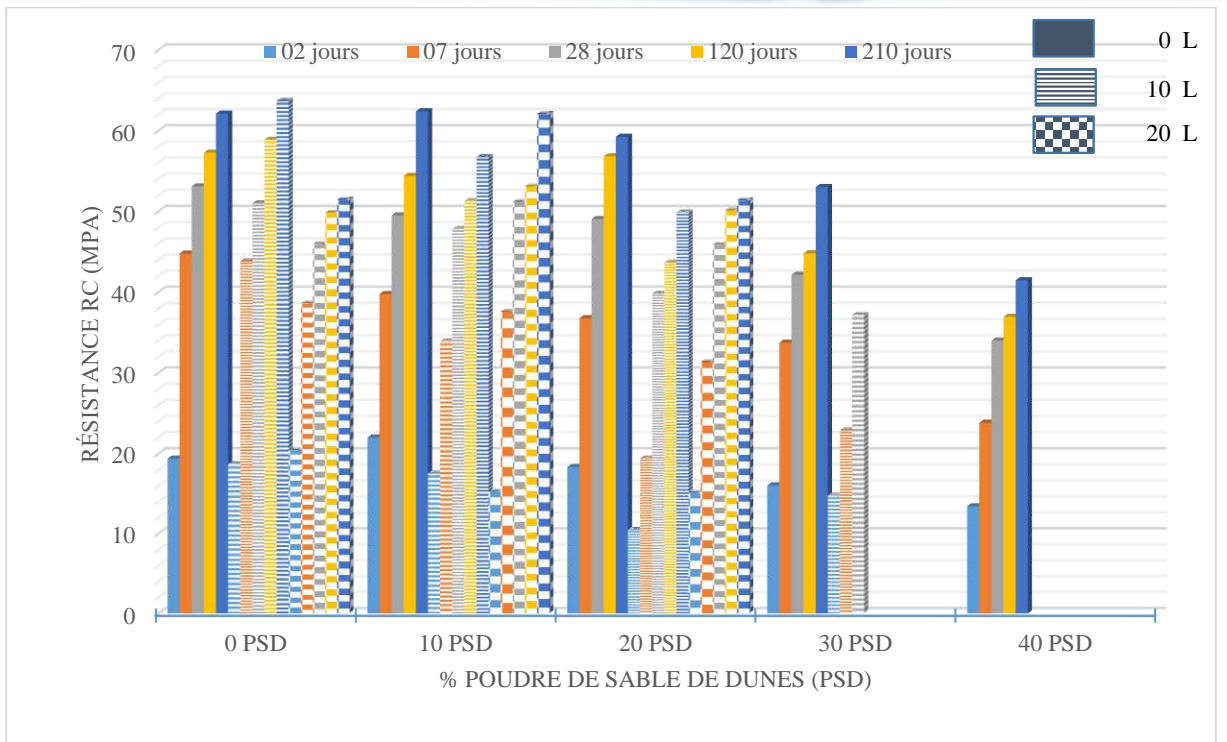


Figure IV-40 Effet de L et PSD sur la résistance à la compression

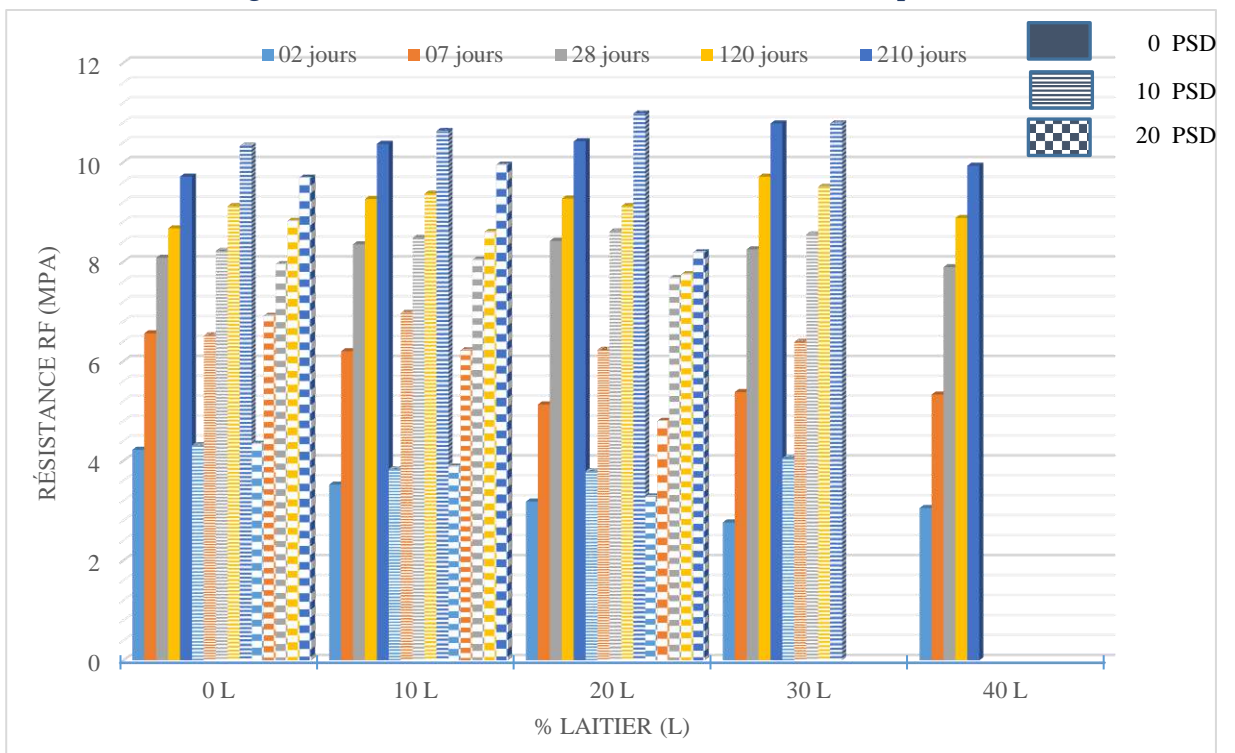


Figure IV-41 Effet de PSD et L sur la résistance à la flexion

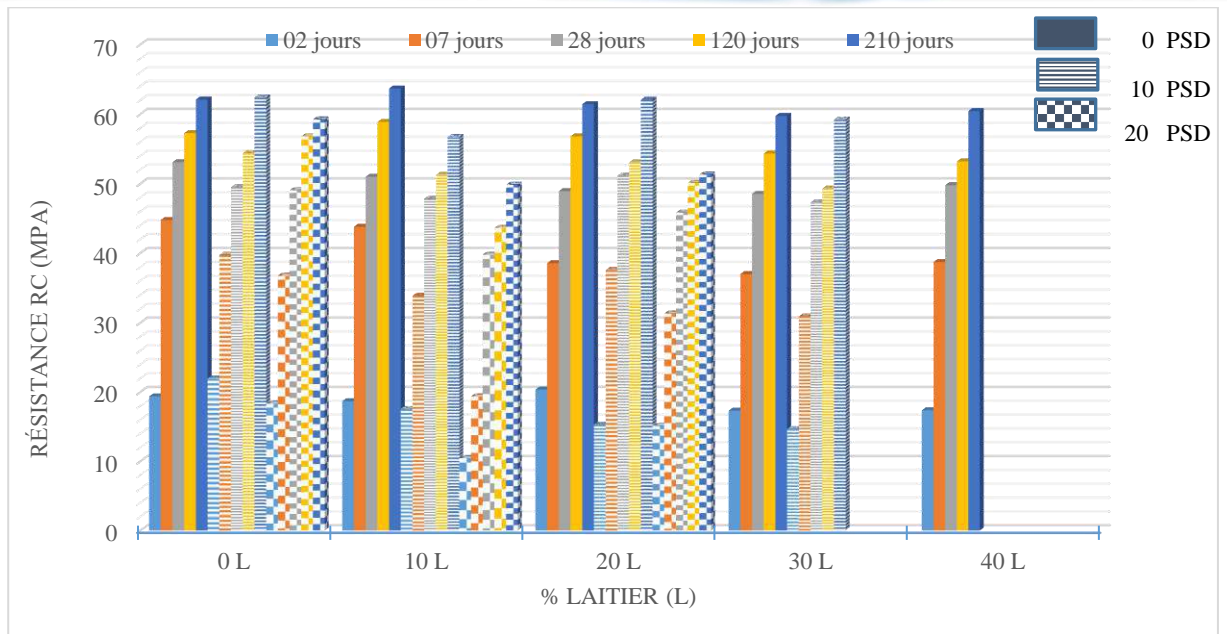


Figure IV-42 Effet de PSD et L sur la résistance à la compression

La figure ci-dessus montre l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la substitution de laitier et de poudre de sable de dunes. A 02 jours, les compositions (10L+10PSD), (10L+20PSD) et (20L+10PSD) ont figuré un écart de 8 à 10.2 % moins que celle de mortier témoin pour la résistance à la flexion. À 07 jours, on remarque une résistance similaire entre eux pour les compositions (10L), (10L+10PSD), (10L+20PSD) et (20L+10PSD), mais la résistance reste toujours inférieure à celle de mortier témoin. Effectivement, la substitution de poudre de sable de dunes uniquement a donné des meilleurs résultats au jeune âge de durcissement. À long terme (28, 120 et 210 jours), la substitution de (10L), (10L+10PSD) et (20L+10PSD) ont comparable avec le mortier témoin, ils sont donnés un effet positif sur la résistance à la flexion avec un écart de 6.8 – 9.5 – 2.5 % respectivement.

À 02 jours, la résistance à la compression des mortiers contenant uniquement de laitier à des taux de 10 et de 20 % qui était comparable à celle du mortier témoin et vient à décroître par l'incorporation de la pouzzolane à des taux entre 10 à 30%. À 07 jours, la substitution de laitier et de pouzzolane provoque un décroissement successif en fonction du pourcentage d'ajout, par contre la substitution de (10L) a donné la meilleure résistance à la compression, mais reste toujours inférieure à celle de mortier témoin.

À 28 jours, les compositions (10L), (10PZ) et (10L+10PZ) étant comparable avec la composition de contrôle pour la résistance à la compression, il vient à une dégradation en faisant augmenter le pourcentage de substitution d'ajout. Effectivement, la substitution de 10L prévoit une meilleure résistance à la compression à long terme (120 et 210 jours) par rapport au mortier témoin.

En effet, le couplage (20L+10PZ) a introduit une évolution de résistance à la compression par rapport au mortier contenant uniquement (20L).

D. Résistance de composition quaternaire :

Les histogrammes de Figure IV-43 , Figure IV-44 et Figure IV-45 représentent l'évolution de la résistance à la flexion et à la compression des compositions quaternaire contenant la pouzzolane (PZ) avec le laitier de haut fourneau (L) et poudre de sable de dunes (PSD).

