



République algérienne démocratique et populaire

Université Akli Mohand Oulhadj

BOUIRA



Institut de Technologies

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme
de Licence professionnalisant en :

Génie chimique

THÈME :

**Etude de l'influence du gypse et de la
pouzzolane sur les propriétés du ciment**

Réalisé par

- HABOUL Samia

Devant le jury composé de :

- | | |
|-------------------|-----------|
| • AKLIOUTE hacene | Président |
| • AUODJIT farid | Examineur |
| • MERAKCHI Akila | Encadreur |

Tuteur de l'entreprise :

- | | |
|----------------------|----------------|
| • Mme Fouzia MAAMERI | Cimenterie SEG |
|----------------------|----------------|

Année : 2017 / 2018

Remerciements

Tout d'abord, je remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié

J'exprime toute ma gratitude, toute ma reconnaissance et tout mon remerciement à ma promotrice Mme MERAKCHI pour sa patience, sa disponibilité, et pour ses conseils, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'elle a su me communiquer pour mener au mieux ce travail.

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles que nombreux, pour mes futurs travaux.

Je suis très reconnaissante à Mme Mammeri responsable du laboratoire de contrôle qualité SC SEG d'avoir mis à ma disposition les moyens matériels ainsi que de son temps et de m'avoir aidée de prêt.

J'associe à ces remerciements tous les membres du laboratoire de contrôle, les ingénieurs et les techniciens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Pour leur support technique et moral, je remercie et je salue chaleureusement les personnels de la cimenterie qui ont m'ont fournie les matières pour mon étude expérimentale. MERCI.

Je remercie vivement tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

DEDICACES

À ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

À mon très cher Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

À mes frères et mes sœurs qui étaient là, présents par leur soutien et leurs encouragements durant tous ce long chemin d'études.

À chaque personne qui m'a aidée et encouragée par ses conseils et m'a offert tout pour la réussite

SAMIA

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE I

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

I.1. localisation	2
I.2. Démarche qualité..	3
I.5.La ligne technologique	4

CHAPITRE II

GENERALITES SUR LE CIMENT

II.1. Définition.....	6
II.2. Historique.....	6
II.3. Matières première.....	6
II.4. Processus de fabrication du ciment	7
II.4. 1. Extraction et préparation des matières premières	7
II.4.2. Broyage cru...	8
II.4.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker.....	9
II.4.4. Broyage.....	10
II.4.5. Stockage, ensachage et expédition...	10
II.5. Constitution du ciment	11
II.6. Propriétés du ciment	12
II.6.1. Propriétés physiques.....	12
II.6.2. Propriétés mécaniques	13
II.6.3. Propriétés chimiques	13

II.7. Hydratation du ciment portland ..	14
II.8. le Gypse	15
II.9. Ajouts cimentaires..	16
II.9.1. Définition....	16
II.9.2. Avantages des ajouts	17
II.9.3. Les pouzzolanes	18
II.9.3.1. Définition	18
II.9.3.2. Propriétés des pouzzolanes	18
II.9.3.3. Rôle de la pouzzolane dans le ciment	19
II.9.3.4. Effet de Lapouzzolane	20

CHAPITRE III

PARTIE EXPERIMENTALE

III.1. MATIERES ET METHODES.....	21
III.1.1. Matières premières	21
III.1.2. Mesures expérimentales	24
III.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	34
III.2.1. Influence du Taux de gypse sur ciment anhydre	34
III.2.2. Influence du Taux de gypse sur la pâte du ciment.....	36
III.2.3. Influence du Taux de gypse Sur Le Mortier à base de sable Normalisé	38
III.2.4. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur ciments anhydre.....	40
III.2.5. Influence du taux d'ajout pouzzolane ciment hydraté.....	42
III.2.6. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur les mortiers	44
CONCLUSION	46

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1. Localisation de l'entreprise	2
Fig. I. 2. Démarche qualité	3
Fig. I.3. Plan de masse	4
Fig. I.4. Organigramme organisationnel de la société	5
Fig. II.1. Extraction et préparation des matières premières	8
Fig. II.2. Broyeur	8
Fig. II.3. Zone de cuisson.....	9
Fig. II.4. Expédition en sac	10
Fig. II.5. Expédition en vrac.....	10
Fig. II.6. Microphotographie d'un clinker	11
Fig. II.7. Différents ajouts cimentaires	16
Fig. II.8. Les ajouts inertes et actifs.....	17
Fig. II.9. Les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane.....	19
Fig. III.1. Le clinker avant et après broyage.....	22
Fig. III.2. La composition chimique du gypse.....	22
Fig. III.3. Le gypse avant et après le broyage	22
Fig. III.4. La composition chimique de la pouzzolane	23
Fig. III.5. La pouzzolane naturelle de BENI-SAF avant broyage.....	23
Fig. III.6. La composition chimique du sable normalisé	24
Fig. III.7. Le sable normalisé	24
Fig. III.8. Perméabilimètre de Blaine.....	27
Fig. III.9. L'Appareil à VICAT.....	29
Fig. III.10. Pâte du ciment	29
Fig. III.11. Constituants des mortiers.....	29
Fig. III.12. Malaxeur programmable avec la table à choc et Aplanissement des moules.....	30
Fig. III.13. Chambre de conservation	31
Fig. III.14. Immersion des éprouvettes.....	31

Fig.III.15. Machine des essais mécaniques.....	31
Fig.III.16. La composition des différentes formulations avec le gypse.....	32
Fig.III.17. La composition des différentes formulations avec la pouzzolane.....	33
Fig. III.18. Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse.....	34
Fig. III.19. Variation de la perte au feu et SO_3 en fonction du taux de gypse.....	35
Fig. III.20. Variation de la surface spécifique de ciment en fonction du taux de gypse.....	36
Fig. III.21. Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de gypse....	37
Fig. III.22. Variation des Temps de prises en fonction de taux de gypse.....	37
Fig.III. 23. Effet du Taux de gypse sur la Résistance à la Compression.....	39
Fig. III.24. Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de pouzzolane.....	40
Fig.III.25. Variation de la surface spécifique du ciment en fonction du taux d'ajout pouzzolane.....	41
Fig. III.26. Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.....	42
Fig. III.27. Variation des Temps de prises en fonction de taux de pouzzolane.....	43
Fig. III.28. Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Nomenclature des équipements existant dans l'usine.....	4
Tableau II.1. Composition du cru.....	7
Tableau II 2. Compositions chimique du clinker du ciment portland ordinaire (Ciment gris).11	
Tableau II.3. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courant.....	13
Tableau III.1. La composition chimique du clinker.....	21
Tableau III.2. La composition minéralogique du clinker.....	21
Tableau III.3. La composition des différentes formulations avec le gypse	32
Tableau III.4. La composition des différentes formulations avec la pouzzolane	33
Tableau III.5. Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes).....	34
Tableau III.6. Surface spécifique des ciments préparés.....	35
Tableau III.7. Propriétés physiques des ciments préparés.....	36
Tableau III.8. Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).....	37
Tableau III.9. Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux de gypse	38
Tableau III.10. Effet du gypse sur la résistance mécanique.....	39
Tableau .III.11. Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes)	40
Tableau III.12. La Finesse de Blaine	41
Tableau III.13. La consistance	42
Tableau III.14. Temps de prise	43
Tableau III.15. Résistance à la compression	44

Liste des abréviations

CEM : Ciment Portland.

CPA : Ciment portland (dans la notation française).

CPJ : Ciment portland composé.

CHF : Ciment de haut fourneau.

CPZ : Ciment pouzzolanique.

CLC : Ciment au laitier et aux cendres.

C3S : Silicate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).

C2S : Silicate dicalcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).

C3A : Aluminate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

C4AF : Aluminoferrite tétracalcique ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

CaO: Chaux.

C-S-H : Silicates de calcium hydratés.

C-A-H : Aluminates de calcium hydratés.

CH : Hydroxyde de calcium (portlandite) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

CaSO₄: Gypse.

PAF: Perte au feu.

R:Résistance.

R_{cp} : Résistance à la compression.

C : masse de ciment.

E : masse d'eau.

E/C: Rapport massique eau sur ciment.

HR : Humidité relative.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En terme d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le ciment est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine. Cependant son emploi, exige des contraintes de sécurité, de fiabilité et surtout de qualité.

L'utilisation des matériaux de correction tels que le gypse et de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet d'améliorer les propriétés physico-chimique et mécaniques des ciments et de réduire la consommation d'énergie, qui se traduit par la diminution du taux de gaz carbonique dégagé par les fours industriels du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux des additions minérales.

L'Algérie est un pays en voie de développement et ses besoins en infrastructure sont importants. De grands projets de logements et d'infrastructures sont lancés. Ces projets exigent la disponibilité, la qualité et la durabilité des matériaux cimentaires et un prix de vente assez faible. Donc L'utilisation des ajouts est très efficace pour augmenter la production du ciment et améliorer la qualité.

Au cours de ce stage effectué au sein de la société des ciments de SOUR EL GHOZLANE (SC, SEG), j'ai pu m'intéresser à l'évaluation de la participation physicochimique du gypse et les ajouts cimentaires sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des pâtes du ciment et des mortiers en faisant varier le taux de gypse et la pouzzolane et évaluer expérimentalement l'influence du chacun.

Le présent travail s'articulera autour de deux parties principales : la première consiste en une partie théorique qui se compose de deux chapitres : le premier donne une présentation de la société des ciments de SOUR EL GHOZLANE et le deuxième présente des généralités sur les ciments. La deuxième partie de ce travail est une partie pratique qui décrit le matériel et les méthodes utilisés ainsi que la discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE I

*Présentation de la société
des ciments de SOUR EL
GHOZLANE*

La société des ciments de SOUR EL GHOZLANE (SC, SEG) filiale du groupe industriel des ciments d'Algérie « GICA » est une société par action (SPA) d'une capitale sociale de 1.900.000.000 DA en partenariat avec le groupe italien BUZZI UNICEM depuis février 2008 (65% GICA & 35% BUZZI UNICEM). La cimenterie a été construite par F.L Danemark et elle a été mise en production le 20-10-1983 avec une capacité nominale de 3000 tonnes/jour et de 1.000.000 de tonnes de ciment annuellement.

I.1. Localisation

La cimenterie est implantée au niveau de la commune de Sour el Ghoulane au lieu dit col de Beccouche à 900 m d'altitude, à une distance d'environ 25 km de l'autoroute est-ouest et à 120 km capitale d'Alger : cette position géographique permet à la cimenterie de jouer un rôle économique important dans la région du centre. Elle assure l'approvisionnement en ciment de plusieurs wilayas du pays.

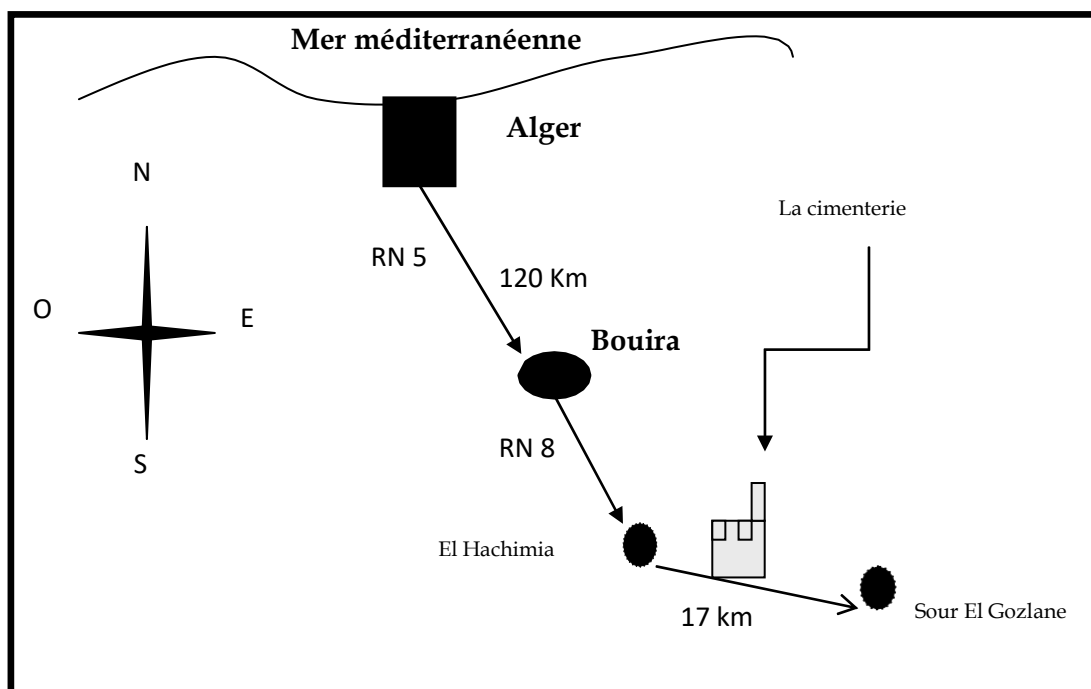


Fig. I.1. Localisation de l'entreprise.

