

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par:

Mr. BOUALI Khaled

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en:

Filière: Génie des Matériaux

Option: Physique et Mécanique des Matériaux

**Elaboration et caractérisation thermomécanique des
mortiers à base d'ajouts de déchets de briques
réfractaires**

Devant le jury composé de:

| | | | | |
|---------------|------------|------|-------|-----------|
| Mr. HAMIANE | Messaoud | Pr | UMBB | Président |
| Mr. BENMOUNAH | Abdelbaki | Pr | UMBB | Examineur |
| Mr. SAFRI | Abdelhamid | MC/A | USTHB | Examineur |
| Mr. SAIDI | Mohamed | MC/A | UMBB | Encadreur |

Année Universitaire: 2013/2014

Table des matières

| | |
|--|----|
| TABLE DES MATIERES | 1 |
| LISTE DES TABLEAUX | 4 |
| LISTE DES FIGURES | 6 |
| REMERCIEMENTS | 8 |
| RESUME | 9 |
| INTRODUCTION GENERALE | 12 |
| PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 15 |
| CHAPITRE I: BIBLIOGRAPHIE SUR LES CIMENTS AUX AJOUTS | 16 |
| I.1. Historique | 17 |
| I.2. Définition du ciment | 18 |
| I.3. Constituants du ciment..... | 18 |
| I.4. Matières premières principales du ciment..... | 19 |
| I.5. Matières auxiliaires..... | 21 |
| I.6. Ajouts cimentaires | 22 |
| I.6.1. Définition des ajouts cimentaires | 22 |
| I.6.2. Les ajouts cimentaires..... | 23 |
| I.7. Définition du ciment portland..... | 23 |
| I.8. Etapes de fabrication du ciment portland | 24 |
| I.9. Composition chimique et minéralogique du clinker | 27 |
| I.9.1. Composition chimique..... | 27 |
| I.9.2. Composition minéralogique..... | 28 |
| I.10. Catégories des ciments..... | 29 |
| I.10.1. Classification des ciments | 29 |
| I.10.2. Types des ciments les plus courants | 29 |
| I.11. Caractéristiques du ciment | 31 |
| I.11.1. Caractéristiques physico-chimiques..... | 31 |
| I.11.2. Caractéristiques chimiques..... | 33 |
| CHAPITRE II: LES MORTIERS ET LA VALORISATION DES DECHETS | 34 |
| II.1. Les mortiers | 35 |
| II.1.1. Définition | 35 |
| II.1.2. Constituants des mortiers..... | 35 |
| II.1.2.1. Le Liant | 35 |
| II.1.2.2. Le sable | 36 |
| II.1.2.3. L'eau de gâchage | 38 |
| II. 1.2.4. Les additifs | 38 |
| II.1.3. Différents types des mortiers | 42 |
| II.1.3.1. Les mortiers de ciment | 42 |
| II.1.3.2. Les mortiers de chaux | 42 |
| II.1.3.3. Les mortiers bâtards | 42 |
| II.1.3.4. Mortier réfractaire | 43 |
| II.1.3.5. Mortier rapide | 43 |
| II.1.3.6. Mortier industriel | 43 |
| II.1.4. Classification des mortiers | 43 |
| II.1.4.1. Classification générale des mortiers..... | 43 |
| II. 1.4.2. Classes des mortiers..... | 45 |
| II.1.5. Préparation des mortiers..... | 45 |
| II.1.6. Caractéristiques des mortiers | 46 |

| | |
|---|----|
| II.2. La valorisation des déchets | 49 |
| II.2.1. Introduction | 49 |
| II.2.1.1. Des solutions écologiques et pérennes | 49 |
| II.2.1.2. Le rôle actif de l'industrie du ciment et du béton | 49 |
| II.2.1.3. Le maintien de la qualité | 49 |
| II.2.1.4. Un double bénéfice pour l'environnement | 49 |
| II.2.2. Valorisation des déchets en Algérie | 50 |
| II.2.2.1. Des métiers de l'environnement à apprendre | 50 |
| II.2.2.2. La part de responsabilité des industriels | 51 |
| II.2.3. Les déchets inertes | 51 |
| II.2.3.1. Matériaux autorisés | 51 |
| II.2.3.2. Matériaux interdits | 52 |
| II.2.3.3. Le recyclage | 52 |
| CHAPITRE III: LES MATERIAUX REFRACTAIRES | 54 |
| III.1. Historique | 55 |
| III.2. Définition des produits réfractaires | 56 |
| III.3. Différentes familles des produits réfractaires | 57 |
| III.3.1. Les réfractaires façonnés | 57 |
| III.3.2. Les réfractaires non-façonnés | 58 |
| III.4. Différentes catégories des matériaux réfractaires | 58 |
| III.5. Classification des produits réfractaires | 59 |
| III.5.1. Selon la composition chimique | 59 |
| III.5.2. Selon la structure | 60 |
| III.5.3. Selon la réfractérité | 60 |
| III.5.4. Selon la fabrication | 60 |
| III.6. Briques réfractaires | 60 |
| III.6.1. Définition | 60 |
| III.6.2. Principaux types de briques réfractaires | 61 |
| III.7. Effet d'une source de chaleur sur les briques réfractaires | 63 |
| III.8. Principe de fabrication des briques réfractaires | 64 |
| III.10. Réfractaires silico-alumineux | 65 |
| III.10.1. Propriétés des réfractaires silico-alumineux | 65 |
| III.10.2. Caractérisation des réfractaires silico alumineux | 65 |
| III.10.3. Brique réfractaire à base de bauxite | 67 |
| III.10.3.1. La bauxite | 67 |
| III.10.3.2. Briques haute teneur en alumine à base de bauxite (HTA) | 68 |
| III.10.3.2.1. Caractéristiques des briques HTA | 68 |
| III.10.3.2.2. Microstructure des briques HTA | 69 |
| III.11. Réfractaires de magnésie | 70 |
| PARTIE EXPERIMENTALE | 71 |
| CHAPITRE IV: CARACTERISATION DES CONSTITUANTS | 72 |
| IV.1. Introduction | 73 |
| IV.2. Matériau | 73 |
| IV.3. Caractérisation des constituants | 73 |
| IV.3.1. Ciment | 73 |
| IV.3.2. Sable normalisé | 74 |
| IV.3.3. Eau de gâchage | 75 |
| IV.3.4. Déchets de briques réfractaires | 76 |
| IV.3.4.1. Déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle | 76 |
| IV.3.4.2. Déchet de brique réfractaire haute teneur en alumine (HTA) | 78 |
| CHAPITRE V: FORMULATION DES MORTIERS A BASE D'AJOUTS DE DECHETS DE BRIQUES REFRACTAIRES | 80 |
| V.1. Introduction | 81 |

| | |
|--|-----|
| V.2. Elaboration des différents mortiers | 81 |
| V.2.1. Composition du mortier..... | 81 |
| V.2.2. Détermination de la quantité d'eau | 81 |
| V.2.3. Malaxage de mortier | 82 |
| V.2.4. Préparation des éprouvettes..... | 82 |
| V.3. Différentes formulations réalisées..... | 83 |
| V.3.1. Appellations des différentes formulations..... | 83 |
| V.3.2. Proportions des constituants de chaque formulation..... | 83 |
| CHAPITRE VI: ETUDE DES PROPRIETES THERMOMECHANQUES DES DIFFERENTES FORMULATIONS..... | 86 |
| VI.1. Introduction..... | 87 |
| VI.2. Caractérisation des différents mortiers à l'état frais..... | 87 |
| VI.2.1. L'étalement | 87 |
| VI.2.2. La masse volumique | 87 |
| VI.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci..... | 89 |
| VI.3.1. Résistances mécaniques à la flexion et compression | 89 |
| VI.3.2. Discussion des résultats des essais de flexion et compression | 93 |
| VI.3.2. Comportement thermique des différents mortiers | 94 |
| VI.3.2.1. But du traitement thermique..... | 94 |
| VI.3.2.2. Méthodologie | 94 |
| VI.3.2.3. Variation de masses des éprouvettes en fonction de température..... | 95 |
| VI.3.2.4. Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie | 95 |
| VI.3.2.5. Analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD-TG)..... | 97 |
| VI.3.2.6. Interprétation des résultats d'analyse ATD-TG..... | 99 |
| VI.3.3. Analyse par diffractométrie des rayons X..... | 100 |
| VI.3.3.1. Interprétation des analyses par diffractométrie des rayons X | 102 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | 103 |
| I. CONCLUSION GENERALE..... | 104 |
| II. PERSPECTIVES..... | 105 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 106 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: Composition chimique du gypse..... | 19 |
| Tableau I.2: Teneurs moyennes des oxydes constitutifs du clinker..... | 28 |
| Tableau I.3: Composition minéralogique du clinker..... | 28 |
| Tableau I.4: Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants.... | 33 |
| Tableau II.5: Différentes actions des adjuvants..... | 39 |
| Tableau II.6: Dosages des mortiers..... | 45 |
| Tableau III.7: Différents types des produits réfractaires..... | 59 |
| Tableau III.8: Classes et masses volumiques des briques courantes..... | 61 |
| Tableau III.9: Dimensions et résistances des briques..... | 62 |
| Tableau III.10: Coefficient linéaire moyen (entre 20 à 1000°C)..... | 67 |
| Tableau III.11: Compositions de la bauxite calcinée suivant les sites d'extraction du minerai..... | 68 |
| Tableau III.12: Composition chimique des briques HTA..... | 68 |
| Tableau III.13: Propriétés physiques des briques HTA..... | 69 |
| Tableau IV.14: Propriétés physiques du ciment de S-E-G..... | 73 |
| Tableau IV.15: Propriétés mécaniques du ciment de S-E-G..... | 73 |
| Tableau IV.16: Analyse minéralogique du ciment de S-E-G..... | 74 |
| Tableau IV.17: Analyse chimique du ciment de S-E-G..... | 74 |
| Tableau IV.18: Composition granulométrique du sable de référence CEN..... | 74 |
| Tableau IV.19: Caractéristiques physico-chimiques et organiques de l'eau de gâchage..... | 76 |
| Tableau IV.20: Analyse minéralogique d'eau utilisée..... | 76 |
| Tableau IV.21: Analyse chimique de la brique réfractaire magnésie-spinelle avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN..... | 77 |
| Tableau IV.22: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle par FX..... | 77 |
| Tableau IV.23: Caractéristiques physiques de la brique réfractaire magnésie-spinelle avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN..... | 77 |
| Tableau IV.24: Analyse chimique de la brique réfractaire HTA avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN..... | 78 |
| Tableau IV.25: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire HTA par FX..... | 78 |
| Tableau IV.26: Caractéristiques physiques de la brique réfractaire HTA avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon la norme selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN..... | 79 |
| Tableau V.27: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 83 |
| Tableau V.28: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 84 |
| Tableau V.29: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 84 |
| Tableau V.30: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 85 |
| Tableau VI.31: Masses volumiques des différents mortiers..... | 88 |
| Tableau VI.32: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 89 |
| Tableau VI.33: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 90 |
| Tableau VI.34: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 91 |

| | |
|---|-----------|
| Tableau VI.35: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA. | 92 |
| Tableau VI.36: Variations de masse des éprouvettes ayant subi un traitement thermique. | 95 |
| Tableau VI.37: Pertes de masse des éprouvettes ayant subi un traitement thermique..... | 95 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Différents types d'ajouts cimentaires. | 22 |
| Figure I.2: Schéma de fabrication du ciment portland selon les différentes voies. | 24 |
| Figure I.3: Broyeur sécheur à boulets. | 25 |
| Figure I.4: Schéma descriptif des différentes phases de cuisson. | 26 |
| Figure I.5: Grains polycristallins d'un ciment anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchiée sur section polie légèrement attaquée par HNO ₃): 1=C ₃ S; 3=C ₂ S; 4=C ₃ A+C ₄ AF..... | 27 |
| Figure II.6: Constituants des mortiers. | 35 |
| Figure II.7: Sable roulé (naturel)..... | 37 |
| Figure II.8: Sable concassé (Artificiel). | 37 |
| Figure II.9: Différents ajouts cimentaires..... | 41 |
| Figure II.10: Une calcite dans le système rhomboédrique..... | 41 |
| Figure II.11: Le gypse..... | 42 |
| Figure II.12: Table à secousses..... | 46 |
| Figure II.13: Principe de fonctionnement du maniabilimètre..... | 46 |
| Figure II.14: Volume quelconque. | 48 |
| Figure II.15: Volume unitaire. | 48 |
| Figure III.16: Diagramme de phase SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO. | 58 |
| Figure III.17: Briques pleines et perforées. | 61 |
| Figure III.18: Briques creuses comprimées par voie demi-humide. | 63 |
| Figure III.19: Transfert de chaleur entre les parois. | 64 |
| Figure III.20: Schéma de fabrication des briques réfractaires. | 64 |
| Figure III.21: Microstructure d'une brique réfractaire HTA. | 69 |
| Figure IV.22: Courbe granulométrique du sable normalisé. | 75 |
| Figure IV.23: Déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle avant et après utilisation..... | 76 |
| Figure IV.24: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 77 |
| Figure IV.25: Déchet de brique réfractaire HTA avant et après utilisation..... | 78 |
| Figure IV.26: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire HTA..... | 79 |
| Figure V.27: Constituants des mortiers. | 81 |
| Figure V.28: Malaxeur programmable avec la table à choc..... | 82 |
| Figure V.29: Aplatissement des moules..... | 82 |
| Figure V.30: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 84 |
| Figure V.31: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 84 |
| Figure V.32: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 85 |
| Figure V.33: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 85 |
| Figure VI.34: Masses volumiques des différents mortiers..... | 88 |
| Figure VI.35: Appareil de flexion-compression..... | 89 |
| Figure VI.36: Résultats des essais de flexion en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle. | 89 |
| Figure VI.37: Résultats des essais de compression en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle. | 90 |
| Figure VI.38: Résultats des essais de flexion en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle..... | 90 |
| Figure VI.39: Résultats des essais de compression en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle. | 91 |
| Figure VI.40: Résultats des essais de flexion en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figure VI.41: Résultats des essais de compression en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 92 |
| Figure VI.42: Résultats des essais de flexion en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 92 |
| Figure VI.43: Résultats des essais de compression en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA..... | 93 |
| Figure VI.44: Profil thermique subi par les éprouvettes. | 94 |
| Figure VI.45: Eprouvettes sans avoir subi un traitement thermique. | 94 |
| Figure VI.46: Eprouvette SbAl30% ayant subi un traitement thermique à 1400°C. | 95 |
| Figure VI.47: Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie. | 96 |
| Figure VI.48: Analyse ATD-TG d'un échantillon de Ref sans traitement thermique. | 97 |
| Figure VI.49: Analyse ATD-TG d'un échantillon de SbAl30% sans traitement thermique. | 98 |
| Figure VI.50: Analyse ATD-TG d'un échantillon de SbAl30% avec traitement thermique..... | 98 |
| Figure VI.51: Analyse ATD-TG d'un échantillon de déchet de brique réfractaire HTA. | 99 |
| Figure VI.52: Spectre de diffraction d'un échantillon de Ref sans avoir subi le traitement thermique.... | 100 |
| Figure VI.53: Spectre de diffraction d'un échantillon de SbAl30% sans avoir subi le traitement thermique. | 101 |
| Figure VI.54: Spectre de diffraction d'un échantillon de SbAl30% ayant subi le traitement thermique à 1400°C. | 101 |

Remerciements

Ce travail a été réalisé pour sa plus grande partie au Laboratoire des essais physico-mécaniques de la cimenterie de Sour El Ghozlane et en collaboration avec le Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (C.E.T.I.M).

Mes premiers remerciements iront à Monsieur Mohamed SAIDI, qui a encadré ce travail, notamment pour la confiance et l'indépendance qu'il m'a accordé mais également pour ses conseils avisés et l'orientation qu'il a su donné au mémoire dans les moments critiques, sans oublier ses qualités humaines formidables, son soutien permanent et son expérience dont j'ai eu l'honneur de profiter à de nombreuses reprises.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, à Monsieur Messaoud HAMIANE, Professeur à l'Université de Boumerdes pour avoir assumé la lourde responsabilité de présider le jury, pour son aide précieuse et ses conseils avisés. Ensuite, à Monsieur Abdelbaki BENMOUNAH, Professeur à l'Université de Boumerdes, et à Monsieur Abdelhamid SAFRI, Maître de conférences à l'Université de Bab Ezzouar pour m'avoir fait le plaisir d'examiner ce travail en tant que membres du jury.

J'en profite pour remercier tous le personnel de l'Unité de Recherche, Matériaux, Procédés et Environnement (UR-MPE). Je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail. Je pense notamment à Monsieur Brahim AICHOUN, Responsable du laboratoire de la cimenterie de Sour El Ghozlane, pour sa gentillesse et son aide. Je remercie également Monsieur Mohand Arezki TEFFAHI, sous directeur responsable des laboratoires analytiques au niveau du C.E.T.I.M, pour sa contribution et son aide pour les analyses des rayons X.

Ma reconnaissance ira aussi à ma chère famille et à mes amis pour leur amour et leur soutien dans les moments difficiles.

Résumé

Le développement des matériaux de construction nouveaux est un problème d'actualité où les chercheurs tentent de trouver des matériaux adéquats et à bon marché en fonction du domaine d'utilisation. De plus en plus l'industrie du ciment et du béton va faire usage d'un certain nombre de produits secondaires plus communément appelés ajouts minéraux. Ces ajouts minéraux sont essentiellement des résidus d'autres industries ou des produits naturels de faible valeur commerciale qui ne présentent par eux-mêmes des propriétés hydrauliques, mais qui une fois combinés au ciment arrivent à créer des liens aussi fort que les silicates de chaux hydratés du ciment portland. Le présent travail a pour but principal de contribuer à la valorisation de déchets de briques réfractaires dans la fabrication des mortiers et bétons. Parmi toutes les industries lourdes consommatrices de réfractaires, on peut citer la sidérurgie, la pétrochimie, métallurgie, l'industrie du ciment, du verre et de la céramique. Nous nous intéresserons dans cette étude sur:

- La récupération de ces déchets de briques réfractaires, de durée de vie limitée, utilisées dans le procédé de cuisson pour la fabrication du clinker,
- Le broyage et à la caractérisation physico-chimique de ces déchets.
- La formulation des différents mortiers, à la caractérisation des différents constituants et à la caractérisation des mortiers frais.
- l'optimisation des différentes formulations et à la caractérisation des ces mortiers durcis surtout sur le plan thermomécanique.

La valorisation et l'utilisation des déchets de briques réfractaires comme ajouts dans le mortier et béton peuvent contribuer à surmonter le déficit en agrégats et à améliorer leurs caractéristiques notamment à des températures élevées.

Mots clés: valorisation de déchets, briques réfractaires, mortiers, thermomécanique.

Abstract

The development of new building materials is a current problem where researchers are trying to find the right materials and cheaply depending on the area of use. Increasingly the cement and concrete industry will make use of a number of secondary products commonly called mineral additives. These mineral additives are essentially residues of other industries or natural products of low value which don't present themselves hydraulic properties, but when combined with cement are able to create links as hard as Portland cement hydrated calcium silicates. The main purpose of this work is to contribute to the recovery of waste refractory brick in the manufacture of mortars and concretes. Of all the industries heavy consumers of refractory include steel, petrochemical, metallurgy, cement, glass and ceramics industry. We focus in this study at:

- Recovery of waste refractory brick, limited life, used in the cooking process for the manufacture of clinker,
- Grinding and physicochemical characterization of these wastes.
- Formulation of different mortars, characterization of the various constituents and fresh mortars.
- Optimization of different formulations and characterization of mortars cured especially on the thermomechanical.

Recovery and use of waste refractory brick as additions in mortar and concrete can help to overcome the deficit in aggregates and improve their characteristics, particularly at high temperatures.

Keywords: recovery of waste, refractory brick, mortars, thermomechanical

ملخص

أصبح تطوير مواد بناء جديدة مشكل الساعة حيث يسعى الباحثون لإيجاد مواد مناسبة غير مكلفة تتماشى مع مجال الاستعمال. استخدام المواد الإضافية في صناعة الإسمنت والخرسانة في تزايد مستمر ويُطلق غالباً على هذه المواد مضافات معدنية. تتمثل هذه المضافات المعدنية في مخلفات الصناعات الأخرى أو مواد طبيعية ذات قيمة تجارية منخفضة حيث لا تتمتع في حد ذاتها بخصائص هيدروليكية، وإنما بمجرد اقترانها بالإسمنت تصبح قادرة على تكوين روابط أكثر قوة من سيليكات الجير الهيدروليكية الإسمنتية. الهدف الأساسي من هذا العمل هو الإسهام في إعادة استغلال الأجر المقاوم للحرارة المستعمل لاستخدامه في تصنيع الملاط والخرسانة. من بين جميع الصناعات الثقيلة المستهلكة للمواد المقاومة للحرارة، نجد صناعة الحديد والصلب، البيتروكيماويات، المعادن، الإسمنت، الزجاج والخزف. كما سندهم في هذه الدراسة بمايلي:

- استرجاع بقايا الأجر المقاوم للحرارة المستعمل في تكنولوجيا صناعة الكنكر.
- طحن وإجراء وصف فزيائي كميائي لهذه البقايا.
- تحضير مختلف أنواع الملاط، وصف مختلف المكونات وأنواع الملاط الجديدة قبل تصلبها.
- السعي للحصول على تركيبات ملاط مثالية وإجراء وصف لهذه الأخيرة في حالتها الصلبة خاصة في الجانب الحراري الميكانيكي.

استغلال واستعمال بقايا الأجر المقاوم للحرارة كمضافات في الملاط والخرسانة يمكن أن يساهم في تجاوز نقائص المكونات وتحسين خصائصهم خاصة في درجات حرارة عالية.

كلمات مفتاحية: إعادة استغلال، الأجر المقاوم للحرارة، الملاط، الحراري الميكانيكي.

Introduction générale

Introduction générale

Les mortiers et les bétons ont connu un essor important ces dernières années en Algérie dans de divers domaines à savoir: bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales,... Composés essentiellement à partir de liants hydrauliques, ce sont des systèmes rendus complexes par l'incorporation de nombreux adjuvants, sous-produits et déchets issus des industries de fabrication des matériaux de construction, dont les effets, bénéfiques et parfois antagonistes ne sont pas encore totalement compris.

Dans ce contexte, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de ces déchets, dans le but économique (réduire le coût de réalisation), écologique (éliminer ces déchets de l'environnement) et technique (améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers ou des bétons). Parmi ces déchets, les déchets de briques réfractaires peuvent être broyés et utilisés comme ajouts pour la fabrication des mortiers et des bétons qui peuvent être exploités dans certains domaines comme:

- Montage et assemblage des cheminées à foyers ouverts ou fermés, des barbecues, des fours à pains ou à pizzas à usage privatif.
- Réalisation de conduits d'évacuation des fumées.
- Montage et jointoiement des blocs en béton creux ou pleins, éléments en terre cuite, briques réfractaires.

L'étude décrite dans ce mémoire a pour objectif de faire le point sur la valorisation des déchets de briques réfractaires qui sont en abondance dans les cimenteries et les briqueteries algériennes pour la confection des mortiers afin d'améliorer certaines propriétés physico-mécaniques et thermiques. Un autre aspect intéressant est l'observation et l'analyse des microstructures pour mieux comprendre les différents phénomènes qui se produisent.

Ceci nous a amené à étudier, dans un premier temps, les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des différents constituants utilisés pour l'élaboration des mortiers, dans la seconde partie de ce mémoire nous avons formulé et considéré ces derniers à l'état frais et durci sur le plan physico-mécanique. Enfin, la dernière partie a comporté un programme de caractérisations thermiques des différents mortiers à des températures variant de 20°C jusqu'à 1400°C selon un profil thermique bien déterminé, suivi d'une analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD-TG), et pour rendre les résultats obtenus plus

significatifs nous étions obligés d'effectuer une analyse par diffractométrie de rayons X (DR-X) pour quelques échantillons représentatifs prélevés des mortiers formulés (Ref, SbAl30%).

Les résultats de cette étude contribuent à une meilleure connaissance de comportement sous hautes températures plus particulièrement pour le mortier SbAl30%.

Partie bibliographique

Chapitre 1

**Bibliographie sur les ciments aux
ajouts**

I.1. Historique

Le terme *ciment* est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé; il s'est toutefois restreint aux seuls liants dits hydrauliques – parce qu'ils sont capables de durcir sous l'eau –, dont le durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de chaux [1].

I.1.1. Origines

Dans la préhistoire et au début de l'antiquité, les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélasgiques de Grèce ou les murs incas. À Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les égyptiens utilisèrent pour les pyramides, notamment, un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. Les grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le Ier siècle avant J.-C., en l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées. Ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permit de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports.

Aucun progrès ne fut accompli sur les liants pendant le moyen âge, dont les principales constructions – cathédrales, châteaux... – doivent leur réussite surtout aux progrès réalisés dans l'art de tailler et d'assembler les pierres.

C'est seulement au XVIIIème siècle, les procédés de cuisson s'améliorant, que des chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produites. En 1756, l'anglais Smeaton, en mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtint un mortier aussi dur que la pierre de Portland. Cette élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi fut introduite progressivement dans le langage l'appellation de ciment Portland [1].