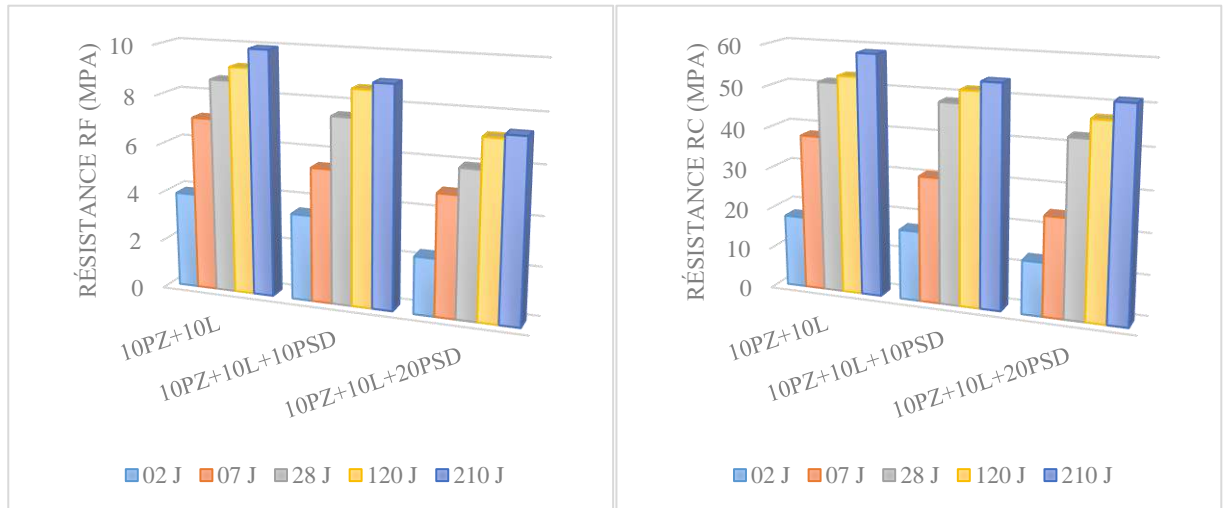


Figure IV-43 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PSD avec 10% PZ et 10% L

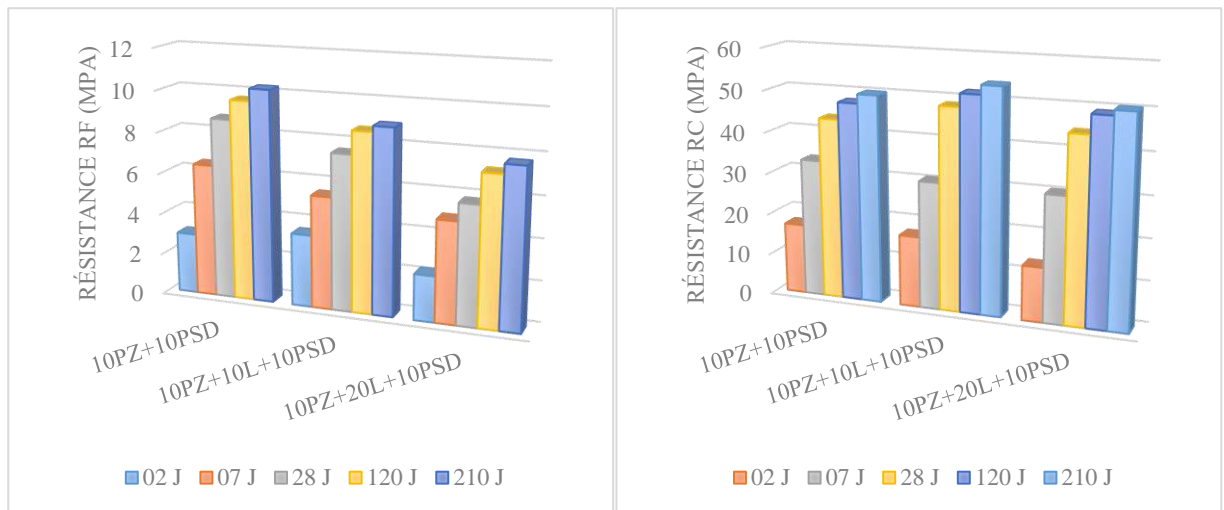


Figure IV-44 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de L avec 10% PZ et 10% PSD

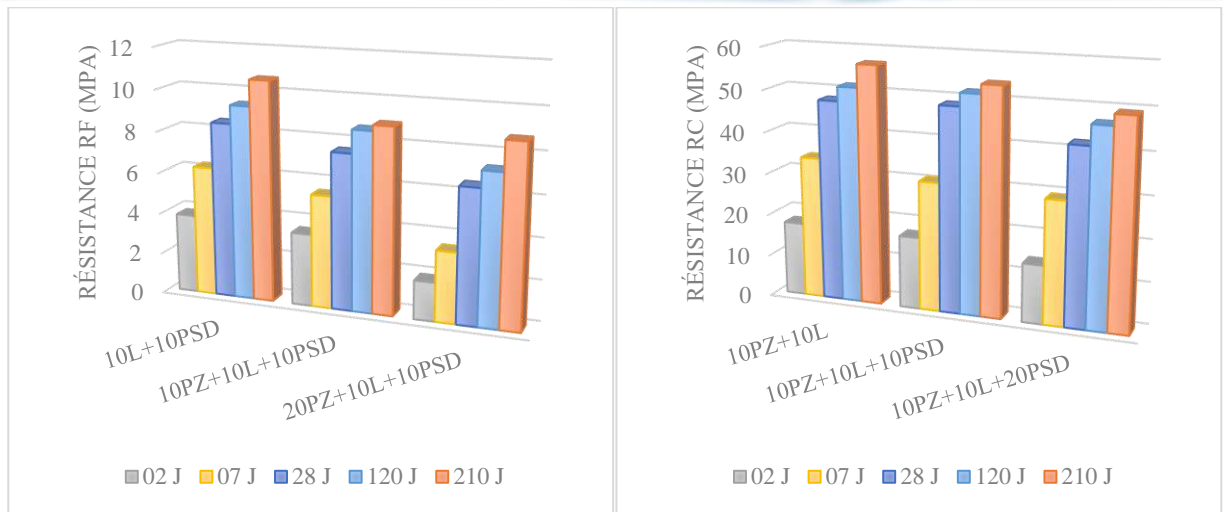


Figure IV-45 Évolution de la résistance en fonction de pourcentage de PZ avec 10% L et 10% PSD

D'après les histogrammes cités ci-dessus qui figurent l'évolution de la résistance mécanique en flexion et compression aux différents âges de durcissement en fonction de la substitution de PZ, L et PSD en composition quaternaire. Nous remarquons que :

Les mortiers binaires composés de (10PZ+10L), (10PZ+10PSD) et (10L+10PSD) ont montré le meilleur résultat de résistance à la flexion au tout âge de durcissement soient à courts ou à long terme, cette résistance tend à décroître en faisant incorporer un pourcentage du troisième ajout.

La substitution de (10PZ+10L+20PSD), (10PZ+10PSD+20L) et (10L+10PSD+20PZ) s'avère à une résistance médiocre en flexion en comparaison avec les mortiers ternaires avec un écart allant jusqu'à 40-24-41% respectivement.

La résistance à la compression des mortiers ternaires composées de (10PZ+10L) et (10L+10PSD) ont comparable avec la composition de (10Pz+10L+10PSD), l'ajout de PSD et de PZ dans les compositions précédentes montre un effet négatif sur le comportement mécanique en compression. Effectivement, la substitution de 10L avec (10PZ+10PSD) s'avère à une bonne résistance à la compression au tout âge de durcissement, au pourcentage de 20L réduit cette résistance.

A partir les résultats obtenus dans cette partie, nous remarquons que la substitution des ajouts minéraux utilisées dans notre étude dans les mortiers provoquant un produit moins dense concernant la densité par rapport au mortier témoin. L'influence de la substitution des ajouts sur la résistance mécanique à long terme nous montre que :

- La substitution binaire de laitier (L) a donné des meilleurs résultats sur la résistance mécanique ; en outre, la substitution de pouzzolane (PZ) et la poudre de sable de dunes

(PSD) en proportion de 0 à 20% nous donne de résistances comparable à celle de mortier témoin.

- Les compositions ternaires composées de (20PZ+10L), (10PZ+10L), (10PZ+10PSD), (10PSD+20PZ) et (20L+10PSD) présentent des résistances en flexion acceptable par rapport au mortier témoin. par contre, le couplage de (L) et (PSD) au taux de 0 à 30% est le plus efficace de point de vue résistance mécanique en comparaison avec le mortier témoin.
- La composition (10PZ+10L+10PSD) quaternaire a donné des meilleures résistances par rapport au témoin pour ce type de composition.

IV.4.2 Durabilité des mortiers aux attaques chimiques :

La démarche consiste à comparer la durabilité de différents types de mortiers confectionnés avec ajouts binaires, ternaires et quaternaires ; en immersion dans différents milieux. Pour cela, des éprouvettes prismatiques de mortier de dimension 4x4x16 cm³ ont été confectionnées selon la norme NF 15 403 ; dont les rapports pondéraux sont :

- liant/sable= 1/3,
- eau/liant = 0.48.

Ces éprouvettes sont démoulées après 24 heures de sa confection ; après 28 jours de durcissement en humidité saturante, les éprouvettes de différentes échéances sont pesées pour déterminer leurs masses initiales avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans différents milieux de conservation pendant 180 jours dans trois milieux.

La première est conservée dans la solution de sulfate de magnésium (MgSO₄)[90, 91] de concentration 5% (classe d'agressivité A3 selon la norme P18-011). La deuxième on conservée dans la solution de acide sulfurique (H₂SO₄) de concentration 0.5 moles [26, 92]et la troisième conservée dans l'eau potable (témoin). Ces milieux sont choisis pour simuler les milieux agressifs des puits de pétrole pour voir l'influence de ces milieux sur nos mortiers et simuler ainsi les milieux réels de ciment des puits pétrolier.

La résistance due aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides est évaluée selon la norme ASTM C 267-96[63]. La norme NA 778 et P18-011 indiquent les spécifications des milieux agressifs. Les solutions présentant une concentration en ions SO₄⁻ compris de 1500 à 6000 mg/l et sol présentent une concentration en ions sulfates comprise entre 3700 à 6700 mg/l sont considérée comme environnement aggressive.[83, 93]

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois par l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30 min. Ensuite, on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de

précision de 0,01g. Les tests se limitent aux observations visuelles et à la détermination de la résistance mécanique.