I.2. Démarche qualité

La société des ciments de SOUR EL GHOZLANE est certifiée selon la norme internationale ISO 9001 VERSION 200 depuis avril 2013, une reconnaissance de son système de management de la qualité par un organisme de renommée mondiale AFAQ/AFNOR. La société est en cours d'intégrer la nouvelle version 2015 de la norme ISO 9001 en tenant compte de son contexte et son environnement immédiate.

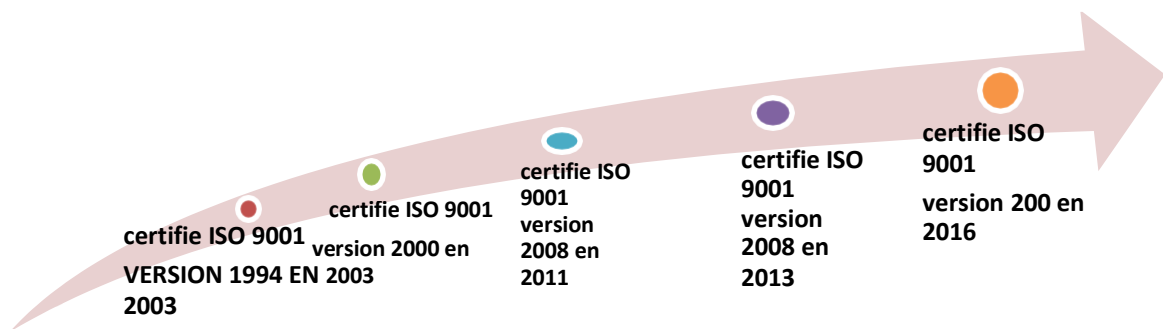


Fig. I. 2. Démarche qualité.

I.3. Les grands projets réalisés avec les produits de la cimenterie : les grands projets

réalisés par cette cimenterie sont :

- Les projets de la société COSIDER CONSTRUCTION
- Ouvrages d'art du projet autoroute Est-ouest
- Le grand barrage de TILES DIT
- Le projet de la cimenterie ACC – Msila

I.4. Les principaux clients : Les principaux clients sont COSIDER, EBA, BATIGEC, CS CEC, TOEC Algérie, ETRHB HADDAD et Les SODISM.

I.5. La ligne technologique

La ligne technologique est présentée par le plan de masse de la société et tableau Nomenclatures des équipements.

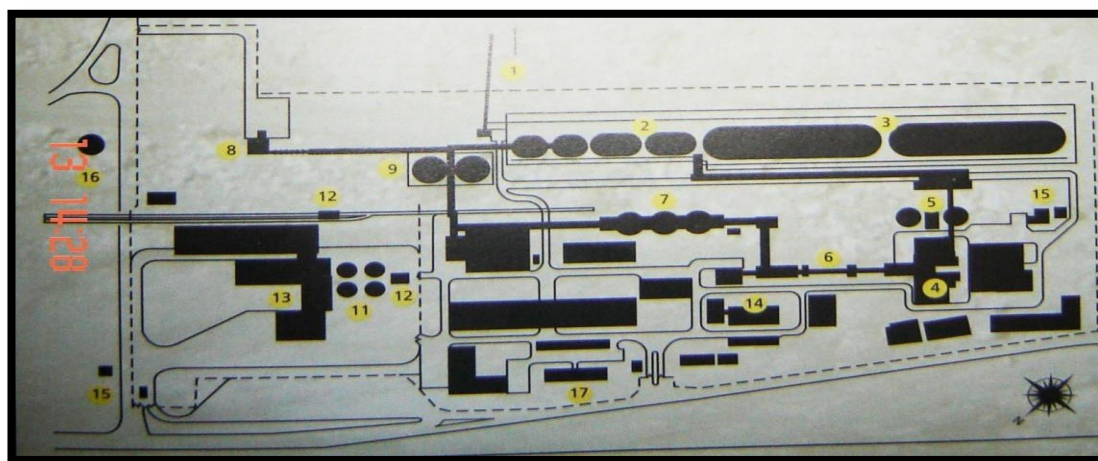


Fig. I.3. Plan de masse.

Tableau I.1. Nomenclature des équipements existant dans l'usine

1	Carrière et concassage de matière première : 1000 t/h.
2	Pré homogénéisation et stock d'argile : 2x3000 t.
3	Pré homogénéisation et stock calcaire : 2x35000 t.
4	Broyeur TIRAX-UNIDAN à cru D=4,4 m L=9,85 capacité 2x140 t/h.
5	Silo d'homogénéisation capacité 2x8000 t.
6	Four rotatif UNAX avec préchauffeur à cyclone D=5,5m L=89m capacité 3000 t/j.
7	Silo à clinker capacité : 3x15000 t.
8	Concasseur des ajouts capacité : 100 t/h.
9	Stock de gypse capacité : 2000 t.
10	Broyeur UNIDAN à ciment D=4,4 m L= 12m capacité : 2x100 t/h.
11	Silos ciment capacité : 4x8000 t.
12	Chargement du ciment en vrac capacité : 2x200 t/h.
13	Atelier d'ensachage capacité : 5x100 t/h.
14	Laboratoire avec spectromètre à rayon x et installation d'ordinateur
15	Traitement des eaux.
16	Dépôt de fuel capacité : 5000 m².
17	Bâtiment d'administration.

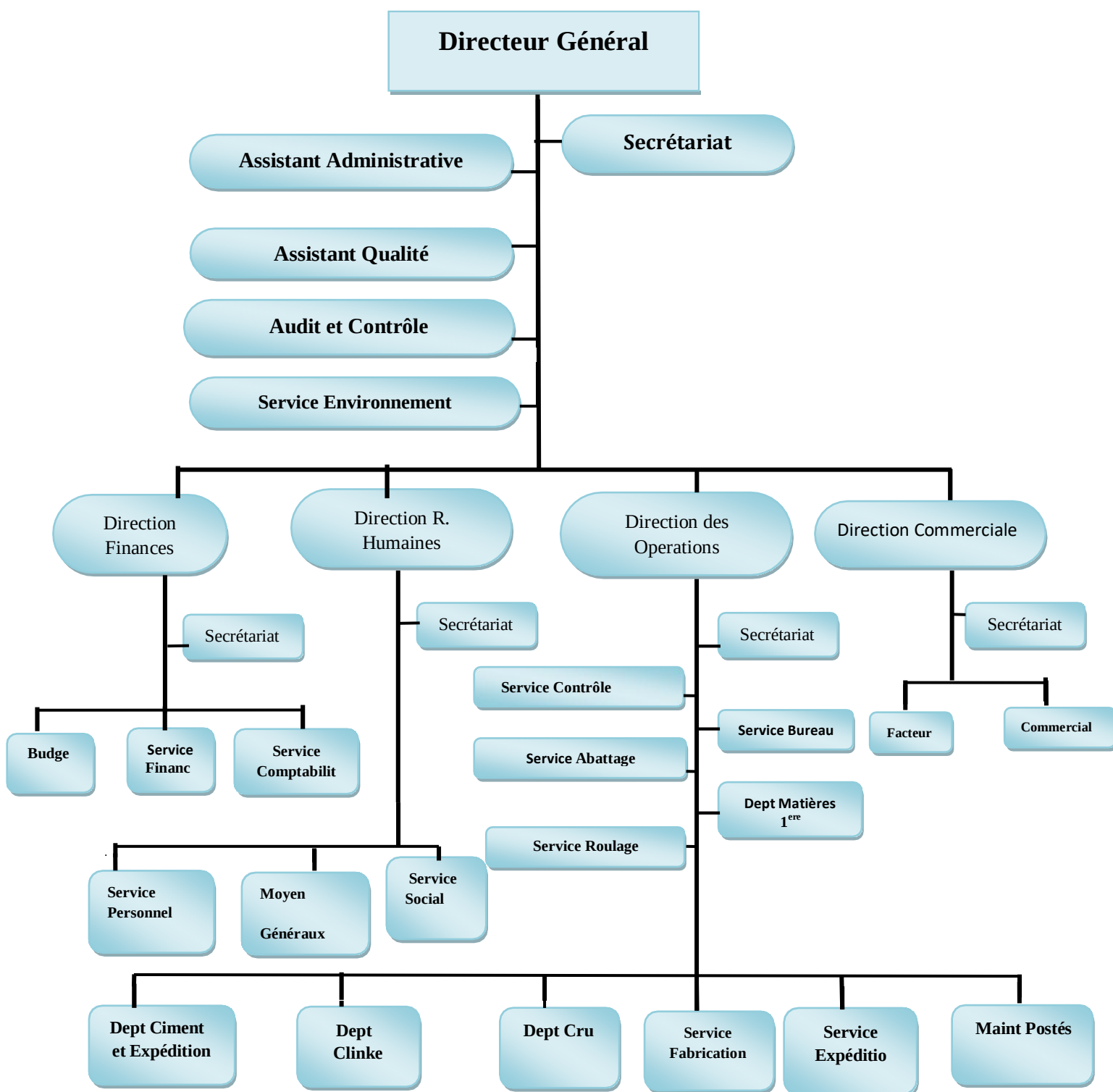


Fig. I.4. Organigramme organisationnel de la société.

CHAPITRE II

Généralités sur les ciments

II.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [1].

II.2. Historique

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ et des cendres volcaniques [2].

L'histoire du ciment moderne a commencé en 1756 par John Smeaton qui a pu clarifier l'influence de l'argile sur les caractères hydrauliques du calcaire après calcination [3].

En 1796, James Parker découvre le ciment prompt qu'il baptise commercialement « Ciment Romain » [4].

En 1810, Edgar Dobbs a proposé un brevet pour la fabrication de la chaux hydraulique [5].

En 1812, Louis Vicat a publié ses travaux « Recherches Expérimentales sur les Chaux de Construction » [4].

En 1818, Maurice St. Leger a proposé un brevet pour la fabrication de la chaux artificielle [4]. Ces découvertes ont abouti, en 1824, au dépôt du brevet sur le « Ciment Portland », par Joseph Aspdin [5].

Le premier ciment moderne fut fabriqué, en 1845, par Isaac Johnson, qui chauffa un mélange d'argile et de craie jusqu'à la clinkérisation [4].

La composition chimique du ciment était détectée par Henri Le Chatelier dans sa thèse de doctorat en 1887, Après 10 années Törnebohm lançait la nomenclature du ciment, Alite, Belite et Cellite [6].

II.3. Matières premières

Les matières premières utilisées pour fabriquer le ciment sont composées essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), la chaux est apportée généralement par les roches carbonatées qui représentent 80 %

du cru d'alimentation (Tableau II.1). L'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles ou des schistes formant approximativement 20 % du cru d'alimentation.

Tableau II.1. Composition du cru [7].

Matière première	Formule chimique	Abréviation	Proportion	Source de matière première
chaux	CaO	C	77 à 80%	Argile, calcaires, calcite, craie, laitier, marbre, schiste, etc.
Silice	SiO ₂	S	10 à 15%	Argile, calcaires, basalte, silicate de calcium, laitier cendres quartzite, sable, schiste, etc.
Alumine	Al ₂ O ₃	A	5 à 10%	Argile, bauxite, laitier cendre volante, minerai d'aluminium, schistes
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F	2 à 3%	Argile, minerai de fer, pyrite calcinée, schiste, etc.

II. 4. Processus de fabrication du ciment

Le procédé de fabrication du ciment consiste à broyer un mélange de matières premières (calcaire + argile) puis à les faire cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C [3]. De la carrière aux silos de stockage du ciment, la matière passe par trois étapes principales :

1. Préparation du mélange des matières premières.
2. Clinkérisation (la fabrication du clinker).
3. Production du ciment (le broyage du clinker et l'élaboration du ciment).

II. 4. 1. Extraction et préparation des matières premières

Les matières premières principales (calcaire et argile) sont extraites des carrières situées à proximité de la cimenterie par abattage à l'explosif. Les blocs roches obtenus sont transportés

par des camions de 30 à 50 tonnes et concassés en éléments de dimensions maximales de 50 mm dans l'atelier de concassage (c'est un concasseur à marteaux à deux rotors).



Fig. II.1. Extraction et préparation des matières premières.

II.4. 2. Broyage cru

Les matières premières pré homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Les réactions chimiques et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses que les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine.

Le mélange du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer est dosé pour alimenter les deux broyeurs cru R1 et R2, le produit résultant du broyage est appelé farine crue, elle est stockée dans deux silos d'homogénéisation de 8000 tonnes chacun.



Fig. II.2. Broyeur.

II.4.3. Cuisson de la farine et stockage de clinker

Les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties : un échangeur de chaleur, comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four, qui se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie. La deuxième partie est la cuisson dans un four cylindrique ayant 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour/mn (Fig. II.3). Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.



Fig. II.3. Zone de cuisson.

Les phénomènes physico-chimiques à la cour de la cuisson sont comme suit :

- A 100 °C : évaporation de l'eau mécanique ou eau libre.
- Entre 450 et 550 °C : Evaporation de l'eau de constitution (chimique) ou cristalline.
- A partir de 650 °C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.

$$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \longrightarrow 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (C3A: Célide)}$$

$$2\text{CaO} + \text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \longrightarrow 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (C4AF: Félide)}$$
- A partir de 700 °C : Décomposition du calcaire $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Vers 800 °C : Formation du silicate bicalcique ($2\text{CaO}, \text{SiO}_2$)

$$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_2 \text{ (C2S: Bélide)}$$

- A partir de 1250 °C: le silicate tricalcique appelé ‘Alite’ commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.
$$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow \text{C}_3\text{S} \quad (\text{C}_3\text{S: Alite})$$
- Entre 1260 et 1450 °C : apparition du premier liquide
- T = 1450 °C: Clinkérisation.