I.1.2. Deuxième naissance et industrialisation

En 1817, le français Louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur.

En 1824, l'anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de Portland, mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs. C'est seulement en 1845 que l'anglais

Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIX^{ème} siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'américain Bogue au XX^{ème} siècle.

En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente: le ciment alumineux fut découvert par Bied en 1908 [1].

I.1.3. Naissance de l'industrie cimentière

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement [2].

I.2. Définition du ciment

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier [3].

I.3. Constituants du ciment

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage. Ils se composent de:

I.3.1. Le clinker

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant *scorie*. Il est obtenu en cuisant, vers 1450°C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile, appelés crus. L'argile, principalement composée de silicates d'alumine, se scinde sous l'effet de la chaleur en ses constituants, silice et alumine, qui se combinent ensuite à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

I.3.2. Le gypse

Le gypse dénommé aussi gypsite est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre.

Tableau I.1: Composition chimique du gypse.

| Composant | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Cl ⁻ |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| % | 10,05 | 2,99 | 1,55 | 26,90 | 3,86 | 0,41 | 0,05 | 30,33 | 0,007 |

I.3.3. Les additifs

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1% [4].

I.4. Matières premières principales du ciment

Les matières premières principales sont 80% de calcaire et 20% d'argile. Ces matières premières sont présentes partout. Des roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux, ont une composition qu'est proche de cette composition. Des correcteurs, minerai de fer qui apporte Fe₂O₃, bauxite (Al₂O₃), sable (SiO₂) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée.

I.4.1. Les calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée d'au moins de 50% de calcite et pouvant contenir de la dolomite, de l'aragonite. Les calcaires se forment soit par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires (coraux, bivalves, foraminifères,...), soit par précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium.

Ce dernier est utilisé en un poids qui est trois fois supérieur à celui d'argile, on le retrouve sous les formes suivantes:

- **Marbre:** C'est une matière pure de composition chimique: CaCO_3 ou $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$.
- **Calcaires durs:** possèdent une structure microcristalline et contiennent le plus souvent des impuretés.
- **Craie:** C'est une roche tendre blanche et micro granulaire, elle est composée de cristaux fins de calcite organogène de teneur en CaCO_3 atteint souvent 98 à 99% sous forme de tuff-calcaire et les types lithologiques suivants:
 - **Calcaire cristallin:** représenté par des cristaux de calcite qui peuvent être formés par voie chimique de dimensions variables (0,01 à 2,0mm), ces calcaires sont formés lors de la précipitation des solutions.
 - **Calcaire organogène:** constitué de squelette ou de coquille d'animaux ou de végétaux, constitués de calcite et d'aragonite.
 - **Calcaire détritique:** formé de débris des calcaires anciens.
 - **Calcaire à structure mélangée:** variété intermédiaire entre les trois calcaires cités, ils sont très répandues dans la nature.

I.4.2. Les argiles

L'argile est un minéral (plus exactement une famille des minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllo-silicates (silicates en feuillets). Leur structure est identifiable par étude aux rayons X; elle se caractérise par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques ou octaédriques. Dans l'espace entre les feuillets, ou espace interfoliaire, se placent divers cations comme K, Na, Ca. L'argile est généralement issue de l'altération par l'eau des autres silicates (sauf le quartz). C'est pour cette raison qu'on le trouve systématiquement dans les sols et les formations superficielles. Minéral détritique ultra fin, on le trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires. Mélangé à un autre minéral comme la calcite il formera de la marne, sa formule générale est la suivante: $\text{Al}_2\text{O}_3.n\text{SiO}_2.m\text{H}_2\text{O}$.

- **Classification des argiles**

Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique on peut classer les argiles en différents groupes:

- Groupe de kaolin: $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de l'halloysite: $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.4\text{H}_2\text{O}$
- Groupe de la montmorillonite: $\text{Al}_2\text{O}_3.4\text{SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$

- Groupe des minéraux argileux micacés (séricite)
- Groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite)

I.4.3. Les marnes

C'est une roche sédimentaire formée d'un mélange de carbonate de calcium (le calcaire) et d'argile comptant pour 35 à 65%. Les marnes ont une composition chimique intermédiaire entre les calcaires marneux d'argile (5 à 35%) et les argiles calcareuses ou marnes argileuses (65 à 90%). Les marnes sont très répandues dans la nature, elles contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des rapports de calcaires ou d'argiles afin de parfaire leur dosage, les calcaires argileux sont préférés pour la fabrication des ciments puisqu'ils se présentent comme mélange naturel de calcaire et de substance argileuse.

I.5. Matières auxiliaires

Leur utilisation est sans cesse croissante, on distingue:

- Les matériaux correctifs, qui sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .
- Les régulateurs de prise du ciment.
- Les minéralisateurs.
- D'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air... [5].

I.5.1. Les matériaux correctifs

On distingue:

- Les correctifs siliceux: le sable et le grès.
- Les correctifs alumineux: bauxite ...
- Les correctifs ferrugineux: minerai de fer, pyrite grillée.

I.5.2. Les minéralisateurs

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

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

I.6. Ajouts cimentaires

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

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

I.6.1. Définition des ajouts cimentaires

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, 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, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [6].

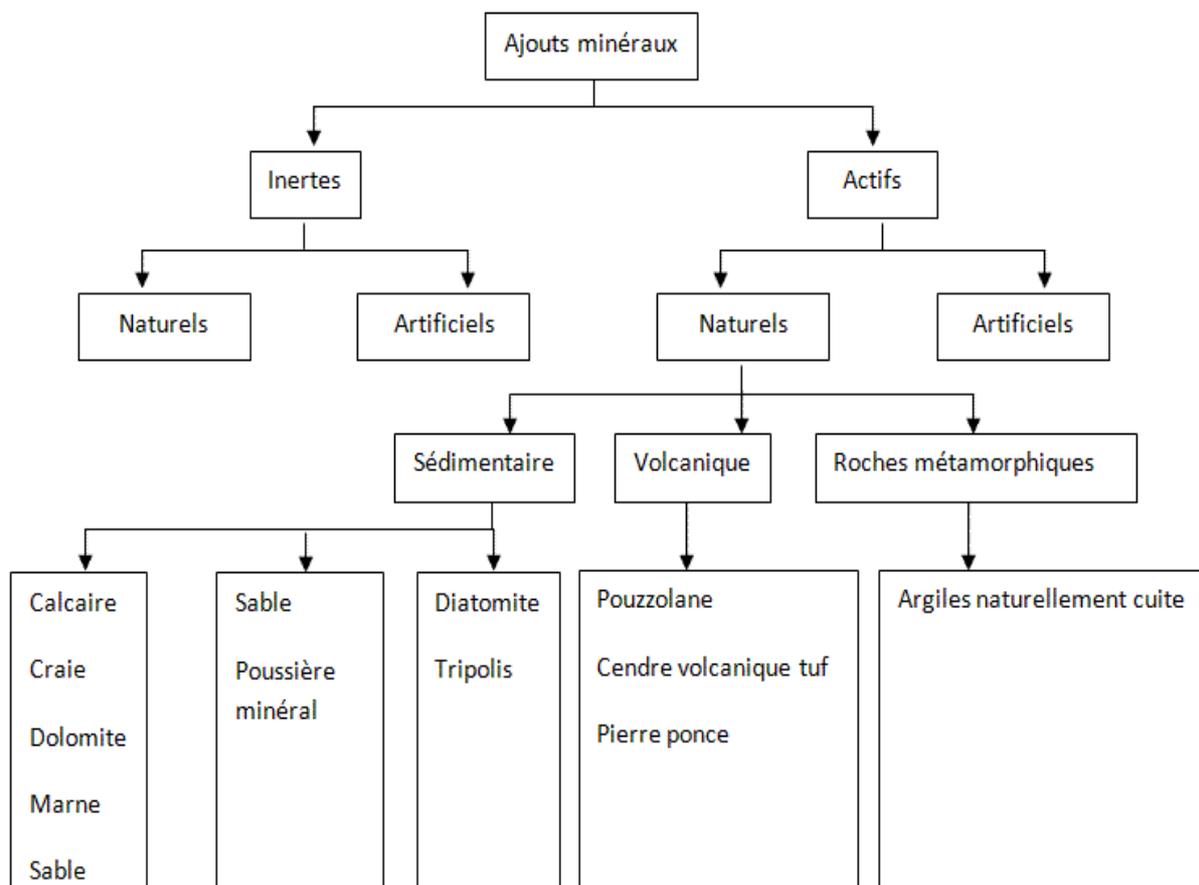


Figure I.1: Différents types d'ajouts cimentaires.

I.6.2. Les ajouts cimentaires

Les différentes variétés du ciment sont liées directement par les qualités et les proportions des différents matériaux ajoutés au clinker, selon leurs activités, on peut les classées en trois types [7].

I.6.2.1. Les fillers calcaires

Ils sont constitués du calcaire broyé. Ils jouent un rôle de remplissage. Une partie de clinker peut être remplacée sans avoir un impact sur les propriétés finales par un matériau pratiquement inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates du ciment. En fait, les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ils conduisent à la formation des carboaluminates de calcium.

I.6.2.2. Les ajouts pouzzolaniques

Ils tirent leur nom des pouzzolanes, cendres volcaniques utilisées par les romains en mélange avec de la chaux pour faire leur ciment. Par extension, un matériau est dit pouzzolanique s'il conduit à des propriétés hydrauliques en mélangeant avec la chaux.

Ces ajouts peuvent être d'origine naturelle comme les matériaux d'origine volcanique ou des sous-produits industriels comme les cendres volantes obtenues par dépoussiérage des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé ou les fumées de silice, sous-produit de l'industrie du silicium.

I.6.2.3. Les ajouts hydrauliques latents

Ce sont des composés qui contiennent les principaux oxydes du clinker, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 dans des proportions telles qu'ils conduisent à la formation des hydrates similaires. Cependant, leur solubilité dans l'eau est très inférieure à celle des anhydres du clinker, de sorte qu'il est nécessaire de modifier le milieu pour qu'ils réagissent (activation). Ce sont essentiellement les laitiers granulés de haut-fourneau obtenus par trempe du surnageant de la fonte résultant de la fusion du minerai de fer.

I.7. Définition du ciment portland

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker portland, de gypse et éventuellement d'additifs telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles ... [8].

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes: $\text{CaO}=\text{C}$; $\text{SiO}_2=\text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3=\text{A}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{F}$; $\text{SO}_3=\bar{\text{S}}$; $\text{H}_2\text{O}=\text{H}$ [9].

I.8. Etapes de fabrication du ciment portland

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles: calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin de clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5%) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau, le calcaire, les cendres volantes,...

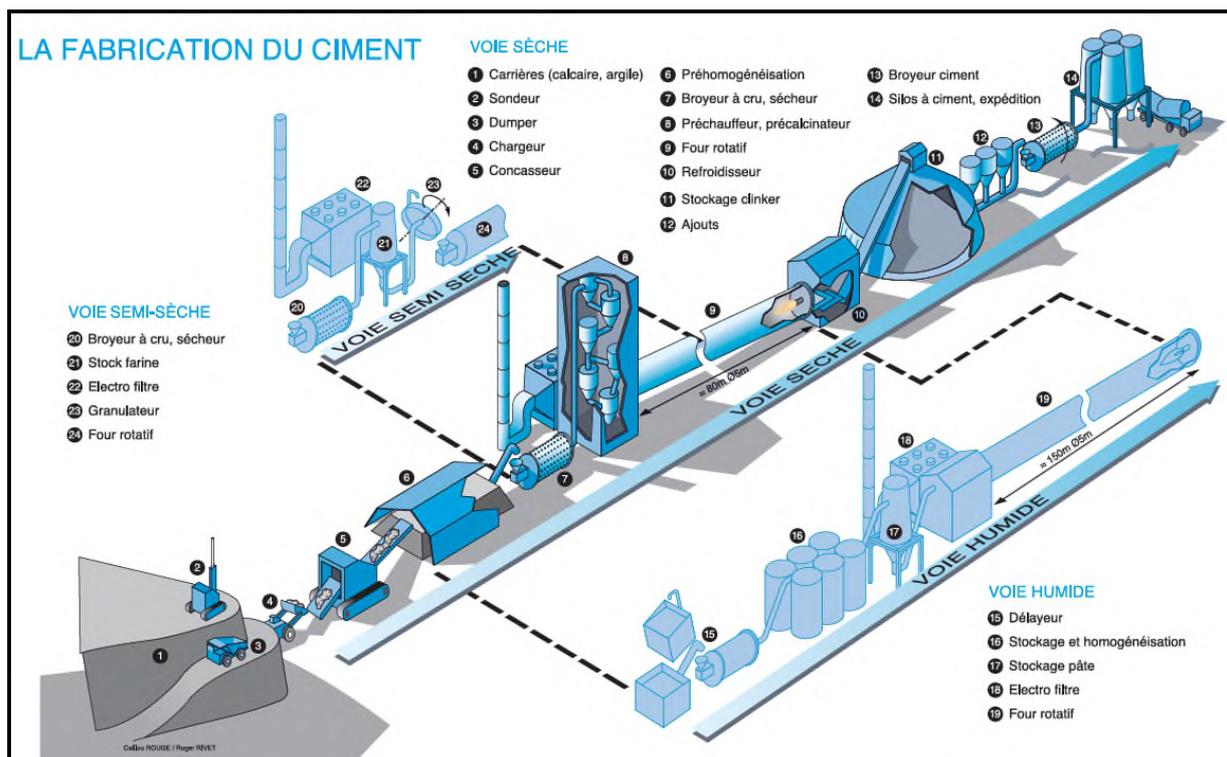


Figure I.2: Schéma de fabrication du ciment portland selon les différentes voies.

I.8.1. Extraction et préparation des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualités

constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

I.8.2. Séchage et broyage

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets comme le montre la figure I.3 ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace.

Il est possible de fabriquer un ciment portland selon trois voies: la voie humide, la voie sèche et semi-sèche.

La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en granules par humidification (voie semi sèche).

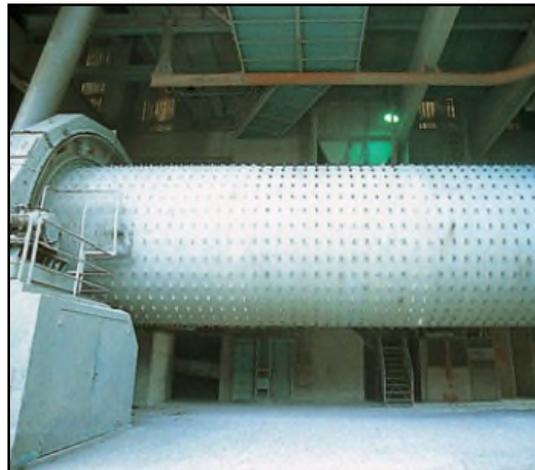


Figure I.3: Broyeur sécheur à boulets.

I.8.3. Cuisson

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6m de diamètre et de 50 à 150m de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5% de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450°C; en s'approchant de cette zone, le cru subit des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le *clinker*. Les réactions chimiques de transformation de cru dans le four sont comme suit:

- Jusqu'à 100°C: évaporation de l'eau libre.

- $T > 100^{\circ}\text{C}$: Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.
- $T > 600^{\circ}\text{C}$: Décomposition des matières argileuses. (Silice SiO_2 , Alumine Al_2O_3 , Ferrite Fe_2O_3).
- $T > 850^{\circ}\text{C}$: Décarbonatation du calcaire selon cette réaction: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- $T > 900^{\circ}\text{C}$: Commencement des processus d'interactions et de combinaisons chimiques entre la chaux (CaO) et les oxydes d'argile (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3).
- $T = 1450^{\circ}\text{C}$: Clinkérisation.

A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

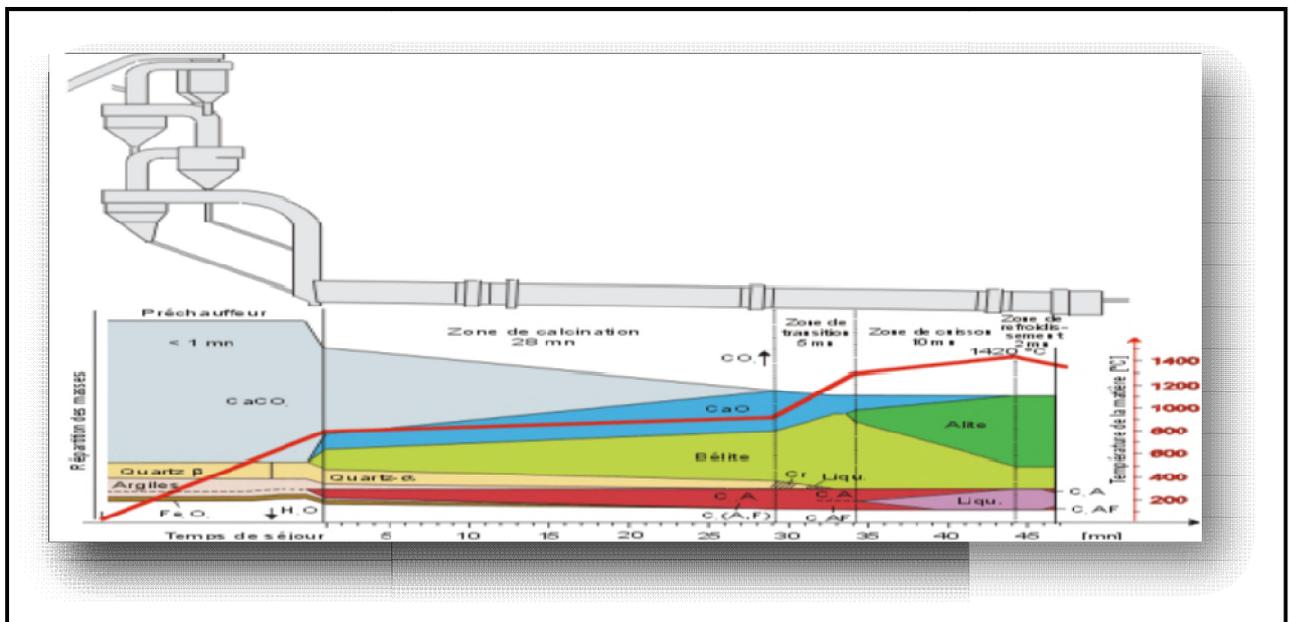


Figure I.4: Schéma descriptif des différentes phases de cuisson.

I.8.4. Broyage du ciment

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyants sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.

Le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains polycristallins de quelques dizaines de microns comme l'indique la figure I.5.

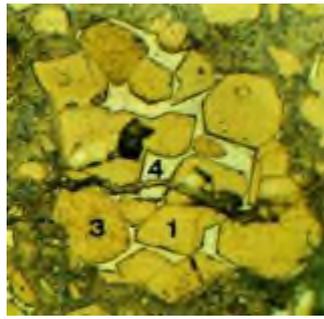


Figure I.5: Grains polycristallins d'un ciment anhydre (image obtenue par microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie légèrement attaquée par HNO_3): 1= C_3S ; 3= C_2S ; 4= $\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}$.

Les ciments aux ajouts sont obtenus par addition, lors du broyage du clinker, du gypse et des éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [10].

I.9. Composition chimique et minéralogique du clinker

I.9.1. Composition chimique

La composition chimique du clinker est comme suit [11]:

- **CaO:** Il est lié avec SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , à l'état libre on l'appelle chaux libre (CaO_l). Ce dernier provoque une inégalité de changement de volume du ciment pendant l'hydratation (expansion), la résistance du ciment augmente en cas d'augmentation de CaO liée, cependant la stabilité chimique de ce ciment diminue en milieu agressif.
- **SiO₂:** Il se combine avec le CaO en formant les silicates de calcium, un pourcentage élevé de C_2S , dans ce cas le ciment durcit lentement ainsi sa résistance augmente à long terme. L'augmentation de C_2S donne une grande durabilité au ciment surtout au milieu agressif.
- **Al₂O₃:** Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant une grande teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la couche sulfatée.
- **Fe₂O₃:** Il joue le rôle du fondant, il diminue considérablement la température de clinkerisation. Il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les creux sulfatés.
- **MgO:** Il ne doit pas dépasser les 5%, l'augmentation de ce dernier provoque l'augmentation du volume (expansion).
- **TiO₂:** Il provient de l'argile.
- **MnO₂:** Il fait partie du clinker (1,5%).
- **P₂O₅:** Il est présent sous forme d'impureté (0,2 à 0,3%), il ralentit le durcissement.

- **Na₂O** et **K₂O**: Ils représentent un faible pourcentage (0,5%), la formation des alcalis provoque la diminution de la résistance mécanique et ralentit l'hydratation.

Tableau I.2: Teneurs moyennes des oxydes constitutifs du clinker.

| Oxydes constitutifs | Teneur limite (%) | Source |
|---|-------------------|--------------------|
| CaO | 60 à 69 | Calcaire |
| SiO ₂ | 18 à 24 | |
| Al ₂ O ₃ | 4 à 8 | Argile |
| Fe ₂ O ₃ | 1 à 8 | |
| MgO | 0 à 5 | |
| Alcalis (K ₂ O et Na ₂ O) | 0 à 2 | Calcaire et argile |
| SO ₃ | 0 à 3 | |

I.9.2. Composition minéralogique

On appelle clinker le produit tel qu'il sort du four après cuisson des matières premières, ces principaux minéraux sont:

- **Alite (C₃S)**: L'alite ou le silicate tricalcique, formulé 3CaO.SiO₂ ou C₃S en notation cimentière, est le principal constituant anhydre du clinker, qui lui confère ses propriétés hydrauliques.
- **Belite (C₂S)**: La belite ou le silicate bicalcique, formulé 2CaO.SiO₂ ou C₂S en notation cimentière, est le constituant qui permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.
- **Aluminate (C₃A)**: C'est la phase qui réagit en premier lors de l'hydratation en dégageant une grande quantité de chaleur (réaction exothermique), elle contribue essentiellement à la prise de la pâte du ciment. Elle est facilement attaquable par les sulfates.
- **Ferrite (C₄AF)**: Forme la solution solide C₂A et C₂F, elle réagit moins que C₃S, son rôle est mineur dans les réactions de durcissement.

En plus de ces quatre phases le clinker peut contenir également:

- **La chaux libre (CaO_l)**: dont le pourcentage ne peut pas dépasser 2% (risque d'expansion).
- **Périclase (MgO)**: dont le pourcentage ne peut pas dépasser 5% (risque d'expansion).

Tableau I.3: Composition minéralogique du clinker.

| Teneur (%) | Conposant minéralogique |
|------------|---|
| 40 à 70 | Silicate tricalcique (C ₃ S) |
| 0 à 30 | Silicate bicalcique (C ₂ S) |
| 2 à 15 | Aluminate tricalcique (C ₃ A) |
| 0 à 15 | Ferro-aluminate tétracalcique (C ₄ AF) |

I.10. Catégories des ciments

I.10.1. Classification des ciments

La classification des ciments se fait selon trois critères [12]:

- **Selon leur composition:** CPA/CPJ/CPZ/CHF/CLK/CLC ou CEM I, II, III.
- **Selon leur résistance:** 32,5, 42,5, 52,5 N/mm².
- **Selon la vitesse de prise:** N pour une prise normale et R pour une prise plus rapide.

I.10.2. Types des ciments les plus courants

- **Ciments Portland composés (CEM II - Norme NF EN 197-1)**

Les ciments Portland composés résultent du mélange de clinker en quantité au moins égale à 65% et d'autres constituants tels que laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, fumée de silice, dont le total ne dépasse pas 35%. Ces types de ciment sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée, les routes et le béton manufacturé.

- **Ciments au laitier (Norme NF EN 197-1)**

Selon le pourcentage du laitier, il y en a trois types dont la notation est respectivement % du clinker, % du laitier de haut fourneau:

- CEM III/A 35-64 36-65
- CEM III/B 20-34 66-80
- CEM III/C 5-19 81-95

Ces ciments sont bien adaptés aux travaux suivants:

- Travaux hydrauliques, souterrains, fondations, injections.
- Travaux en eaux agressives: eaux de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures.
- Ouvrages massifs: fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages.

Les bétons de ciment au laitier sont sensibles à la dessiccation; il faut les maintenir humides pendant le durcissement.

- **Ciments à maçonner (CM - Norme NF P 15-307)**

C'est un Liant hydraulique pulvérulent fabriqué en usine et dont le développement de résistance est essentiellement due à la présence de clinker portland. Selon la résistance minimale à 28 jours, il existe trois classes de résistance (MC 5, MC 12,5 et MC 22,5). Le temps de début de prise ne doit pas être inférieur à 60 min. La teneur en SO₃ est limitée à 3,5% pour les classes 12,5 et 22,5 et à 2,0% pour la classe 5. Ces ciments, dont les résistances

sont volontairement limitées par rapport aux ciments classiques, conviennent bien pour la confection des mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis ...). Ils peuvent être également utilisés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles. Ces ciments ne conviennent pas pour les bétons à contraintes élevées ou les bétons armés. Ils ne doivent pas être employés dans les milieux agressifs.