Les solutions d'attaque sont renouvelées chaque 30 jours pour l'acide sulfurique de telle façon à maintenir un PH constant sont égales à 1 - 2, et chaque 30 jours pour le sulfate de magnésium de façon à maintenir la classe A3 de l'agressivité de solution conformément à la norme NF P18-011. Le Tableau IV-11 présente l'analyse chimique de la solution agressive en sulfate de magnésium ; cette analyse a été effectuée au laboratoire ADE OUARGLA.

Tableau IV-11 Analyse chimique de la solution sulfatique

CE	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	TH ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Résidus sec	PH
6,090 ms/cm	162,463 mg/l	332,727 mg/l	2 mg/l	2800 mg/l	160,32 mg/l	583,32 mg/l	2225 mg/l	7202 mg/l	7,95

Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante :

$$perte\ de\ masse\ (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec **M1** : masse des éprouvettes avant immersion.

M2 : masse des éprouvettes après immersion.



Photo IV-1 Conservation des éprouvettes dans différentes milieux

IV.4.3 Analyse macroscopique des éprouvettes :

Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans différents milieux, (eau, acide et sulfate). Après la durée de conservation ; nous retirons ces éprouvettes puis lavées trois fois avec l'eau douce et séchées jusqu'à la stabilisation de la masse de ces derniers. Le microscope utilisé est celle de laboratoire de recherche LGS de l'université d'OUARGLA.



Photo IV-2 Séchage des éprouvettes dans l'étuve après lavage

Les photos présentées ci-dessous représente l'analyse macroscopique et microscopique d'état des éprouvettes à l'œil nu et à l'aide de microscope.



Photo IV-3 État de surface des éprouvettes de ciment pétrolier



milieu Eau



milieu acide

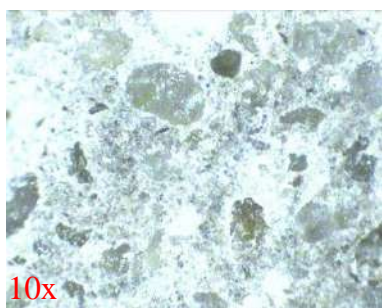


milieu sulfates

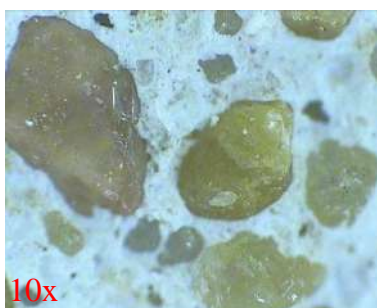
Photo IV-4 État de surface des mortiers après 180 jours de conservation



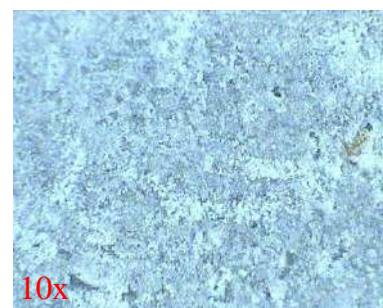
Photo IV-5 État de surface des compositions quartenaires après 180 jours de conservation



10x



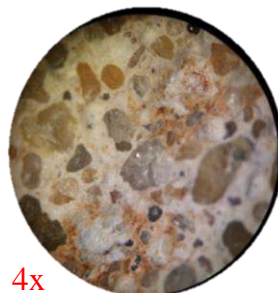
10x



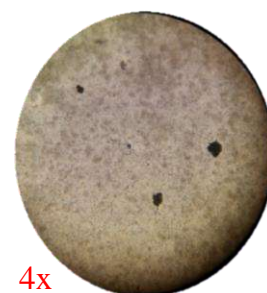
10x



4x



4x



4x

Photo IV-6 vue microscopique de surface des éprouvettes après 180 jours de conservation

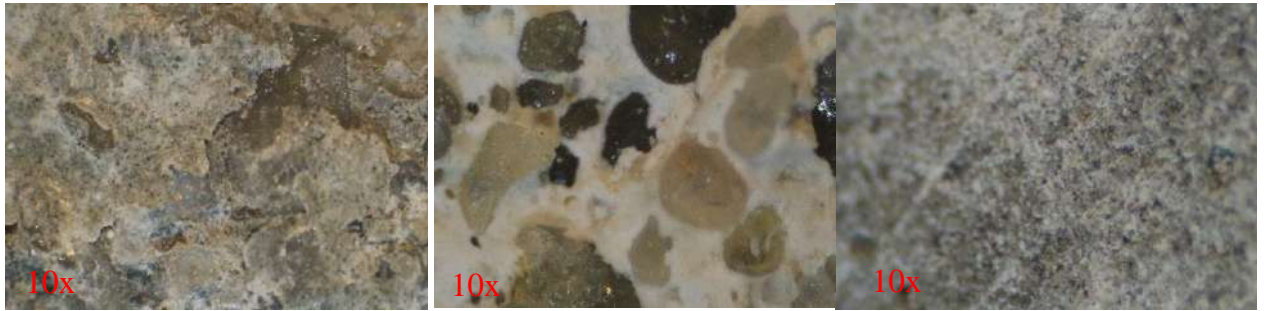


Photo IV-7 vue microscopique de surface des éprouvettes en ciment G après 90 jours de conservation

Les photos ci-dessus montrent l'état des éprouvettes conservé aux différents milieux.

Après 180 jours de conservation dans la solution et à la sortie des bains :

- Nous avons constaté que les éprouvettes conservées à la solution sulfatique sont généralement entourées par une couche blanche de sel difficile à gratter ; ce dernier est attribué à la formation de l'étringite et de la thaumasite qui résulte de la réaction chimique de $MgSO_4$ avec le ciment, l'observation microscopique ne présente aucune fissure sur les éprouvettes conservées en milieu sulfatique. En comparaison avec le ciment pétrolier classe G, nous remarquons la bonne tenue des spécimens confectionnés en différentes compositions aux milieux sulfatiques.

- Nous avons constaté que, dans la solution acide et après 180 jours de conservation, les échantillons présentent un aspect plus ou moins dégradé comme illustré dans figures ci-dessus. D'une façon générale, les spécimens immergés dans l'acide sont recouverts par une couche cristallisée de couleur jaunâtre ; la Photo IV-3, Photo IV-4 et Photo IV-5 montrent l'état de surface des éprouvettes dégradé, on remarque que la dégradation des éprouvettes est superficielle. L'analyse sous microscope montre la détérioration de liant de surface autour des grains de sable.



Photo IV-8 couche formée sur les éprouvettes soumise dans l'acide sulfurique

- Les surfaces la plus détériorée correspondante aux compositions ternaire et quaternaire contenant le couplage des minéraux, cette détérioration augmente en faisant augmenter le

pourcentage de ces derniers, l'addition de pouzzolane montre un effet positif sur l'attaque acide aux éprouvettes confectionnées ; ce qui confirme les résultats de [5, 94, 95] ; les mortiers contiennent la poudre de sable de dunes et de laitier présentent une faible dégradation qui provoque une faible perte de masse.

- L'éprouvette conservée dans l'eau ne figure aucun changement pendant la durée de cure aux différents milieux.

IV.4.4 Perte de masse :

Les histogrammes de Figure IV-47, Figure IV-48 et Figure IV-49 montrent la variation de la perte de masse de différentes combinaisons binaires, ternaires et quaternaires aux milieux acides, agressive et eau douce.