La matière est refroidie brusquement de 1450 °C à environ 100 °C en quelques minutes de figer les espèces minérales qui seraient instables à la température ambiante : le silicate tricalcique se décompose en silicate bicalcique et en chaux (CaO). On obtient des granules de diamètre variant de 10 à 30 mm "le clinker".

II.4.4. Broyage

Il a pour objectif, d’une part de réduire les granules de clinker en poudre, d’autre part de procéder à l’ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu’à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d’obtenir les différents types de ciments normalisés. La granulométrie de la poudre de ciment à la sortie du broyeur varie de moins d’1 µm à 100 µm.

II.4.5. Stockage, ensachage et expédition:

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L’ensachage s’effectue dans des sacs en papier kraft de 50 kg à l’aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches.



Fig. II.4. Expédition en sac



Fig. II.5. Expédition en vrac.

II.5. Constitution du ciment

- **Le clinker** : Le clinker est le principal constituant des ciments courants. Il est produit par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) vers 1450°C d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire (~80%) et d'argile (~20%). La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le Tableau II.2.

Tableau II.2. Compositions chimique du clinker du ciment portland ordinaire (Ciment gris).

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaSO ₄	H ₂ O	SO ₃
Composition	50-70%	5-10%	15-30%	5-10%	0-5%	0-2%	0-5%
Notation cimenterie	C	A	S	F	CS	H	S

Le clinker est constitué principalement de quatre phases minérales issues de la combinaison chimique de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

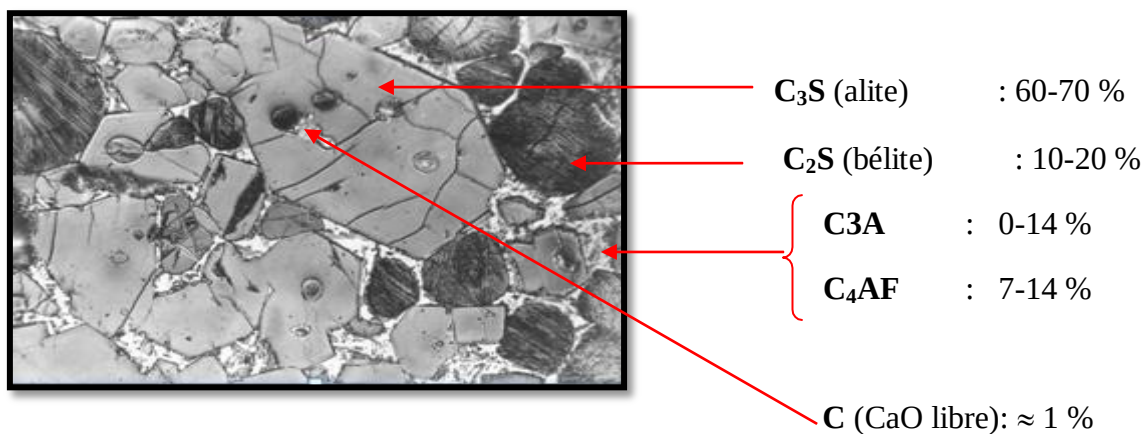


Fig. II.6. Microphotographie d'un clinker.

- **Gypse** : Pour produire du ciment, le clinker est très finement co-broyé avec du gypse (CaSO₄.2H₂O) (retardateur du prise).

II.6. Propriétés du ciment

II.6.1. Propriétés physiques

- **Finesse de mouture** : L'hydratation du ciment commence sur la surface des grains, donc c'est la superficie totale des grains qui représente le matériau disponible pour l'hydratation. La vitesse d'hydratation dépend donc de la finesse des grains de ciment. Pour avoir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est exigée. La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique du ciment est la méthode de Blaine.
- **La consistance** : La consistance est le pourcentage optimal d'eau qui permet d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale. On utilise généralement l'appareil de "Vicat" pour mesurer cette consistance.
- **La prise** : C'est le terme employé pour décrire le raidissement de la pâte de ciment. La prise est définie comme étant le changement d'un état fluide à un état solide. Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. Pour mesurer le temps de début et de fin de prise, on utilise généralement l'essai de "Vicat".
- **Fausse prise** : Dans la composition des ciments la présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est indispensable. Si le clinker EST trop chaud ou s'échauffe trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise. Dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage.
- **Gonflement** : Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, sa variation dimensionnelle étant environ 1/10ème de celle constatée dans l'air.
- **Retrait** : Le retrait est la diminution du volume apparent de la matière ; il est mesuré sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$, conservées à l'air de température $T = 20^\circ \text{C}$ et d'humidité relative.
- **Expansion** : Les volumes des pâtes de ciment, les mortiers et les bétons gonflent en présence d'humidité ou d'eau. Les principales causes de l'expansion sont : - excès de gypse, - excès de la chaux libre CaO . - excès de magnésium libre MgO .

II.6.2. Propriétés mécaniques

Les résistances mécaniques, en traction et en compression des ciments, sont déterminées sur des éprouvettes 4x4x16 cm en mortier normal à 28 jours d'âge. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1". Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales

II.6.3. Propriétés chimiques

Les exigences les plus importantes à respecter sont résumées dans le tableau ci-dessous:

Tableau II.3. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants.

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale (%)
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	≤ 5
MgO	CPA-CEM I	Toutes les classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes les classes	≤ 5
SO₃	CPA-CEM I Et CPJ-CEM II (*)	32.5 32.5R 42.5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV Et CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5R Toutes les classes	≤ 4
Chlorures	Tous les types de ciment (**)	52.5R Toutes les autres classes	≤ 0.05 ≤ 0.10

(*) Valable pour les CPJ-CEM II/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5 % pour toutes les classes de résistance.

(**) Les CHF-CEM II/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10% des chlorures mais dans ce cas la teneur doit être déclarée

II.7. Hydratation du ciment portland

Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe [8- 9- 10] qui a été étudié pour la première fois par Henri Lechatelier (1887). Schématiquement, Lechatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment [11]:

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

Les réactions chimiques d'hydratation des constituants du ciment précédemment présentées s'effectuent à des cinétiques différentes. L'ordre de réactivité suivant a été établi dans les pâtes de ciment Portland : $C3A > C3S > C4AF \approx C2S$ [12, 13].

- **Hydratation des silicates** : Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C3S) et les silicates bicalciques (C2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+} et OH^- , H_2 et SiO_4^{2-} , qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). A titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

- Le silicate tricalcique (C3S):



- Le silicate bicalcique (C2S):



- **Hydratation des aluminates :** Le C3A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C_4AH_{13} , C_2AH_8) qui se transforment en un aluminat de calcium hydraté C_3AH_6 . L'aluminat tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. En l'absence de gypse, l'hydratation du C3A est extrêmement rapide, exothermique et perturbe l'hydratation des silicates. Il s'en suit un phénomène de prise très rapide, empêchant la mise en œuvre du matériau. Pour remédier à cela, les cimentiers incorporent systématiquement du gypse dans la composition de leur ciment.

II.8. le Gypse

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse.

Le gypse ou sulfate de calcium dihydraté de formule $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, et l'anhydrite forme anhydre $CaSO_4$ sont des minéraux fréquents dans certaines formations géologiques. Ces minéraux, fréquemment associées, sont communs dans la nature surtout dans les formations géologiques sédimentaires. Ils ont des présentations de forme de structure de cristallisation et de couleurs très variables selon leurs conditions de gènes et les impuretés qu'ils contiennent.

La formule chimique : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou sulfate de calcium dihydraté

La masse volumique: $2,32 \text{ g/cm}^3$ à 25°C

La composition: un gypse pur est composé du :

- 92 à 94 % de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$,
- 2 à 4 % de $CaCO_3$,
- 2 à 4 % d'autres éléments tels que SiO_2 , MgO .

L'influence interne du sulfate sur le ciment commença avec l'invention du four rotatif par l'industrie du ciment Atlas en 1895. Le début de prise du clinker, fabriqué par ce type de four, étant très rapide [4]. Ce problème a été résolu par le chimiste français Pierre Giron, qui proposa d'ajouter le gypse naturel pour contrôler la prise du ciment [4]. Mais l'attaque

sulfatique interne du béton n'a été détectée qu'en 1970, lorsque les premiers cas de détérioration, survenus dans des bétons préfabriqués exposés à un environnement non agressif, ont été observés. Le cas le plus connu est celui de la fissuration de traverses de chemin de fer au Canada et aux Etats-Unis.

En général les sulfates jouent un rôle important comme régulateur de prise et d'hydratation du ciment leur présence a un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment. Les sulfates réagissent avec les aluminates pour donner de l'ettringite si la quantité d'ions SiO_4^{2-} en solution n'est pas suffisante, le C3A va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide, tandis que si la concentration en ions sulfates est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise.

II.9. Ajouts cimentaires

II.9.1. Définition

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



Fig. II.7. Différents ajouts cimentaires.

Avec: 1: cendre volante classe C, 2: métakaolin, 3: fumée de silice, 4: cendre volante classe F, 5: laitier, 6: schiste.

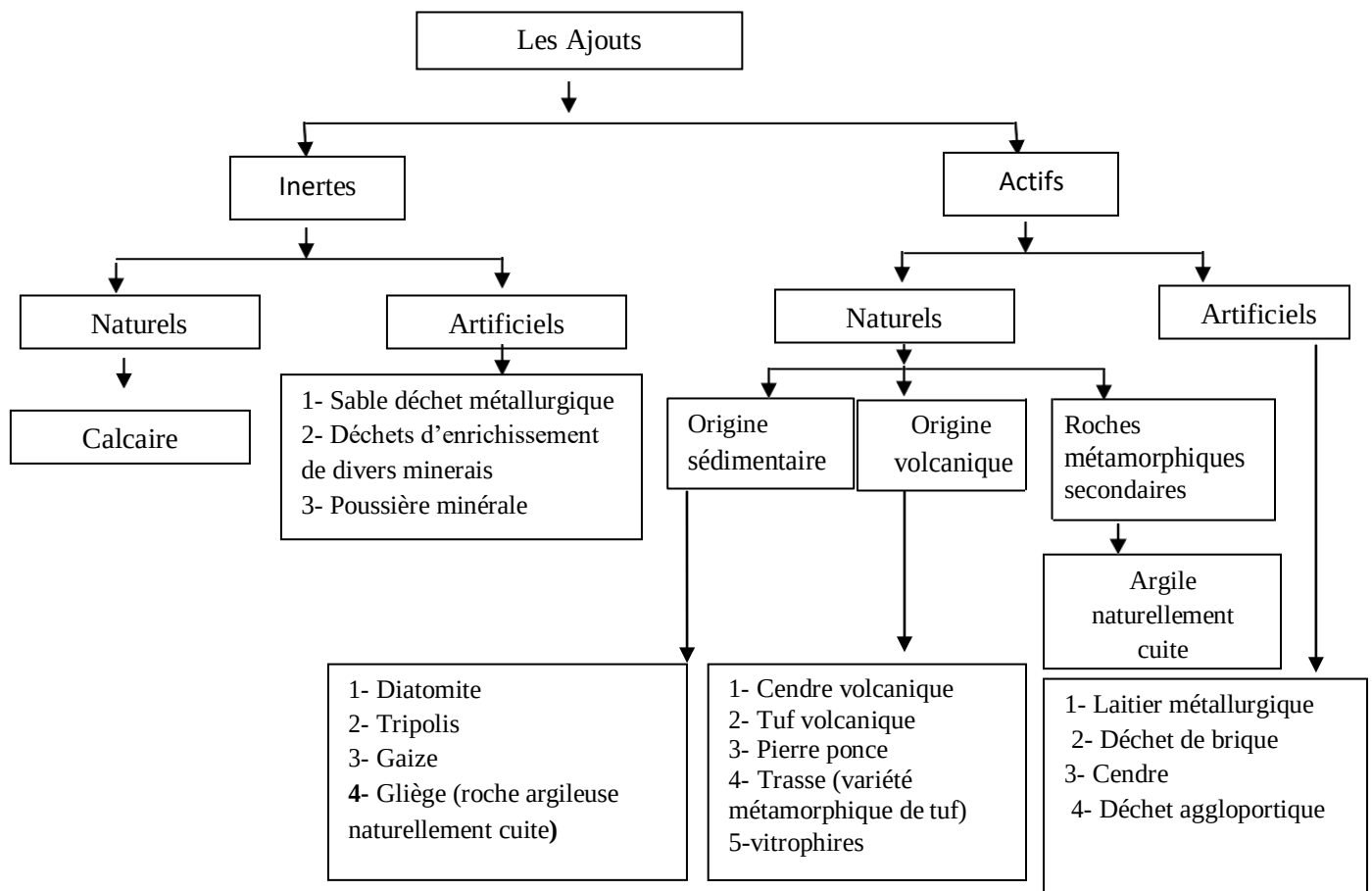


Fig. II.8. Les ajouts inertes et actifs.