- **Ciment prompt naturel (CNP - Norme NF P 15-314)**

Le ciment prompt naturel est obtenu par cuisson, à température modérée entre 1000 et 1200°C d'un calcaire argileux d'une grande régularité. La mouture est plus fine que celle des ciments portland. Le début de prise commence à environ 2 min, s'achève pratiquement à 4 min, mais il est plus réglable de 3 à 15 min en utilisant l'adjuvant Tempo (livré avec chaque sac de 25kg) qui ne modifie pas l'évolution du durcissement. Le ciment prompt naturel est utilisé en mortier avec un dosage de ciment double du volume de sable, et éventuellement en béton. Dans les cas d'urgences nécessitant une prise immédiate (aveuglements de voies d'eau), il est possible de l'employer en pâte pure. Parmi les nombreux emplois, on peut citer:

- Scellements.
 - Travaux spéciaux et travaux de réparation.
 - Enduits de façade (en mélange aux chaux naturelles).
 - Bétons projetés, moulages.
 - Revêtements et enduits résistants aux eaux agressives et à bon nombre d'attaques chimiques, en particulier à l'acide lactique et aux déjections (bâtiments pour l'élevage, silos).
 - Colmatage et travaux à la mer.
 - Projection, travaux souterrains.
- **Ciment alumineux fondu (CA - Norme NF P 15-315)**

Le ciment alumineux fondu résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des ciments portland (début de prise minimum 1h 30min). Il développe des résistances à court terme élevées grâce à un durcissement rapide. Il est très résistant aux milieux agressifs et acides (jusqu'à des PH de l'ordre de 4). Il est normalisé pour les travaux à la mer (PM) et en eaux à haute teneur en sulfate (ES). Une chaleur d'hydratation élevée, liée à son durcissement rapide, permet au ciment fondu d'être mis en œuvre par temps froid (jusqu'à 10°C). C'est également un ciment réfractaire (bon comportement jusqu'à 1300°C).

- **Ciments blancs**

La teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et kaolin) débarrassées de toutes traces d'oxyde de fer. Les caractéristiques sont analogues à celles de ciment portland gris (norme NF EN 197-1). Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents. La pâte peut être elle-même colorée à l'aide de pigments minéraux, ce qui fournit des bétons avec une grande variété de teintes tant pour les bétons de structure que pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs. La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats et des effets recherchés.

I.11. Caractéristiques du ciment

I.11.1. Caractéristiques physico-chimiques

Comme cela a été étudié précédemment, le ciment est essentiellement constitué de:

- Silicate tricalcique: C_3S
- Silicate bicalcique: C_2S
- Aluminate tricalcique: C_3A
- Ferro-Aluminate tétracalcique: C_4AF

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise.

- **Indice d'hydraulicité**

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique.

$$I = \frac{\textit{Fraction acide}}{\textit{Fraction basique}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

- **Prise**

On entend par la prise du ciment le phénomène d'épaississement du système: Ciment- Eau succédant au gâchage (augmentation brusque de la viscosité du mélange). La prise correspond chimiquement à une hydratation des principaux constituants et à la formation des composés hydratés assurant la cohésion de la matière.

- **Durcissement**

Le durcissement est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques transformant après la prise, le système Ciment – Eau en une masse solide résistant aux efforts mécaniques. Il y a enchevêtrement des cristaux, ce qui donne à la pâte une adhésion et une dureté, c'est le durcissement.

- **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.

- **Chaleur d'hydratation**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leur pourcentage relatif, le dégagement de chaleur est donc plus au moins important. Suivant le type de ciment, cette chaleur est comprise à 12h, approximativement, entre 65j/g pour certain CPA-CEMI.

- **Finesse de mouture**

La finesse de mouture, également appelée finesse de Blaine, exprimée en m^2/kg , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (la finesse s'exprimait auparavant en cm^2/g et il existe de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi (il ressort qu'une finesse de 300 m^2/kg correspond à 3000 cm^2/g). Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait qui accroissent par conséquent la fissuration ainsi que d'éventement du ciment.

- **Retrait**

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 4x4x16cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. La norme impose les valeurs limites à 28 jours de:

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32.5.
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R-42.5 et 42.5R.

- **Expansion**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie

libre. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

- **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 $1/10^{\text{ème}}$ de celle constatée dans l'air.

I.11.2. Caractéristiques chimiques

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

Tableau I.4: 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 |
| SO ₃ | 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% de chlorures mais dans ce cas la teneur doit être déclarée.

Chapitre 2

Les mortiers et la valorisation des déchets

II.1. Les mortiers

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon.

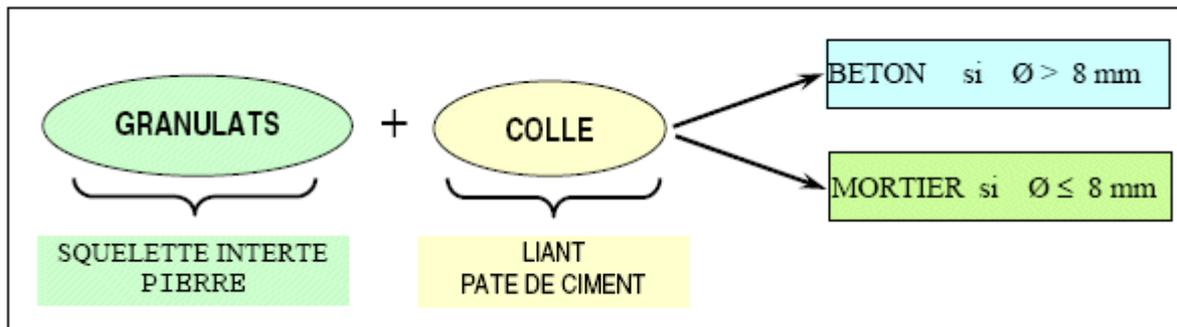


Figure II.6: Constituants des mortiers.

II.1.1. Définition

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant. Dans ce chapitre, nous présentèrent les différents types ainsi que les caractéristiques principales telles que l'ouvrabilité, la prise, le retrait,...

II.1.2. Constituants des mortiers

II.1.2.1. Le Liant

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [13].

Généralement, on peut utiliser:

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

II.1.2.2. Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements: il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut [14].

II.1.2.2.1. Origines de sable

- **Sable d'origine naturelle**

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho-scopie) au cours des temps géologiques. Les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants (masses orbitaires), on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique,

ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux.

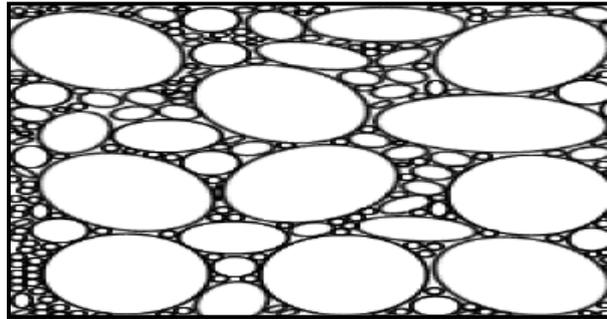


Figure II.7: Sable roulé (naturel).

- **Sable d'origine artificielle**

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane), dit aussi sable concassé, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant.

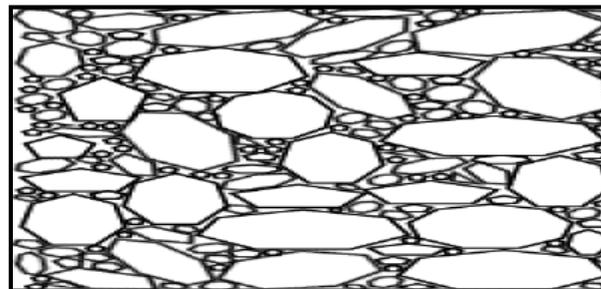


Figure II.8: Sable concassé (Artificiel).

II.1.2.2.2. Granulométrie

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

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

II.1.2.2.3. Rôle de sable dans le mortier

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant de ça, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume

comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

II.1.2.2.4. Exigences sur le sable d'usage général

Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable L'indice fourni par cet essai (ESV) doit être inférieur à 75%. Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 3mm. En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0% à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié, c'est le phénomène bien connu du *foisonnement* du sable.

II.1.2.3. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

II. 1.2.4. Les additifs

II.1.2.4.1. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les superplastifiants (haut réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé, pour les raisons suivantes:

- On ajoute les adjuvants qui servent à aérer en vue d'améliorer la maniabilité et la durabilité du mortier. Toutefois, des recherches ont démontré que des contenus d'air dans le mortier en excès de 12 % augmentent la probabilité que l'humidité y pénètre en plus de diminuer l'adhérence.
- On utilise quelque fois un antigel ou autre produit semblable pour abaisser le point de congélation du mortier afin de poser de la brique par temps froid. Toutefois, pour que cette méthode soit efficace, il faut ajouter une quantité considérable et cela diminue considérablement l'adhérence, en plus de contribuer à l'efflorescence et à l'effritement des surfaces du briquetage.
- Les accélérateurs comme le chlorure de calcium servent à accélérer l'hydratation du mortier par temps froid en vue d'éviter de chauffer les matériaux du mortier. Toutefois, le chlorure de calcium chlorite tend à corroder l'armature dans le mortier. Les accélérateurs, même ceux qui ne contiennent pas de chlorure de calcium, ont tendance à causer de l'efflorescence.
- Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique permettent habituellement d'obtenir une maçonnerie solide. Par contre, une mauvaise composition, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse ne peuvent pas être corrigées par l'emploi d'adjuvants. Selon l'effet recherché, on peut distinguer trois grandes familles d'adjuvants [15].

Tableau II.5: Différentes actions des adjuvants.

| Action | Rôle | Domaine d'emploi |
|---------------------------------------|---|--|
| La prise | Il diminue le temps ou prise ou durcissement du ciment. | Bétonnage pour temps froid, décoffrage rapide, travaux sous l'eau. |
| | Il augmente le temps de prise. | Bétonnage par temps chaud, avec coffrage glissant. |
| L'ouvrabilité | A teneur en eau égale, il augmente l'ouvrabilité du béton et mortier. | Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant. |
| | A même maniabilité, il augmente les résistances. | Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant. |
| | Il provoque un fort croissement de maniabilité. | Fondation, dalles, raideurs, béton pompé. |
| Les résistances aux agents extérieurs | Il entraîne la formation de microbulles d'air uniformément. | Béton exposé au gel, bétons routiers |
| | Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers. | Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité. |

II.1.2.4.2. Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

- **Les cendres volantes**

Il existe quatre classes qui sont :

- **Classe F:** moins de 10% de CaO.
 - Grande proportion de Silice et d'Alumine.
 - Structure: verre d'Aluminosilicate.
 - Composition: cristaux de mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), quartz, hématite, magnétite.
- **Classe C:** de 15 à 35% de CaO .
 - Plus réactif que la classe F.
- **Classe F et C:** 60 à 85% de verre.
 - 10% à 30% phases cristallines.
 - 10% carbone non calciné.
 - Diamètre de $1\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$.
- **Le laitier de haut fourneau**
 - **Laitier acide:**
 - Pourcentage élevé de la silice fondue de 50 à 60%.
 - Alumine.
 - 25 à 30% de chaux.
 - Le rapport pondéral (Silice/Chaux) ≤ 1.10 .
 - **Laitier basique:**
 - Rapport pondéral: $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 1.3$.
 - Composition chimique: 40 à 55% de CaO, 25 à 35% de SiO_2 , 12 à 25% de Al_2O_3 .
- **Les pouzzolanes**
 - **Pouzzolane naturelle:**

L'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.
 - **Pouzzolane artificielle:**

Matière essentiellement composée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et de schiste cuit.

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

- $C_3S + H_2O \rightarrow C - S - H + CH$ (réaction rapide)
- Pouzzolane + $CH \rightarrow C - S - H + C - A - H$ (réaction lente)

Les réactions qui se déroulent:

- $SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow C - S - H$ (Silicate calcique hydraté)
- $Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow C - A - H$ (Aluminate calcique hydraté)

• Les colorants

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



Figure II.9: Différents ajouts cimentaires.

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

• Les calcites

Ce sont des ajouts incolores de couleur blanche, jaune, brune, rouge, et noire. Elles se composent que de $CaCO_3$, leur densité varie entre 2,6 et 2,8, leur Indice de réfraction varie entre 1,48 et 1,65. Elles éclatent dans la flamme et libèrent CO_2 , le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl .



Figure II.10: Une calcite dans le système rhomboédrique.

- **La fumée de silice**

Elle est composée essentiellement de silice (SiO_2) avec un diamètre qui varie entre 0,1 et 2μ , elle est utilisée dans la confection des BHP et les bétons coulés sous l'eau comme elle peut être utilisée aussi comme ajout au ciment (10% du poids du ciment).

- **Les fillers**

Selon les normes françaises NF 1979, les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier ou cendre volante) naturelles ou non.

- **Le gypse**

C'est une espèce minérale qui se compose de sulfate de calcium hydraté (voir tableau I.1).



Figure II.11: Le gypse.

II.1.3. Différents types des mortiers

Les mortiers se partagent en différents types [3].

II.1.3.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1m^3 de sable.

II.1.3.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

II.1.3.3. Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

II.1.3.4. Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues ...

II.1.3.5. Mortier rapide

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

II.1.3.6. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiment.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment ...
- Mortier de réparation.

II.1.4. Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite: [16]

II.1.4.1. Classification générale des mortiers

- **Selon leur domaine d'utilisation**

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes:

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.

- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.
- **Selon la nature du liant**

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

- **Mortier de ciment portland**

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

- **Mortier de chaux**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air; ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide.

- **Mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées.

- **Mortier à base de ciment de maçonnerie**

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants.

II. 1.4.2. Classes des mortiers

- **Classe 1:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- **Classe 2:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- **Classe 3:** Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- **Classe 4:** Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 5:** Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 6:** Adjuvant modifiant des propriétés spéciales.

II.1.5. Préparation des mortiers

Les quantités nécessaires en fonction des dosages et des travaux à faire comme le montre tableaux ci-dessous: [17]

Tableau II.6: Dosages des mortiers.

| Sable | Ciment | Eau |
|-----------|-----------|------------|
| Unité (g) | Unité (g) | Unité (ml) |
| 1350 | 450 | 225 |

- Prévoir une surface de gâchage plate et assez grande, balayer cette aire de gâchage au balai de chantier, elle doit être propre et surtout sans débris végétaux.
- Installer la bétonnière ou le seau de maçon à proximité des produits.
- Prévoir un tuyau d'alimentation en eau muni d'un robinet d'arrêt.
- Déposer sur l'aire prévue à cet effet la quantité de sable.
- Verser le ciment (ou la chaux) sur le sable.
- Commencer à mélanger à la pelle le sable et le ciment. Afin d'obtenir un bon mélange, déplacer le tas deux ou trois fois. Le mélange doit être de couleur homogène.
- Creuser le tas en cratère et verser 2/3 de l'eau prévue.
- Faire tomber peu à peu les bords du cratère dans l'eau pour humidifier le mélange.
- Mélanger le tas afin de répartir l'eau. Pour homogénéiser le mélange, le déplacer deux ou trois fois comme pour le mélange à sec.
- Couper le dessus du tas de mortier avec la pelle. S'il ne se forme pas de *boudins*, ajouter un peu d'eau et mélanger à nouveau.
- Le mortier est correctement humidifié lorsqu'on passe le plat de la pelle dessus, il se lisse et l'eau remonte en surface.

II.1.6. Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont: [15]

II.1.6.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

- **Table à secousses**

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

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

Avec: D_r : diamètre final

D_i : diamètre initial

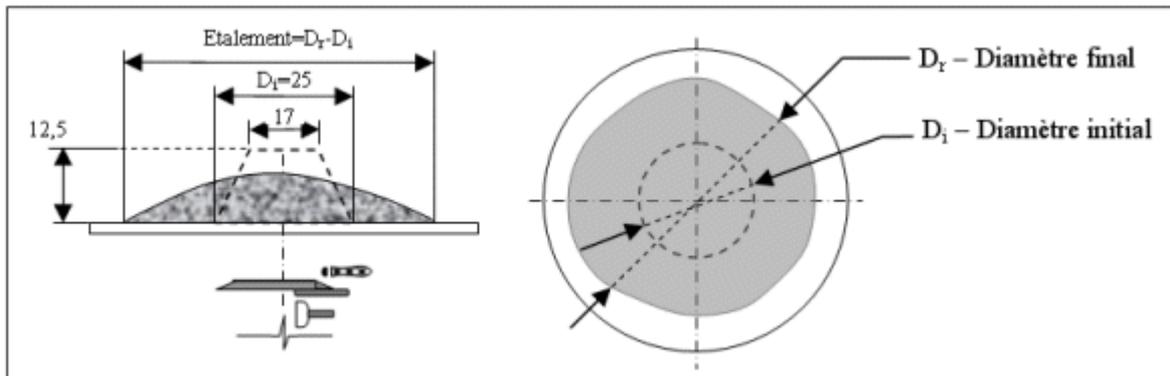


Figure II.12: Table à secousses.

- **Maniabilimètre du LCPC**

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

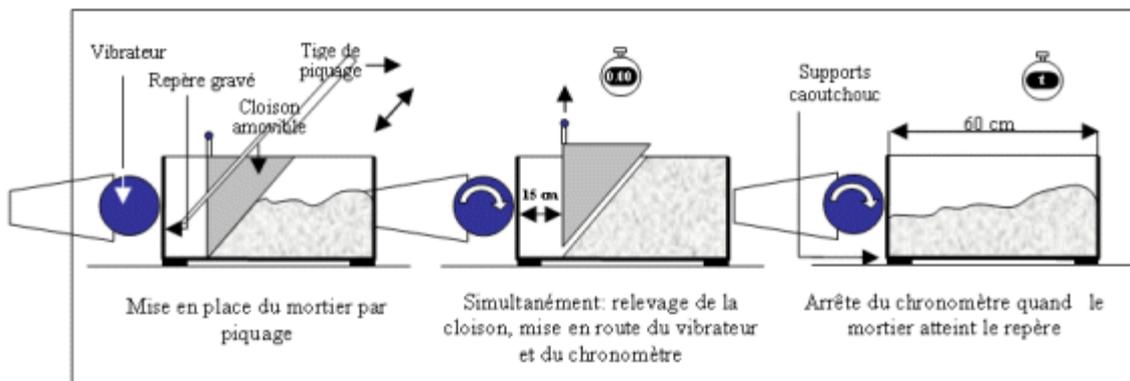


Figure II.13: Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

- **Le cône**

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

II.1.6.2. Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

II. 1.6.3. Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours.

II.1.6.4. Retraits et gonflements

- **Le Retrait**

Les retraits se mesurent sur des prismes 4x4x16cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

- **Le gonflement**

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10mm).

II.1.6.5. Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou t/m³).

II.1.6.6. Masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou t/m³).

II.1.6.7. Porosité et compacité

- **La porosité**

La porosité est le rapport du volume vide sur le volume total.

$$p = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}}$$

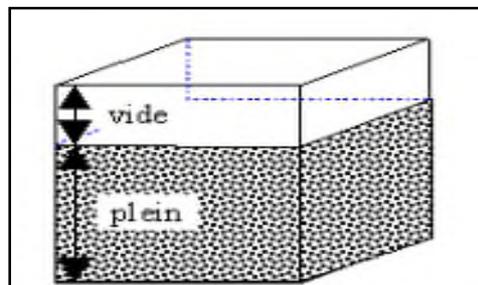


Figure II.14: Volume quelconque.

- **La compacité**

La compacité est le rapport du volume des pleins sur le volume total.

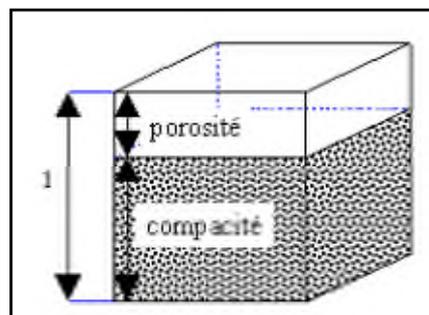


Figure II.15: Volume unitaire.

II.2. La valorisation des déchets

II.2.1. Introduction

II.2.1.1. Des solutions écologiques et pérennes

Si la meilleure des politiques réside dans la réduction des déchets à la source, une quantité énormément élevée de déchets est produite chaque année à travers le monde. Le traitement de certains d'entre eux, dont le réemploi est impossible (pneus, huiles usagées et farines animales), est un enjeu majeur pour la collectivité, les pouvoirs publics et les industriels. Il est indispensable de mettre en place des solutions écologiques et pérennes pour les valoriser sans danger pour l'environnement et les riverains. A titre d'exemple près d'un million de tonnes de déchets par an sont ainsi valorisés par l'industrie cimentière en France.

II.2.1.2. Le rôle actif de l'industrie du ciment et du béton

Grâce à la valorisation des déchets dans les cimenteries et les centrales à béton, ces industries participent depuis de nombreuses années à l'effort collectif pour la préservation des ressources naturelles et le traitement des déchets.

II.2.1.3. Le maintien de la qualité

La valorisation de déchets s'effectue dans des conditions particulièrement strictes. Ne sont ainsi utilisés que des déchets sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé de fabrication et la qualité finale des produits (ciments et bétons).

II.2.1.4. Un double bénéfice pour l'environnement

Les déchets sont utilisés de deux façons:

- En remplacement partiel des constituants de base (calcaire, argile, sable,...): c'est la valorisation matière.
- En remplacement des combustibles fossiles (coke de pétrole, charbon, fioul lourd,...): c'est la valorisation énergétique.
- **La valorisation matière**

L'industrie du ciment et du béton utilisent depuis longtemps des sous-produits issus d'autres industries comme les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres volantes en remplacement de certains constituants du ciment ou du béton sans en modifier la qualité. Traditionnellement, l'industrie cimentière emploie 80% de calcaire et 20% d'argile pour fabriquer le ciment. Or, cette argile peut être en partie remplacée par des cendres provenant de centrales thermiques au charbon. Ainsi, ces déchets n'ont pas à être éliminés par d'autres moyens.

- **La valorisation énergétique**

Depuis une vingtaine d'années, les cimentiers réduisent leur consommation d'énergie d'origine fossile (charbon, fioul lourd, coke de pétrole,...) grâce à l'utilisation de déchets sélectionnés comme combustibles. L'industrie cimentière a été sollicitée par les pouvoirs publics pour la destruction des farines animales en raison de sa capacité à assurer une valorisation totale des déchets.

II.2.2. Valorisation des déchets en Algérie

La récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir vis à vis l'environnement, les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes/an, soit un kilogramme par habitant par jour, dont près de la moitié peut être récupérée. Environ 45% de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes, il y a 1,8 million de tonnes de papiers, 1,22 millions de tonnes de plastiques, 1,6 millions de tonnes de textiles et 300.000 tonnes de métaux. Ceux-ci pour une valeur approximative de 23 milliards de DA. C'est un véritable gisement. Or, il n'existe que 247 micro-entreprises qui opèrent dans la récupération des déchets et qui ne valorisent à peine que 5 ou 6% de ce potentiel dont une partie est exportée. L'Etat mise beaucoup sur le développement d'une industrie de récupération et de recyclage. Elle est au cœur même du programme national de gestion des déchets municipaux (PROGDEM), qui constitue le principal cadre de référence en termes de gestion et de valorisation des déchets ménagers. Il existe deux (02) types de filières: classiques (plastiques, papiers, métaux, textiles, verres, bois et matières organiques) et complexes (pneus usagés, huiles usagées, piles et batteries et autres déchets d'équipements électriques et électroniques).

II.2.2.1. Des métiers de l'environnement à apprendre

La chaîne de valeur de ces filières comporte quatre niveaux à savoir, les études d'ingénierie, la logistique et transfert, le traitement et la valorisation, et enfin l'élimination. Les quatre niveaux nécessitent une expertise pour laquelle l'Algérie cumule d'immenses retards.

Le développement durable pour lequel l'Algérie a pris des engagements internationaux favorise l'émergence de filières très porteuses (énergies renouvelables, la gestion des déchets ménagers, spéciaux ou des eaux usées, et les bâtiments à faible impact énergétique). Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique est ambitieux. Il prévoit une production électrique d'origine renouvelable (photovoltaïque, notamment) de 22.000 MW à l'horizon 2030 (5 MW actuellement). De même qu'on vise le recyclage de 70% des déchets

(5% actuellement) en 2020, et à promouvoir la réutilisation des eaux épurées, mais il est nécessaire de réorienter la formation vers les métiers qui sont nécessaires au développement de telles filières. Ces filières nécessitent une expertise qui n'est pas disponible en Algérie. Elle est importée d'Allemagne, de France et de Suisse. Tout est à faire dans ce domaine (expertise et ingénierie des déchets spéciaux, gestion des stations d'épuration, traitement des eaux usées, en irrigation, système de traçabilité, management environnemental, qualité de l'air, transport) car, ce qui est constaté que les capacités actuelles du pays ne lui permettent pas de tenir ses engagements internationaux.