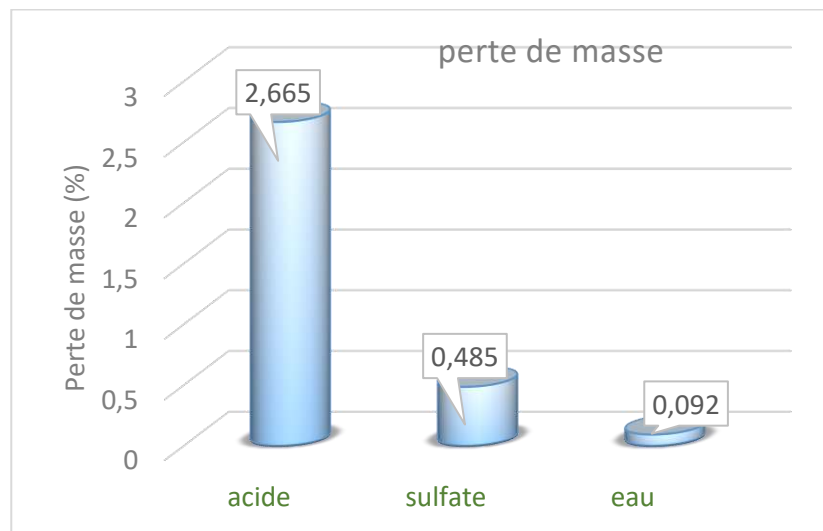


Figure IV-46 Perte de masse des éprouvettes de ciment pétrolier après 03 mois

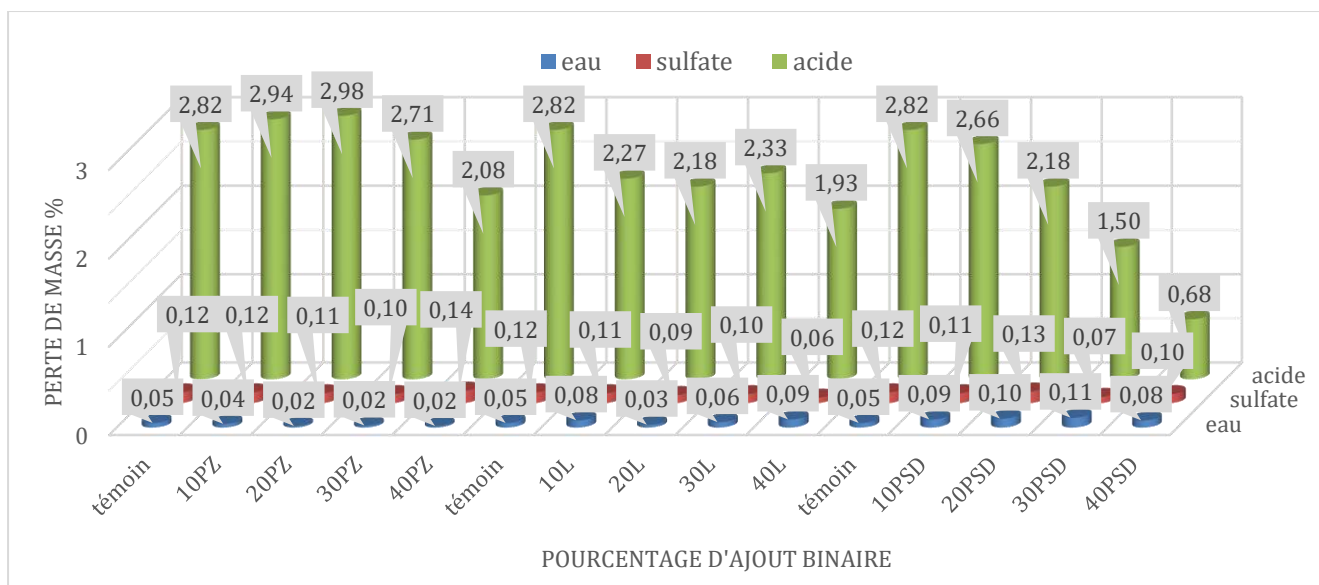


Figure IV-47 Évolution de perte de masse des compositions binaires

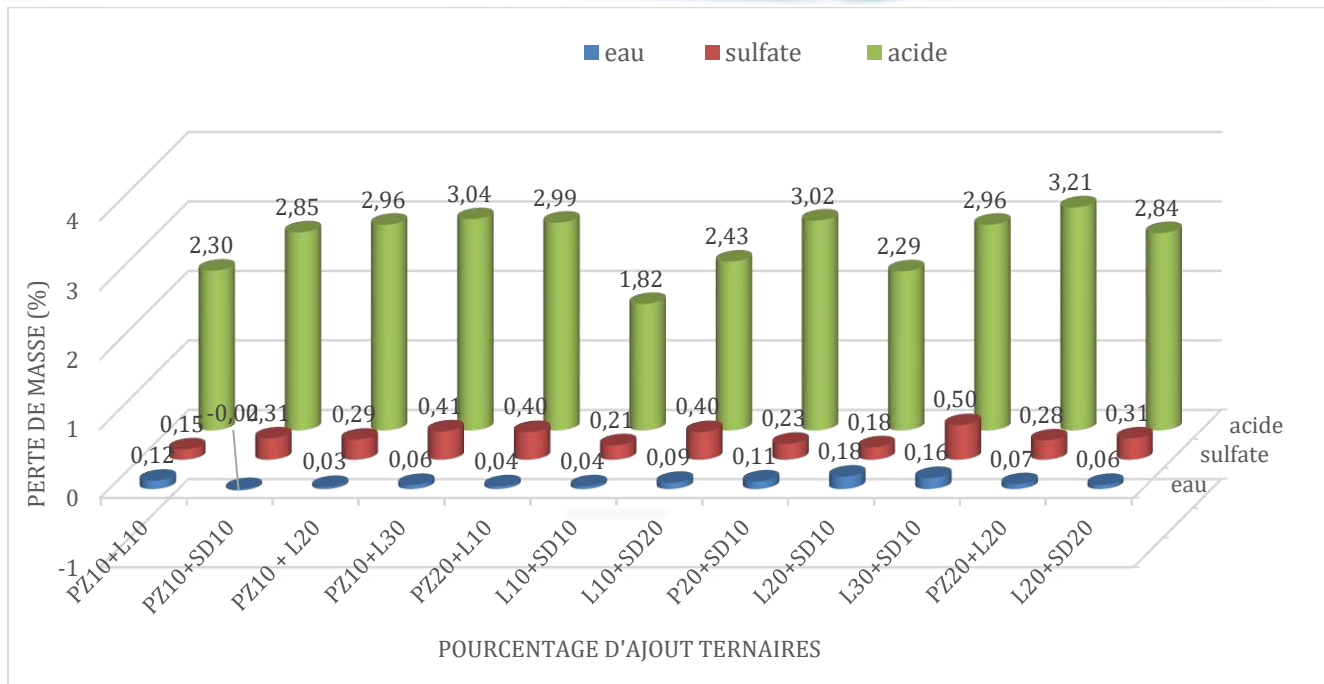


Figure IV-48 Évolution de la perte de masse des compositions ternaires

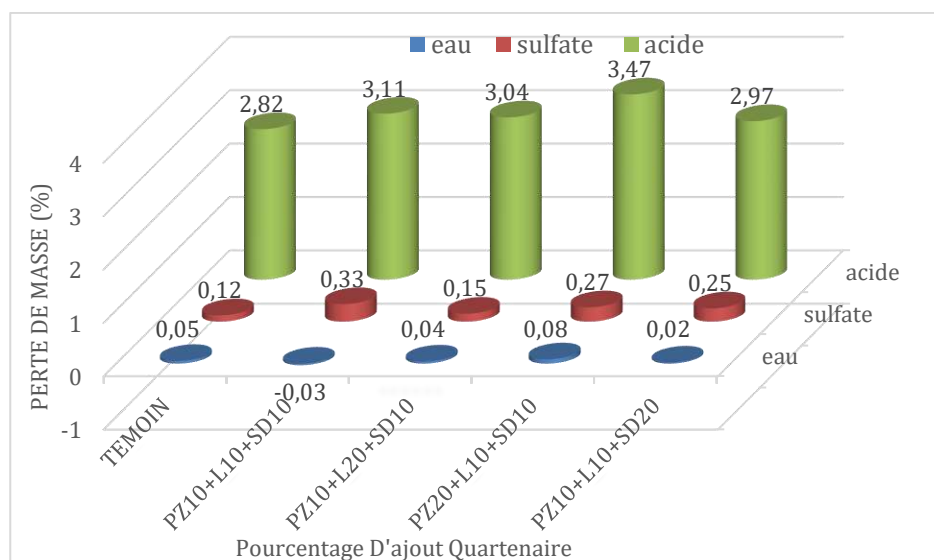
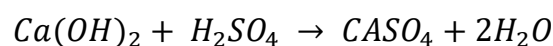


Figure IV-49 Évolution de la perte de masse des compositions quaternaires

• **Action des acides :**

Nous remarquons que les éprouvettes conservées dans la solution acide ont recouvert par une couche blanche après 24 heures de conservation pour toutes les compositions. (MOULI M. et al) ont mentionné que la réaction est due au dépôts du gypse qui se forme suite à la réaction entre la portlandite et l'acide sulfurique selon la formule [96]:



La perte de masse est augmentée en fonction de la durée de conservation. Les compositions contenant la pouzzolane sont résistantes aux attaques acides jusqu'à un écart de 17,90 % par rapport au mortier témoin, ce qui confirme les résultats de [5, 87, 96-99].

La substitution de laitier (L) et la poudre de sable de dunes (PSD) au pourcentage varie de 0 à 40% réduit à un abaissement de la perte de masse jusqu'à 9 et 26% respectivement par rapport au mortier témoin, ; ces résultats sont confirmés par Achoura et Guettala [26, 85]. Cet abaissement est dû à l'incorporation du sable de dunes et de laitier et leur résistance au attaque acide (joue un rôle chimique en fixant la portlandite libérée par la réaction d'hydratation de ciment)[58]. En effet, les compositions ternaires et quaternaires ont présenté une faible résistance chimique à l'agression acide sauf pour le couplage de (10L+10PSD), (10L+20PSD) et (20L+10PSD) qui ont montré une perte de masse similaire au mortier témoin.

- **Action des sulfates :**

Les éprouvettes conservées aux milieux agressifs (solution de sulfate de magnésium) durant 180 de cure ; nous remarquons que ces derniers recouverts par une couche de sel blanc difficile à gratter ; la perte de masse de ces éprouvettes est assez faible par rapport au mortier témoin pour toutes les combinaisons (binaire ternaire et quaternaire).

Par contre, la substitution de poudre de sable de dunes et de laitier possède une amélioration de la perte de masse en faisant augmenter le pourcentage de l'ajout par rapport au mortier témoin. Cette résistance chimique nous résulte le bon comportement de ciment confectionné avec les ajouts minéraux dans les milieux agressifs notamment dans notre région qui caractérise par une très forte agressivité au sol [100].

Les éprouvettes conservées dans l'eau douce n'ont plus perdu son poids durant la période de cure.

IV.4.5 Résistance mécanique

Les histogrammes ci-après montrent l'influence de l'attaque agressive sur l'évolution de la résistance mécanique des éprouvettes conservées dans différents milieux agressifs (milieu acide sulfurique, milieu sulfate de magnésium et milieu eau douce). Les éprouvettes conservées sont menées à l'écrasement après une durée de conservation au différent milieu de 90 et 180 jours.

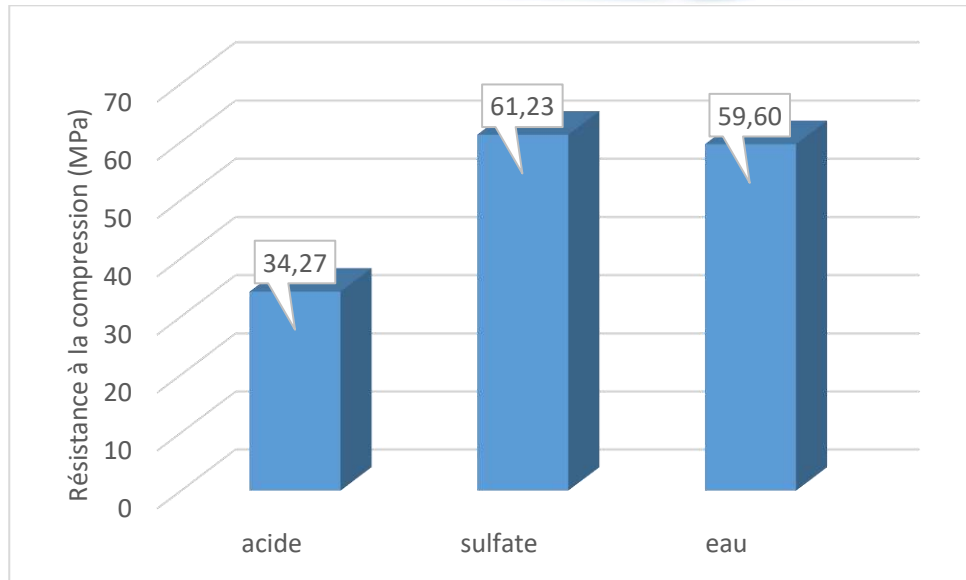


Figure IV-50 Résistance à la compression des éprouvettes de ciment pétrolier après 03 mois