II.9. 2. Avantages des ajouts

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

- **Avantages techniques**

- améliore la maniabilité et réduit la demande en eau.
- amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton.
- diminue la fissuration d'origine thermique

- **Avantages économiques**
 - leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
 - réduit le prix du béton pour le coût du combustible.
- **Avantages écologiques**
 - diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
 - élimination des sous-produits de la nature.

II.9.3. Les pouzzolanes

II.9.3.1. Définition

Les pouzzolanes sont des roches naturelles formées par des projections volcaniques scoriacées. Leur couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique [14]. Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer [15].

II.9.3.2. Propriétés des pouzzolanes

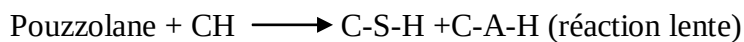
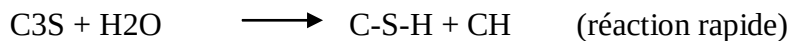
- **Propriétés physiques** : Elle est d'aspect rugueux, caverneux, de porosité fermée, sa densité apparente varie de 0.65 à 0.95. La pouzzolane résiste au feu et au choc thermique. Elle fond vers 1140 C°.
- **Propriétés chimiques et hydrauliques** : Elle est constituée de 3 oxydes principaux : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. Parfois de la chaux mais pas suffisamment pour donner naissance aux sels insolubles. Elle n'a pas de propriétés hydrauliques, la pouzzolane est incapable de faire prise seule.

II.9.3.3. Rôle de la pouzzolane dans le ciment

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C3S et C2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les pouzzolanes réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique (La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau.) [16].

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



Les réactions qui se déroulent sont :

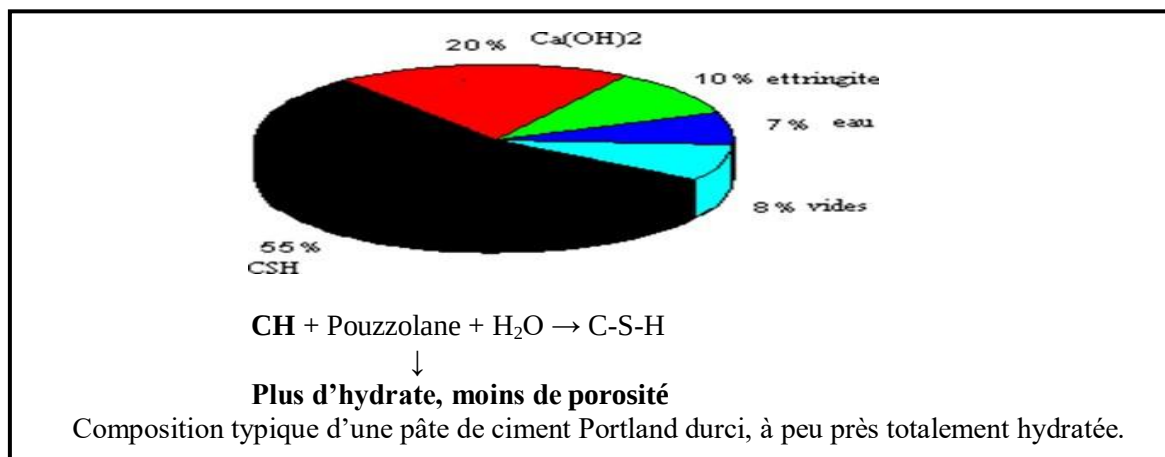
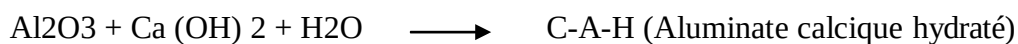
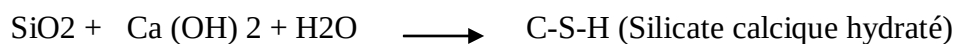


Fig. II.9. Les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane.

Le comportement du ciment avec pouzzolane est déterminé par trois caractéristiques :

- a) La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- b) 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.
- c) 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).

II.9.3.4. Effet de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

- **L'état frais** : Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.
- **L'état durci** : Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.
 - Accroissement de la résistance finale.
 - Légère diminution du retrait et du fluage.
 - Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
 - Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
 - Protection des armatures contre la corrosion.
 - Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
 - 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.

CHAPITRE III

Partie expérimentale

Dans le but de mettre en évidence l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés des mortiers confectionnés à base de ciment Portland artificiel (C.P.A) des essais physiques, chimiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire physique de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE.
- Laboratoire chimique de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE
- Les matériaux utilisés proviennent de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE et La pouzzolane provient de BENI-SAF.

Remarque : La plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisés conformément aux normes AFNOR sous des conditions climatiques $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR = 43\%$ à 55% .

III.1. MATIERES ET METHODES

III.1.1. Matières premières

a) Le clinker

Le clinker utilisé au cours de cette étude provient de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE. Il a été obtenu après cuisson d'un mélange contenant 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Sa composition chimique et minéralogique est présentée dans les tableaux suivants.

Tableau III.1. La composition chimique du clinker.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	P.A.F.
(%)	22.22	4.87	3.90	1.84	64,94	0.26	0.223

Tableau III.2. La composition minéralogique du clinker.

Compositions minéralogique	C3S	C2S	C3A	C4AF
(%)	54.07	22.96	6.31	11.86



Fig. III.1. Le clinker avant et après broyage.

b) Le gypse

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium dihydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a été varié entre 0,5%, 5% et 8% dans les variantes de ciments. Le rôle principal de ce matériau est d'agir comme régulateur de prise des ciments. Le gypse a une finesse de 5000 cm^2/g et une masse volumique absolue de 3160 kg/m^3 . Sa composition chimique est montrée dans la figure III.2.

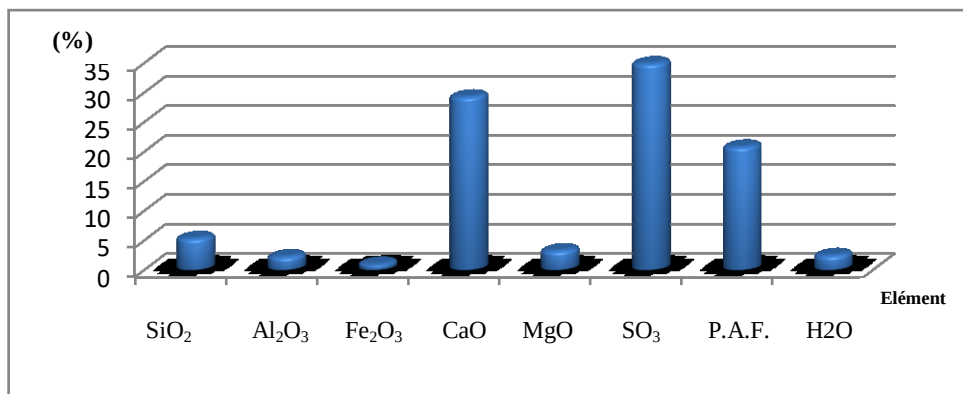


Fig. III.2. La composition chimique du gypse



Fig. III.3. Le gypse avant et après le broyage.

c) La pouzzolane

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre résultante de concassage ; étuvés pendant 12 heures à une température de 100°C afin d'éliminer l'humidité existante dans la pouzzolane, ensuite broyées très finement.

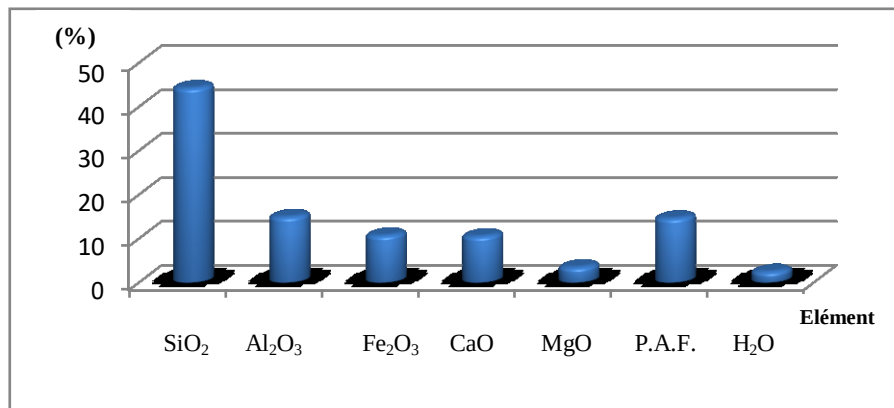


Fig. III.4. La composition chimique de la pouzzolane.



Fig. III.5. La pouzzolane naturelle de BENI-SAF avant broyage.

d) L'eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau potable du robinet. Cette eau ne contenant pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

e) Le sable

Dans cette étude expérimentale, on a utilisé un sable normalisé (SABBIA NORMALE STANDARD SAND) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :2009. Un sable normalisé,

est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité dans le laboratoire d'essais des matériaux de la ville de paris contrôlé par le L.E.M.V.P. Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350 g.

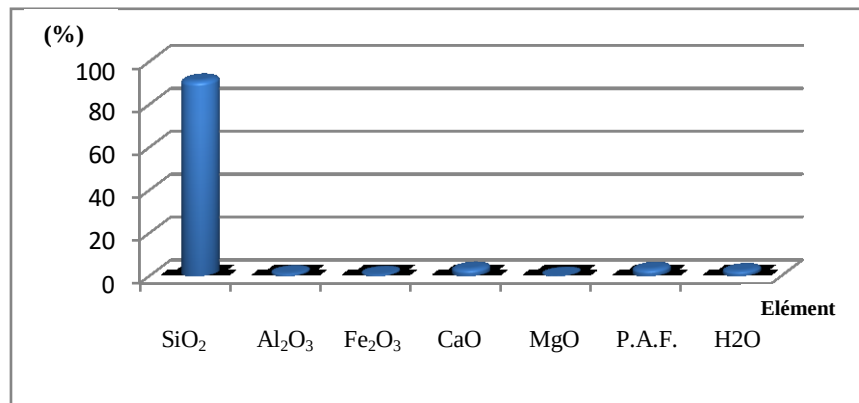


Fig.III.6. La composition chimique du sable normalisé.

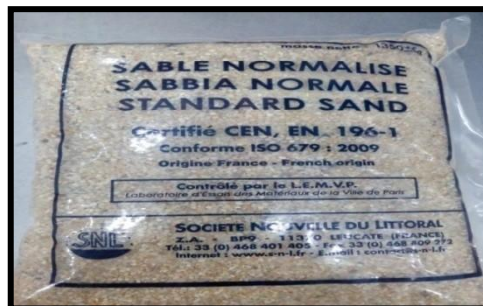


Fig.III.7. Le sable normalisé.

III.1.2. Mesures expérimentales

a) Détermination la teneur des oxydes

Principe

Le bombardement de la matière par des rayons X provoque l'émission de raies caractéristiques de spectre dont leurs intensités sont mesurées. L'échantillon à analyse doit

être réduit en poudre par broyage afin d'atténuer l'influence des effets liés à la minéralogie, à la granulométrie et aux interactions possibles entre les éléments.

Réactifs

- Triéthanolamine (T.E.A.)

Appareillage

- Broyeur à disques.
- CubiX XRF (Spectromètre à rayons X).
- Micro-ordinateurs.
- Logiciels (Blend Xpert et SuperQ).
- Pastilleuse.
- Pastille de 37 mm de diamètre.

Méthode de mesure

- Broyer 20 grammes de l'échantillon farine dans un broyeur à disques pendant 6 min pour clinker et 4 min pour gypse et la pouzzolane en présence de quelques gouttes de T.E.A.
- Récupérer l'échantillon broyé, en peser 7 grammes et les presser par une pastilleuse.
- Mettre la pastille de l'échantillon dans le spectromètre à rayons X pour l'analyser
- Ouvrir la fenêtre de mesures analyse dans le logiciel SuperQ et démarrer l'analyse par le logiciel Blend Xpert.

Les résultats de l'analyse de l'échantillon sont calculés par le CubiX XRF et affichés dans le micro-ordinateur

b) Perte au feu

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante par calcination de l'échantillon à l'air à une température de (950 ± 25) °C.

Matériel utilisé

- Creuset en platine.
- Balance de précision.
- Four à moufle.

Méthode de mesure

- Peser ($1,00 \pm 0,05$) g de ciment dans un creuset qui a été préalablement calciné et taré.
- Placer le creuset couvert dans le four électrique réglé à (950 ± 25) °C et laisser le creuset dans le four pendant 10 min supplémentaires.
- Refroidir le creuset à $T=25^{\circ}\text{C}$

Calcul et expression des résultats :
$$L = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100$$

m_1 : est la masse de la prise d'essai initiale, en grammes;

m_2 : est la masse de la prise d'essai calcinée, en grammes.

c) Détermination de la Surface Spécifique de Blaine**Principe de l'essai**

La finesse du ciment est mesurée sous forme de surface spécifique en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à des dimensions et une porosité spécifiées.

Réactifs

- Graisse légère.
- Liquide manométrique.

Appareillage

- Cellule de perméabilité.
- Disque perforé.
- Piston plongeur.
- Balance de précision.
- Manomètre.
- Chronomètre.
- Papier filtre.
- Entonnoir.