II.2.2.2. La part de responsabilité des industriels

Il convient de signaler que l'Algérie dispose de 16 centres de tri opérationnels, 16 autres sont en travaux ou en phase d'études, et 5 en voie de lancement. Des investissements ont été également engagés pour la réalisation de 48 déchetteries dont 13 sont désormais en exploitation, 9 en travaux, 8 en phase d'études et 11 en instance de lancement (choix de sites). Par ailleurs, selon la réglementation en vigueur, tout producteur de déchets est tenu d'en assurer l'élimination dans des conditions à éviter les effets préjudiciables pour l'environnement, à faciliter la récupération des matériaux, le recyclage des matières ou la valorisation énergétique. Aucune étude n'a été engagée pour quantifier les déchets industriels. L'état a pris à sa charge l'élimination des déchets produits avant la promulgation de la nouvelle loi et ce, dans le cadre d'un plan national de gestion des déchets spéciaux (mercure, cyanures). Désormais, les industriels sont tenus de le faire par leurs propres moyens. Des contrats de performances ont été signés avec eux et ils avaient le temps nécessaire pour s'y préparer.

II.2.3. Les déchets inertes

Il est utile de préciser que les déchets sont classés en trois catégories: les déchets dangereux, non dangereux et inertes.

Pour être *inerte*, le déchet doit notamment être exempt de plastiques, plâtres, bois, amiante... Une formation du personnel affecté à la réception des matériaux doit donc être effectuée afin que la gestion du centre de tri et/ou recyclage soit conforme à la réglementation.

II.2.3.1. Matériaux autorisés

- Les matériaux stériles issus du site d'extraction.
- Les matériaux de type argileux (si l'arrêté l'autorise).

- Les matériaux naturels, sables, graviers, blocs rocheux, résultant des travaux publics tels que le terrassement et n'ayant pas fait l'objet d'une quelconque contamination au cours de ces travaux.
- Les déchets triés issus du secteur du bâtiment (construction, démolition et réhabilitation), tels que: mortier, béton, béton cellulaire, rebus de ciment, briques (sauf briques réfractaires), tuiles, pierres, blocs, céramiques, carrelages, sanitaires, gravats, verre, déchets de minéraux.

Ces matériaux ne doivent pas contenir de plâtre et ne doivent pas avoir été contaminés par une quelconque activité.

II.2.3.2. Matériaux interdits

- Les matériaux provenant d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) sauf s'ils ont fait l'objet d'une autorisation spécifique.
- Les terres suspectes ou considérées polluées lors de leur réception sur site.
- Les déchets industriels spéciaux et les déchets dangereux, comme par exemple les sous-produits générés par les activités de la métallurgie.
- Les briques réfractaires.
- Les déchets industriels banals.
- Les matériaux putrescibles et fermentescibles tels que bois, papiers, cartons, déchets verts, ordures ménagères.
- Les matières synthétiques tels que caoutchouc, plastiques, résines, ainsi que les métaux, quels qu'ils soient.
- Les matériaux solubles tels que les plâtres.
- Les enrobés et produits bitumineux, goudrons, asphalte, y compris ceux résultant du démantèlement d'une chaussée de route
- Les déchets non refroidis.
- Les déchets susceptibles de s'enflammer spontanément et les explosifs.
- Les matériaux non pelletables, tels que liquides, effluents, produits de vidange, boues ne résultant pas du criblage mécanique des matériaux extraits du site lui-même.

II.2.3.3. Le recyclage

Il existe trois filières de valorisation pour les matériaux inertes: un réemploi direct sur les chantiers, un acheminement vers des plateformes de recyclage et une utilisation en remblais pour le réaménagement des carrières.

Concernant le recyclage des matériaux proprement dit, l'avenir passera par la réutilisation des matériaux recyclés dans le béton: il s'agira alors de granulats recyclés dont les caractéristiques seront équivalentes aux granulats naturels (alluvionnaires ou roches massives); à ce titre les granulats recyclés seront marqués CE. Cette substitution participe donc à l'économie des ressources naturelles et à la réduction de notre empreinte carbone.

En effet, au même titre que les carrières, les installations de recyclage et/ou de stockage de matériaux inertes sont soumises à de nombreuses lois qui aboutissent à des déclarations ou autorisations. Ensuite, pendant la vie du site, chaque matériau inerte reçu doit avoir son bordereau de suivi au même titre que tous les déchets.

Chapitre 3

Les matériaux réfractaires

III.1. Historique

Le terme *réfractaire* est d'origine française recensé en 1539 par Robert Estienne, dans son dictionnaire latino-gallicum. Il provient du latin d'église *refractarius*, querelleur et signifie indocile. La racine latine est portée par le verbe *refringere* dont le premier sens est briser, abattre une cloison, le second sens est déjà relatif à la déviation des rayons lumineux entrant dans l'eau ou dans une substance vitreuse. Cette réflexion, au sens de la bas-latin réflexion, retour en arrière, suit aussi une loi géométrique précise, le faisceau reste dans le plan et les mesures de l'angle d'incidence et d'éloignement avec la normale à la surface touchée sont identiques. Cette modélisation bien connue de la science naissante du XVII^e siècle semble avoir été adaptée à tous les types de flux alors plus ou moins mystérieux (rayonnement, son, chaleur...) traversant ou repoussé par les corps.

En 1762, le terme réfractaire a été appliqué à des matériaux résistants à la pénétration du flux calorifique, c'est-à-dire à de hautes températures. Comme la vieille théorie calorifique a longtemps été préservée, le vieux vocabulaire associé s'est maintenu et parfois a perduré dans les techniques modernes. Ainsi, en 1804, apparaît le réflecteur en céramique blanche, placé dans le renflement intérieur de nouvelles cheminées anglaises et améliorant le rendement par rayonnement. Le renouvellement des conceptions sur la chaleur, en particulier l'équivalence avec l'énergie démontré par Mayer et Joule.

Vers 1845, n'a pas modifié les terminologies techniques, mis à part les termes en usage de calorimétrie comme la capacité calorifique, d'autant plus que la notion de température n'a été comprise que par des approches statistiques dites de statistique de Maxwell-Boltzmann. La réfraction thermique suppose que le gradient de température ou d'agitation moléculaire obéisse à des lois différentes au cœur du matériau selon la nature du corps, nécessairement solide si l'échauffement est important en surface.

Les premières études des matériaux réfractaires doivent beaucoup aux fondeurs et aux spécialistes des arts céramiques, en particulier les faïenciers et fabricants de porcelaine. Au temps de l'acier conquérant et de la brique, culminant en 1880, la définition de la haute température définit le matériau réfractaire, qui résiste à 1000 °C. Elle est plutôt de l'ordre de 1200 °C pour les céramistes en 1900 et les moyens de mesure et la puissance des fours ne cessent de progresser. Mais les laboratoires scientifiques prennent la relève. En 1897, le four à arc d'Henri Moissan atteint 2000 °C. Herman Nernst, en plaçant en 1903 un élément chauffant en matière réfractaire dans un four électrique, pulvérise le record. En 1905, Moissan volatilise du graphite à 3000 °C. En conséquence, la limite dépasse 1400°C en 1920.

Vers 1950, la haute température débute vers 1500°C. En 1980, le monde de la physico-chimie des hautes températures s'accorde au minimum à 1800°C, voire aujourd'hui plus de 2000 °C, température au-delà de laquelle les échanges par rayonnement deviennent prépondérants. Outre la métallurgie et la sidérurgie, l'industrie des verres et des ciments, les industries mécaniques et la fabrication des matériaux réfractaires pour moteurs et fours sortent transformées de cette évolution séculaire. L'étude des combustions et des processus géochimiques peut aussi commencer avec de bons outils [18].

III.2. Définition des produits réfractaires

Un matériau réfractaire est un produit qui conserve ses caractéristiques physico-chimiques sous hautes températures, la fusion du matériau n'apparaissant qu'au-delà des conditions d'emploi. La norme ISO 1927 de 1984 ne stipule que « les matériaux réfractaires sont des matières et produits autres que les métaux et alliages (sans que soient exclus ceux contenant un constituant métallique), dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum ». En plus de cette résistance pyroscopique élevée, on exige souvent des réfractaires qu'ils aient: [19]

- Une bonne résistance aux chocs thermiques.
- Une faible conductivité thermique.
- Une bonne résistance à la corrosion (aciéries, four de verrerie ...) et à l'érosion à hautes températures.

III.2.1. Définition des produits réfractaires selon la norme AFNOR

La norme B40-001 de AFNOR définit aussi les réfractaires, Un produit artificiel ou naturel est considéré comme réfractaire lorsque sa résistance pyroscopique définie et déterminée suivant la norme correspondante est supérieure à la température de 1500°C représentée par cône pyroscopique.

III.2.2. Autre définition

Les réfractaire peuvent être une substance ou un mélange de substance soit naturel ou artificiel est dite réfractaire par convention lorsque sa température de fusion déterminée selon les normes est supérieure à 1500°C.

III.3. Différentes familles des produits réfractaires

Les réfractaires sont divisés en deux grandes familles. Façonnés et non-façonnés (ou monolithique). Les matériaux façonnés sont livrés sous forme de briques, tuiles et pièces de forme. Leur consolidation a lieu par frittage, réaction chimique (liant hydraulique ou chimique), ou par solidification (matériaux électro-fondus). Les matériaux non-façonnés sont livrés en vrac pour être moulés ou appliqués sur place comme les bétons réfractaires, les mortiers ou les masses plastiques. Nous parlerons par la suite principalement des matériaux réfractaires non façonnés et plus particulièrement des briques réfractaires car ce sont les matériaux qui nous intéressent dans cette étude [20].

III.3.1. Les réfractaires façonnés

Les bétons et mortiers à prise hydraulique constituent la majorité des réfractaires monolithiques. Les bétons et mortiers réfractaires denses peuvent être divisés en trois catégories bien distinctes, dont la différence essentielle est la teneur en ciment:

- **Bétons classiques:** teneur en ciment comprise entre 15 et 25% suivant la nature de l'agrégat et sa densité.
- **Bétons basse teneur en ciment:** teneur comprise généralement entre 4 et 10%. Le développement de bétons et mortiers réfractaires contenant de moins en moins de ciment s'est fait pour différentes raisons. Tout d'abord l'examen du diagramme d'équilibre $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$ fait nettement apparaître que la présence de CaO dans ce système fait augmenter de façon très sensible la quantité de phase liquide. Par ailleurs, la mise en place d'un béton ou mortiers classique avec 15 à 25% de ciment, sans adjuvant particulier, nécessite entre 8 et 15% d'eau, suivant la nature de son agrégat (densité). L'eau liée sera comprise entre 4 et 8% suivant la teneur en ciment et le reste constituera l'eau d'humidité qui sera évacuée par séchage. On aura donc, après étuvage, une porosité raisonnable (~15%) mais en fait, après déshydratation complète (après 600°C) une porosité de l'ordre de 25%. Ces deux facteurs condamneraient ces bétons et mortiers à être des sous-produits des briques équivalentes, d'où la démarche vers les tentatives de réduction:
 - De la teneur en ciment.
 - De la porosité.

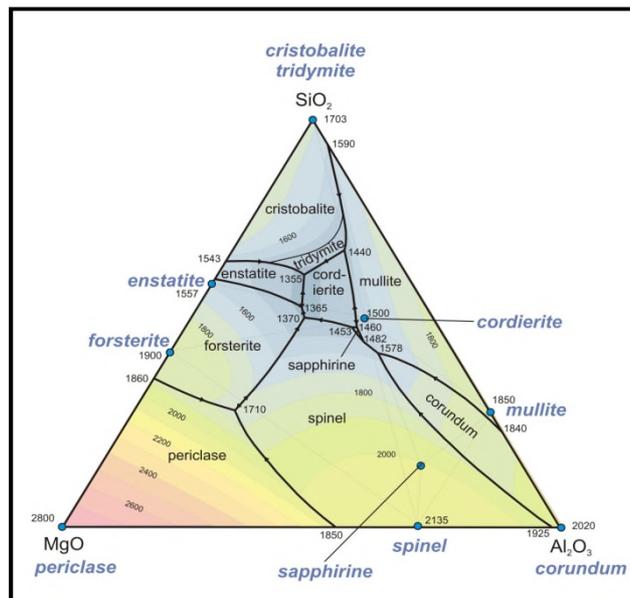


Figure III.16: Diagramme de phase $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$.

III.3.2. Les réfractaires non-façonnés

Avant le début du XX^{ème} siècle, les matériaux réfractaires se présentaient tous sous la forme de briques cuites. Aujourd'hui, de plus en plus d'applications industrielles nécessitent des matériaux non-façonnés et élaborés par d'autres méthodes. On observe alors un changement fondamental dans le domaine des réfractaires qui est le remplacement progressif de ces matériaux façonnés par des matériaux non façonnés, appelés communément matériaux monolithiques. Le terme monolithique englobe tous les matériaux qui ne sont pas mis en forme avant leur application et qui constituent une entité à eux seuls. Par abus de langage, on confond souvent monolithique et béton. Ils s'opposent aux matériaux plus conventionnels, façonnés et cuits avant leur utilisation. Ils sont constitués par le mélange d'un ou plusieurs types de granulats réfractaires avec une phase liante (liant hydraulique, liant phosphatique, silicates alcalins, liaison carbonée,...). Contrairement aux réfractaires façonnés, leurs caractéristiques ne sont pas figées et dépendent fortement de leur mise en œuvre et de leur première montée en température.

III.4. Différentes catégories des matériaux réfractaires

La gamme des produits réfractaires se répartit en cinq catégories, et répond aux besoins en produits réfractaires silico-alumineux des industries cimentière, céramique, sidérurgique ainsi que la construction. Les listes des produits sont données à titre indicatif et ne sont nullement exhaustives. Tous les formats peuvent être étudiés dans les diverses qualités, avec analyse des besoins spécifiques pour l'utilisation prévue, et une offre personnalisée est établie en tenant compte des quantités, qualités, délais de livraison et de paiement ainsi que des éléments relatifs aux frais des modèles éventuels.

Tableau III.7: Différents types des produits réfractaires.

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| Standards | Cubilots | Spéciaux | Creux | Non-façonnés |

III.4.1. Standards

Les produits standards sont les briques et dalles de grandes consommations, utilisés indifféremment dans tous les secteurs d'application.

III.4.2. Cubilots

Les produits courants destinés principalement aux cimentiers sont les coins cimentiers, cubilots et les clés.

III.4.3. Façonnés creux

Les produits creux sont plus généralement destinés à la sidérurgie, aciérie, fonderie, pour poches, coulées continues, répartiteurs,...

III.4.4. Non-façonnés

Les produits non-façonnés sont des mélanges utilisés soit pour la réalisation de pièces monolithiques, soit pour le jointoiment de pièces réfractaires, sous forme de ciment, coulis ou d'enduits, pisés et mélanges projetables.

III.4.5. Produits spéciaux

Les produits spéciaux sont les pièces réfractaires faites sur mesure pour des applications précises.

III.5. Classification des produits réfractaires

Vu la diversité de leurs constitutions et leur mode de fabrication, les produits réfractaires sont subdivisés comme suit [21]:

III.5.1. Selon la composition chimique

- Produits à haute teneur en alumine G1: $Al_2O_3 > 56\%$
- Produits à moyenne teneur en alumine G2: $45\% < Al_2O_3 < 56\%$
- Produits argileux: $30\% < Al_2O_3 < 5\%$
- Produits silico-argileux: $10\% < Al_2O_3 < 30\%$
- Produits de silice: $8\% < SiO_2 < 93\%$
- Produits basiques, produit de magnésie, dolomie de chamotte, fosterite,...
- Produit spéciaux à base de carbone, zircon et à base d'oxydes purs.

III.5.2. Selon la structure

- **Réfractaires denses**
 - Très denses: porosité inférieure à 10%.
 - Denses: porosité comprise entre 10 et 30%.
 - Peu denses: porosité comprise entre 30 et 45%.
- **Réfractaire isolant ou léger:** porosité supérieure à 45%.

III.5.3. Selon la réfractérité

- **Réfractaire:** température entre 1350 et 1550°C.
- **Hautement réfractaire:** température entre 1580 et 1770°C.
- **Très hautement réfractaire:** température entre 1770 et 2000°C.
- **Super réfractaire:** température 2000°C.

III.5.4. Selon la fabrication

- Produits réfractaires façonnés: cuits, non cuits, électrofondus,...
- Produits réfractaires non-façonnés: produits broyés réfractaires, enduits et mortiers réfractaires, masse à maçonner,...
- Produits réfractaires poreux façonnés, matériaux fibreux,...

III.6. Briques réfractaires

III.6.1. Définition

Les briques sont les produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, c'est l'un des plus anciens matériaux de construction. Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. Il semble que ce mot soit magique et permette de réaliser toutes sortes de performances calorifiques. Mais de quoi s'agit-il exactement? La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, elle sera composée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans différentes proportions. En plus de résister à la chaleur, la brique réfractaire a également la capacité de restituer la chaleur. C'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire [22].

La brique réfractaire est utilisée principalement pour les constructions destinées à résister à une source de chaleur directe ou indirecte:

- Le barbecue fixe.
- Les foyers de cheminée.
- Les cheminées.
- Les fours (à cuisson clinker, à pain, à pizza ...).
- Les chaudières.
- Les forges.
- Les murs proches d'un poêle ou d'une source importante de chaleur.

III.6.2. Principaux types de briques réfractaires

Les principaux types des briques réfractaires sont [23]:

III.6.2.1. Briques ordinaires

Une brique d'argile est une roche artificielle ayant la forme parallélépipédique rectangle de dimensions bien déterminées. Généralement, on fabrique les briques suivant deux procédés: procédé plastique (l'argile est humectée d'eau de 20 à 25%) et procédé demi-sec (l'argile est humectée d'eau de 8 à 12%). Après moulage et séchage, les briques sont cuites pour qu'elles deviennent assez dures. La cuisson est faite soit dans le four périodique soit dans le four continu. En général, les dimensions d'une brique ordinaire sont: 250x120x65mm. Selon la technologie de fabrication des briques traditionnelles, il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précises, à cause du retrait à l'air et retrait de cuisson. Selon la norme, les tolérances sur les briques peuvent être calibrées de la manière suivante: ± 6 mm sur la longueur; ± 4 mm sur la largeur et ± 3 mm sur l'épaisseur. On distingue la masse volumique des briques courantes en quatre groupes voir le tableau ci-dessous (Tableau III.8).

Tableau III.8: Classes et masses volumiques des briques courantes.

| Classe | A | B | C | D |
|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|-------|
| Masse volumique (kg/m ³) | 700-1000 | 1000-1300 | 1300-1450 | >1450 |

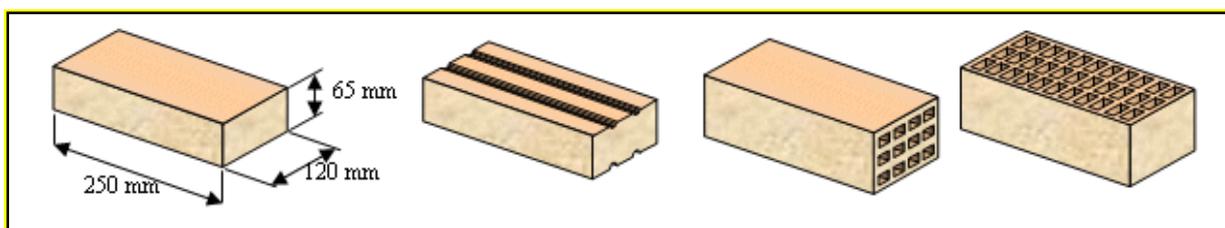


Figure III.17: Briques pleines et perforées.

La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8%. Ainsi on peut résumer les dimensions et les résistances des briques dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.9: Dimensions et résistances des briques.

| Dimensions courantes (mm) | | | | Résistances moyennes | | |
|---|-----------|---------|----------|--|-------------|-----|
| | Épaisseur | Largeur | Longueur | Catégorie | Résistances | |
| | | | | | MPa | Bar |
| Briques pleines ou perforées | 40 | 105 | 220 | I | 20 | 200 |
| | 55 | 105 | 220 | | | |
| | 60 | 105 | 220 | II | 30 | 300 |
| | 55 | 105 | 330 | | | |
| Tolérance sur brique: Calibres = 31mm sur longueur et largeur et 3mm sur hauteur | | | | 1 MPa = 10 bars. 1 bar = 10 N/cm ² | | |

III.6.2.2. Briques poreuses

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires, auxquelles on ajoute des additions fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé). L'emploi des briques poreuses permet de réduire les dépenses de transport et donc le prix des murs. Cependant la résistance d'une brique poreuse étant faible, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges. Elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé.

III.6.2.3. Briques d'argiles creuses à perforations

Les briques creuses qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes: 250x120x88mm ou bien 65mm. On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35 à 45mm et de 17 à 18mm. Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60% de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40% de la section totale. On classe les briques creuses en quatre marques: 150, 125, 100 et 75. La capacité d'absorption d'eau d'une brique creuse à la même valeur que pour la brique ordinaire donc >8%. La résistance à la flexion est de 20, 18, 16 et 14 kg/cm². Toutes les autres prescriptions techniques imposées aux briques creuses sont les mêmes que pour les briques ordinaires.

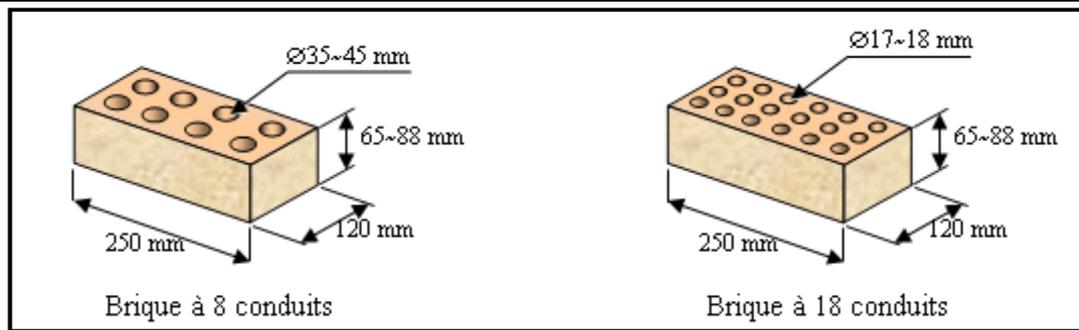


Figure III.18: Briques creuses comprimées par voie demi-humide.

III.6.2.4. Caractéristiques et utilisations des briques pleines ou perforées

Elles servent à réaliser:

- Des parements extérieurs ou intérieurs décoratifs (appareillages en briques).
- Des murs simples ou doubles enduits ou non.

Les briques sont obtenues soit:

- Par filage (passage de l'argile dans la filière).
- Par pressage (compression de la pâte dans un moule).

Les qualités requises:

- Résistance au gel (à 25 cycles de gel et dégel).
- Peu de dilatation à l'humidité (gonflement).
- Pas d'éclatements dus à l'expansion de grains de chaux.
- Peu d'efflorescences (sels) pouvant former des taches.
- Aspect suivant la destination du produit.
- Régularisation des coloris et des dimensions.

III.7. Effet d'une source de chaleur sur les briques réfractaires

Les matériaux réfractaires les plus communs, par exemple une brique réfractaire, possèdent une forte inertie thermique. Exposés à une source de chaleur, ils chauffent relativement lentement, et une fois à température élevée, ils refroidissent avec lenteur. Placée au contact d'une flamme ou d'un plasma, une plaque réfractaire permet aux parois des fours de contenir la source de chaleur, en particulier en restreignant l'expansion des zones à températures très élevées qui pourraient altérer tout ou une partie des parois du four. Comme ces matériaux sont souvent de mauvais conducteurs de la chaleur, ils diminuent la déperdition calorifique d'un système de chauffage ou assurent une appréciable isolation thermique. Cette inertie thermique est caractérisée par un coefficient appelé capacité thermique : c'est l'énergie qu'il faut apporter à un matériau pour Augmenter sa température relative d'un kelvin (1K) [24].

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Avec: Q = Chaleur évacuée en joules

M = Masse du corps en kg

C_p = Capacité calorifique massique à pression constante du corps en $\text{j/kg} \cdot ^\circ\text{k}$

ΔT = Différence de température entre le corps et le fluide $^\circ\text{k}$



Figure III.19: Transfert de chaleur entre les parois.

III.8. Principe de fabrication des briques réfractaires

Les briques réfractaires sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000°C . Par combinaison chimique à partir de 700°C , l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques. En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous.

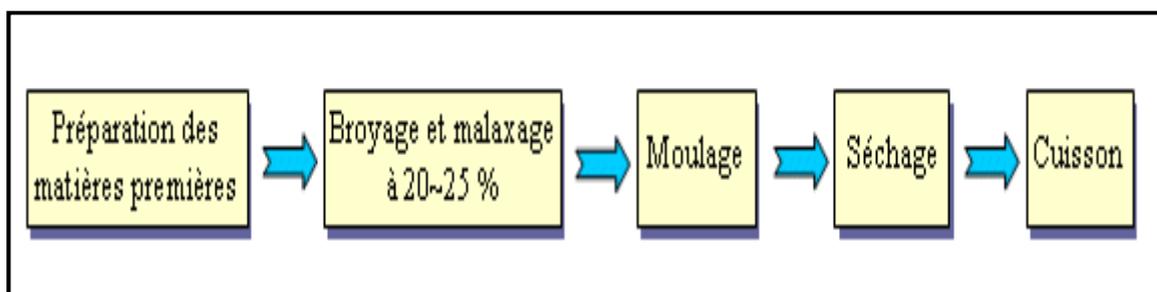


Figure III.20: Schéma de fabrication des briques réfractaires.