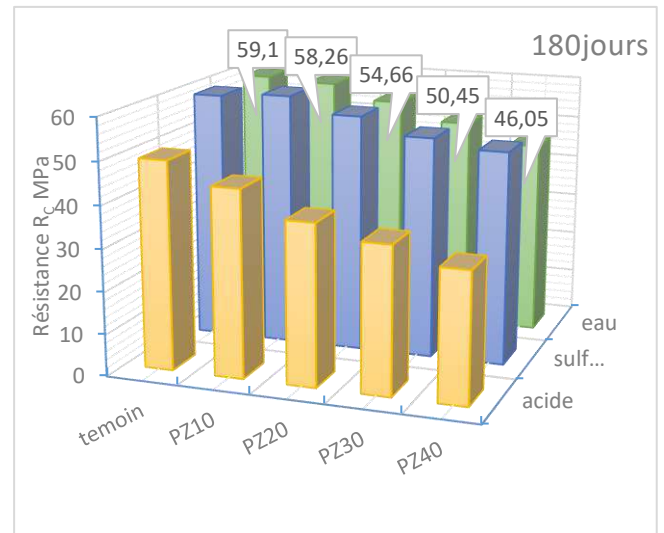
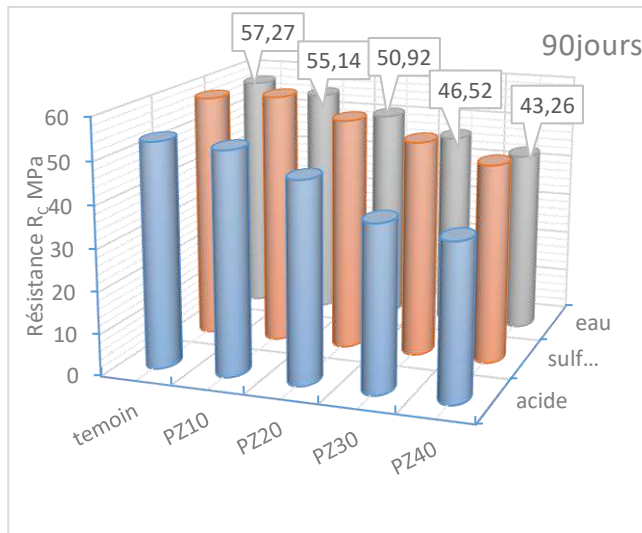


Figure IV-51 Effet de pouzzolane sur l'évolution de la résistance à la compression

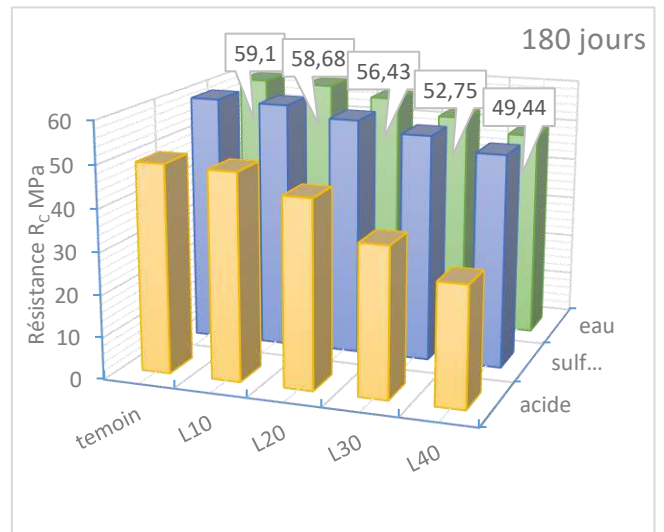
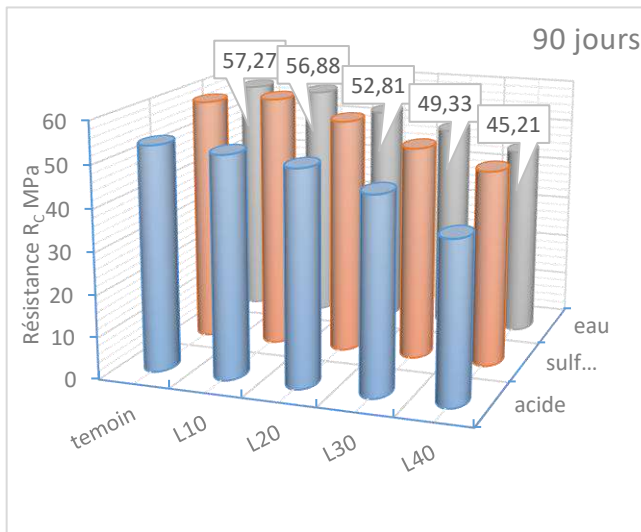


Figure IV-52 Effet de laitier sur l'évolution de la résistance à la compression

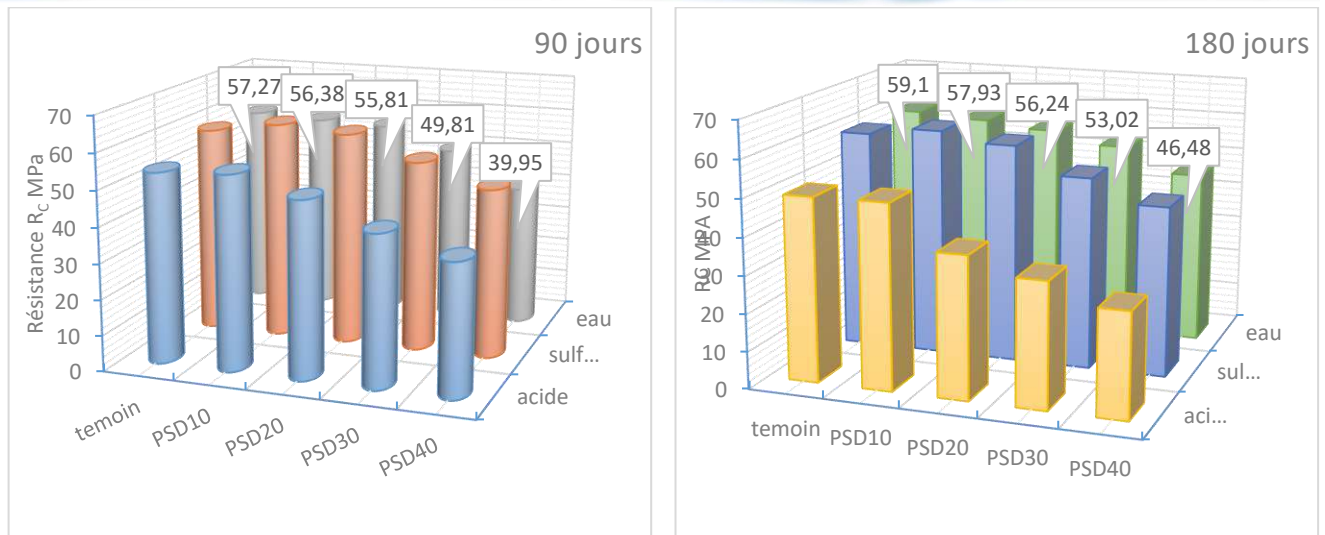


Figure IV-53 Effet de poudre de sable de dunes sur l'évolution de la résistance à la compression

La démarche consiste à comparer la durabilité de différents types de mortier étudié aux différents milieux. Les Figure IV-51, Figure IV-52 et Figure IV-53 et dans le cas des mortiers confectionnés, il est clair que la diminution des résistances à la compression est influencée par la nature de l'acidité et la concentration molaire des solutions de conservation.

La diminution de la résistance à la compression à long terme des mortiers conservés dans la solution d'acide sulfurique pour composition binaire est de l'ordre de 7 à 20% par rapport au mortier témoin, et de l'ordre de 3 à 16% pour le milieu sulfatique ; cette diminution est causée peut-être par la variation cinétique de la réaction d'hydratation du minéral silicate tricalcique C_3S et silicate bicalcique C_2S . Effectivement, la substitution de pouzzolane, laitier et poudre de sable de dunes à un taux de 0 à 20% Est figure des résistances mécaniques similaires et comparables à celle de mortier témoin en différents milieux de conservation, ce qui signifie le bon comportement du ciment aux agressions chimiques.

Cette résistance à l'agression chimique présente l'effet pouzzolanique des ajouts minéraux sur la durabilité du ciment confectionné. Généralement la résistance à l'attaques agressives (acides ou sulfates) pour le ciment composé est dépend du pourcentage de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 contenant dans le ciment[58]. Cela confirme les constatations chimiques et physiques obtenues précédemment.

Dans le cas des mortiers ternaire et quaternaire (Figure IV-54 et Figure IV-55), nous remarquons que la résistance mécanique à la compression à long terme des éprouvettes conservées au milieu acide présent des résistances assez faibles par rapport à celle conservée dans l'eau, soit d'un taux entre 16 et 68%. Cette diminution est due à la dégradation du ciment entre les grains de sable. Par contre, la résistance à la compression des mortiers conservés dans la solution sulfatique ($MgSO_4$)

est proportionnellement comparable positivement avec celle de milieu témoin (eau douce) soit d'une augmentation de 0 à 9% par rapport au mortier témoin à long terme. Donc, nous ne pouvons pas dire que les compositions étudiaient sa résistance à l'agression chimique.

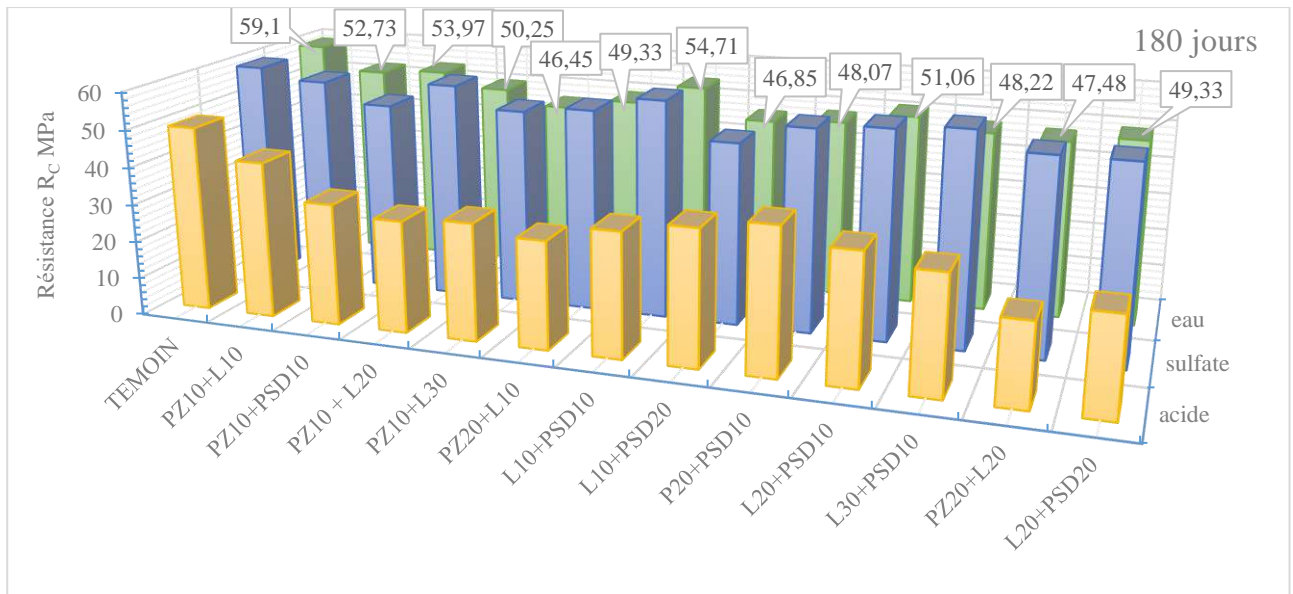


Figure IV-54 Effet de composition ternaire sur l'évolution de la résistance à la compression à 180 jours