Méthode de mesure

- Peser dans une balance de précision le poids du ciment déterminé.
- Former le lit de ciment comme suit :
- Mettre le disque perforé dans la cellule de perméabilité en s'assurant qu'il soit plat.
- Poser un papier filtre dessus.
- Introduire la quantité du ciment à l'intérieur de la cellule en se servant d'un entonnoir.
- Aplatir la quantité par un papier filtre et en pressant par un piston plongeur.
- Mettre la cellule dans le manomètre, remonter le liquide par la poire d'aspiration puis fermer le manomètre et démarrer le chronomètre une fois le premier repère atteint, laisser écouler le liquide jusqu'au 2^{ème} repère puis arrêter le chronomètre.

Calcul et expression des résultats : $SSB = K * t \text{ Cm}^2 / \text{gr}$

K : Constante de l'appareil.

t : Temps mesuré en secondes (s).



Fig. III.8. Perméabilimètre de Blaine.

d) Essai de prise**Principe de l'essai**

Il est nécessaire de connaître les débuts et fin de prises des liants hydrauliques utilisés afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des coulis de ciment confectionnés. Donc l'essai a pour but de déterminer le temps que prends le mortier normal pour se figer.

Appareillage

- Appareil à VICAT

Composition de la pâte

La quantité du ciment qui doit être pesé est 500g + 125 ml d'eau doit être mélangé dans le malaxeur, la durée de cette opération est de 150 secondes.

Détermination De la consistance Normale

- placer la pâte au dessus de la sonde et régler cette dernière jusqu'au zéro.
- Abaisser ensuite la sonde jusqu'au contact de la pâte et lâcher rapidement les parties mobiles jusqu'à pénétration de la sonde verticalement au centre de la pâte.
- Noter la norme indiquée sur la graduation. Si la sonde pénètre d'une valeur de 05+02 c.à.d. que la quantité d'eau est exacte sinon l'essai est à refaire.

Détermination du temps de début et fin de prise

Le début de prise : est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant où le liant hydraulique a été mis en contact avec l'eau de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat ne pénètre plus au fond du moule conique. Faut-il noter que le début de prise est Normalisé.

La fin de prise : Cette dernière n'est pas Normalisée mais purement conventionnelle. C'est le moment où la pâte pure supporte le poids de l'aiguille de Vicat sans que celle-ci ne laisse de traces visibles.



Fig. III.9. L'Appareil à VICAT.



Fig. III.10. Pâte du ciment.

e) Elaboration des différents mortiers

Composition du mortier

La réalisation des formulations conduit en premier lieu à connaître les proportions des constituants de chaque formulation. Pour le mortier de référence on l'a formulé à l'aide de la composition suivante : une gâchée pour trois éprouvettes doit être constituée de (450 ± 2) g de ciment, (1350 ± 5) g de sable et (225 ± 1) g d'eau.



Fig. III.11. Constituants des mortiers.

Malaxage de mortier

- Peser le ciment et l'eau à l'aide d'une balance. Comme l'eau est mesurée en volume, elle doit être introduite avec une précision de 1ml.
- Malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement en utilisant un auto-malaxeur (Programmable).

Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être de forme prismatique de 4×4×16cm.

Moulage des éprouvettes

Le moulage des éprouvettes se fait immédiatement après la préparation du mortier. Le moule et la hausse étant solidement fixés sur la table à chocs.

- Introduire, à l'aide d'une cuillère appropriée, en une ou plusieurs fois, la première des deux couches de mortier (chacune d'environ 300 g) dans chacun des compartiments du moule, directement à partir du bol de malaxage.
- Étaler la couche uniformément à l'aide de la grande spatule.
- Ensuite, serrer la première couche du mortier par 60 chocs de l'appareil à choc. Introduire la seconde couche du mortier, niveler avec la petite spatule et serrer à nouveau par 60 chocs.
- A la fin Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle tenue presque à plat.



Fig. III.12. Malaxeur programmable avec la table à choc et Aplanissement des moules.

Conservation des moules et des éprouvettes

- Placer chaque moule convenablement identifié, sur un support horizontal dans la chambre ou armoire humide NF X 15-140 pendant 24 h.
- Effectuer le démoulage avec toutes les précautions requises.
- Immerger sans retard les éprouvettes marquées, de manière convenable, soit horizontalement, soit verticalement, dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et dans des récipients adéquats



Fig. III.13. Chambre de conservation.



Fig. III.14. Immersion des éprouvettes.

Essai sur éprouvette de ciment durci

La connaissance des résistances mécaniques est indispensable au calcul de dimensionnement des ouvrages. Les essais de flexion et compression sont effectuée suivant la NA 234. L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture.



Fig.III.15. Machine des essais mécaniques.

f) Différentes formulations réalisées

L'usage du gypse et la pouzzolane nous ont conduit à élaborer plusieurs formulations et pour les distinguer, il a été préférable d'utiliser les abréviations suivantes:

- **CEM I-0.5%** ciment formulé en substituant 0. 5% de clinker par le gypse.
- **CEM I-5%:** ciment formulé en substituant 5% de clinker par le gypse.
- **CEM I-08%:** ciment formulé en substituant 8% de clinker par le gypse.
- **Ref:** Mortier de référence formulé sans utilisation de la pouzzolane
- **CMp05%:** ciment constitué de 05% gypse, 05% pouzzolane, 90% clinker
- **CMp10%:** ciment constitué de 05% gypse, 10% pouzzolane, 85% clinker
- **CMp15%:** constitué de 05% gypse, 15% pouzzolane, 80% clinker.
- **CMp20** constitué de 05% gypse, 20% pouzzolane, 75% clinker

- Différentes formulations en substituant le ciment par le gypse

Tableau III.3. La composition des différentes formulations avec le gypse.

formulation	Clinker (g)	Sable (g)	Eau (g)	Gypse (g)
CEM I-0.5	447.5	1350	225	2.25
CEM I-5	427.5	1350	225	22.5
CEM I-8	414	1350	225	36

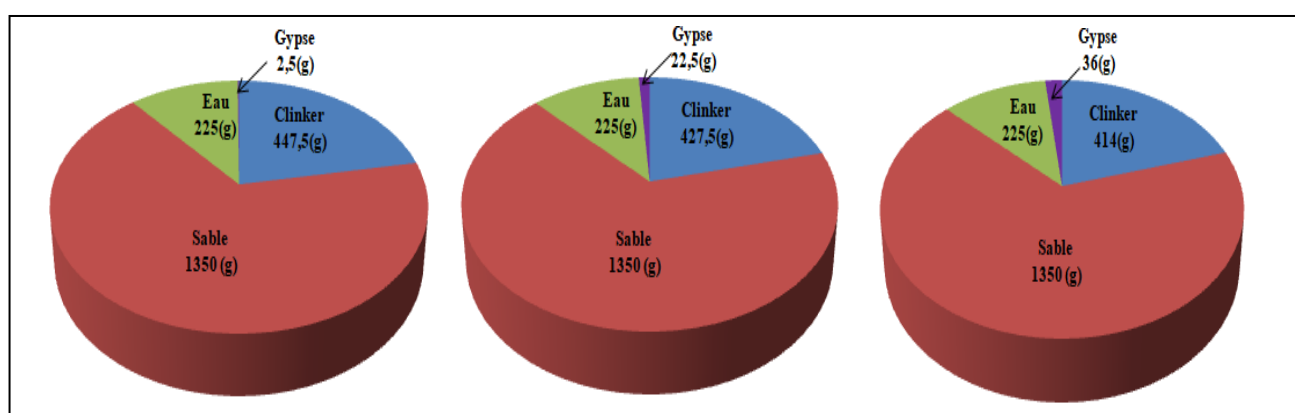


Fig.III.16. La composition des différentes formulations avec le gypse.

- Différentes formulations en substituant le ciment par la pouzzolane

Tableau III.4. La composition des différentes formulations avec la pouzzolane.

Formulation	Clinker (g)	Gypse (g)	Sable (g)	Eau (g)	pouzzolane(g)
Ref	427.5	22.5	1350	225	0
CMp5%	405	22.5	1350	225	22.5
CMp10%	382.5	22.5	1350	225	45
CMp15%	360	22.5	1350	225	67.5
CMp20%	337.5	22.5	1350	225	90

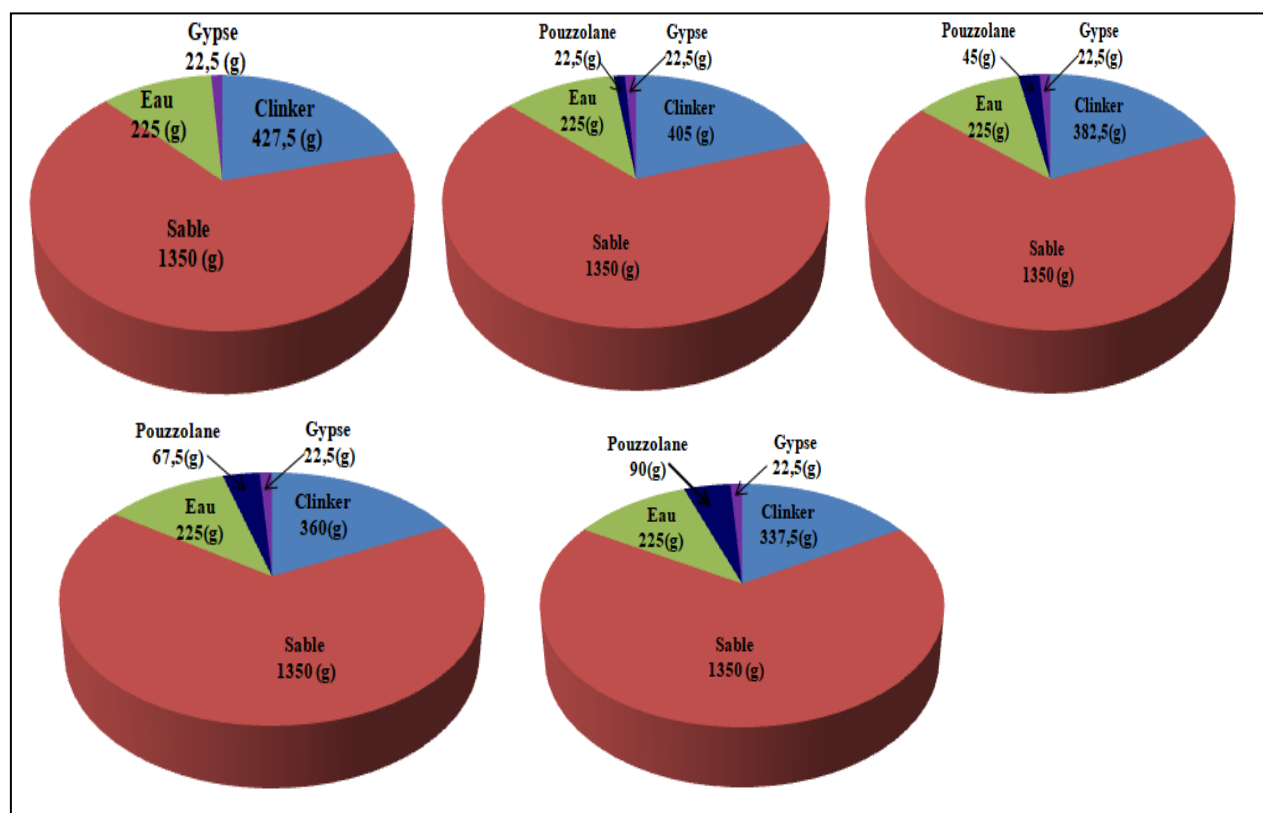


Fig.III.17. La composition des différentes formulations avec la pouzzolane.

III.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre projet de fin d'études et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier. A la fin de ce chapitre nous tenterons de proposer une composition optimale du liant équivalent vis-à-vis de la résistance à la compression.

III.2.1. Influence du Taux de gypse sur ciment anhydre

a) Influence du Taux de gypse sur les Teneurs en Oxydes

Le Tableau (III.5.) et la Fig. (III.18, III.19) représentent la variation des taux des principaux oxydes ainsi que la perte au feu dans le ciment en fonction du taux de gypse.

Tableau III.5. Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes).

Eléments (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF
CEM I-0.5	<u>20.86</u>	4.8	2.96	<u>62.86</u>	1.53	<u>1.00</u>	<u>0.04</u>
CEM I-5	<u>19.86</u>	4.92	3.28	<u>58.86</u>	1.55	<u>2.71</u>	<u>1.4</u>
CEM I-8	<u>18.9</u>	4.84	3.3	<u>57.33</u>	1.69	<u>4.14</u>	<u>2.5</u>

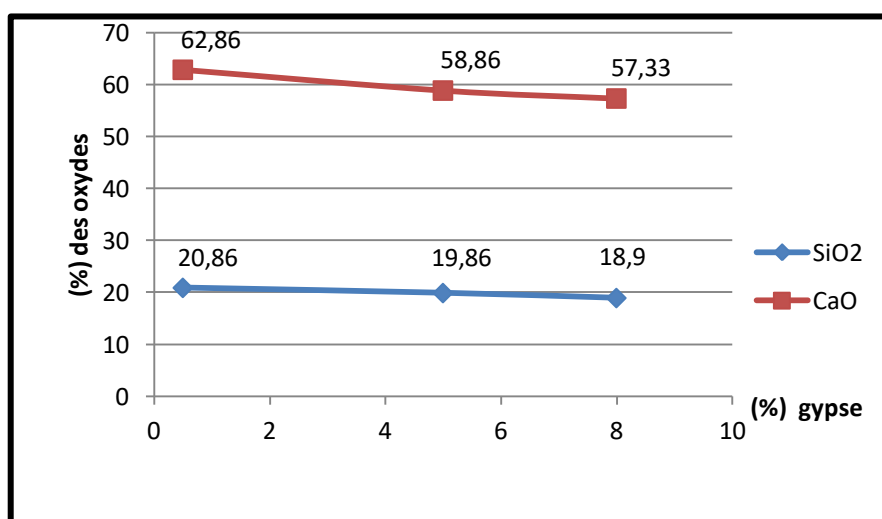


Fig. III.18. Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse.