- **Remarque:**

Les briques sont obtenues soit par filage (passage de l'argile dans la filière), ou bien par pressage (compression de la pâte dans un moule).

III.10. Réfractaires silico-alumineux

Selon la norme AFNOR, Les réfractaires silico-alumineux sont des produits à base d'argile réfractaire (la teneur en alumine élevée), la norme ISO/1109 les classe dans la catégorie silico-argileux façonnées denses [25], la fabrication de ces réfractaires se fait en deux voies possibles voie sèche et voie humide.

III.10.1. Propriétés des réfractaires silico-alumineux

Dépendent de la voie utilisée pour la fabrication.

- **Voie sèche:** la résistance à la compression varie entre 250 et 450 Kg/Cm², la porosité est comprise entre 16 et 28%.
- **Voie humide:** la résistance à la compression varie entre 100 et 300 Kg/Cm², la porosité est comprise entre 26 et 28%.

III.10.2. Caractérisation des réfractaires silico alumineux

Les performances des réfractaires dépendent de leurs propriétés thermiques (conductivité, expansion thermique) et mécaniques (rigidité, ténacité,...) qui vont influencer sur la résistance aux chocs thermique et aux différentes sollicitations mécaniques, ainsi les propriétés physiques (densité, mouillabilité,...) et chimiques qui vont déterminer la résistance à la corrosion.

Dans notre étude on va traiter des échantillons thermiquement afin de définir leur comportement à la température qu'il nous intéresse donc la connaissance des propriétés thermiques des produits réfractaires est très importante.

o Propriétés thermiques

• La réfractarité

Selon la théorie de Braniski [26] la réfractarité des matériaux est conditionnée par la configuration des couches électroniques de leurs atomes. Elle dépend des éléments chimiques qui les constituent, du nombre et de la répartition des électrons sur le dernier niveau d'énergie. Les matériaux réfractaires fondent dans un large intervalle de température. La température de fusion des matériaux réfractaires est défini par la comparaison entre la fusibilité du matériau façonné en petite pyramide triangulaire et la fusibilité de cônes pyroscopiques.

Les cônes pyroscopiques sont constitués par des substances différentes (silice, kaolin, alumine, carbonates de calcium et fondants) mélangées ensemble en des proportions variées de manière à former une série de mélanges à point de fusion croissant de 600 à

2000°C. Les premiers termes de la série, fondant à basse température, sont constitués par des borosilicates de sodium, plomb et alumine, tandis que les cônes à plus haut point de fusion sont constitués par des mélanges de kaolin avec des quantités croissantes d'alumine, le dernier est en alumine pure. La série des CONES SÊGER (les plus connus en Europe) comporte 59 numéros avec des températures de fusion croissantes de 600 à 2000 °C.

- **Résistance aux chocs thermiques**

La résistance mécanique est un facteur fondamental même pour ce qui concerne le comportement aux chocs thermiques, Norton a démontré qu'il existe une différence importante entre les ruptures dues à un réchauffage brusque et à un refroidissement rapide, au cours de la chauffe se produisent des efforts de cisaillement (tensions tangentielles), tandis que, pendant le refroidissement, on a des efforts de traction (tensions normales). Un réfractaire qui a une faible résistance au cisaillement et une résistance relativement élevée à la traction, s'écaille par chauffage rapide mais ne présentera que de faibles fissures s'il est refroidi brusquement. Pratiquement, la résistance aux chocs thermiques des réfractaires est évaluée par le suivi de révolution de la résistance mécanique en (compression ou traction indirecte) d'échantillons soumis à des cycles répétés de chauffage (à une température fixe) /refroidissement (par immersion dans l'eau à température ambiante).

Les variations de longueur et de volume associées aux changements de température sont importantes pour beaucoup d'applications. Pour chaque température, nous pouvons définir un coefficient de dilatation linéaire (équation 1) et un coefficient de dilatation volumétrique (équation 2):

- C'est l'allongement relatif de l'échantillon dl/l sous l'effet d'une élévation de la température dt .

$$\alpha_l = dl/l.dt \quad (\text{équation 1})$$

- Pour des intervalles limités de température, on considère juste la valeur moyenne.

$$\alpha_v = dv/v.dt \quad (\text{équation 2})$$

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de coefficient de dilatation moyenne de certains matériaux réfractaires [27].

Tableau III.10: Coefficient linéaire moyen (entre 20 à 1000°C).

| Désignation | $\alpha \cdot 10^{-6}$ (m/m°C) |
|--|--------------------------------|
| Briques argileuses | 4.5 à 5.0 |
| Briques argileuses (40% Al ₂ O ₃) | 5.0 |
| Briques de kaolin | 4.5 à 5.5 |
| Briques silico-alumineuses | 7 à 9 |
| Briques de silice | 11.5 à 13 |

- **Remarque:**

Les murs du four se composent d'un revêtement intérieur, de la maçonnerie isolante et de maçonnerie extérieure. Les différences de températures dans les joints de séparation entre elles provoquent une dilatation thermique non uniforme se traduisant par la rupture des couches rigidement combinées. Pour réaliser des joints destinés à absorber la dilatation des matériaux, il faut employer des produits de même qualité.

- **La conductivité thermique**

Elle est exprimée par la quantité de chaleur en heure, traverse un mètre carré de parois d'une épaisseur d'un mètre du matériau considéré, pour une différence d'un degré entre la température des deux surfaces qui la délimitent. Généralement, la loi de conduction thermique de Fourier est exprimée par:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot dt/ds \text{ (Kcal/h)}$$

Avec: λ : coefficient de conductibilité thermique du matériau considéré en Kcal/m/h°C.

A: la section m².

dt/ds: gradient de la température par rapport à une épaisseur en °C/m,

Dans le but de comprendre les effets des produits réfractaires sur les mortiers traités, on va choisir deux types de brique réfractaire: une brique silico-alumineuse à base de bauxite (HTA) et une brique à base de magnésie (magnésie-spinelle).

III.10.3. Brique réfractaire à base de bauxite

III.10.3.1. La bauxite

C'est un minerai rouge à forte teneur en alumine hydraté, a été découverte par Berthier en 1821. Les gisements les plus importants actuellement exploités pour la production de réfractaires sont répartis dans trois pays: la France (Guyane), la Chine et le Brésil. Ce minerai est constitué essentiellement de trois hydroxydes d'aluminium: la gibbsite (7Al₂O₃.3H₂O), la bohémite (7Al₂O₃.H₂O) et la diaspore (AlO(OH)). Les impuretés les plus communes sont la kaolinite (Al₂O₃-SiO₂-H₂O), le quartz (SiO₂), l'anastase (TiO₂), l'hématite (F₂O₃) et la goethite

(Fe₂O₃- H₂O). En sortie de mine, l'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer pour la production de l'aluminium. Le minerai siliceux et pauvre en fer, couramment appelé «bauxite blanche», est utilisé comme matière première pour les réfractaires du système alumine - silice. Ce matériau est calciné à haute température (>1400°C) pour déshydrater le produit et le consolider par frittage. La composition et la minéralogie moyenne obtenues suivant les gisements sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau III.11: Compositions de la bauxite calcinée suivant les sites d'extraction du minerai

| Oxydes | Guyane | | Brésil | Chine |
|--|--------|------|--------|---------|
| | A | B | | |
| Al ₂ O ₃ | 88 | 82 | 85.5 | 86 |
| SiO ₂ | 7.0 | 13.5 | 10.0 | 7.0 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.5 | 1.3 | 2.0 | 1.5 |
| TiO ₂ | 3.0 | 2.7 | 2.5 | 4.1 |
| minéralogique | | | | |
| Corindon (α -Al ₂ O ₃) | 70 | 55 | 45 | 75 |
| Mullite (3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂) | 15 | 20 | 25 | 6 |
| Phase vitreuse | 20 | 25 | 27 | 17 |
| Tiéélite (Al ₂ O ₃ -TiO ₂) | ≤ 4 | ≤ 4 | ≤ 3 | 6 |
| Propriété physique | | | | |
| Porosité ouverte des grains (%) | 14 | 12 | 12 | 15 - 18 |
| Densité apparente | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 2.9 |

III.10.3.2. Briques haute teneur en alumine à base de bauxite (HTA)

Les profils d'imprégnation présentés plus loin ont été réalisés sur des produits B80PCU commercialisés par le fabricant Didier. Pour des raisons d'approvisionnement, des produits Didier B85PCU et des produits VL85PT commercialisés par Pousseur. Le tableau **III.12** présente les compositions de ces différentes briques, toutes basées sur un mélange de bauxites naturelles de Chine et de Guyane [28].

III.10.3.2.1. Caractéristiques des briques HTA

- **Composition chimique**

Tableau III.12: Composition chimique des briques HTA.

| | B80PCU | B85PCU | VL85PT |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Al ₂ O ₃ | 77.7 | 84 | 84 |
| SiO ₂ | 13.5 | 8 | 9 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.2 | 1.7 | 1.6 |
| P ₂ O ₅ | 2.1 | 2.7 | 1.5 |
| TiO ₂ | 2.6 | 2.5 | 3.5 |
| CaO | 0.3 | ? | ? |
| MgO | 0.15 | - | - |

• Propriétés physiques

Tableau III.13: Propriétés physiques des briques HTA.

| | Porosité ouverte | | Densité apparente | |
|--------|------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | Produit cru | Produit cuit | Produit cru | Produit cuit |
| B80PCU | 16 | 21.4 - 25 | 2.85 | 2.66 |
| B85PCU | 17.6 | 19.7 | - | - |
| VL85PT | 14.4 | 15 | 2.92 | 2.84 |

III.10.3.2.2. Microstructure des briques HTA

La microstructure de ces briques est macroscopiquement la même: des agrégats millimétriques de bauxite constitués des phases suivantes : corindon, mullite, berlinite, verre; associés à une liaison constituée d'argile kaolinitique, de fines de bauxites et de phosphate (acide phosphorique ou phosphate d'alumine). Cette microstructure relativement grossière, présentée sur la figure. En effet, ces différentes nuances présentent à la température ambiante une porosité connectée élevée, allant de 14.4 à 25%.

La matrice de ce réfractaire à haute teneur en alumine a une granulométrie inférieure à 100 μm , elle est composée de:

- 15% de fines d'argile réfractaire de granulométrie inférieure à 60 μm .
- 5 % de bauxite de Guyane dont la composition minéralogique est la gibbsite, de granulométrie inférieure à 90 μm .
- 15% d'alumine ultra-fine, calcinée et rebroyée de très haute pureté ($\% \text{Al}_2\text{O}_3 > 99,3\%$) et de granulométrie moyenne 6 μm [29].

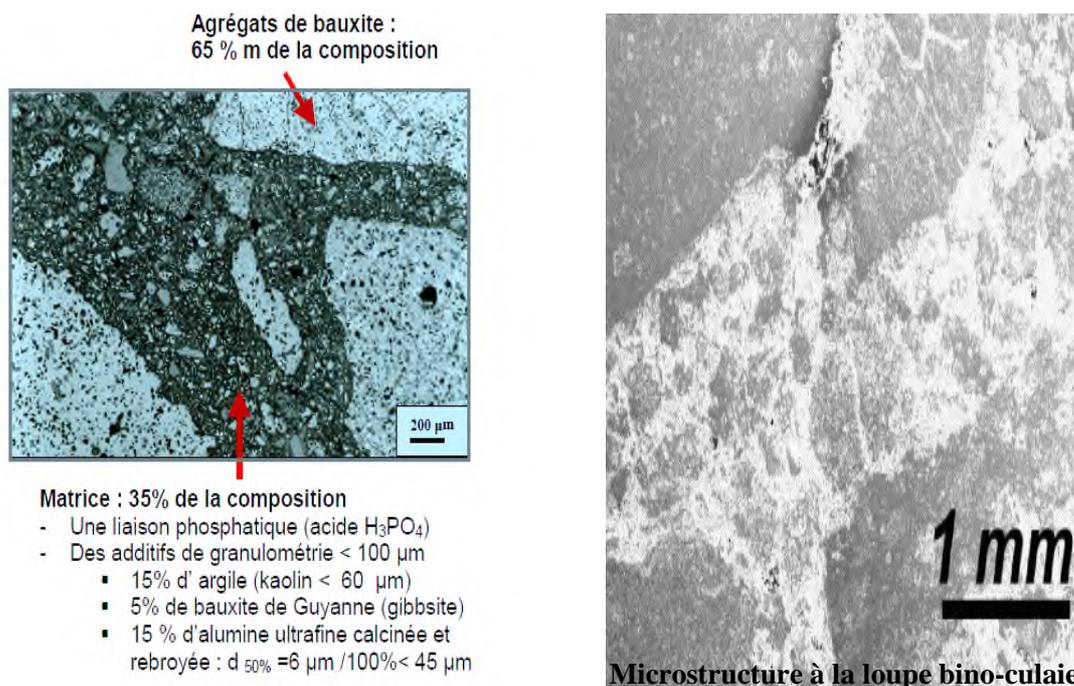


Figure III.21: Microstructure d'une brique réfractaire HTA.

III.11. Réfractaires de magnésie

- **Classement chimique:** les magnésies (zone chaude des fours de cimenterie ...), les réfractaires de haute teneur en alumine sont neutres (ou amphotères), les siliceux sont acides (fabrication de produits organiques, cheminées,...) [29].
- **Magnésie:** produit basique.
- **Application:** en sidérurgie, four cimentaires.
- **Principaux minéraux:**
 - **Foresterie:** $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{MgO}$
 - **Enstentite:** $\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$
 - **Giobertite:** $\text{MgO} \cdot \text{CO}_2$
 - **Olivine et serpentine**
- **Matières premières:** magnésite et dolomie contenant des impuretés (fer, silice, composés de Ca ...) qui sont en grande partie éliminées par traitement chimique et thermique. Cuisson des briques formant un cristal de MgO appelé périclase.

Partie expérimentale

Chapitre 4

Caractérisation des constituants

IV.1. Introduction

On présentera dans ce chapitre l'ensemble des matériaux utilisés pour l'élaboration des mortiers, leur mise en œuvre, ainsi que les techniques expérimentales permettant leur caractérisation.

IV.2. Matériau

Le matériau étudié est un mortier composé de sable, ciment portland, eau et déchet de brique réfractaire comme ajout. Le matériau a été choisi pour pouvoir comparer le comportement thermomécanique et voir si une transposition des résultats est possible d'un matériau à l'autre.

IV.3. Caractérisation des constituants

- Ciment de Sour-El-Ghozlane.
- Sable normalisé.
- Eau de gâchage.
- Déchets de briques réfractaires.

IV.3.1. Ciment

Le ciment utilisé est un CEM II/A 42.5 MPa de Sour-El-Ghozlane, Il contient 14% d'ajouts (calcaire et pouzzolane).

- Il doit être exposé à l'air ambiant le moins longtemps possible lorsqu'il doit être conservé pendant plus de 24 h entre le moment de l'échantillonnage et celui des essais.
- Il doit être stocké dans des conteneurs complètement remplis et hermétiquement fermés.
- L'échantillon de laboratoire doit être homogénéisé mécaniquement ou par d'autres moyens comme décrit dans la norme EN196-7 avant de prélever un sous-échantillon pour l'essai.

IV.3.1.1. Propriétés physiques

Tableau IV.14: Propriétés physiques du ciment de S-E-G.

| Consistance normale (%) | SSB (cm ² /g) | Début de prise (min) | Fin de prise (min) | Expansion (mm) |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------|
| 25.5 | 4015 | 120 | 305 | 1.5 |

IV.3.1.2. Propriétés mécaniques

Tableau IV.15: Propriétés mécaniques du ciment de S-E-G.

| Résistance à la flexion (MPa) | | | Résistance à la ompression (MPa) | | |
|-------------------------------|------|------|----------------------------------|-------|-------|
| 2j | 7j | 28j | 2j | 7j | 28j |
| 4.19 | 5.58 | 6.15 | 21.80 | 34.20 | 43.65 |

IV.3.1.3. Analyse minéralogique

Tableau IV.16: Analyse minéralogique du ciment de S-E-G.

| Composants minéralogiques | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Teneurs (%) | 50.82 | 19.48 | 8.33 | 8.45 |

IV.3.1.4. Analyse chimique

Tableau IV.17: Analyse chimique du ciment de S-E-G.

| Oxydes | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | CaO _I |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|
| Teneurs (%) | 22.84 | 4.92 | 2.78 | 57.83 | 5.33 | 2.53 | 0.31 | 0.92 | 1.30 |

IV.3.2. Sable normalisé

Les mortiers sont élaborés avec du sable normalisé \ll CEN EN 196-1 \gg . Le sable normalisé CEN doit être conforme à la composition granulométrique spécifiée. Elle est déterminée par une analyse granulométrique réalisée sur un échantillon représentatif de sable, d'une masse totale au moins égale à 1350g. Le tamisage doit être poursuivi jusqu'à ce que la quantité de sable passant à travers chaque tamis soit inférieure à 0,5g/min. La teneur en eau doit être inférieure à 0,2 %. Elle est déterminée par la perte de masse d'un échantillon représentatif de sable après séchage à masse constante à une température comprise entre 105 et 110°C, et exprimée en pourcentage en masse de l'échantillon sec. Ces exigences ne suffisent pas pour garantir que le sable normalisé CEN à des performances équivalentes à celles du sable de référence CEN. Cette équivalence doit être initialement établie et confirmée par les essais de validation. Le sable normalisé CEN doit être conditionné dans des sacs d'une contenance de (1350±5)g.

Tableau IV.18: Composition granulométrique du sable de référence CEN.

| Série de tamis (mm) | Refus cumulé sur les tamis (%) |
|---------------------|--------------------------------|
| 2 | 0 |
| 1.16 | 7±5 |
| 1.10 | 33±5 |
| 0.5 | 67±5 |
| 0.16 | 87±5 |
| 0.08 | 99±1 |

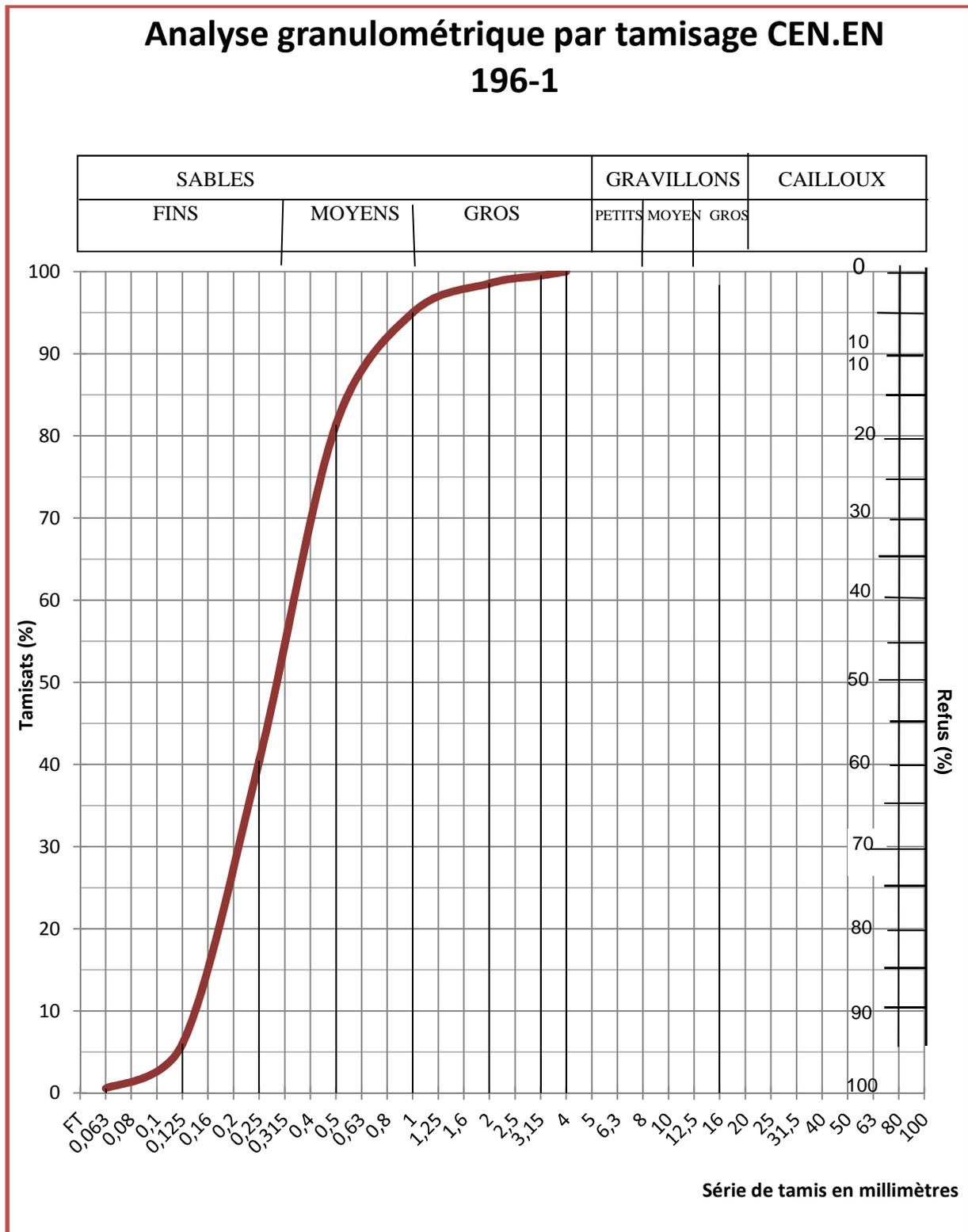


Figure IV.22: Courbe granulométrique du sable normalisé.

IV.3.3. Eau de gâchage

De l'eau distillée doit être utilisée pour les essais de validation. Pour les autres essais, on peut utiliser de l'eau potable.

- **Caractéristiques de l'eau utilisée**

Toutes les eaux 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 physiques et mécaniques du béton (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures),...

Tableau IV.19: Caractéristiques physico-chimiques et organiques de l'eau de gâchage.

| Paramètres organiques | Quantités et qualités selon la norme AF P 18 303 |
|------------------------------|--|
| Couleur | Clair |
| Odeur | Bonne |
| Gout | Bon |
| PH | 7.94 |
| Salinité (%) | 9 |
| CO ₂ libre (mg/l) | 9.26 |
| Oxygène dissous (mg/l) | 5.47 |

Tableau IV.20: Analyse minéralogique d'eau utilisée.

| Ions | Mg ⁺² | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | CO ₃ ⁻² | Fe ⁺² |
|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Teneurs (mg/l) | 37.3 | 265 | 760.48 | 0 | 0.04 |

IV.3.4. Déchets de briques réfractaires

Afin de mieux comprendre le rôle des déchets de briques réfractaires dans les mortiers, on a choisit deux types distincts, déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle et déchet de brique réfractaire haute teneur en alumine (HTA).

IV.3.4.1. Déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle



Figure IV.23: Déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle avant et après utilisation.

- **Caractéristiques techniques**

- **Composition chimique avant et après son exploitation**

Tableau IV.21: Analyse chimique de la brique réfractaire magnésie-spinelle avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN.

| Principaux oxydes | MgO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ |
|-------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|
| Teneurs (%) | 82÷87 | 11÷14 | 0.8 | 1.4 | 0.9 |

Ce type de brique réfractaire est composé principalement de *MgO* qui résiste à de très hautes températures.

Tableau IV.22: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle par FX.

| Oxydes | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | CaO | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ |
|-------------|--------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|
| Teneurs (%) | 82.593 | 11.249 | 1.774 | 0.099 | 1.575 | 0.287 | 1.253 |

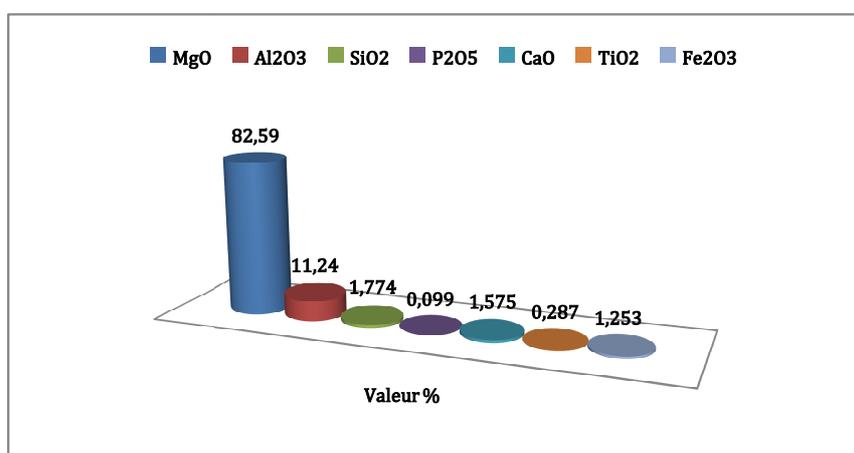


Figure IV.24: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

- **Caractéristiques physiques**

Tableau IV.23: Caractéristiques physiques de la brique réfractaire magnésie-spinelle avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN.

| Caractéristiques physiques | Valeurs |
|--|---|
| Masse volumique (g/cm ³) | 2.85÷3.00 |
| Porosité ouverte (%) | 15÷17 |
| Résistance à l'écrasement à froid (N/mm ²) | 65 |
| Résistance à l'affaissement sous charge à chaud (°C) | T _a >1700 T _e > 1700 |
| Coefficient de conductibilité thermique (W/m.K) | 4.0 à 300 °C 3.0 à 700 °C 2.8 à 1000 °C |
| Dilatation thermique linéaire (%) | 0.4 à 400 °C 0.9 à 800 °C 1.5 à 1200 °C |
| Résistance aux chocs thermiques 950 °C/air | 100 min |
| Cône de Seger | > 42 |

- **Masse volumique**

On introduit une masse M de déchet de brique réfractaire dans un cylindre gradué rempli de $V_i=100\text{ml}$ d'eau, et on lit le volume V_f .

$$M_v = M / (V_f - V_i)$$

Avec: M_v : masse volumique.