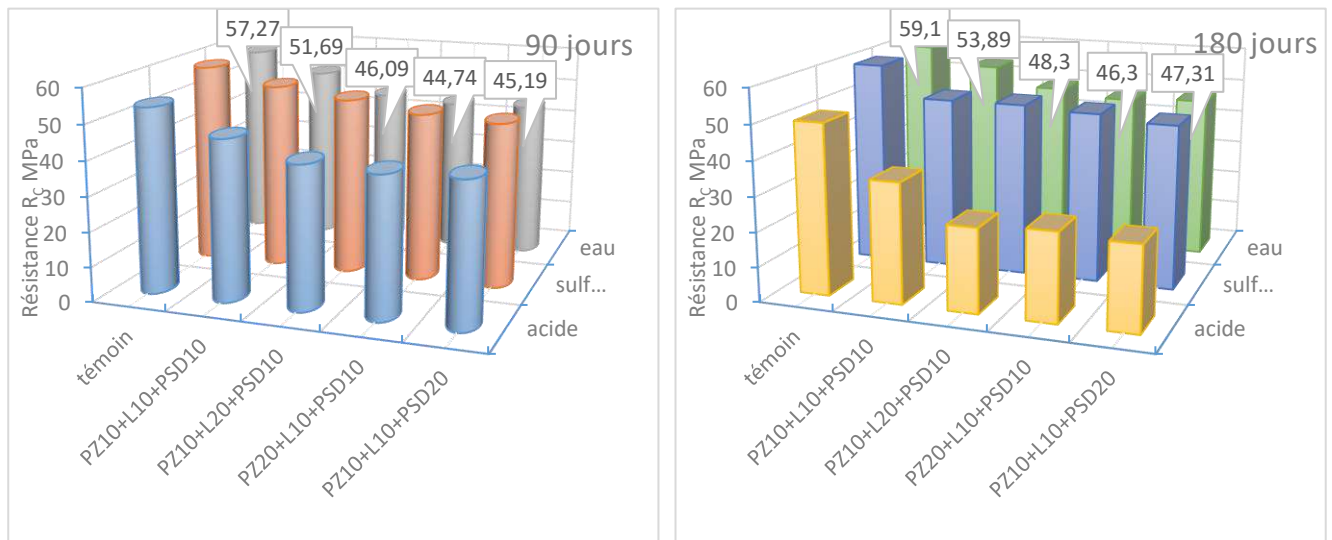


Figure IV-55 Effet de composition quaternaire sur l'évolution de la résistance à la compression

Les histogrammes de Figure IV-54 et Figure IV-55 représentent l'effet de la substitution des ajouts minéraux en composition ternaire et quaternaire sur la résistance à la compression à long terme. Nous constatons que la cure en milieu acide conduit à un abaissement de la résistance mécanique par rapport au mortier témoin ; au contraire, la cure en milieu sulfatique a provoqué une amélioration de la résistance. Ce changement est dû à la cinétique de l'hydratation des matériaux contenant dans les mortiers au contact de l'agent agressif et la dégradation des éprouvettes qui est illustré sur les éprouvettes durant l'essai de l'écrasement.



Photo IV-9 rupture des éprouvettes en compression

La Photo IV-9 nous présente la différence entre les modes de rupture des éprouvettes soumises aux différents milieux de conservation. Nous remarquons que l'allure de rupture est normale pour les éprouvettes soumises dans l'eau, par contre dans le milieu acide et sulfate, la rupture a été sous forme de feuille et le liant entre les grains de sable a été détérioré par la solution.

À partir des résultats obtenus, on peut constater que la différence des résistances des éprouvettes témoins et celles qui sont conservées dans la solution de sulfate est faible et parfois négligeable, par contre celles qui sont conservées dans la solution acide sont moyennement importantes. On constate que les mortiers testés résistent bien aux sulfates ne soit que le temps de cure et la concentration de solution non pas suffisante.

IV.5. CONCLUSION

Les dégradations des mortiers sont essentiellement dues à la dégradation de la portlandite. La cinétique de cette réaction dépend de la nature et de la concentration des solutions sulfatiques ou acide. La dégradation est plus importante dans le cas de conservation en milieu acide. À la lumière de ces essais, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux dans la production de ciment (pouzzolane, laitier et poudre de sable de dunes) contribue positivement sur la durabilité (résistance aux attaques agressives) des mortiers binaire, ternaire et quaternaire confectionnés ; par contre l'augmentation de pourcentage d'ajout provoque un abaissement de la résistance mécanique à court et à long terme.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de la présente thèse étant d'examiner expérimentalement la possibilité de produire un ciment pétrolier composée et confectionné localement en utilisant les minéraux et produits locaux existant en Algérie et spécialement la pouzzolane et le laitier ainsi que la poudre de sable de dunes broyé qui sont usuellement utilisés. De ce fait, valoriser ces ressources naturelles qui existent dans notre pays : La pouzzolane naturelle qui existe à l'ouest de l'Algérie, le laitier de haut fourneau provient de l'industrie sidérurgique de ANNABA et le sable de dunes qui existe en énorme quantité au sud Algériens. Afin d'exploiter les minéraux locaux et de contribuer à une éventuelle production d'un ciment pétrolier.

Les résultats expérimentaux menés à travers cette étude permettent de dégager les conclusions suivantes :

Bien que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers soit réduite par l'incorporation de la pouzzolane à faible pourcentage, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum après maturation. L'incorporation d'un taux de pouzzolane naturelle au clinker s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin surtout après 28 jours.

L'incorporation de 10% de poudre de sable de dunes au ciment permet au mortier de développer une résistance comparable à celle du mortier témoin et au ciment pétrolier.

La substitution de laitier au taux de (10 – 30%) a un effet très efficace sur la résistance à la compression des mortiers à court et à long terme. Ce gain de résistance pour un dosage de 10% est marqué par un taux de gain de 22% à l'âge de 90 jours par rapport à la résistance du mortier témoin.

Les mortiers ternaires élaborés de couplage des ajouts (laitier et poudre de sable de dunes) présentent des résistances comparables à celle du mortier témoin à court et à long terme et le couple semble le plus performant par rapport au mortier témoin. Cela est dû aux rôles complémentaires joués par ces deux ajouts à court et à long terme, car les effets bénéfiques de l'un permettent de compenser les inconvénients que pourrait présenter l'autre.

L'introduction des ajouts minéraux améliore le comportement de la matrice cimentaire dans les environnements agressifs, c'est ce qui est contribué à la densification de la pâte de ciment durcie, et à l'amélioration de la zone de transition pâte – granulat et à la consommation de la portlandite et formation des sels C-S-H ; ce résultat confirme les résultats de [101-104].

La résistance à l'attaque sulfatique est assurée positivement pour toutes les compositions qui ont été confectionnées à base de pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et de la poudre

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

de sable de dunes. Cette résistance est provoqué par le clinker utilisé dans notre étude qui se caractérise par un faible taux d'alumine (C_3A) et le taux de sulfate (SO_4) conformément à la norme Algérienne NA 443 [83, 84].

L'étude de la durabilité montre que le phénomène de dégradation superficiel des mortiers dans les milieux acides est atténué par l'introduction du laitier et de poudre de sable de dunes et que l'ensemble de sable et de laitiers de haut fourneau d'El-Hadjar présente de bonnes résistances aux acides et sulfates, ce qui accord avec [20, 26, 76, 85, 86, 105].

La substitution de pouzzolane au pourcentage de 20 à 40 % confère à une diminution de résistance et d'une augmentation de consistance, cela dû au phénomène d'absorption d'eau de gâchage ; Même que pour la poudre de sable de dunes. Par contre, la substitution de laitier de haut fourneau s'avère au comportement positif. Ces résultats confirme celle de [81, 104, 106].

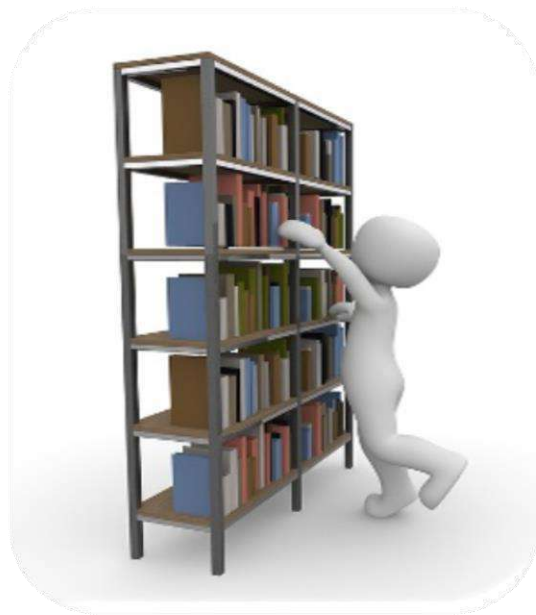
Bien que le clinker de la cimenterie de ZAHANA répond aux exigences de la norme NA 442 et P15-301 de ciment portland [83, 84]. Nous pouvant dire que ce produit peut être considéré comme ciment destiné aux travaux de cimentation des puits de pétrole et de gaz, vu la conformité de la composition chimique de ce ciment au celle recommandé par API ; mais avec une modification de la composition primaire afin d'obtenir un taux de C_3S (48-65%), C_3A (<3%) et SO_3 (<3%).

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :

À la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivantes :

- Étude rhéologique de ciment pétrolier dans les conditions spéciales.
- L'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur la résistance mécanique et la durabilité des mortiers et bétons.
- Étude de la faisabilité économique de l'utilisation des ciments ternaires dans l'industrie du ciment.
- Contribution des ajouts minéraux aux attaques chimiques (acides et sulfuriques) des ciments ternaires.
- Étude des effets des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons.
- L'effet des paramètres de cure et d'eau sur la durabilité des matériaux cimentaires aux zones arides et humides.
- L'influence des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons dans les milieux chimiques.
- étude de ciment avec ajouts minéraux locale avec des faibles proportions n'excède plus 20% conformément à la norme NA443 de ciment résistant à l'agression chimique.

