



Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master
Filière : Génie Minier
Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par :

Mr. BELGHITI Ali.

Mr. GUENDOUZ Aimene.

Thème

*Préparation théorique du cru et clinker à ciment par le logiciel
de gestion de la qualité. Application à la Cimenterie de Sidi*

Moussa- ADRAR.

Soutenu le 26/06/2018 à 11^h devant le jury composé de :

<i>Président</i>	<i>Mr A. AKDIM</i>	<i>M.A.A</i>	<i>U.A.M.B</i>
<i>Promoteur</i>	<i>Mr K. MOUSSACEB</i>	<i>Professeur</i>	<i>U.A.M.B</i>
<i>Examinatrice</i>	<i>M^{me} N. MALEK</i>	<i>M.C.B</i>	<i>U.A.M.B</i>
<i>Co-promoteur</i>	<i>M^{lle} F. Araoun</i>	<i>Doctorante</i>	<i>V.A.MR</i>

REMERCIEMENT

Ce travail de recherche a été réalisé au département des mines et Géologie Faculté technologie, Université Abderrahmane Mira-BEJAIA, dans le cadre d'une mémoire de Master.

Au terme de cette recherche, il nous est très agréable d'exprimer toute notre gratitude, notre reconnaissance et notre très vif remerciement à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous remercions Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous donné durant tous ces années d'étude.

En premier lieu nous exprimons notre profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à notre Promoteur, Monsieur K. Moussaceb, Professeur à l'Université Abderrahmane Mira-BEJAIA, qui n'a ménagé aucun effort pour réaliser ce travail, par ces conseils attentifs et critiques précieuses.

Nous voulons remercier le Docteur A. Akdim, d'avoir accepté de présider le Jury, nous lui en est très reconnaissant.

Nous remercions également Madame N. Malek (M.C.B) d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Finalement, nous n'oublierons sans doute pas de remercier mes amis, collègues, enseignants, administrateurs et travailleurs de département des mines et Géologie.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

- ✓ *Mon très cher père qui me prodigue toujours des conseils de grandes valeurs.*
- ✓ *Ma très chère mère qui m'apporte toujours son amour affectif.*
- ✓ *Mes chers frères et sœurs qui me soutiennent tout le temps.*
- ✓ *Toute ma grande famille.*
- ✓ *Tous mes amis.*
- ✓ *Tous mes collègues à l'université de Bejaia.*

AIMENE.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

- ✓ *Mon très cher père qui me prodigue toujours des conseils de grandes valeurs.*
- ✓ *Ma très chère mère qui m'apporte toujours son amour affectif.*
- ✓ *Mes chers frères et sœurs qui me soutiennent tout le temps.*
- ✓ *Toute ma grande famille.*
- ✓ *Tous mes amis.*
- ✓ *Tous mes collègues à l'université de Bejaia.*

Ali.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABRIVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : CHIMIE DU CIMENT

Introduction	3
I.1. Chimie du ciment	3
I.1.1. Définition de chimie du ciment	3
I.1.2. Composition chimique des matières premières	4
I.1.3. Composition minéralogique du ciment	5
I.2. Caractéristiques principales des minéraux du clinker	5
I.2.1. Silicate tricalcique C_3S (Alite).....	5
I.2.2. Silicate bicalcique C_2S (Belite).....	5
I.2.3. Aluminate tricalcique C_3A (Cellite).....	6
I.2.4. Aluminoferrite tétracalcique C_4AF	6
I.3. Notions de modules dans la chimie du ciment	6
I.3.1. Modules régissant la chimie du ciment.....	6
I.3.2. Contrainte technologique sur le four (Module régissant la chimie du clinker).....	10
I.4. Fabrication du ciment Portland.....	12
I.4.1. Principe de fabrication	12
I.4.2. Fabrication du ciment par voie humide.....	13
I.4.3. Fabrication du ciment par voie semi-humide	14
I.4.4. Fabrication du ciment par voie semi-sèche.....	14
I.4.5. Fabrication du ciment par voie sèche.....	14
I.5. Hydratation du ciment portland.....	21
I.5.1. Théories d'hydratation du ciment portland.....	21
I.5.2. Durcissement et prise de ciment.....	23
I.6. Classification et domaine d'application des ciments.....	23