M : masse de déchet de brique.

$$M_v = 3,85\text{g/ml}$$

V_f : volume final.

V_i : volume initial.

IV.3.4.2. Déchet de brique réfractaire haute teneur en alumine (HTA)



Figure IV.25: Déchet de brique réfractaire HTA avant et après utilisation.

- **Caractéristiques techniques**

- **Composition chimique avant et après son exploitation**

Tableau IV.24: Analyse chimique de la brique réfractaire HTA avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN.

| Principaux oxydes | Al_2O_3 | SiO_2 | Fe_2O_3 |
|-------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| Teneurs (%) | 80÷85 | 10÷12 | 1.5 |

Ce type de brique réfractaire est composé principalement de Al_2O_3 qui résiste face aux contraintes mécaniques et thermiques.

Tableau IV.25: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire HTA par FX.

| Oxydes | Al_2O_3 | SiO_2 | P_2O_5 | SO_3 | K_2O | CaO | TiO_2 | Fe_2O_3 | ZrO_2 |
|-------------|-------------------------|----------------|------------------------|---------------|----------------------|--------------|----------------|-------------------------|----------------|
| Teneurs (%) | 75.873 | 15.431 | 0.193 | 0.109 | 0.692 | 1.075 | 2.730 | 2.040 | 1.057 |

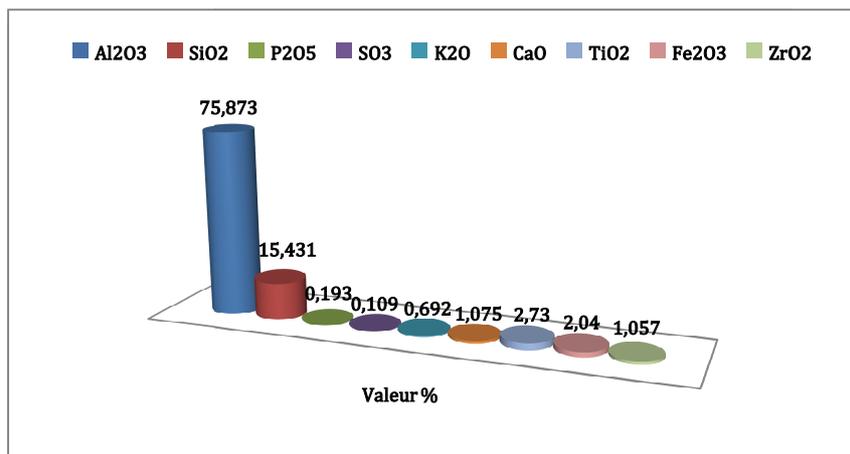


Figure IV.26: Analyse chimique du déchet de brique réfractaire HTA.

▪ **Caractéristiques physiques**

Tableau IV.26: Caractéristiques physiques de la brique réfractaire HTA avant son utilisation dans le four de cuisson clinker selon la norme selon les normes DIN ou parallèlement aux normes DIN.

| Caractéristiques physiques | Valeurs |
|--|---|
| Masse volumique (g/cm ³) | 2.75÷2.90 |
| Porosité ouverte (%) | 17÷19 |
| Résistance à l'écrasement à froid (N/mm ²) | 85 |
| Résistance à l'affaissement sous charge à chaud (°C) | T _a =1500 T _c =1700 |
| Coefficient de conductibilité thermique (W/m.K) | 2.3 à 300 °C 2.2 à 700 °C 2.1 à 1000 °C |
| Dilatation thermique linéaire (%) | 0.3 à 400 °C 0.5 à 800 °C 0.9 à 1200 °C |
| Résistance aux chocs thermiques 950 °C/air | 80 min |
| Cône de Seger | 40 |

▪ **Masse volumique**

$$M_V = M / (V_f - V_i)$$

Avec: M_v: masse volumique.

M: masse de déchet de brique.

V_F: volume final.

V_i: volume initial

| |
|---------------------------|
| M _v = 4,17g/ml |
|---------------------------|

Chapitre **5**

**Formulation des mortiers à base
d'ajouts de déchets de briques
réfractaires**

V.1. Introduction

La caractérisation de tous les constituants a permis dans ce chapitre d'élaborer les différents mortiers après l'optimisation de leurs formulations en variant le rapport E/C dans le but d'obtenir un mortier normalisé facile à manier.

V.2. Elaboration des différents mortiers

V.2.1. Composition du mortier

La réalisation de nos formulations nous 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.
- Pour les autres mortiers, on a remplacé une fois le sable normalisé et une fois le ciment par le déchet de brique réfractaire.
- **Remarque:**

On a remarqué que lorsqu'on utilise le déchet de brique réfractaire HTA avec cette formulation on obtient une pâte ferme et difficile à manier à cause du manque d'eau.

La question qui se pose maintenant: comment déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte maniable?



Figure V.27: Constituants des mortiers.

V.2.2. Détermination de la quantité d'eau

La composition normale n'est pas applicable dans ces mortiers à cause de la faible granulométrie (broyage fin jusqu'à $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$) et l'absorption d'eau très élevée du déchet de brique réfractaires HTA, donc pour confectionner ces mortiers on a été obligé de remédier à cette situation par l'utilisation d'un essai comparatif d'étalement.

Cet essai consiste à l'addition de l'eau dans les gâchées jusqu'à l'obtention d'un étalement qui tend vers celui d'un mortier de référence.

V.2.3. 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).

V.2.4. Préparation des éprouvettes

- **Dimensions 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, tenu presque verticalement, avec ses épaulements en contact avec la partie supérieure de la hausse, et mue en avant et en arrière, une fois, sur toute la longueur de chaque compartiment du moule. Note le nombre de mouvements de scie et l'angle de la règle plate dépendent de la consistance du mortier. Les mortiers durs nécessitent un plus grand nombre de mouvements de scie et un angle plus aigu. Le nombre de mouvements des scies transversales nécessaires est plus petit pour le lissage que pour l'arasement. Enlever le résidu de mortier laissé sur le périmètre du moule par suite de l'arasement. Étiqueter ou marquer les moules pour permettre leur identification.



Figure V.28: Malaxeur programmable avec la table à choc.



Figure V.29: Aplanissement des moules.

V.3. Différentes formulations réalisées

V.3.1. Appellations des différentes formulations

L'usage de deux types de déchets de briques réfractaires nous a conduit à élaborer plusieurs formulations et pour les distinguer, il a été préférable d'utiliser les abréviations suivantes:

- **Ref:** Mortier de référence formulé sans utilisation du déchet de brique de réfractaire.
- **SbMg20%:** Mortier formulé en substituant 20% de sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.
- **SbMg30%:** Mortier formulé en substituant 30% de sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.
- **CMg20%:** Mortier formulé en substituant 20% de ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.
- **CMg30%:** Mortier formulé en substituant 30% de ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.
- **CMg40%:** Mortier formulé en substituant 40% de ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.
- **SbAl20%:** Mortier formulé en substituant 20% de sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.
- **SbAl30%:** Mortier formulé en substituant 30% de sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.
- **CmAl20%:** Mortier formulé en substituant 20% de ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.
- **CmAl30%:** Mortier formulé en substituant 30% de ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.
- **CmAl40%:** Mortier formulé en substituant 40% de ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

V.3.2. Proportions des constituants de chaque formulation

Les tableaux V.27, V.28, V.29 et V.30 mentionnent toutes les proportions des constituants de chaque formulation en précisant la quantité d'eau de gâchage:

Tableau V.27: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

| Formulation | Ciment (g) | Sable (g) | Eau (g) | Déchet (g) |
|-------------|------------|-----------|---------|------------|
| Ref | 450 | 1350 | 225 | 0 |
| SbMg20% | 450 | 1080 | 225 | 270 |
| SbMg30% | 450 | 945 | 225 | 405 |

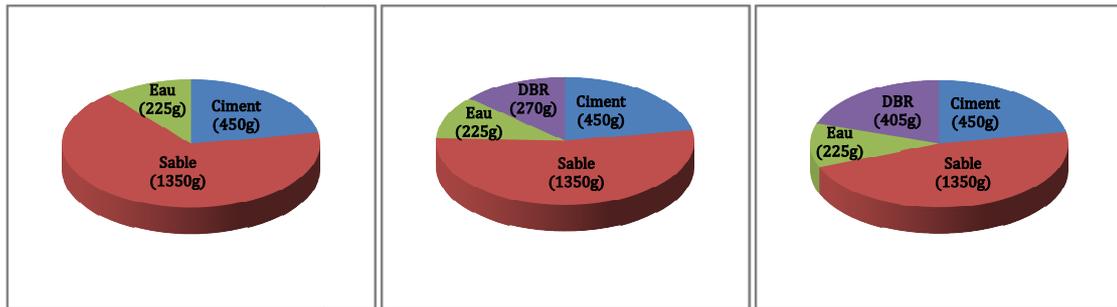


Figure V.30: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

Tableau V.28: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

| Formulation | Ciment (g) | Sable (g) | Eau (g) | Déchet (g) |
|-------------|------------|-----------|---------|------------|
| Ref | 450 | 1350 | 225 | 0 |
| CMg20% | 360 | 1350 | 180 | 90 |
| CMg30% | 315 | 1350 | 158 | 135 |
| CMg40% | 270 | 1350 | 135 | 180 |

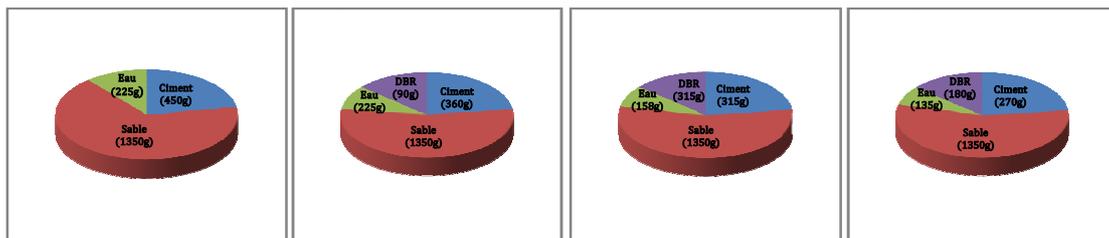


Figure V.31: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

Tableau V.29: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.

| Formulation | Ciment (g) | Sable (g) | Eau (g) | Déchet (g) |
|-------------|------------|-----------|---------|------------|
| Ref | 450 | 1350 | 225 | 0 |
| SbAl20% | 450 | 1080 | 250 | 270 |
| SbAl30% | 450 | 945 | 265 | 405 |

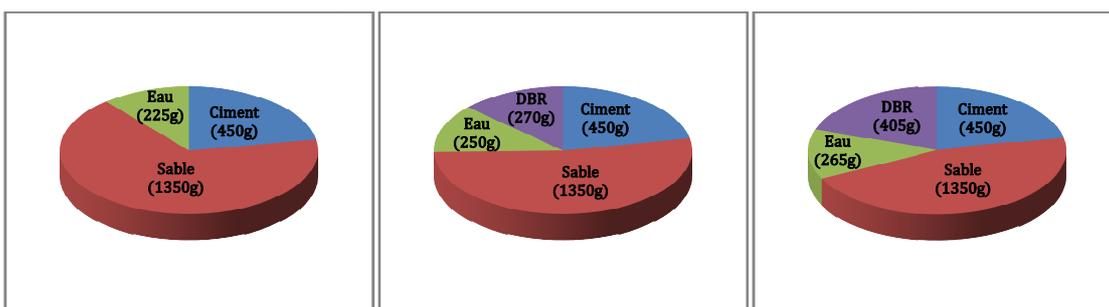


Figure V.32: Différentes formulations en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.

Tableau V.30: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

| Déchet de brique réfractaire (%) | Ciment (g) | Sable (g) | Eau (g) | Déchet (g) |
|----------------------------------|------------|-----------|---------|------------|
| Ref | 450 | 1350 | 225 | 0 |
| CmAl20% | 360 | 1350 | 180 | 90 |
| CmAl30% | 315 | 1350 | 165 | 135 |
| CmAl40% | 270 | 1350 | 150 | 180 |

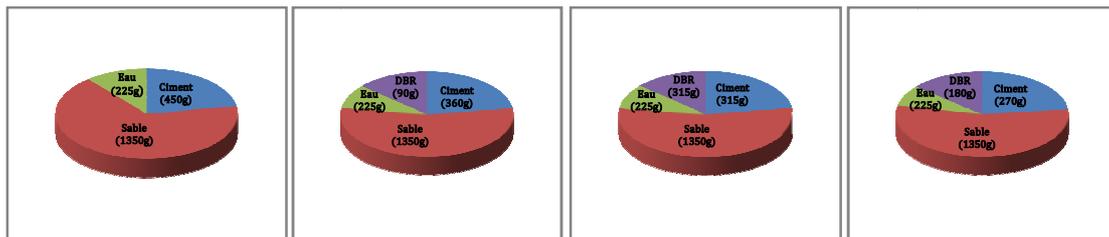


Figure V.33: Différentes formulations en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

Chapitre 6

**Etude des propriétés
thermomécaniques des différentes
formulations**

VI.1. Introduction

Afin de mieux comprendre quelle pourrait être l'influence de ces déchets de briques réfractaires sur le comportement thermomécanique des différents mortiers, on a décidé de réaliser des essais mécaniques (compression et traction par flexion). On a également mené des essais thermiques en introduisant que les échantillons ayant donné de bons résultats sur le plan mécanique dans un dispositif ATD-ATG couplé afin d'effectuer une analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD-TG). Enfin, on a opté à une caractérisation physique en bombardant ces échantillons par des rayons X (DR-X) dans le but de mieux interpréter les résultats obtenus.

VI.2. Caractérisation des différents mortiers à l'état frais

VI.2.1. L'étalement

C'est un essai essentiel qui permet de caractériser l'état frais et déterminer la maniabilité du mortier, cet essai est réalisé à l'aide d'un mini cône posé sur une table à secousses. On utilise cette dernière afin d'assurer un seul régime de vibration et éliminer les bulles d'air dans le but d'obtenir une bonne compacité.

- **Interprétation:**

Il était apparent lors de perfectionnement des différentes éprouvettes que la substitution de sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA engendre une diminution d'étalement (un faible diamètre de galette) par rapport au déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle. Cette différence est due à la quantité du déchet utilisé ainsi que sa capacité d'absorption d'eau.

VI.2.2. La masse volumique

On a déterminé la masse volumique à l'état frais par la différence des pesées des moules vides et remplis sur le volume du moule.

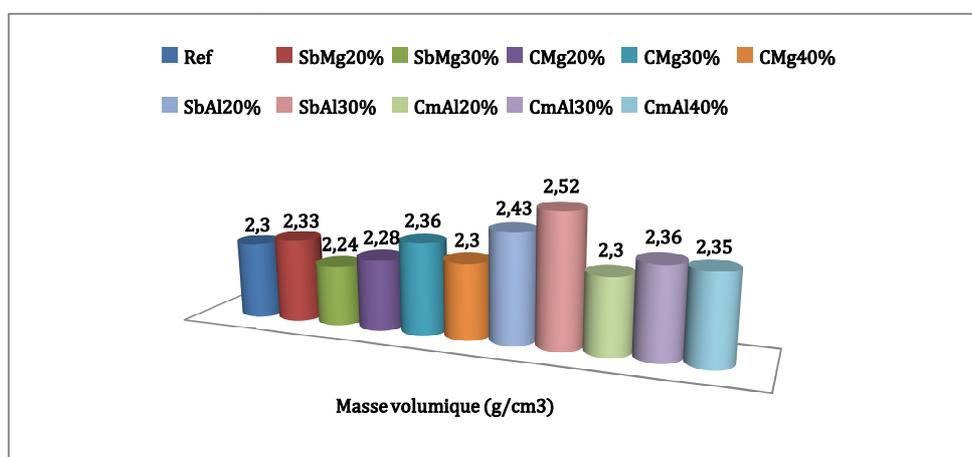
$$Mv=[(\text{masse de mortier}/\text{volume de moule})/3]$$

Avec: volume du moule=3(4x4x16)=768 cm³

Les résultats obtenus ont été présenté dans le tableau **VI.31**:

Tableau VI.31: Masses volumiques des différents mortiers.

| Formulations | Masse volumique (g/cm ³) |
|--------------|--------------------------------------|
| Ref | 2.30 |
| SbMg20% | 2.33 |
| SbMg30% | 2.24 |
| CMg20% | 2.28 |
| CMg30% | 2.36 |
| CMg40% | 2.30 |
| SbAl20% | 2.43 |
| SbAl30% | 2.52 |
| CmAl20% | 2.30 |
| CmAl30% | 2.36 |
| CmAl40% | 2.35 |

**Figure VI.34:** Masses volumiques des différents mortiers.

- **Interprétation:**

Les résultats représentés dans la figure VI.34 montrent que la masse volumique varie selon le type du déchet utilisé, plus on augmente la quantité du déchet de brique réfractaire HTA plus la masse volumique est importante notamment pour le mortier SbAl30%, par contre les masses volumiques obtenues lors de l'utilisation du déchet de brique réfractaire magnésio-spinelle sont moins importantes. Cette variation est due aux plusieurs facteurs tels que:

- La masse volumique du déchet de brique réfractaire HTA est plus grande par rapport à celle de magnésio-spinelle.
- L'absorption d'eau des briques HTA est plus importante que celle des briques magnésio-spinelle.

VI.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci

VI.3.1. Résistances mécaniques à la flexion et compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique, placée 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.



Figure VI.35: Appareil de flexion-compression.

Tableau VI.32: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

| Formulations | 2J | | 7J | | 28J | |
|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) |
| Ref | 4.19 | 21.80 | 5.58 | 34.20 | 6.15 | 43.65 |
| SbMg20% | 0.65 | 17.44 | 3.07 | 24.85 | 5.71 | 30.40 |
| SbMg30% | 0.95 | 16.30 | 3.50 | 22.15 | 5.87 | 30.05 |

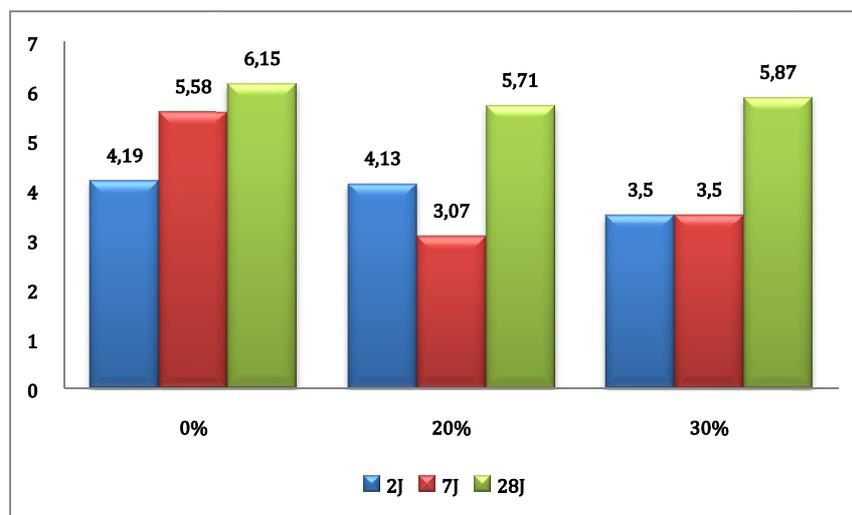


Figure VI.36: Résultats des essais de flexion en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

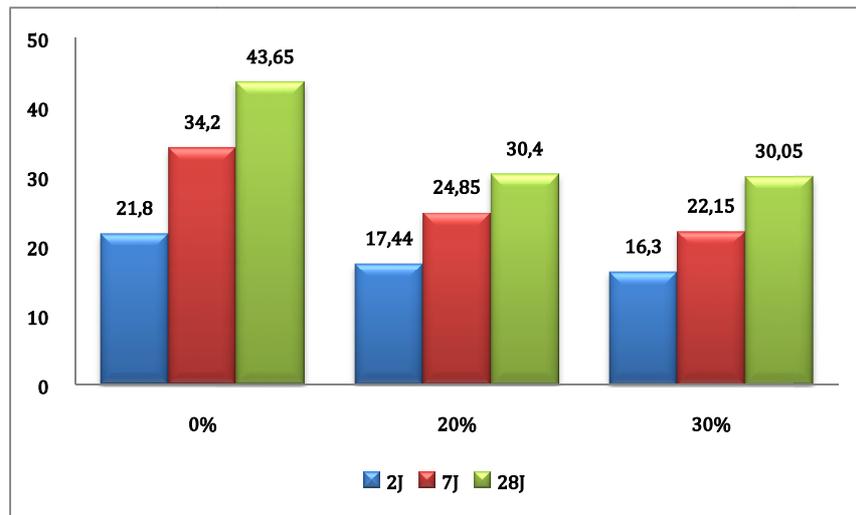


Figure VI.37: Résultats des essais de compression en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

Tableau VI.33: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

| Formulations | 2J | | 7J | | 28J | |
|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) |
| Ref | 4.19 | 21.80 | 5.58 | 34.20 | 6.15 | 43.65 |
| CMg20% | 3.15 | 10.69 | 4.04 | 18.22 | 4.99 | 25.90 |
| CMg30% | 2.51 | 8.39 | 3.45 | 14.82 | 4.52 | 21.50 |
| CMg40% | 1.86 | 5.15 | 3.11 | 8.43 | 3.80 | 15.82 |

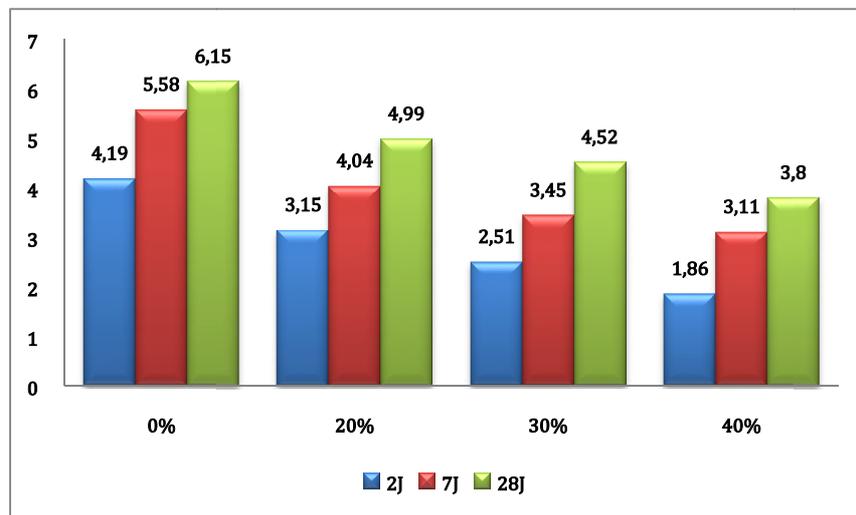


Figure VI.38: Résultats des essais de flexion en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

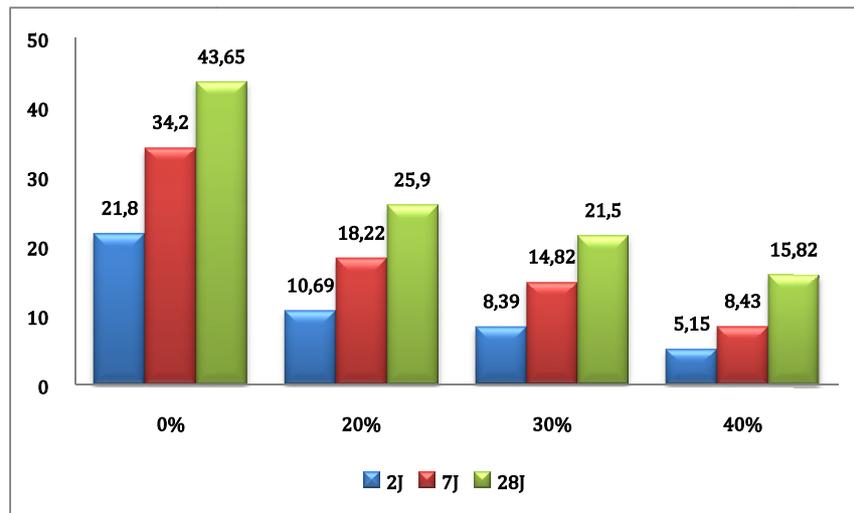


Figure VI.39: Résultats des essais de compression en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire magnésie-spinelle.