Références bibliographiques



REFERENCE BIBLIOGRAHIQUE

1. Chabi, S., B. Mezghiche, and H. Guettala, *Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers*. 2013.
2. Harichane, K.G., Mohamed; Kenai, Said; Grine, Khaled, *Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils*. Geotechnical and geological engineering, 2011. **29**(5): p. 759-769.
3. Ghrici, M., S. Kenai, and M. Said-Mansour, *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(7): p. 542-549.
4. Ezziane, K.B., A; Kadri, A; Khelafi, H; Kadri, E, *Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(8): p. 587-593.
5. Kaid, N.A., K; Abidelah, A; Khelafi, H; Kerdal, D. *Etude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs*. in *SICZS_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique*. 2010.
6. CIMBETON, c.t., *Guide de prescription des ciments POUR DES CONSTRUCTIONS DURABLES*. 2009, Paris: DBG Saudios.
7. CIMBETON, *Ciments et bétons, in collection technique*. 2005, paris.
8. DREUX, G., *nouveau guide du beton et de ses*. 1998, JEANFESTA: Eddition eyrolles.
9. Mr Fouad GHOMARI, *science des matériaux de construction (HIM 12)*. 2003/2004, sidi belabbes Alger: département de genie civil université ABOUBEKR BELKAID.
10. infociments. *info ciment*. 2014 15-03-2014; ciment et béton]. Available from: <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/historique>.
11. ligne, c.e. <http://www.la.refer.org/materiaux>. 2013 09/02/2013; Available from: <http://www.la.refer.org/materiaux.html>.
12. DREUX, J.F.e.G., *nouveau guide du béton et ses constituants*. 1998, paris: EYROLLES.
13. LACOMBE, M.C.e., *GENIE CIVIL (2ème année d'étudde)*. 1997/1998, Paris: école centrale paris.

14. OUESLATI, O., *DURABILITE DES MATERIAUX CIMENTAIRES SOUMIS AUX ACIDES ORGANIQUES - Résistance chimique, mécanique et de corrosion*, in *THESE DOCTORAT*. 2011, FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIE UNIVERSITE LAVAL: QUEBEC.
15. E, G., *durabilité des matériaux cimentaires - modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles*, t. doctorat, Editor. 2004, ENS Cachan/ CNRS/ Université PARIS: PARIS.
16. GHOMARI, F., *science des matériaux de construction*. 2006, université AOUBAKER BELKAID, Faculté des sciences, département de génie civil: SIDIBELABBES
17. 215, N.S., *LIANTS MINERAUX*, in *NORME MATERIAUX*. 1978, Société suisse des ingénieurs et architectes ZURICH: SUISSE.
18. Defossé, C., *Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie*. Université Libre de Bruxelles. Faculté des Sciences Appliquées. Laboratoire de Chimie Industrielle, 2004.
19. D., p.C., *Valorisation des déchets en cimenterie*. 2004, laboratoire de chimie industrielle: faculté des sciences appliquées université LIBRE DE BRUXELLES.
20. Houzé, C., *Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse*. 2013, Paris Est.
21. Tsakiridis, P., S. Agatzini-Leonardou, and P. Oustadakis, *Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker*. Journal of Hazardous Materials, 2004. **116**(1): p. 103-110.
22. MacLeod, N.F., *l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage*. Mars 2005, CANADA CEMENT ASSOCIATION OF CANADA
23. Salah, B.M., *effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier*. 2008, université de M'Sila: M'Sila.
24. Alexandre, J., *Le laitier de haut fourneau*. 1988.
25. Houze, C.L., Stéphane; Divet, Loïc; Chaussadent, Thierry. *Formulations de matériaux cimentaires à base de laitiers sidérurgiques*. in *Journées Ouvrages d'Art*. 2013.
26. ACHOURA, D., *Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hautes fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide*, in *faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil*. 2005, BEDJI MOKHTAR ANNABA: annaba.

27. W, M.E., *Blended cements - Applications and implications* ". 4. Vol. 15. 1993: *Cément and Concrete Composites*".
28. GABRYSIK, F., – *Matériaux – Les bétons* –. 1994.
29. Shi, C., *An overview on the activation of reactivity of natural*. *Canadian Journal of Civil Engineering*
2001. **28**(5): p. 778-786.
30. ARYA C, B. N.R, and N. J.B, *Factors influencing chloride-binding in CONCRETE*. *Cement and Concrete research*, 1990. **20**(2): p. 291-300.
31. CIMBETON, c.t., *fiche technique (les constituants des bétons et des mortiers) G10*. 2005, paris: Amprincipe Paris.
32. J-P, B., *Rhéologie des mortiers et des bétons frais influence du facteur ciment*. 1983, *Proceedings of RILEM: LEEDS*.
33. CONDENSIL. *La référence française de la commercialisation des additions techniques pour le béton*. 2008 [cited 2016 20/12/2016]; Available from: http://www.condensil.com/fre_FR/caracteristiques-techniques.
34. DOLMATOVA, L., RUCKEBUSCH, Cyril, DUPUY, Nathalie Huvenne, J. P., & Legrand, P., *Device for continuous injection under low pressure of a powdered additive into a stream of molten metal*. Vol. 4. 1998, U S.
35. Aïtcin, P.-C., *High performance concrete*. 2011: CRC press.
36. ARCHITECT, S.S.D.I.E., *liant minéraux*. 1978, Norme SIA: zurich.
37. BAI J, C.K.J.M., O'FARRELL M, SABIR B.B, WILD S.LEWIS M.A., *Compressive strength an hydratation of waste paper sludge ash ground granulated blast furnace slag blended paste*. *Cement and Concrete Research*, 2003. **33**(8): p. 1189-1202.
38. Tafraoui, A., *Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie)*. 2009. p. 1 vol. (223 p.).
39. ASHBY, M.F., JONES, David RH, BRECHET, Yves, Courbon, J., & Dupeux, M., *Matériaux: Microstructure et mise en œuvre*. 1991: Dunod.
40. AITCINE, P.-C., *Béton de haute performance*. Eyrolles ed. 2001, paris.
41. L., P., *la fabrication du ciment*. 1993, Paris: édition Eyrolles.

42. BEHIM, D.M., *hydratation et structuration des ciments* in *HYDRATATION DE CIMENT*, U.B.M.A.F.D.E.D.L.I.D.D.G. CIVIL, Editor. 2011: ANNABA.
43. ZEROUB, *HYDRATATION DECIMENT, FORMATION*, Editor. 2013, GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGER.
44. POKKULURI, K.S., *effect of admixtures, chlorides and moisture on dielectric properties of portland cement concrete in the low micro wave frequency range*. . 1998, Virginia univercity: Virginia.
45. Bessa, A., *Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers*. XXIèmes rencontres universitaires de génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2004. **5**: p. 39-48.
46. N, A., *Incidence de l'adjonction de la pouzzolane sur les propriétés des bétons de haut résistance*. 1998. **Mémoire d'ingénieur**.
47. J.M, M.H.G.A.I., *The penetration of chlorides into hardened -cément pastes*, *Cem, Concr, Res*. 1984.
48. GALAL A, T.A.S., HELMY I.M, *Rice husk ash in Portland blended cément*. 1990. **Silicates industriels**.
49. DR, B.J.P., «*Blast furnance slag ciment* ». 1996.
50. VOINOVITCH, I.A.e.D., R. , *Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé*. 1976. **83**.
51. B, M., *Résistance et déformabilité de Béton Basique*. 1996: p. 86-93.
52. KOBAYASHI, K.e.U., Yuichi, *Influence of alkali on carbonation of concrete, part 2- influence of alkali in cement on rate of carbonation of concrete*, ed. 4. Vol. 20. 1990: Cement and Concrete Research.
53. ISO, *-cements and materials for well cementing- Part 1: specification*, in *Petroleum and natural gas industries*, i. standard, Editor. 2009.
54. ZINAI, S.S., *ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUE ET CHIMIQUE DES CIMENTS PÉTROLIERS BENTONITIQUES AVEC AJOUT DE 20% DE SCORIE*. 2008, MENTOURI CONSTANTINE: Algérie.
55. BAOUIA., B. and H. BENALI, *Contribution à la caractérisation des ciments utilisés dans les puits de pétrole*, in *génie civil et hydraulique*. 2010, UKM OUARGLA: Algérie.

56. Schlumberger, D., *Cementing technology*. 1984: Nova Communications Limited.
57. Rhein-Knudsen, E.V., Claude J; Prouvost, Laurent P; Milne, Arthur W; Pessin, Jean-Louis, *Method and apparatus for cementing a well*. 2001, Google Patents: Patent and Trademark Office.
58. Ahmed, B., *Contribution à l'amélioration des propriétés des ciments locaux en vue d'une production d'un ciment pétroliers par utilisation des ajouts*, in *génie civil et hydraulique*. 2014, UKM OUARGLA. p. 1vol. (123 p.).
59. Zinai, S.S.N., *utilisation des scories des hauts fourneaux pour l'amélioration du ciment pétrolier asland classe "G" et des ciments bentonites*, in *Architecture*. 2001, UST Oran: Algérie.
60. ERIK, B.N., *Well cementing*. 1990(Schlumberger Educational Services).
61. WIKI, P., *Cement composition and classification*. 2013.
62. Nelson, E.B., *Well cementing*. Vol. 28. 1990: Newnes.
63. C267-96, A., *standard test methods for chemical resistance of mortars, ground and monolithic surfacings and polymer concretes*. 1996. **03.01**(annual book of ASTM standards).
64. Dahmani, S.K., Abdelouahed; Aillerie, Michel; Salame, Chafic-Touma; Papageorgas, Panagiotis. *Contribution to the physical-mechanical study of cement CRS basis of dune-sand powder and other minerals*. in *AIP Conference Proceedings*. 2016. AIP Publishing.
65. DAHMANI, S., et al., *Contribution to the Mechanical Study of Cement Intended for Aggressive Environments with Mineral Additions*. 2017.
66. Ollivier, B.J.J.-P., *Les bétons-bases et données pour leur formulation*. Eyrolles ed. 1996, Paris: Eyrolles.
67. AFNOR, *Méthode d'essais des ciments- partie 2: analyse chimiques des ciments*. 1996. **NF EN 196-2**.
68. AFNOR, *granulats: mesure de la teneur en chlore - méthode par dissolution*. PARIS 1997.
69. AFNOR, *Granulats: définitions, confirmités et spécifications* PARIS 1997. **NF P 18-540**.

70. 933-2, N.E., *partie 2-: détermination de la granularité, tamis de contrôle et dimensions minimales des ouvertures*. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats -. 1997 PARIS: AFNOR.
71. AFNOR, *Granulats: équivalent de sable*. 1997 PARIS. **nf p 18-598**.
72. AFNOR, *Béton: performances, production, mise en oeuvre et critères de conformité*. NF P 18-325, 1997. **PARIS**.
73. SAINT-REMY-LESCHEVREUSE, L.M.C.-. *Annexe technique I à la convention d'accréditation N° 1-0002*. 2006.
74. BRUNET, H., *Ajouts cimentaires Date Published*. 2012, GOVERNMENT OF CANADA,.
75. Raymond Dupain, R.L., Jean-Claude Saint-Arroman, *Granulats, Sols, Ciments et Béton, Caractérisation des matériaux de Génie Civil par les essais de Laboratoire*. 3 ed. 2004: casteilla.
76. Behim, M. and P. Clastres. *Durabilité de pâtes de ciments contenant du laitier d'El Hadjar conservées dans des milieux agressifs et à des températures de climat chaud*. in *MATEC Web of Conferences*. 2012. EDP Sciences.
77. Merida, A., *Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de Pouzzolane en milieu sulfate*. 2005.
78. Siad, H.H.K.M.M. *Comportements physico-mécaniques des mortiers et briques à base de liant (pouzzolane-chaux)*. in *Colloque CMEDIMAT*. 2005. Bouira.
79. Naceri, A. and I. Messaoudene, *Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier*. *Lebanese Science Journal*, 2006. **7(2)**: p. 85.
80. Guettala, S., *Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton*. 2012, Université Mohamed Khider-Biskra.
81. Mechti, W. and M.R.a.T. Mnif, *Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing finely ground sand*. 2014.
82. Benkaddour, M., F.K. Aoual, and A. Semcha, *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*. *Revue Nature et Technologie*. n, 2009. **1**: p. 1.