I.6.1. Types du ciment.....	23
I.6.2. Classe de résistance du ciment	25
I.6.3. Domaine d'utilisation des différents ciments	25
I.7. Ciment pétrolier.....	26
I.7.1. Définition	26
I.7.2. Processus de fabrication de Ciment pétrolier	26
I.7.3. Classification des ciments pétroliers	26
I.7.4. Domaine d'utilisation.....	29
Conclusion.....	30

**CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA CIMENTERIE ET PROTOCOLES
EXPERIMENTALS**

Introduction.....	31
II.1. Présentation du site.....	31
II.1.1. Situation géographique.....	31
II.1.2. Topographie du site.....	32
II.1.3. Situation climatologique.....	32
II.1.4. Situation géologique.....	33
II.1.5. Exploitation des carrières.....	35
II.2. Protocoles expérimentaux.....	37
II.2.1. Préparation mécanique d'échantillons.....	37
II.2.2. Méthodes d'analyse chimique.....	39
II.2.3. Méthode d'analyse chimique pour détermination des compositions chimiques des matières (calcaire, argile, fer, sable)	42
II.3. Présentation du logiciel de gestion de la qualité du ciment (homogénéisation et fabrication)	49
Conclusion	52

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction.....	53
III.1. Étude et suivi de la production du ciment au niveau de la cimenterie sidi-moussa (ADRAR).....	53

III.1.1. Contrôle des variations des compositions chimiques et des modules LSF, MS et A/F du cru.....	53
III.1.2. Contrôle de la composition chimique et minéralogique du clinker en dix jours de production au niveau de la cimenterie d'ADRAR.....	56
III.2. Essais de préparation de cru et clinker C.P.A et pétrolier.....	57
III.2.1. Plan d'échantillonnage.....	57
III.2.2. Caractérisation des matières premières utilisées.....	58
III.2.2.1. Etapes de préparation des échantillons pour analyses.....	58
III.2.2.2. Composition chimique.....	60
III.3. Exécution du logiciel de gestion de la qualité du ciment.....	61
III.3.1. Préparation du cru CPA.....	61
III.3.1.1. Préparation du cru CPA par matières premières ordinaires.....	61
III.3.1.2. Préparation du cru CPA par valorisation de déchet de marbre.....	65
III.3.2. Préparation de cru pétrolier.....	69
III.3.2.1. Préparation du cru pétrolier par matières premières ordinaires.....	69
III.3.2.2. Préparation du cru pétrolier en substituant le calcaire par le déchet de marbre.....	73
Conclusion.....	77
CONCLUSION GENERALE	
PERSPECTIVES	
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	
ANNEXES	

Liste des tableaux

Tableau I.1: Composition chimique du ciment portland	5
Tableau I.2: Composition minéralogique du ciment.	5
Tableau I.3: Procédés généraux de fabrication du ciment.	13
Tableau I.4: Composition chimique et minéralogique du Clinker	17
Tableau I.5: Liste des différents types de ciments normalisés	24
Tableau I.6: Classes de résistance du ciment.....	25
Tableau I.7: Domaine d'utilisation des différents ciments.....	25
Tableau I.8: Domaine d'utilisation des différents ciments.....	27
Tableau I.9: Les caractéristiques physique d'un ciment pétrolier classe G.....	29
Tableau III.1: Composition chimique et les indices de qualité des crus conçus le long d'une journée.....	53
Tableau III.2: Compositions chimiques du clinker de la cimenterie de Sidi Moussa.....	56
Tableau III.3: Compositions minéralogiques potentielle du clinker	56
Tableau III.4: Masse des échantillons prélevées et acheminés au laboratoire LTMGP	58
Tableau III.5: Compositions chimiques des matières premières.....	60
Tableau III.6: Paramètres et compositions théoriques donnés par le logiciel.....	62
Tableau III.7: Composition chimique du tas calcaire et de cru.....	63
Tableau III.8: Modules du cru.....	63
Tableau III.9: Comparaison de la composition chimique du cru, tas calcaire et modules du Cru C.P.A.....	63
Tableau III.10: composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 1)..	64
Tableau III.11: Résultats donnés par le logiciel.....	66
Table III.12: Préparation du cru conformément aux résultats du logiciel.	66
Tableau III.13: Composition chimique du tas calcaire et de cru.....	67
Tableau III.14: Modules du cru.....	67
Tableau III.15: Comparaison de la composition chimique et des modules du cru.	67
Tableau III.16: : Composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 2)..	68
Tableau III.17: Résultats théorique donnés par le logiciel.....	70
Tableau III.18: Préparation du cru conformément aux résultats du logiciel.....	70
Tableau III.19: Composition chimique du tas calcaire et de cru.....	71
Tableau III.20: Modules du cru.....	71