Tableau VI.34: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.

| Formulations | 2J | | 7J | | 28J | |
|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) |
| Ref | 4.19 | 21.80 | 5.58 | 34.20 | 6.15 | 43.65 |
| SbAl20% | 0.65 | 1.83 | 0.94 | 3.05 | 6.74 | 50.40 |
| SbAl30% | 0.95 | 2.87 | 1.04 | 4.00 | 7.47 | 55.90 |

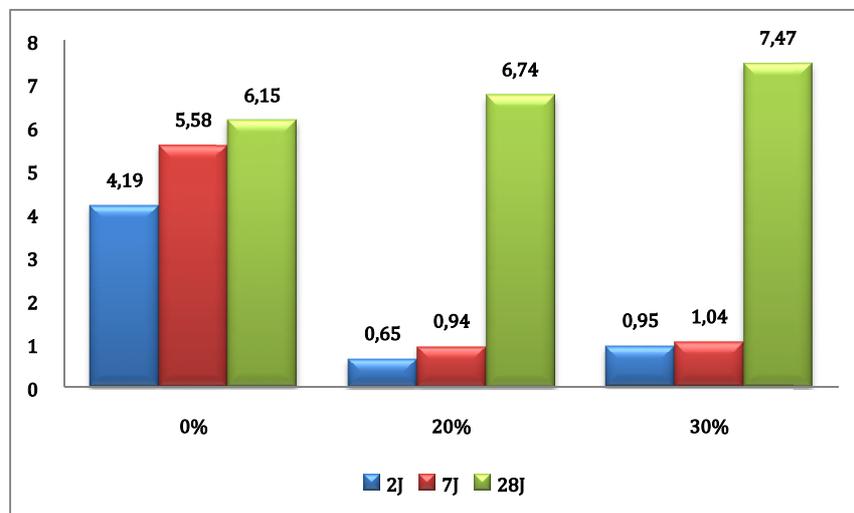


Figure VI.40: Résultats des essais de flexion en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.

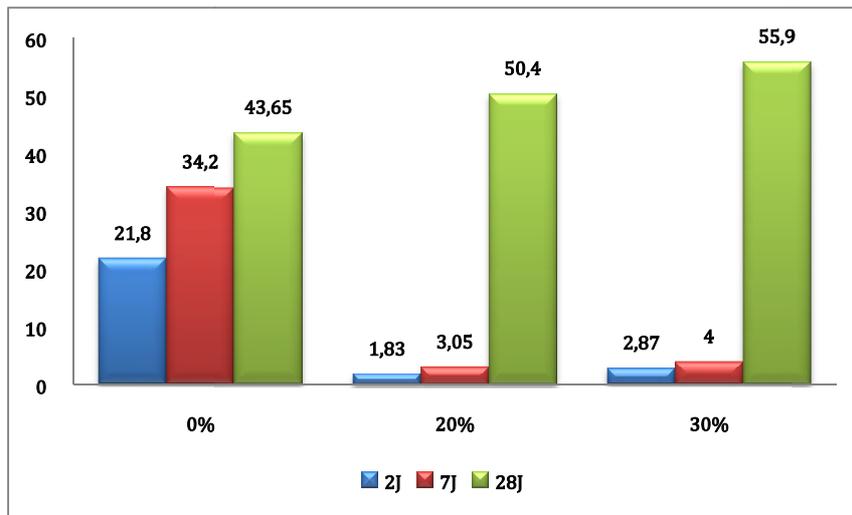


Figure VI.41: Résultats des essais de compression en substituant le sable normalisé par le déchet de brique réfractaire HTA.

Tableau VI.35: Résultats des essais mécaniques sur les mortiers en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

| Formulations | 2J | | 7J | | 28J | |
|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) | Flexion (MPa) | Compression (MPa) |
| Ref | 4.19 | 21.80 | 5.58 | 34.20 | 6.15 | 43.65 |
| CmA120% | 3.67 | 16.53 | 4.45 | 28.05 | 6.04 | 33.95 |
| CmA130% | 1.83 | 4.47 | 3.67 | 21.80 | 5.73 | 28.80 |
| CmA140% | 0.24 | 0 | 2.37 | 6.50 | 4.21 | 23.15 |

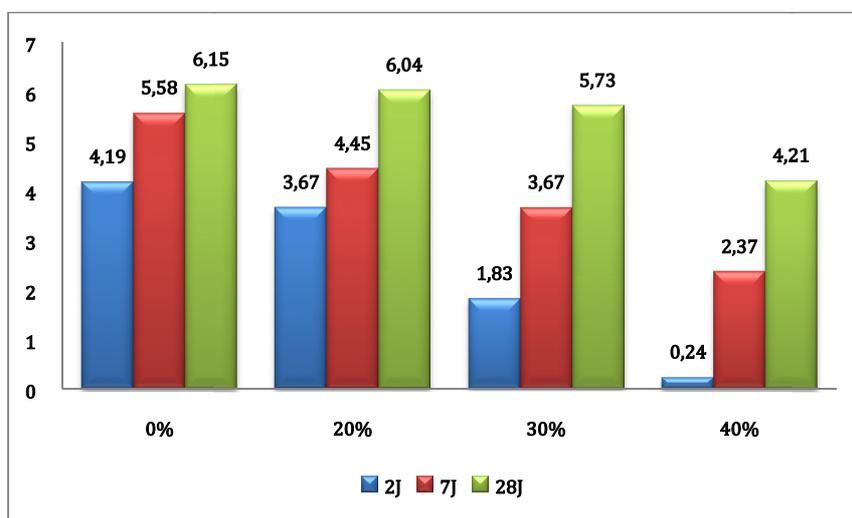


Figure VI.42: Résultats des essais de flexion en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

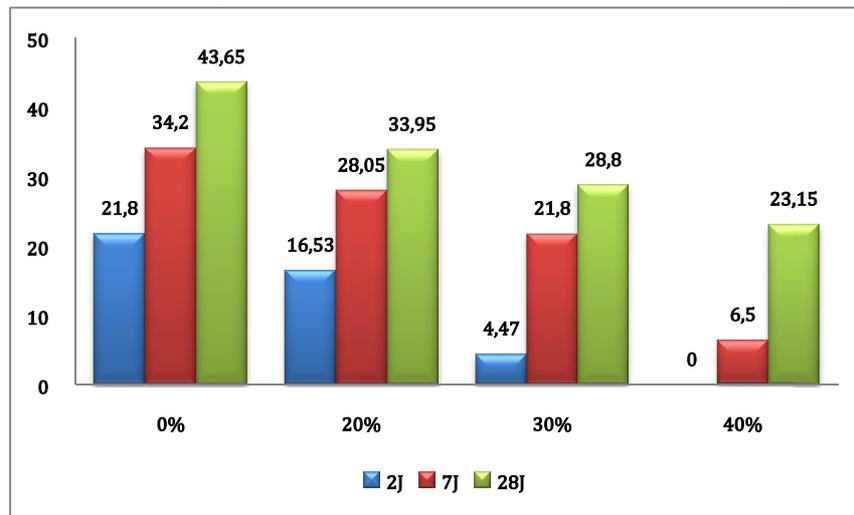


Figure VI.43: Résultats des essais de compression en substituant le ciment par le déchet de brique réfractaire HTA.

VI.3.2. Discussion des résultats des essais de flexion et compression

L'essai de compression simple est une référence pour qualifier la résistance mécanique d'un mortier. Cette dernière étant utilisée par la suite pour le dimensionnement de structures. Dans la littérature, peu de résultats montrant l'évolution de la résistance en traction par flexion du mortier ou d'un béton.

La règle principale de la résistance mécanique des mortiers est directement liée au rapport (E/C), c'est-à-dire un faible rapport conduit à une faible porosité donc une grande compacité et par conséquent une résistance mécanique élevée.

Les figures VI.36, VI.37, VI.38, VI.39, VI.40, VI.41, VI.42, VI.43 présentent l'évolution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des différents mortiers formulés. D'après ces histogrammes, on constate une augmentation des résistances mécaniques notamment pour le mortier SbAl30% par rapport aux autres mortiers y compris le mortier de référence. Cette croissance de résistances est due en premier lieu au faible rapport (E/C).

Non seulement le rapport (E/C) joue un rôle important sur la variation des résistances mécaniques mais aussi les fines particules qui comblent les vides dans la matrice et donnent une bonne compacité (effet physique).

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que l'ajout de déchet de brique réfractaire HTA influe positivement sur le comportement mécanique des mortiers, donc il peut être valorisé sur le plan mécanique.

VI.3.2. Comportement thermique des différents mortiers

VI.3.2.1. But du traitement thermique

Cette étude consiste à examiner l'effet de la température sur la perte de masse des différents mortiers en fonction du temps.

L'effet de la température va entraîner une modification des composants (pâte de ciment, sable, déchet de brique réfractaire) ainsi que la structure de notre mortier. D'un point de vue macroscopique, il en résulte une modification des propriétés thermiques.

VI.3.2.2. Méthodologie

- Retirer les éprouvettes du bassin après conservation sous l'eau pendant 28 jours (température 20°C).
- Sécher avec un chiffon humide puis étuver à une température de 100 à 105°C.
- Noter la masse de chaque éprouvette après séchage total (la masse devient constante).
- Ensuite les éprouvettes sont soumises à une haute température (1400°C) dans un four selon le profil ci-dessous (**figure VI.44**). Chaque jour, on fait la pesée de l'éprouvette pour évaluer la perte de masse après chaque cycle thermique (chauffage –refroidissement).

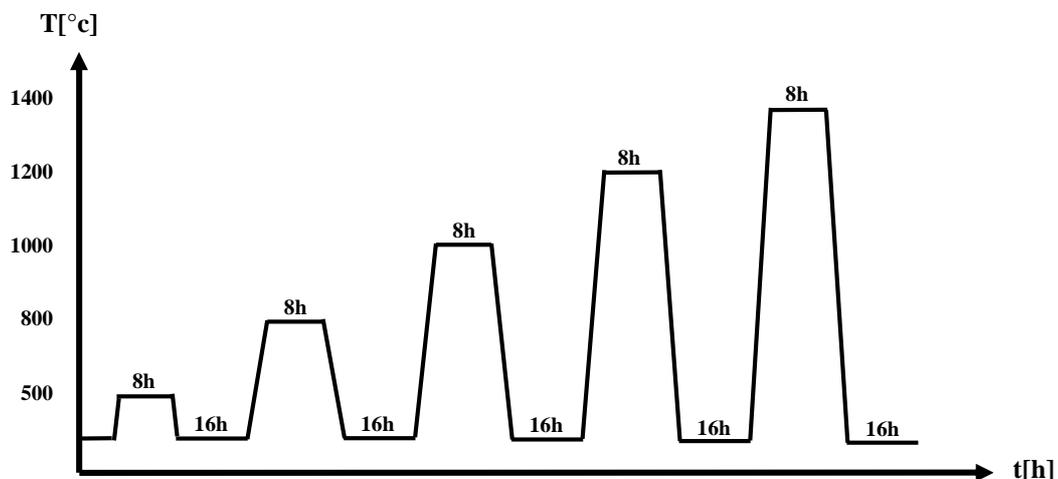


Figure VI.44: Profil thermique subi par les éprouvettes.

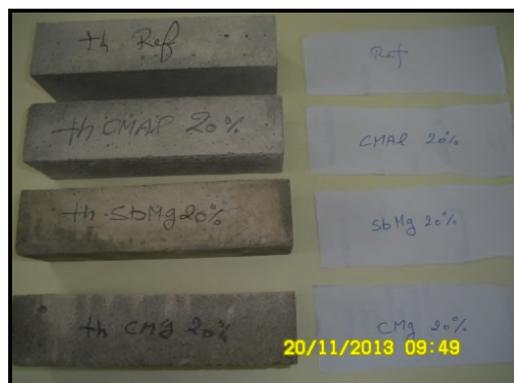


Figure VI.45: Eprouvettes sans avoir subi un traitement thermique.



Figure VI.46: Eprouvette SbAl30% ayant subi un traitement thermique à 1400°C.

VI.3.2.3. Variation de masses des éprouvettes en fonction de température

Tableau VI.36: Variations de masse des éprouvettes ayant subi un traitement thermique.

| | m_0 | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 | m_5 |
|---------|-------|-------------|-----------|------------|-----------------|--------|
| Ref | 532 | Fissuration | Ecaillage | Eclatement | | |
| SbAl30% | 549 | 534 | 531 | 532 | 530 | 531 |
| CmAl20% | 524 | 502 | 501 | 499 | Début de fusion | Fusion |
| SbMg20% | 555 | 523 | 520 | 521 | Début de fusion | Fusion |
| CMg20% | 538 | 513 | 510 | 510 | Début de fusion | Fusion |

- Perte de masse:

$$PM(\%) = \frac{m_0 - m_f}{m_0} 100\%$$

Tableau VI.37: Pertes de masse des éprouvettes ayant subi un traitement thermique.

| | PM ₁ | PM ₂ | PM ₃ | PM ₄ | PM ₅ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ref | - | | | | |
| SbAl30% | 2.73 | 3.27 | 3.09 | 3.46 | 3.27 |
| CmAl20% | 4.19 | 4.38 | 4.77 | - | |
| SbMg20% | 5.76 | 6.30 | 6.12 | - | |
| CMg20% | 4.64 | 5.20 | 5.20 | - | |

- **Interprétation:**

D'après les résultats du comportement thermique présentés dans le tableau VI.37, on constate une faible perte de masse pour l'éprouvette SbAl30% par rapport aux autres éprouvettes. Non seulement elle a donné une bonne stabilité thermique, elle a pu résister même en arrivant à une température élevée de 1400°C.

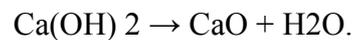
Tous les autres mortiers n'ont pas résisté à 1400°C, et comme résultat ils ont subi une détérioration, soit par éclatement (mortier de référence), soit par fusion.

VI.3.2.4. Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie

Au sein du matériau mortier se déroulent de nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques plus ou moins rapides comme le montre la figure IV.47. Ainsi tout au long de la

vie du béton ou mortier, celui-ci est sensible aux conditions d'humidité et de température de son environnement qui modifient ses caractéristiques macroscopiques (durabilité, résistance...). Pour notre cas, nous présentons maintenant les intervalles de température pour lesquels se produisent des changements physico-chimiques de la pâte de ciment et du béton ordinaire. L'élévation de la température entraîne les processus suivants:

- Entre 30°C et 120°C: l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent. Castellote [30] montre aussi une décomposition de l'ettringite et son élimination complète avant 100°C.
- Entre 130°C et 170°C: le gypse se décompose d'après Noumowe et Alarcon [31]
- En dessus de 100°C jusqu'à 400°C, d'après Castellote, le gel C-S-H se déshydrate essentiellement en β -C₂S, β -CS et en eau d'après Bažant [32].
- Entre 450°C et 550°C: décomposition de la portlandite selon l'équation :



- Autour de 570°C: transformation des granulats quartziques de la phase α à la phase β . Ceci s'accompagne d'un gonflement.
 - Entre 600°C et 700°C: deuxième phase de déshydratation du gel C-S-H d'après Noumowe [33].
 - A partir de 650°C: décomposition endothermique du calcaire selon l'équation :
- $$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2.$$
- A partir de 1300°C: début de fusion de la pâte et des granulats, éliminations des sulfates et évaporations des alcalins d'après Schneider [34].

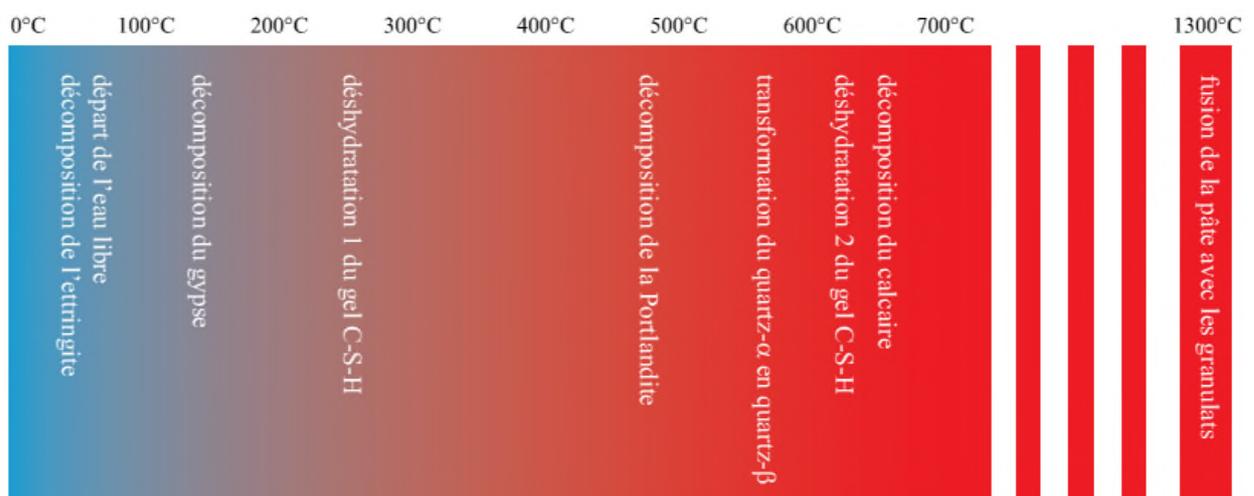


Figure VI.47: Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie.

VI.3.2.5. Analyse thermique différentielle et gravimétrie (ATD-TG)

Afin d'avoir plus d'informations sur le comportement du déchet de brique réfractaire HTA qui a donné de bons résultats sur le plan thermomécanique, on a effectué une analyse thermique différentielle et gravimétrie (ATD-TG) pour quatre échantillons. Les résultats de cette analyse sont présentés dans les figures IV.48, IV.49, IV.50 et IV.51.

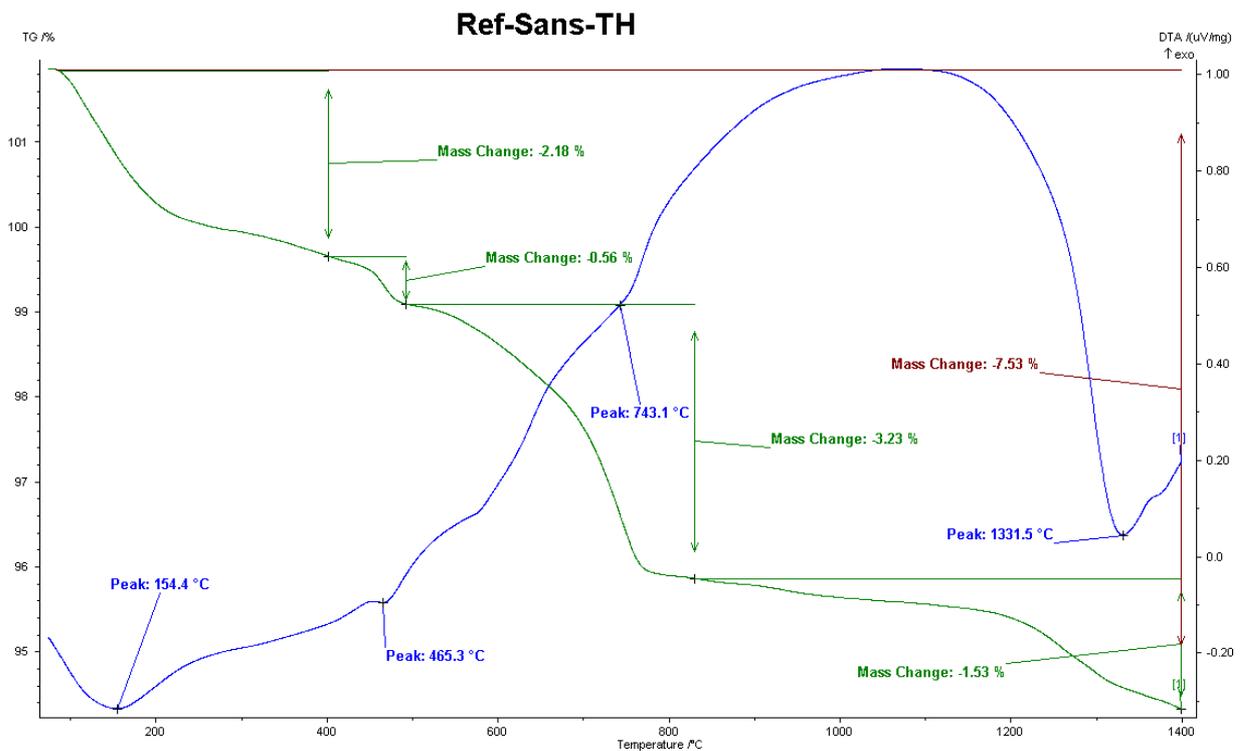


Figure VI.48: Analyse ATD-TG d'un échantillon de Ref sans traitement thermique.

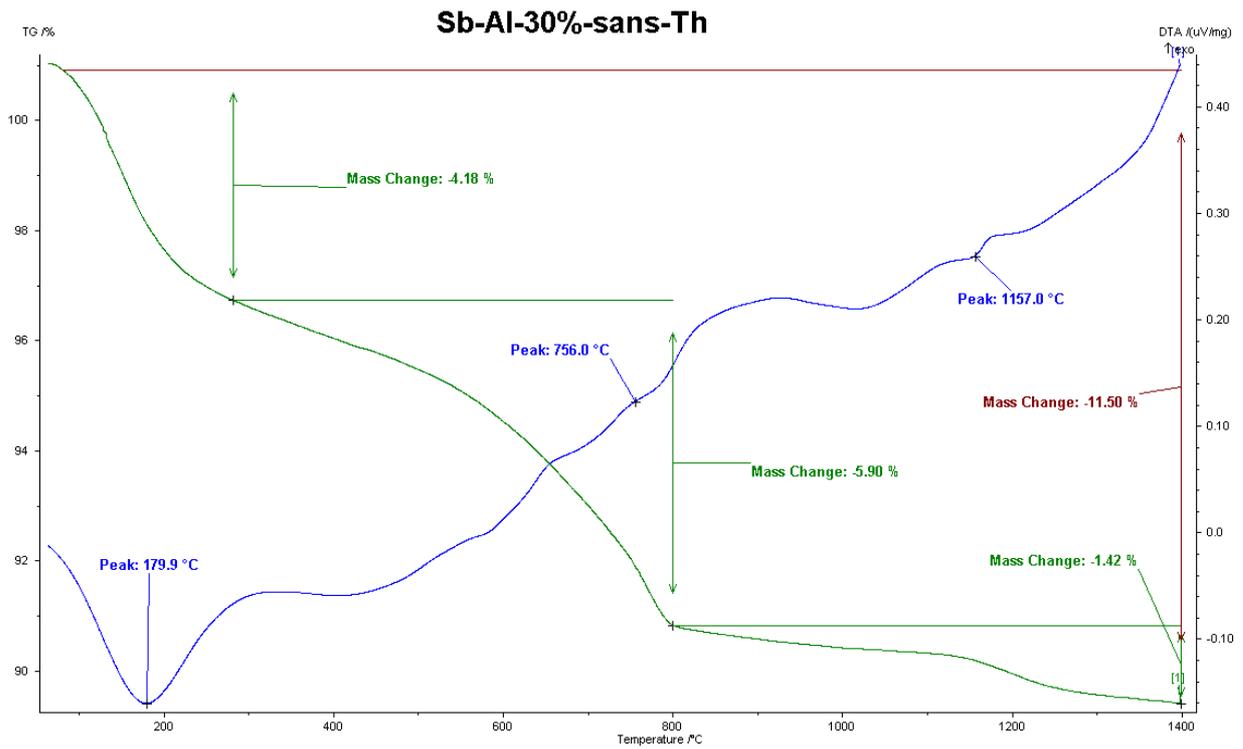


Figure VI.49: Analyse ATD-TG d'un échantillon de SbAl30% sans traitement thermique.