83. IANOR, *ciments pour travaux dans les milieux fortement agressifs*, in *liants hydrauliques 2005*, IANOR: Algerie.
84. IANOR, *compositions, spécifications et critères de confirmités des ciments courants*, in *liants hydrauliques*. 2005, IANOR: Algerie.
85. Achoura, D.L., Ch; Jauberthie, R; Redjel, B. *Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide*. in *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 2004. EDP sciences.
86. Achoura, D.R., B; Jauberthie, R; Lanos, C, *Influence des conditions de maturation sur les comportements physico-chimique et mécanique des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment*. *Matériaux & Techniques*, 2008. **96**(4-5): p. 189-199.
87. Kerbouche, A., *INFLUENCE DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES RÉSISTANCES MÉCANIQUES ET LA DURABILITÉ DES MORTIER*. 2008.
88. Guettala, S. and B. Mezghiche, *Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder*. *Construction and Building Materials*, 2011. **25**(3): p. 1263-1269.
89. Guettala, S. and B. Mezghiche, *Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2011. **15**(10): p. 1483-1507.
90. SADOK, A.H., S. KENAI, and B. MENADI, *Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier*. *Production scientifique-Communications*, 2014. **1**.
91. Boubekour, T., B. Boulekbache, and A. Makhelouf. *Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire*. 2010. *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS_2010)*, Université de Chlef.
92. MOUALLIF, I.L., Sara; LATRACH, Abdelkhalek; CHERGUI, Mhamed; BARBE, Nicolas, *Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton*. 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France (FR), 2013.
93. AFNOR, *béton - classification des environnements agresifs*. 1992, Paris: AFNOR.
94. Mokhtaria, B., K. Fatha, and S. Abdelaziz, *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et*. 2010.
95. Belaribi, O., *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*. 2015, Cergy-Pontoise.

96. Mouli, M.S., Y; Benosman, AS; Khelafi, H, *Résistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire*. Communication Science et Technologie, COST, 2010(8).
97. Senhadji, Y.E., G. ; Mouli, M. ; Khelafi, H, *Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar*. Powder Technology, 2014. **254**: p. 314-323.
98. Leussa, T. and C. Charlotte, *Influence of cristalline structure of two minerals clays of type 1/1 on their pozzolanic power*. 2015, Université de Yaoundé I.
99. Belhachemi, B. and N.E. Hassaine, *ETUDE D'UN MILIEU AGRESSIF ACIDE SUR UN MORTIER A BASE DE CIMENT COMPOSE*.
100. Bachir, M., *Influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et génie civil*, in *genie civil et hydraulique*. 2009, UKM Ouargla. p. 122.
101. MEZERAI, N., *Durabilité d'un mortier à base d'un ciment portland composé à la pouzzolane CPJ-CEM II A vis-à-vis d'un milieu agressif*. 2014.
102. Chaib, O.M., Mohamed; Hanifi, Missoum; Hamadache, Miloud; Benosmane, Soufiane; Dif, Fodil. *Étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base ciments composés*. in *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. 2015.
103. ELBAHI, B., *Influence des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques du béton-utilisation de la méthode de fréquence de résonance*. 2016.
104. Nasreddine, D. and M. Amrouche, *Influence d'attaques par (HNO₃+ NH₄NO₃) et (MgSO₄) sur les résistances mécaniques en compression sur les mortiers A base des ciments pouzzolaniques*. 2016.
105. SALHI, K., *Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton*. 2007, Université Mohamed Khider-Biskra.
106. ABDELATEF, K., *Contribution à l'Amélioration de la durabilité du béton dans les zones enterrées de la wilaya de Ouargla par l'ajout des minéraux locaux*. 2014, Université Kasdi Merbah de Ouargla.

ANNEXES

ANNEXE I. MATERIAUX ET MATERIELS



Photo I-1 Broyeur à boulet

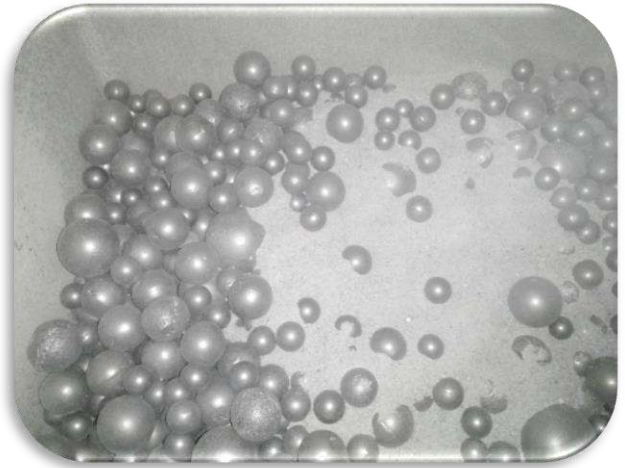


Photo I-2 Intérieur du broyeur



Photo I-3 Clinker utilisé



Photo I-4 Pouzzolane



Photo I-5 Laitier de haut fourneau



Photo I-6 Sable de dunes



Photo I-7 Gypse



Photo I-8 substitution des ajouts avec le clinker



Photo I-9appareil de Blaine



Photo I-10 matériel nécessaire pour le malaxage



Photo I-11 préparation du mélange



Photo I-12 remplissage et arasage des moules



Photo I-13 Démoulage des éprouvettes



Photo I-14 conservation des éprouvettes



Photo I-15 Armoire humide de conservation



Photo I-16 presse hydraulique



Photo I-17 essai de flexion et de compression



Photo I-18 microscope



Photo I-19 PH mètre de laboratoire

ANNEXE II. DURABILITE



Photo II-1séchage des éprouvettes après immersion dans milieux agressifs



Photo II-2 état de surface des compositions binaire après 180 jours de conservation



Photo II-3 état de surface des compositions ternaire après 180 jours de conservation

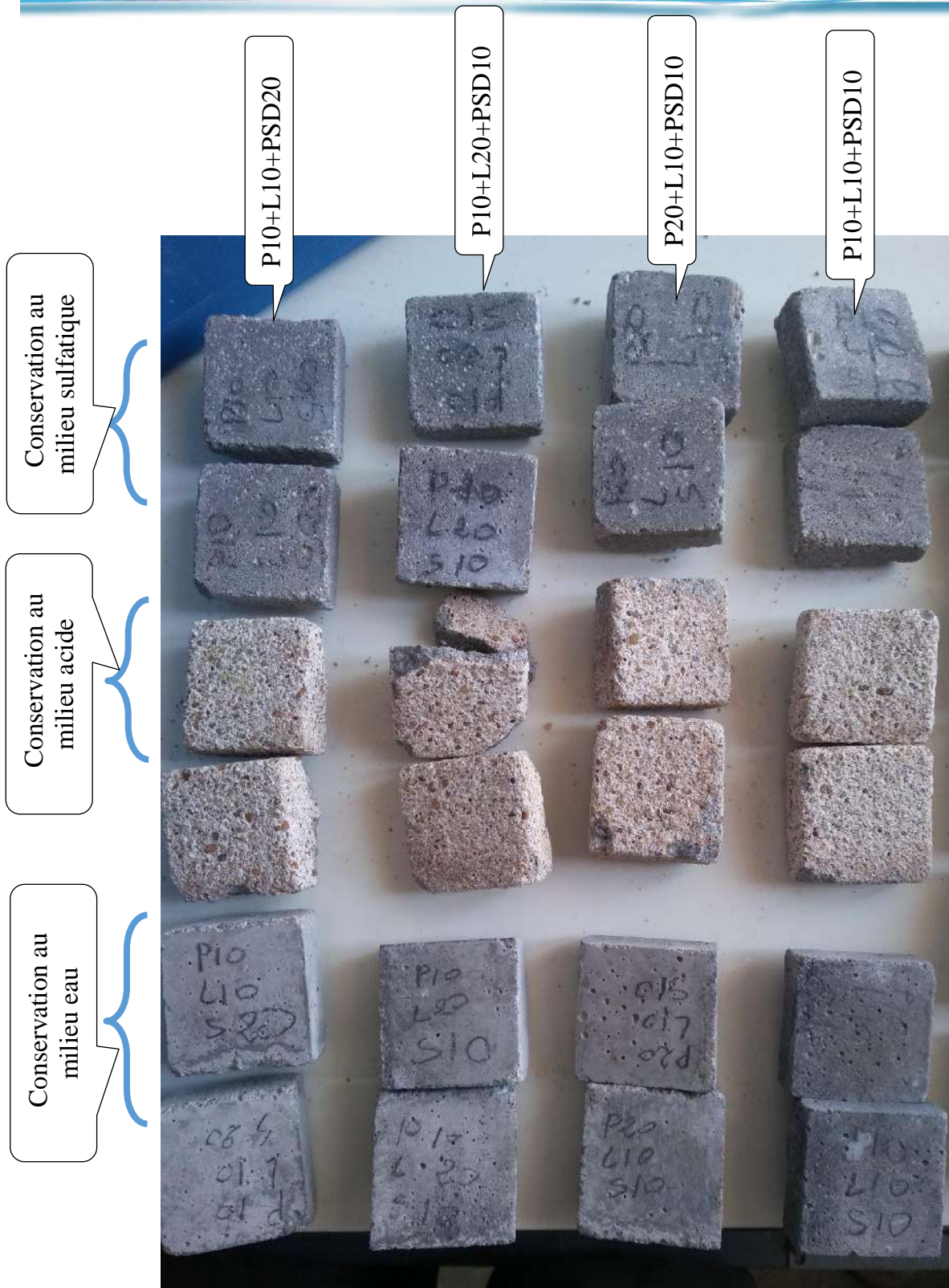


Photo II-4 état de surface des compositions quartenaire après 180 jours de conservation



Photo II-5 rupture des éprouvettes soumis dans la solution témoin (eau douce)



Photo II-6 rupture des éprouvettes soumis dans la solution sulfate de magnésium



Photo II-7 rupture des éprouvettes soumis dans la solution acide sulfurique