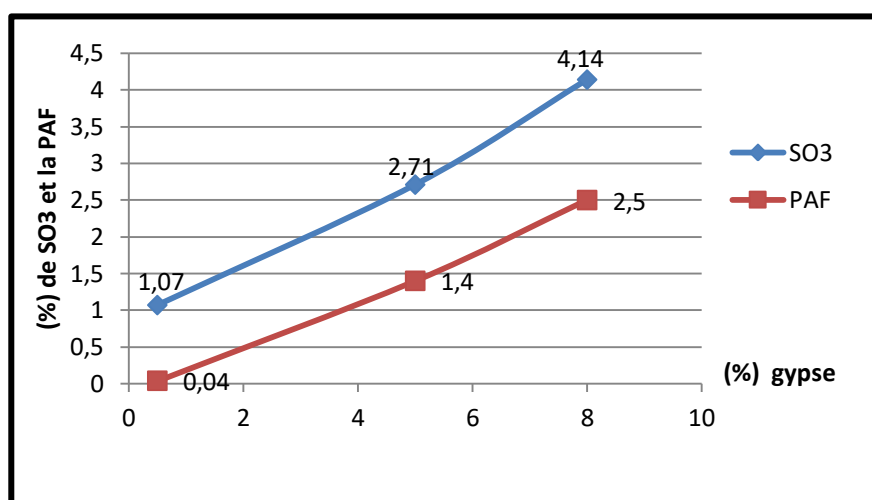


Fig. III.19. Variation de la perte au feu et SO₃ en fonction du taux de gypse.

On remarque que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- Le taux d'oxyde de silice (SiO₂) et la chaux (CaO), diminue dû à la diminution du pourcentage de clinker par rapport à l'augmentation du gypse.
- Le taux d'oxyde de (SO₃) et la perte au feu (P.A.F) augmente proportionnellement avec l'augmentation du gypse dû à la teneur élevée de (SO₃) dans le gypse (34.4%) et la présence des impuretés.

b) Influence du Taux de gypse Sur la Surface Spécifique du Ciment

Les résultats du Tableau (III.6) et la Fig. (III.20) présentent l'effet d'addition du gypse sur la surface spécifique du ciment.

Tableau III.6. Surface spécifique des ciments préparés.

Elément	CEM I-0.5	CEM I-5	CEM I-8
SSB (cm ² /g)	3286	3466	3500

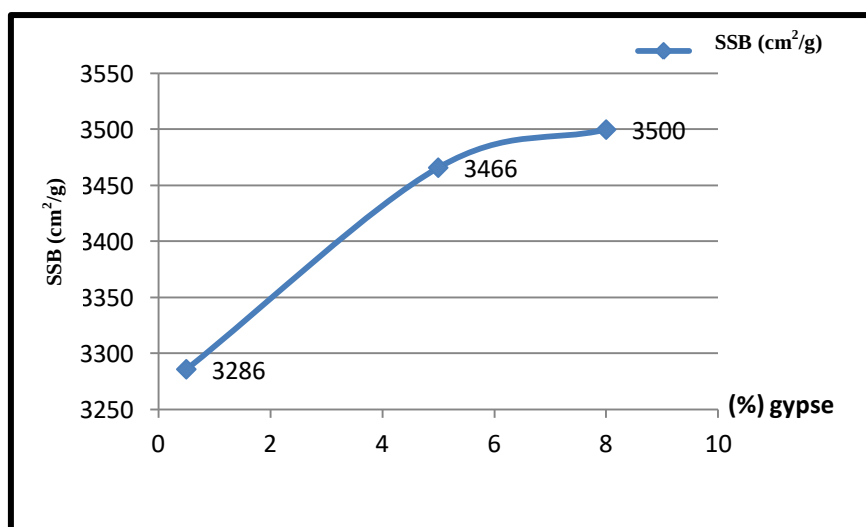


Fig. III.20. Variation de la surface spécifique de ciment en fonction du taux de gypse.

Une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage de gypse dans le ciment. Cette augmentation est due à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par le gypse et la broyabilité du gypse (facile à broyer) de (5000 ± 100) par rapport au clinker difficile à broyer de (3200 ± 100) (le gypse joue un rôle d'adjuvant de mouture et facilite le broyage des ciments).

III.2.2. Influence du Taux de gypse sur la pâte du ciment

a) Influence du taux de gypse Sur la Consistance Normale

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau III.7 et Fig. III.21) présentent l'effet du taux de gypse sur la consistance normale du ciment.

La demande en eau des pâtes de ciments préparées avec les différents pourcentages de gypse : (0.5% 5 % et 8%) est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat manuel.

Tableau III.7. Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).

Élément	CEM I-0.5	CEM I-5	CEM I-8
E/C (%)	24.4	25	27.3

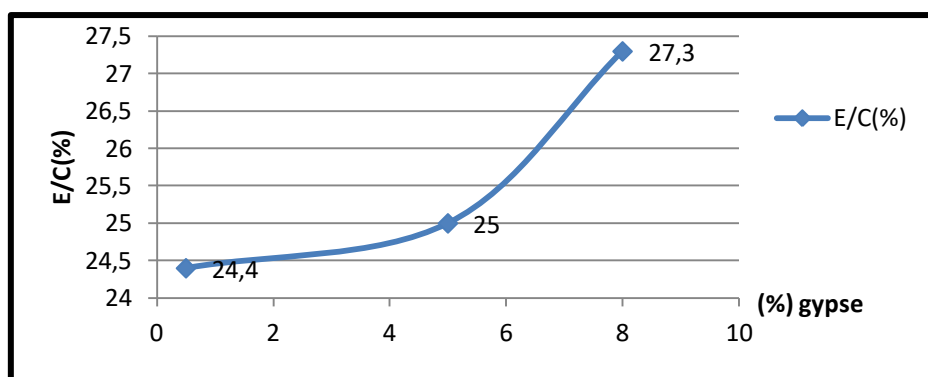


Fig III.21. Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de gypse.

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment engendre l'effet suivant : L'augmentation de la surface spécifique implique l'augmentation de la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment.

b) Influence du Taux de gypse sur le Temps de Prise

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau III.8 et Fig. III.22) présentent l'effet du taux de gypse sur le temps de prise de la pâte de ciment. L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat automatique.

Tableau III.8. Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).

Elément	CEM I-0.5	CEM I-5	CEM I-8
Début de prise (min)	40	145	55
Fin de prise (min)	78	235	90

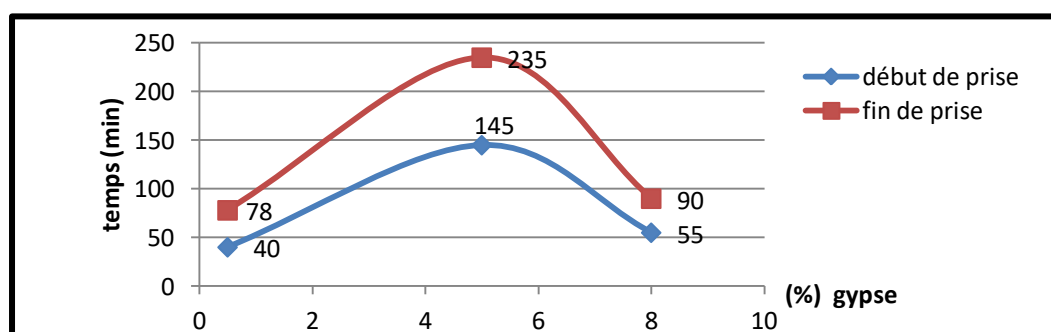
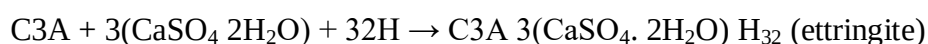


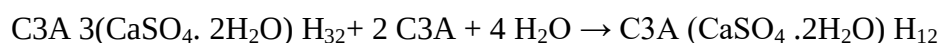
Fig. III.22. Variation des Temps de prises en fonction du taux de gypse.

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- Augmentation des temps de début et fin de 0.5% de gypse jusqu'au le point 5 % qui est dû à l'hydratation des C3A avec le gypse ,ce dernier joue le rôle d'un régulateur de prise qui retarde la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) selon la réaction suivante :



De 3 à 24 h : après le gâchage on observe la transformation régulière de la pâte du ciment en un bloc rigide, car le gypse a été totalement consommé. Ainsi, l'excès de C3A va réagir avec l'ettringite formée précédemment ce qui constitue l'unique source de sulfates. En présence d'eau, ces constituants vont donner lieu à la formation des monosulfoaluminates de calcium hydratés selon une réaction provoquant la dissolution rapide de l'aluminate en excès :



Diminution des temps de début et fin de prise au point 8% du gypse (une chute de temps de prise sous l'effet excès du gypse qui résulte la fausse prise).

III.2.3. Influence du Taux de gypse Sur Le Mortier à base de sable Normalisé

a) Résistance à la Compression

Le Tableau (III.9) et la Figure (III.23) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages de gypse par substitution dans le ciment en fonction des différents âges.

Tableau III.9. Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux de gypse.

	CEM I-0.5	CEM I-5	CEM I-8
Rcp 02j (MPa)	8.43	21.75	19.3
Rcp 07j (MPa)	28.2	42.00	31.9
Rcp 28j (MPa)	41.65	55.70	38.3

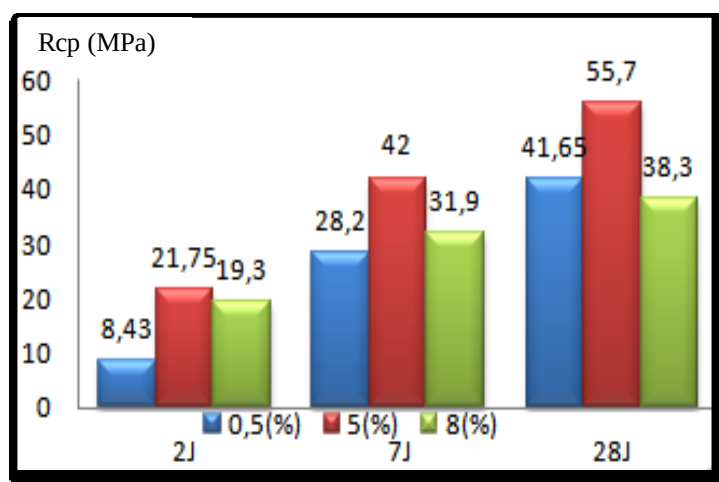


Fig. III. 23. Effet du Taux de gypse sur la Résistance à la Compression.

On remarque que les résistances de les 2 mortiers 0.5% et 8% sont très faible à jeune âge (2j et 7j) et à long terme (28j) par rapport à le mortier 5% de gypse, la résistance est chutée de 55.7 MPa à 5% jusqu'à 41.65 et 38.3 MPa à 0.5 et 8% de gypse.

Cette diminution (chute de la résistance) est due au fait que : l'optimum de sulfate à une échéance donnée coïncide à la teneur en sulfate nécessaire pour former la quantité d'ettringite correspondant exactement à l'espace poreux laissé par les C-S-H une quantité inférieure laisserait une plus grande porosité donc une résistance mécanique moindre, une plus grande quantité provoquerait une fissuration due à la croissance de ettringite dans un espace confiné le tableau (III.10) résume ces phénomènes à une échéance donnée, pour même quantité de C-S-H formés :

Tableau III.10. Effet du gypse sur la résistance mécanique.

$SO_3 < \text{Optimum}$	$SO_3 = \text{Optimum}$	$SO_3 > \text{Optimum}$
$V_{\text{ettringite}} < V_{\text{poreux C-S-H}}$	$V_{\text{ettringite}} = V_{\text{poreux C-S-H}}$	$V_{\text{ettringite}} > V_{\text{poreux C-S-H}}$
	Formé à une échéance	Formé une échéance
Espaces vides diminuent les résistances mécaniques	Les résistances mécaniques sont maximales	Les microfissures altèrent les résistances

III.2.4. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur ciments anhydre

a) Influence du taux d'ajout pouzzolane sur les Teneurs en Oxydes :

Le Tableau (III.11) et la Fig. (III.24) représentent la variation des taux des principaux oxydes ainsi que la perte au feu) dans le ciment en fonction du taux de la pouzzolane.