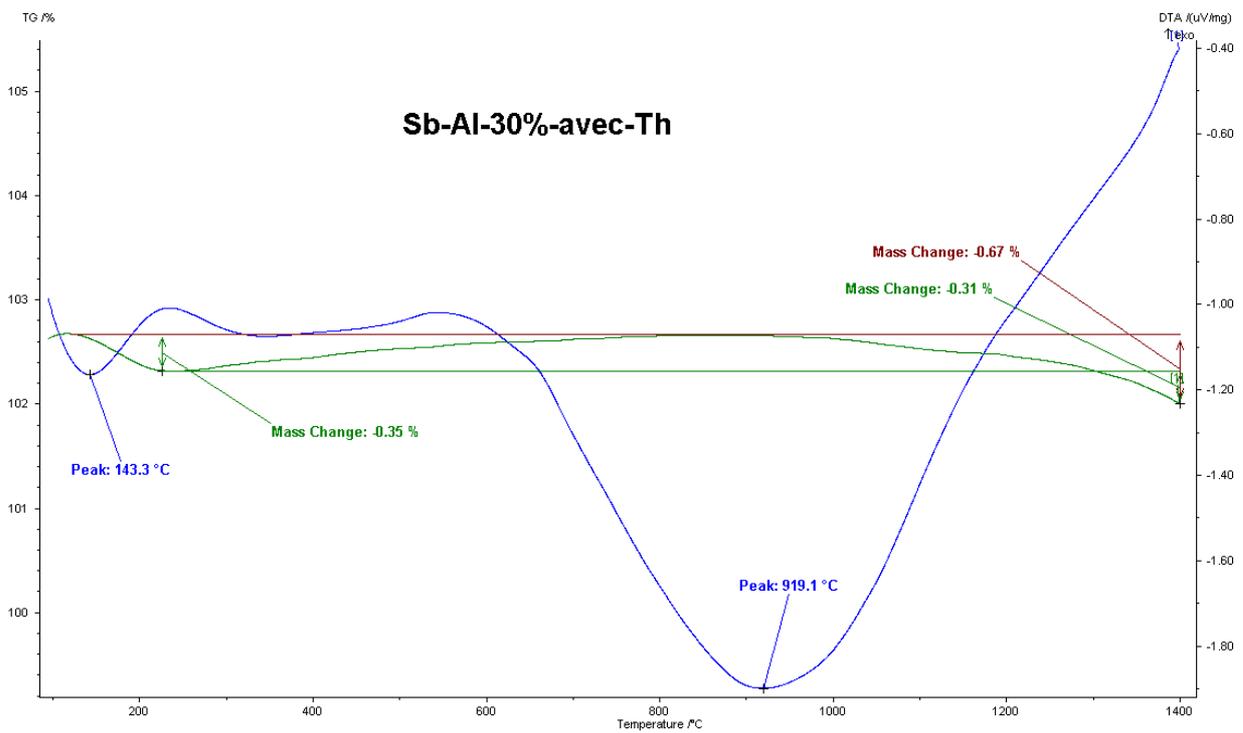


Figure VI.50: Analyse ATD-TG d'un échantillon de SbAl30% avec traitement thermique.

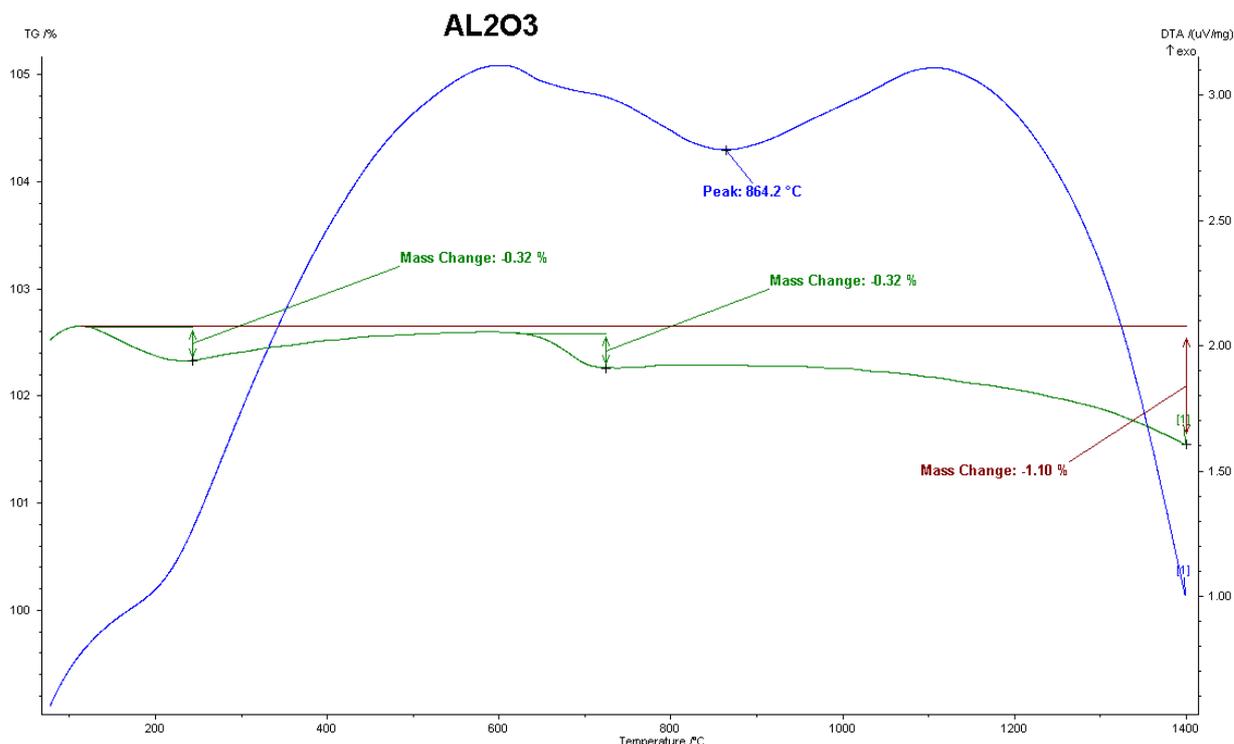


Figure VI.51: Analyse ATD-TG d'un échantillon de déchet de brique réfractaire HTA.

VI.3.2.6. Interprétation des résultats d'analyse ATD-TG

Les quatre échantillons étudiés ont été analysés au niveau de l'unité de recherche, matériaux, procédés et environnement (UR-MPE). Les résultats de ces analyses sont présentés dans les figures **VI.49**, **VI.50**, **VI.51** et **VI.52**.

Ces analyses ont été effectuées sur les échantillons dans un intervalle de température qui varie entre 100°C et 1400°C avec une vitesse de chauffe de 30°C/min.

La comparaison entre les différents échantillons avec l'analyse ATD-TG a montré que l'échantillon de SbAl30% et l'échantillon du déchet de brique réfractaire HTA ont subi presque les mêmes transformations vis-à-vis la température, ces transformations sont présentés par des combinaisons (température, perte de masse) comme suit:

L'analyse présentée dans la figure **VI.49** nous a permis de distinguer trois pics endothermiques à 179.9°C bien prononcé, à 756.0°C moins prononcé et à 1157.0°C prononcé.

Pour l'analyse présentée dans la figure **VI.51**, on note un pic endothermique à 864.2°C prononcé et trois pics exothermiques à environ 600°C, 1150°C et 1400°C.

- Le premier pic endothermique bien prononcé se situe vers 179.9°C, il y a une transformation des hydrates en hydrates stables (C_3AH_6 et AH_3), ainsi que la gibbsite et le C_3AH_6 sont convertis en phases anhydres, notamment en $C_{12}A_7$.

- Le deuxième pic endothermique moins prononcé est observé sur la courbe de l'ATD 756.0°C, il est dû au dégagement de l'eau liée chimiquement qui se traduit par la déshydratation du gel C-S-H.
- Le pic exothermique à 1150°C montre la cristallisation de la phase CA, qui commence vers 950°C et réagit ensuite avec l'alumine (Al_2O_3) pour former CA_2 à partir de 1100 °C.
- Le pic exothermique vers 1400°C, d'après le système ternaire (C-A-S), il peut être expliqué par la présence de la silice libre qui peut générer une phase de type CAS_2 (Anorthite) ou C_2AS (Gehlenite).
- Un autre pic à environ 1400°C montre clairement la fusion (phase liquide) de la pâte des granulats.

VI.3.3. Analyse par diffractométrie des rayons X

Des analyses par diffraction en rayons X ont été effectuées afin d'identifier les nouvelles phases cristallines formées.

Les analyses des spectres de diffraction des échantillons prélevés avant et après traitement thermique sont présentées dans les figures VI.54, VI.53 et VI.54.

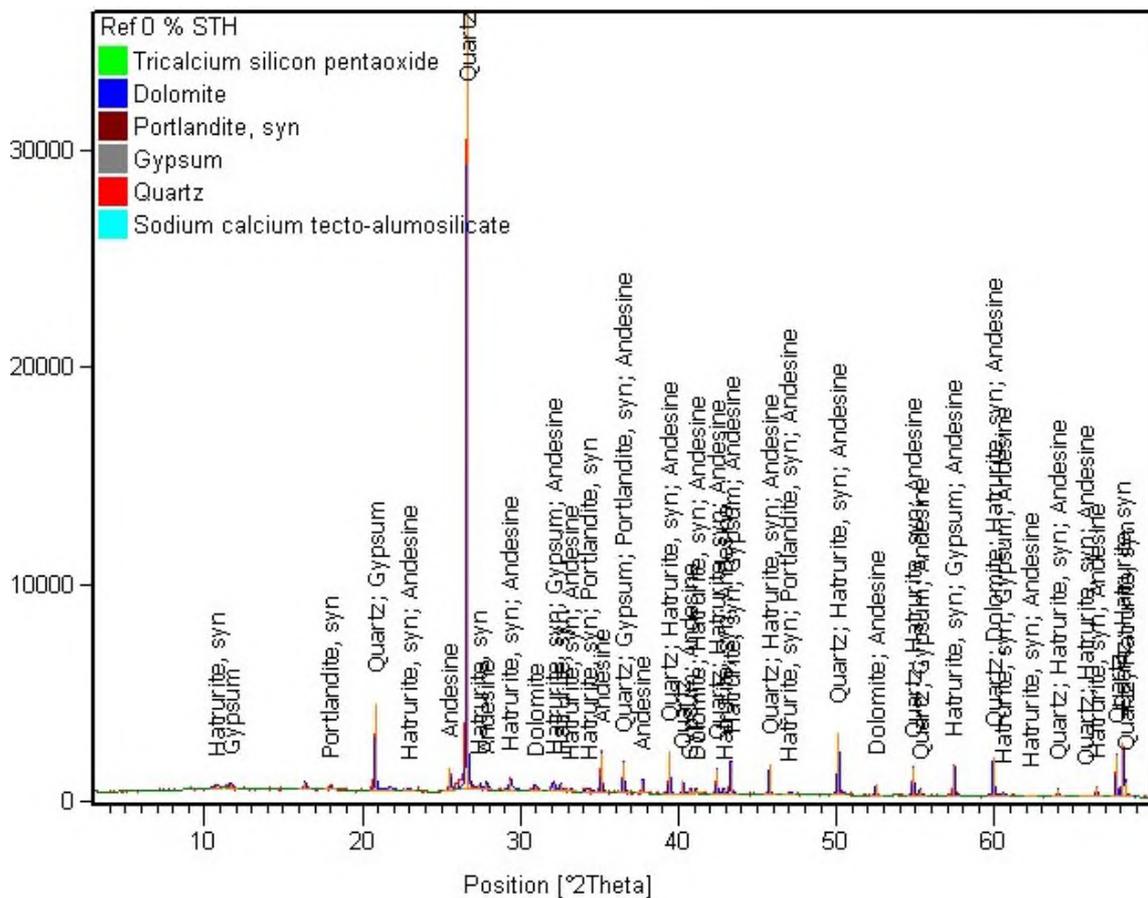


Figure VI.52: Spectre de diffraction d'un échantillon de Ref sans avoir subi le traitement thermique.

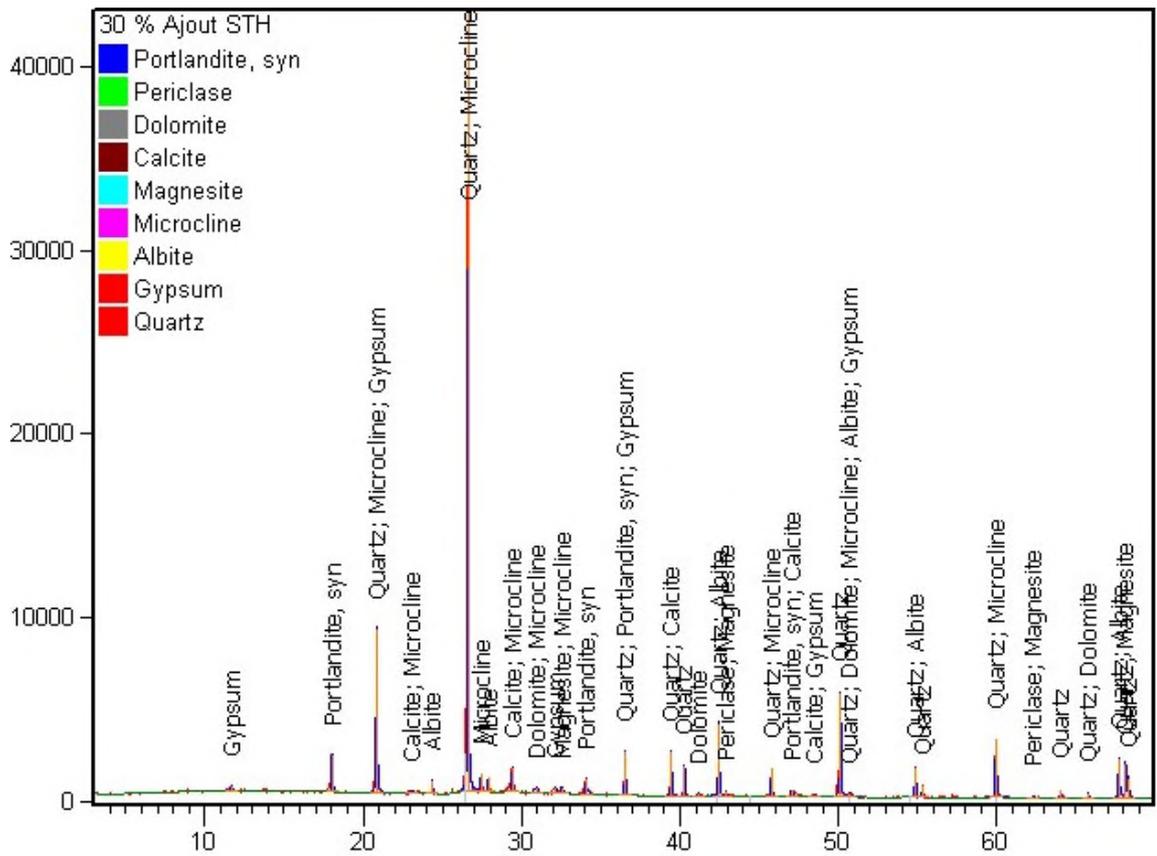


Figure VI.53: Spectre de diffraction d'un échantillon de SbAl30% sans avoir subi le traitement thermique.

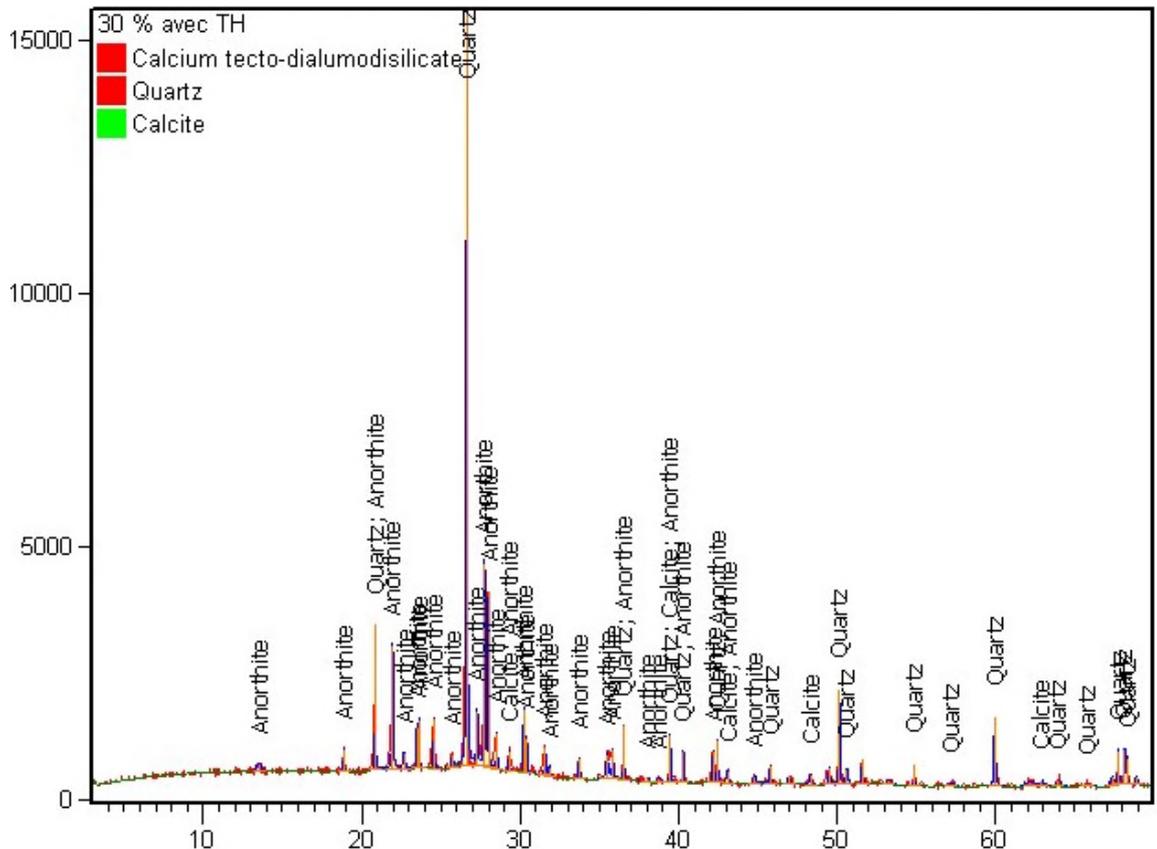


Figure VI.54: Spectre de diffraction d'un échantillon de SbAl30% ayant subi le traitement thermique à 1400°C.

VI.3.3.1. Interprétation des analyses par diffractométrie des rayons X

On constate dans le diffractogramme (**figure VI.54**) de l'échantillon SbAl30% traité à 1400°C une disparition de la quasi-totalité des composants sauf qu'il y avait une formation remarquable de quartz qui crée une phase vitreuse, on note également la naissance d'un nouveau composant.

L'analyse minéralogique qualitative par diffractométrie des rayons X des trois échantillons prélevés des mortiers a permis de mettre en évidence que le nouveau composant formé n'était rien d'autre que l'Anorthite comme le montre la figure **VI.54**. Ce nouveau composant appartient à la famille des tecto-silicates qui résistent à de hautes températures.

Conclusion générale et perspectives

i. Conclusion générale

Les travaux de recherche dans ce domaine sont encore peu avancés car ils demandent un investissement important, mais ils s'inscrivent dans une véritable volonté de développer des outils d'aide à la conception.

Le recyclage des déchets de briques réfractaires comme agrégats est moins coûteux et ne demande pas pour son élaboration un matériel ou des stations spéciales comme celles conçues à l'élaboration des granulats recyclés à base de déchets de démolition et de construction.

Le recyclage des déchets inertes pour produire des granulats contribue à limiter:

- La mise en décharge de ces déchets,
- Le déficit en granulats de la région,
- Les transports des granulats vierges et les transports de déchets (en sens inverse).

L'étude des caractéristiques des ajouts à base de déchets de briques réfractaires et les propriétés des mortiers à base de ces ajouts ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Il est possible de valoriser les déchets de briques réfractaires comme ajouts pour la fabrication des mortiers réfractaires.
- Le déchet de brique réfractaire HTA broyé produit, en général, des mortiers avec une résistance plus élevée par rapport à celle du mortier normal.
- Les résistances mécaniques du mortier varient en fonction de la densité du déchet de brique réfractaire. Donc plus ce dernier est dense, plus les performances mécaniques du mortier augmentent,
- Les ajouts à base de déchets de briques réfractaires broyées conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, conduites de fumées, sols d'usines sidérurgiques, parties de fours,...
- En général, il est possible d'exploiter les mortiers à base de déchets de briques réfractaires HTA jusqu'à 1400°C
- Les résultats obtenus dans cette étude nous donnent une très bonne raison de penser à une éventuelle utilisation de ces déchets dans les mortiers thermorésistants.

ii. Perspectives

Cette étude peut être améliorée par:

- L'utilisation d'un ciment CEMI pour avoir des résultats plus corrects.
- Optimisation du rapport E/C.
- L'optimisation du profil thermique surtout en ce qui concerne la vitesse de chauffage, cela nous oblige à utiliser un four programmable.
- La compréhension de la microstructure à l'aide d'un MEB.
- L'optimisation de la granulométrie de déchet.
- L'étude des autres propriétés thermiques telles que: dilatation et choc thermique.
- Optimiser la résistance de ces mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires broyés par:
 - La substitution partielle du déchet par la même classe granulaire,
 - L'augmentation du dosage en ciment,
- Etudier l'isolation thermique ainsi que phonique des bétons à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires broyés.
- Etudier l'adhérence du béton à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires broyés aux armatures (essais d'arrachement).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bernard DARBOIS, Walter ROTHLAUF, « CIMENT », Encyclopædia Universalis.
- [2] Ciments par Joseph ABDO: base documentaire scientifique et technique - Techniques de l'Ingénieur.
- [3] GCI712 « Durabilité ET réparation du béton », département Génie civil, Université de Sherbrooke-Canada, Avril 2009.
- [4] Erik B Nelson, Jean-François Baret and Michel Michaux (1990), « Cement Additives and Mechanisms of Action ».
- [5] Le ciment Est un matériau essentiel en construction. Les parpaings de ciment ou blocs de béton servent à monter les murs. © Catherine Roy, CC BY-NC-ND 2.0, Flickr.
- [6] Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Edition Eyrolles, 2009.
- [7] Rock Product, mars 1996; cembureau; international ciment review, juillet 1997.
- [8] J. P Olivier: livre de " Durabilité des bétons ". (A.NONAT :chapitre2; V. BAROGHELBOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS: chapitre9; A. CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12 (Edition: Presse de l'école nationale des ponts et chaussées-2008).
- [9] Nicolas HYVERT: Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton (Thèse de doctorat-l'Université Toulouse III-Paul Sabatier-2009).
- [10] CHIHAOUI Ramdane: Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran-2008).
- [11] M.ADAM, « Guide pratique pour l'emploi des ciments »
- [12] D.SCHLUUMBERGER, Cementent technology, édition nova communication, London, 1984, P271-276.
- [13] WILLIAM.D, CALLISTER.JR « Science et génie des matériaux » modolu Editeur, 2001.
- [14] R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN «Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004.
- [15] Arezki Tagni Hamou « Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, chapitre 8 ».
- [16] SYLVER.P «science des matériaux», université pierre et marie curie 2005 ,2006.
- [17] PDF réalisé par Zile-Marie Durosier Richard Bonneville.
- [18] W.T. BAKKER, Refractory Concrete, American Concrete Institute Publication SP57, 1978.
- [19] Jacques Lachnitt, Les matériaux réfractaires, Que sais-je?, Presses Universitaires de France, Paris, 1983, 128 pages, ISBN 2130379427
- [20] Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour obtenir le grade de docteur par Frédéric THUMMEN.
- [21] A. NOUMOWE NCHAMBOU, Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de Doctorat: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995, 232p.
- [22] Références Jean Peyroux (Arts et métiers), Dictionnaire des mots de la technique et des métiers, Librairie Blanchard, Paris, 1985.

- [23] A.JOURDIN, « la technologie des produits céramique réfractaires », Paris Gauthier-Villard. p315-329, 1966.
- [24] E.Krause, T.Plaul et R.Zollner, « pricipes et techniques de caisson et de construction des fours céramiques », Ed.Septima, Paris, 1973.
- [25] M.J.RIBEIRO, J.A.LABRINCHA, « Properties of sintered mullite and cordierite pressed bodies manufactured using Al-rich anodising sludge », *ceramics international* 34, 2008, 593-597.
- [26] G. Aliprandi, *Matériaux Réfractaires et Céramiques Techniques*, éditions Septima Paris, 1979.
- [27] Livre Nanotechnologie, « Les politiques des nanotechnologies », Editions Charles Léopold Mayer www.eclm.fr/nanotech.html.
- [28] F.SIMONIN, Comportement thermomécanique de bétons réfractaires alumineux Contenant du spinelle de magnésium, Thèse de doctorat, « Institut National des Sciences Appliquées de Lyon », 2000.
- [29] G. Aliprandi, *Matériaux Réfractaires et Céramiques Techniques*, éditions Septima Paris, 1979.
- [30] M. Castilote, C.Alonso, C.Andrade, X Turillas; and J.Campo composition and microstructural changes of cement pastes upon leaching as studiend bay neutron diffraction cement and concete *Research*, 34(9): 1633-1644, 2004.
- [31] L.Alrancon-Ruiz, G.Platered, E.Massiu, and A.Ehrlacher. Theuse of thermal analyse in assessing the effect of temperatur on cement paste. *Cement and concrete research*, 35 :609-613, 2005.
- [32] Z.P.Bazent and L. Najjar. Nolinear water diffusion in norsaturated concrete materias and structures, 5: 3-20, 1972.
- [33] A.Noumowé, effet de haute température (20-600°C) sur les bétons. Cas Particulier du BFUP. PhD Thesis, INSA, Loyon, 1995.
- [34] U.Schneider, U.Drederiches, and. C.Ehm. effect of temperature on steel and concrete for PCRVS. *Nuclear engineering and design*, 67:245-258.