Tableau III.21: Comparaison de la composition chimique du cru, tas calcaire et modules... 72	72
Tableau III.22: Composition chimique des minéraux du cru pétrolier (Var 1)..... 73	73
Tableau III.23: Résultats donnés par le logiciel..... 74	74
Tableau III.24: Préparation du cru pétrolier par valorisation de déchet de marbre. 74	74
Tableau III.25: Composition chimique du tas calcaire et du cru.. 75	75
Tableau III.26: Modules du cru pétrolier.....75	75
Tableau III.27 : Comparaison des résultats théoriques et pratiques.....75	75
Tableau III.28: Composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 2).....76	76

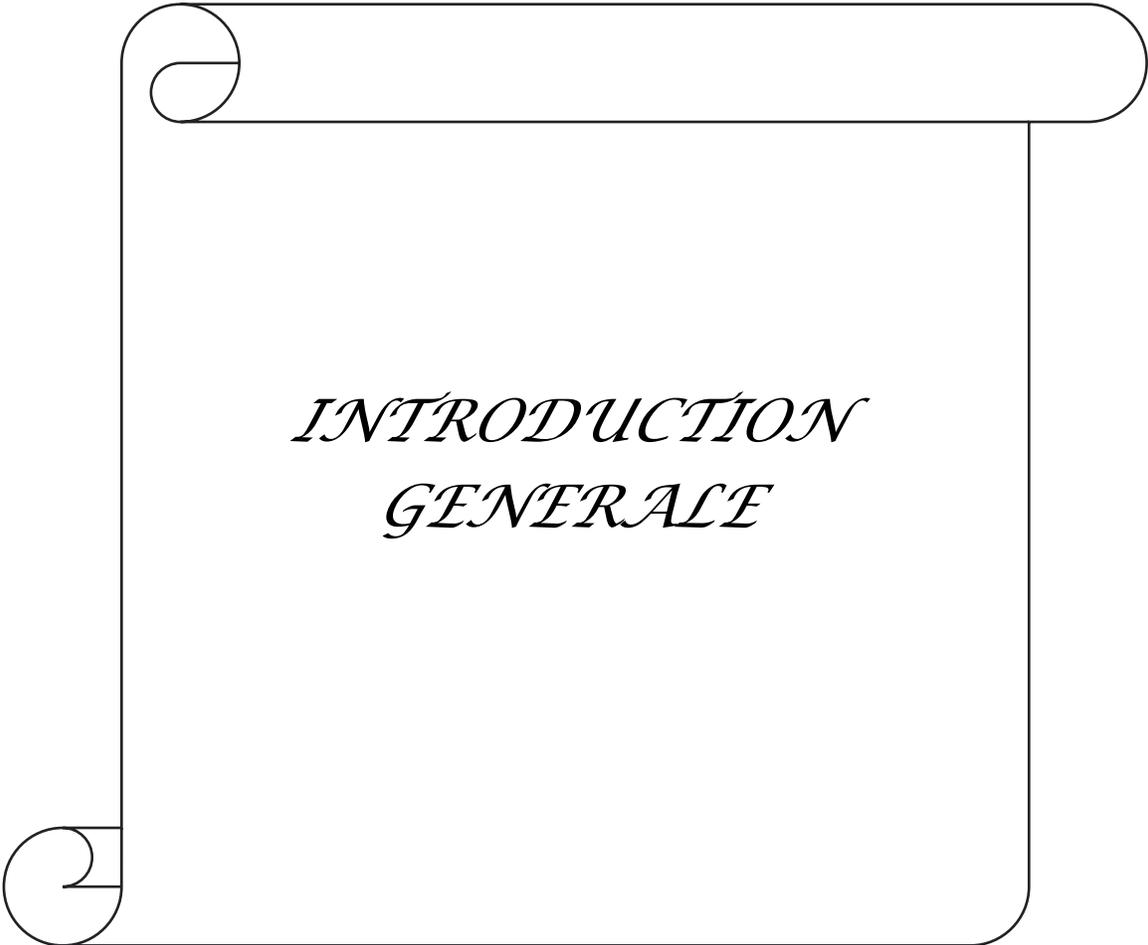
Liste des figures

Figure I.1: Evolution de la quantité de la phase liquide en fonction du module silicique.....	8
Figure I.2: Évolution de la température de Clinkérisation en fonction du module silicique. ...	8
Figure I.3: Évolution de la température de clinkérisation en fonction du module d'alumine. .	9
Figure I.4: Processus de transformation des minéraux du mélange dans le four de cuisson	17
Figure I.5: Schéma explicatif de la fabrication du ciment Portland	20
Figure I.6: Codification des ciments.	24
Figure II.1: Localisation de la cimenterie SIDI MOUSSA.....	31
Figure II.2: Situation du carrière sidi moussa.....	31
Figure II.3: Concasseur à mâchoire.	38
Figure II.4: Broyeur à disque.....	38
Figure II.5: Calcaire en quartage.	39
Figure II.6: Les étapes d'analyse par spectromètre de fluorescence des rayons X.	40
Figure II.7: Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X.....	42
Figure II.8: Creusé platine	42
Figure II.9: bain marin pour chauffer la solution	43
Figure II.10: Filtration de solution.....	43
Figure II.11: La solution avec l'eau distillé.....	44
Figure II.12: les solutions qui consulter les composants chimiques.....	44
Figure II.13: Tubes utilisés	46
Figure II.14: Les solutions qui révèlent le Cl	47
Figure II.15: Balance.	48
Figure II.16: Chauffeur.	48
Figure II.17: Filtration	48
Figure II.18: Interface de communication.	49