Tableau III.11. Analyses chimiques des ciments préparés (les oxydes).

Eléments (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF
Ref	<u>21.07</u>	<u>4.92</u>	3.41	<u>63.89</u>	2.4	2.71	1.08
CMp05%	<u>21.76</u>	<u>5.02</u>	3.45	<u>60</u>	1.82	2.08	1.51
CMp10%	<u>23.51</u>	<u>5.33</u>	3.6	<u>58.28</u>	1.08	2.31	2.1
CMp15%	<u>27.95</u>	<u>6</u>	3.75	<u>55.43</u>	1.76	2.14	2.48
CMp20%	<u>29.26</u>	<u>6.86</u>	3.89	<u>53.95</u>	1.51	2.27	2.6

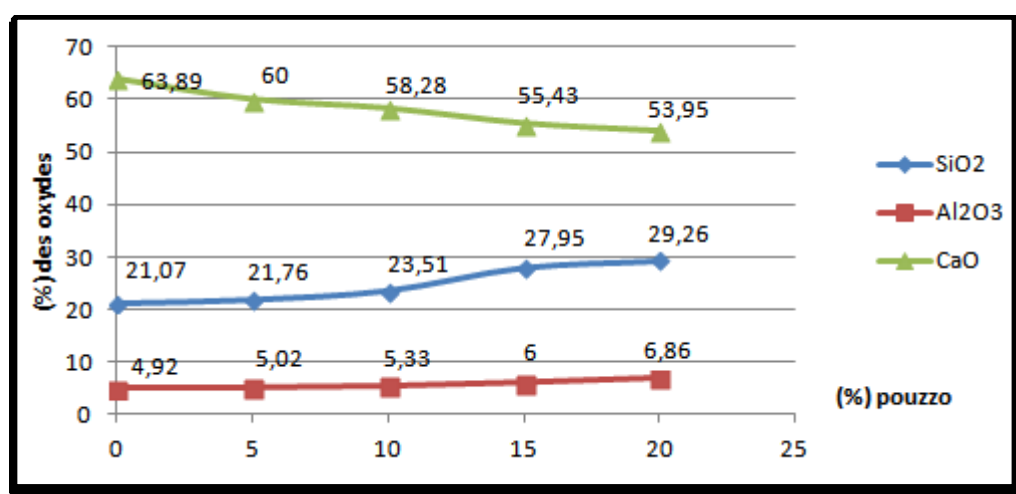


Fig. III.24. Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de pouzzolane.

On remarque que l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane incorporé dans le ciment a les effets suivants :

- Le taux d'oxyde la chaux (CaO), diminue dû à la diminution du pourcentage de clinker par apport à l'augmentation de la pouzzolane.

- Le taux d'oxyde de la silice (SiO_2) et l'alumine de fer (Al_2O_3) augmente proportionnellement avec l'augmentation de la pouzzolane car elle est essentiellement composée de silice réactive (dans des proportions de 44.28 %), d'alumine et d'oxyde de fer.

b) Influence du taux d'ajout pouzzolane Sur la Surface Spécifique du Ciment

Les résultats du Tableau III.12 et la Fig. III.25 présentent l'effet d'addition de la pouzzolane sur la surface spécifique du ciment.

Tableau III.12. La Finesse de Blaine.

Elément	Réf.	CMp05%	CMp10%	CMp15%	CMp20%
SSB (cm^2/g)	3500	3534	3926	4153	4228

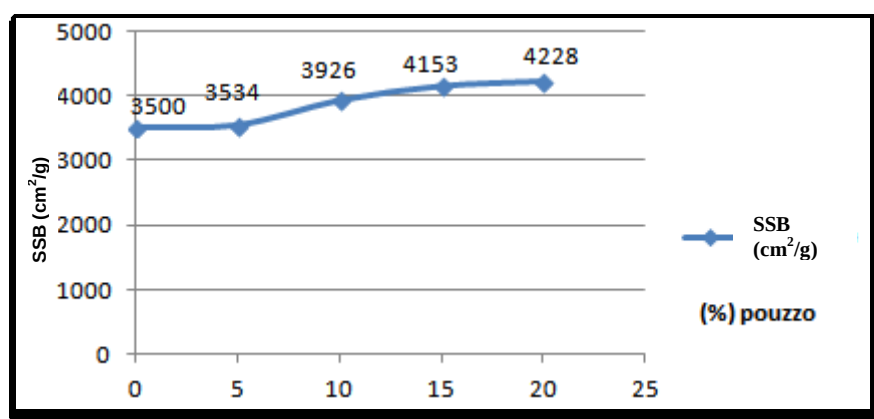


Fig.III.25. Variation de la surface spécifique du ciment en fonction du taux d'ajout pouzzolane.

Dans cette figure on remarque une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane dans le ciment c'est –à-dire que les grains de la pouzzolane sont très fin. La finesse du mélange varié entre 3534 et 4228 cm^2/g donc elle est élevée par apport au ciment témoin.

Donc on peut conclure que l'augmentation de la quantité de l'ajout pouzzolane incorporé dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique (Blaine) du ciment.

III.2.5. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur ciment hydraté

a) Influence du taux d'ajout pouzzolane sur la consistance normale

Les résultats du tableau III.13 et Fig. III.26 présentent l'effet de l'addition de la pouzzolane sur la consistance normale.

Tableau III.13. La consistance.

Elément	Ref	CMp05%	CMp10%	CMp15%	CMp20%
E/C(%)	26	26.8	27	27.5	28.2

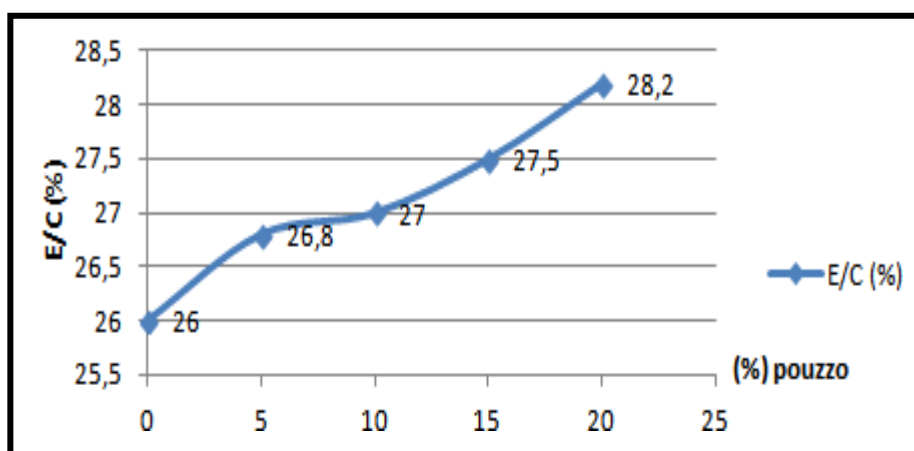


Fig. III.26. Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de pouzzolane.

Nous remarquons d'après cette figure que pour garder une maniabilité constante des différents mélanges, il faut augmenter la quantité d'eau de gâchage au fur et à mesure que la teneur de l'ajout (pouzzolane) augmente.

La comparaison de la maniabilité des pâtes de contrôle (sans ajouts de pouzzolane), avec les pâtes contenant de la pouzzolane a conduit à constater la nécessité d'augmenter la quantité d'eau.

b) Influence du taux d'ajout pouzzolane sur le Temps de Prise

Les résultats du tableau III.14 et Fig.III.27 présentent l'évolution de ces temps mesurés en minutes (début et fin de prise) pour les différentes compositions des mélanges.

Tableau III.14. Temps de prise.

Elément	Ref	CMp05%	CMp10%	CMp15%	CMp20%
Début de prise (min)	140	160	165	172	183
Fin de prise (min)	200	230	235	240	260

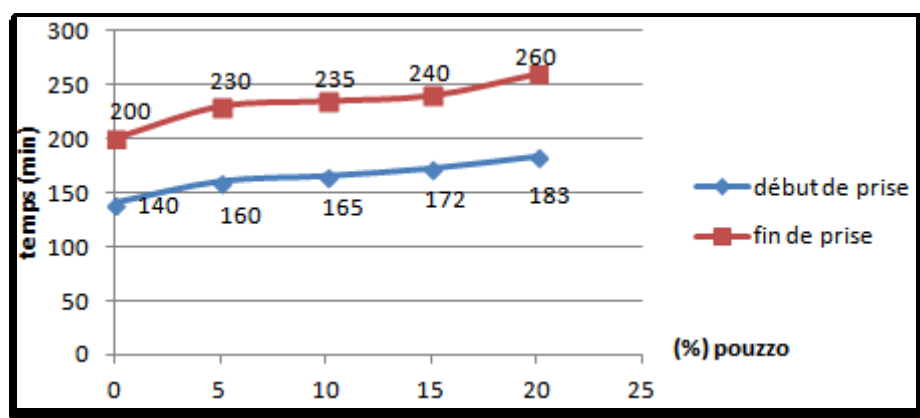


Fig. III.27. Variation des Temps de prises en fonction du taux de pouzzolane.

Pour la même maniabilité des pâtes des liants élaborés, des temps de prises sont mesurées (début et de fin de prise) conformes aux normes NF 196-3, Les mélanges contenant de la pouzzolane présentent des augmentations dans les temps de début et fin de prise supérieures par rapport à la pâte témoin.

Pour le début de prise nous remarquons que les pâtes à base de 5%, 10% ,15 % et 20 % de pouzzolane présente une augmentation de 14.28%, 17.85%, 22.85% et 30.71% respectivement par rapport aux pâtes de contrôle.

Pour la fin de prise nous remarquons que les pâtes à base de 5 %, 10% ,15 % et 20 % de pouzzolane présente une augmentation de 15%, 17.5%, 20% et 30% respectivement par rapport aux pâtes de contrôle.

L'étude a aussi confirmé qu'au jeune âge, la prise est plus rapide pour la pâte de contrôle par rapport les pâtes à base de l'ajout (pouzzolane) car l'influence de la pouzzolane a eu pour effet de retardé l'hydratation du ciment.

III.2.6. Influence du taux d'ajout pouzzolane sur les mortiers

a) Résistance à la compression

Les résultats expérimentaux du tableau III.15 et Fig.28 présentent l'effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression.

Tableau III.15. Résistance à la compression.

	Réf.	CMp05%	CMp10%	CMp15%	CMp20%
Rcp 02j (MPa)	27.32	26.95	24.55	21.05	20.15
Rcp 07j (MPa)	44.40	42.00	38.4	37.5	36.3
Rcp 28j (MPa)	58.8	55.95	50.2	47.95	46
Rcp 60j (MPa)	63.22	60	53.5	49.7	47.4

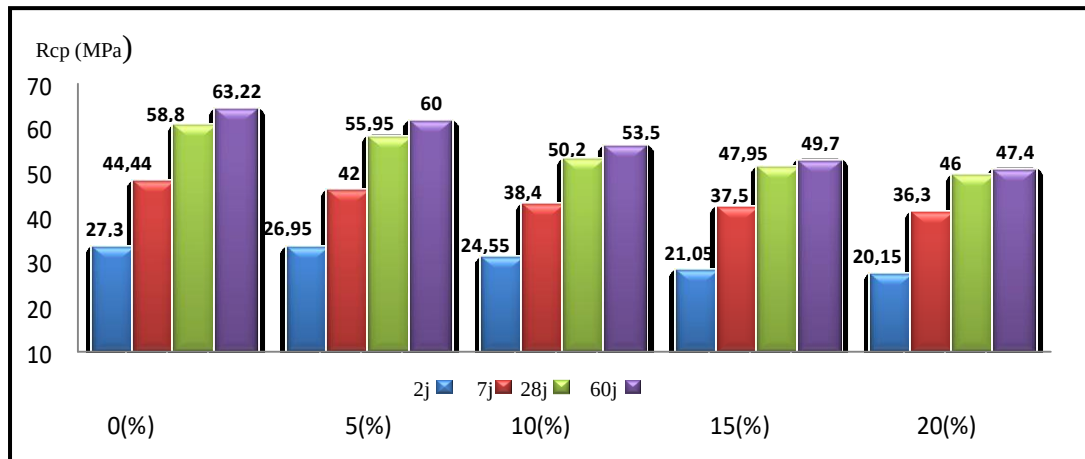


Fig. III.28. Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du taux de pouzzolane.

D'après cette figure on remarque que les mortiers qui contiennent de la pouzzolane développent des résistances qui restent toujours inférieures à celle du mortier de contrôle et cela à tous les âges.

La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge. A titre d'exemple, un remplacement du ciment par 201 % de pouzzolane diminue la résistance à la compression de 26.19%, 18.2%, 21.36% et 25% à 2j, 7j, 28 j et 60 jours respectivement. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane.

Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane et le Ca(OH)_2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances.

CONCLUSION

Ce travail est une recherche des propriétés physico-mécaniques optimales des pâtes de ciment et mortiers basée sur l'augmentation du pourcentage du gypse et de la pouzzolane sur le ciment portland (CPA- CEM I, CPJ- CEM II) de classe de résistance (42,5).

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale permettent de tirer les conclusions suivantes :

L'augmentation du taux de gypse et de la pouzzolane dans le ciment influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.

L'augmentation de la quantité de gypse et de la pouzzolane incorporée dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique de (Blaine) des ciments préparés.

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante car lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande plus l'hydratation est rapide et complète

Augmentation des temps de début et fin de prise à partir du taux minimal 0.5% de gypse jusqu'à le point d'ajout gypse 5% dû à l'hydratation des C3A avec le gypse, le gypse qui joue le rôle d'un régulateur de prise qui retarde la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) .

Diminution des temps de début et fin de prise au point 8% du gypse (une chute de temps de prise sous l'effet excès du gypse qui résulte la fausse prise).

Le choix de l'optimum de sulfate est un compromis pour de bonnes propriétés mécanique de 1 à 28 jours et assurer ainsi la mise en place de mortier ou de béton.

L'optimum de sulfate accélère l'hydratation du C3S par contre un excès ralentit l'hydratation donc développement de la résistance.

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par

CONCLUSION

l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) (C3A. SiO₂), composé principal du ciment Portland.

Les mortiers pouzzolaniques développent des résistances inférieures à celles du mortier de contrôle.

Bien que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers soit réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme. L'incorporation d'un taux de pouzzolane naturelle au CPA s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin. Tous les pourcentages de la pouzzolane conforment à la norme ($R > 42.5$ MPa)

Enfin pour assurer une bonne qualité des ciments (CEM I et CEM II) avec caractéristiques physicochimiques et mécaniques conformes à la norme et aussi réduire le maximum la quantité du clinker utilisée : le taux de gypse optimum est fixé à l'ordre de 5% et pouzzolane à 20%.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographique

- [1] : H. Lafuma, E. Freyssinet ;Liants hydrauliques, L'actualité, technique ; 3^{ème} édition Dunod Paris ; 1965
- [2]: D .Moore ;The Roman Pantheon: The Triumph of Concrete;1995
- [3] : N. Adam ; Propriétés des Bétons. ;édition Eyrolles, Translated by CRIB ; 2000.
- [4] : B.Javed, F .MILLER., S .KOSMATKA ;Innovation in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association;2004.
- [5] : VDZ –Germany Verein Deutscher Zementwerke,Zement Taschenbuch; 2000.
- [6]: R. Blezard ; Reflections on the history of the chemistry of cement, Society of chemical industry, London;1998
- [7] :M.Venuat ;La pratique des ciments, mortiers et bétons ;Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers ; édition2 ;Collection Moniteur. 277p ;1989.
- [8] : G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark; Technologie des ciments, chaux et plâtres, processus et installations de cuisson; Paris; Septima éd; 230 p ; 1980.
- [9] :I. Jawed, J. Skalny, J.F. Young; Structure and performance of cements; Hydration of Portland cement Structure and Performance of Cements; 1985.
- [10]: C. Vernet; Évolution de la microstructure des hydrates des ciments - Aspects théoriques; 8^{ème} Congrès International - Journal of Cement composites and lightweight concrete; Vol 11; 1989.
- [11] :L. PLISKIN ;La fabrication du ciment ;Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.
- [12]: I. Older ;Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement in "Lea's Chemistry of Cement and Concrete; Fourth Edition Arnold ;1998.
- [13] : M. Regourd, L'hydratation du ciment Portland in "Le Béton hydraulique ; Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ;1982.
- [14] : G .Dreux & J. Festa ;Nouveau guide du béton et de ses constituants ; 8^{ème} Edition.Eyrolles; Mai 1998.
- [15]:R. Dupain, R. Lanchon & J.C. Saint –Arroman ;Granulats, sols, ciments etBétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ; EditioCasteilla. 1995.
- [16]: K.Kobayashi, Y.Uno; Influence of alkali on carbonation of concrete.2.Influence of alkaline cement on rate of carbonation of concrete; Cement and Concrete Research. 20, 4, 1990.

Annexe 01: Classification du ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

Classification des ciments en fonction de 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. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

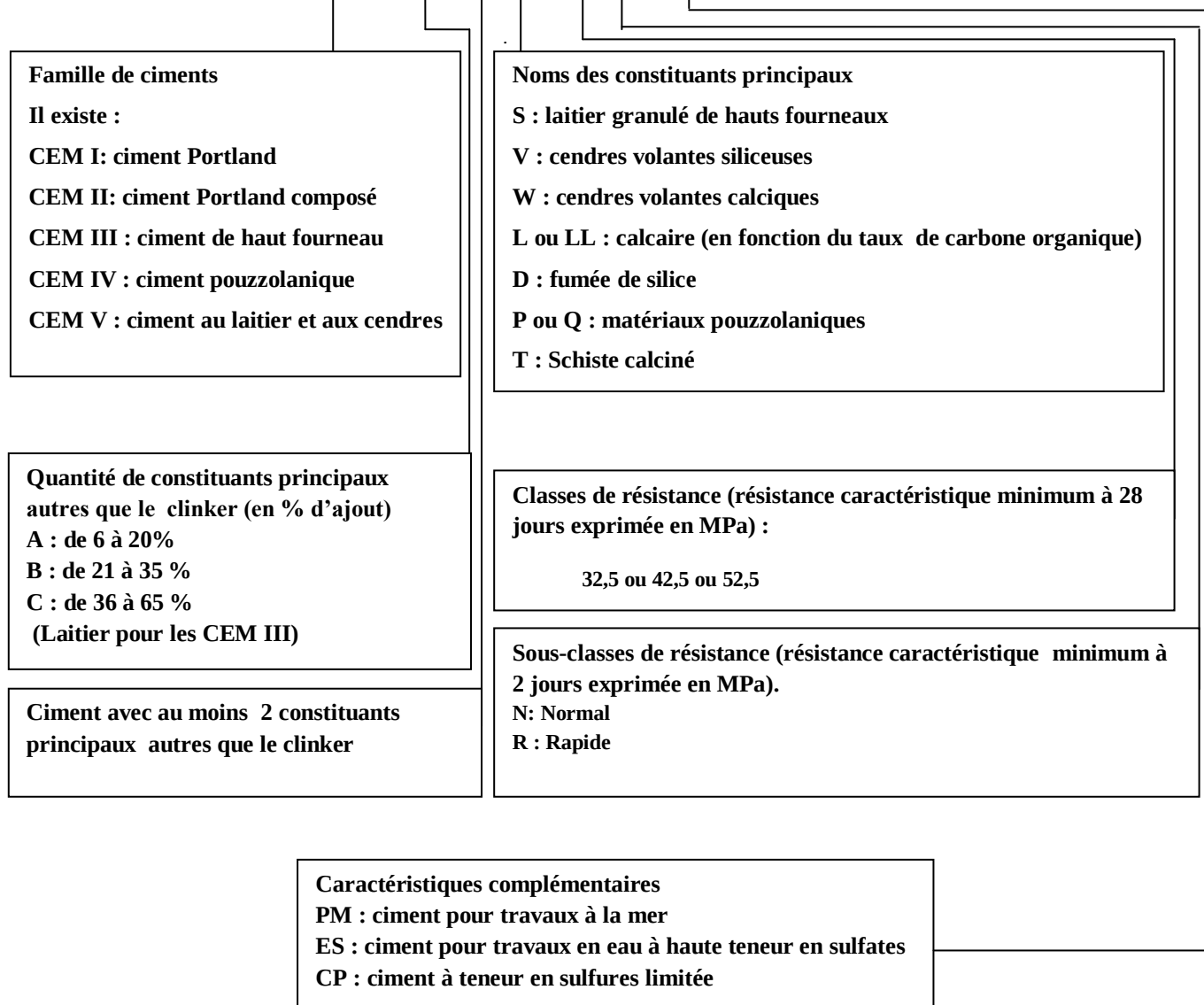
- CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française).
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ).
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5.

Annexe 01: Classification du ciment

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*



Annexe 02: Le Clinker

A- Composition chimique du clinker :

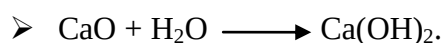
De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

1-La composition chimique du clinker :

Le clinker portland comprend les oxydes suivant :

CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ de 95% à 97% et MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂.

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



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

SiO₂ : Il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium; un pourcentage élevé donne beaucoup de C₂S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme.

L'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24%.

Al₂O₃ : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al₂O₃ donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%.

Fe₂O₃ : joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5% à 4%.

MgO : Une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de périclase, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure à 5%.

TiO₂ : Sa teneur est inférieure à 0,5%, il provient des argiles.

MnO₂ : Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matières première, sa teneur est 1,5%.

P₂O₅ : Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2%, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2 à 0,3%.

Na₂O et K₂O : Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0,5 à 1%.

Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique.

Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment.

Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux.

B- Composition minéralogique du clinker :

- Caractéristiques principales des constituants du clinker :

1-Silicate tricalcique : Alite « C3S » : 40 à 65%.

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

2- Silicate bi calcique : Bélite « C2S » : 8 à 35%.

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

3- Aluminate tricalcique : Célide : « C3A » : 1 à 13%.

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière.

Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation est fortement exothermique.

4 - Aluminate tétra calcique : Félide, C4AF :3 à 14%.

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

C- Proportions des matières premières et composition potentielle des ciments.

Le clinker est caractérisé par la teneur en oxyde et par sa composition minéralogique.

BOGUE a élaboré une méthode de calcul permettant de déterminer, sur la base d'une analyse chimique, la composition minéralogique du clinker.

Equations de Bogue:

$$C4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$C3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3$$

$$C2S = 8,6 SiO_2 + 1,08 Fe_2O_3 + 5,07 Al_2O_3 - 3,07 CaO$$

$$C3S = 4,07 CaO - 7,6 SiO_2 - 1,43 Fe_2O_3 - 6,72 Al_2O_3$$

Par convention on adopte les symboles suivants : CaO : **C** ; SiO₂ : **S** ; Al₂O₃ : **A** ; et Fe₂O₃ : **F**.

Les matières premières sont toujours bien dosées pour assurer la bonne composition chimique.

Résumé : La majorité des propriétés du béton sont liées à la nature du ciment et à sa composition chimique, résistance mécanique et durabilité. La substitution d'une partie de ciment portland par des minéraux contribue aux propriétés du béton durci par action. Il est donc utile de connaître les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques et le mécanisme d'hydratation ainsi que la microstructure du ciment hydraté. Dans cette étude, on a fait varier le pourcentage du gypse et de la pouzzolane dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par le gypse et la pouzzolane) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment et le comportement mécanique du mortier pour choisir un taux optimal du gypse et de la pouzzolane. Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, finesse, consistance des pâtes de ciment, et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le comportement mécanique (résistances à la compression) ont été étudiées. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité du gypse, de la pouzzolane et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques des mortiers testés.

Mots clés : Ciment, gypse, pouzzolane, hydratation, propriétés mécaniques.

Summary: The majority of concrete properties are related to the nature of the cement and its chemical composition, mechanical strength and durability. The substitution of a portion of portland cement by minerals contribute to the properties of concrete hardened by action. So it is useful to know the properties: physical, chemical, mineralogical and the mechanism of hydration as well as the microstructure of hydrated cement. In this study, we have varied the percentage of gypsum and pozzolan in cement by the substitution method (partial replacement of clinker by gypsum and pozzolan) in order to study its effect on the physico-chemical properties of cement and mechanical behavior of the mortar to choose an optimal rate of gypsum and pozzolan. The physicochemical properties of cement in the anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, fineness, consistency of the cement paste, and setting time), as well as the characteristics of the mortars prepared at their bases, such as, mechanical behavior (compressive strengths) were studied. From the experimental results obtained, it appears that the quantity of gypsum, pozzolan and the chemical composition of the manufactured cement are the main parameters which influence the variation of the mechanical strengths of the mortars tested.

Keyword: Cement, gypsum, pozzolan, hydration, mechanical properties.

ملخص ترتبط غالبية خواص الخرسانة بطبيعة الأسمنت وتركيبه الكيميائي، وقوته الميكانيكية، وقوة تحمله واستبدال جزء من الإسمنت البورتلاندي بالمعادن يساهم في خواص الخرسانة المتصلبة، لذلك من المفيد معرفة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والمعدنية وآلية الترطيب فضلا عن البنية المجهرية للأسمنت الرطب لقد قمنا في هذه الدراسة بتغيير نسبة مادة الكلنكر في لاسمنت (باستعمال طريقة الاستبدال الجزئي لمادة الكلنكر بمادة الجبس و البوزلان) لدراسة أثرهما على الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للأسمنت المحضر وكذلك المقاومة الميكانيكية للمونة من أجل تحديد نسبة الجبس والبوزلان المثالية، إن الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للأسمنت المحضر في الحالة الجافة (التركيب الكيميائي، زمن السحق، الوزن النوعي، النعومة، التوزيع الحبيبي) والمبللة (القوام القياسي للعجينة الإسمنتية، وزمن الشك) وكذلك مميزات المونة في الحالة الصلدة المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء)، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي ووفقا لنتائج التجارب التي حصل عليها، يتبين لنا أن كمية مادة الجبس، البوزلان المضافان والتركيب الكيميائي للأسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) للمونة المختبرة

كلمة مفتاحية: الجبس، كبريتات الكالسيوم، المضافات المعدنية، البوزلان، الترطيب، الخواص الميكانيكية.