Figure II.19: Organisation d'introduction des informations dans le logiciel.....	50
Figure II.20: Interfaces d'introduction des informations concernant un type de clinker	50
Figure II.21: Interface de progression de l'exécution du logiciel.....	51
Figure II.22: Interface d'affichage des solutions trouvées.	52
Figure III.1: Evolution du module silicique (M.S) des crus conçus pendant 24H.....	54

Figure III.2: Fluctuations des valeurs du Facteur de saturation en chaux (L.S.F) des crus conçus pendant 24H..	55
Figure III.3: Fluctuations des valeurs de Module Alimino-ferrique (A/F) des crus conçus pendant 24H.	55
Figure III.4: points d'extraction des échantillons calcaire .	57
Figure III.5: Étapes de préparation des échantillons de calcaire 1 pour caractérisation et analyses.	59
Figure III.6: Evolution des teneurs des éléments chimiques, en fonction de type de la matière première utilisée.	60
Figure III.7: Schéma de mélange des matières premières à ciment, cru C.P.A.	61
Figure III.8: Schéma de répartition du mélange préparé.	62
Figure III.9: . Phases cristallisées du cru CPA.	64
Figure III.10: Schéma de mélange des matières premières à ciment.	65
Figure III.11: Schéma de répartition du mélange préparé.	67
Figure III.12: Diffraction des rayons X du cru CPA.	68
Figure III.13: Schéma de mélange des matières premières à ciment.	69
Figure III.14: Schéma de répartition du mélange préparé.	71
Figure III.15: Diffraction des rayons X du cru pétrolier de class G.	72
Figure III.16: Schéma de mélange des matières premières à ciment.	73
Figure III.17: Schéma de répartition du mélange préparé.	74
Figure III.18: Diffraction des rayons X du cru pétrolier de class G.	76

Liste des abréviations et symboles

- CPA : Ciment Portland Artificielle.
- L.S.F : facteur de saturation en chaux.
- M.S : Module Silicique.
- A/F : Module Alimino-ferrique.
- F.A.C : Facteur d'aptitude à la cuisson.
- A.W : Le coefficient de stabilité du croûtage.
- M.Si : Module de silice.
- M.H : Module hydraulique.
- Δ : Module delta.
- H.S et MS : Module de sulfates.
- E.A : Équivalent Alcalin.
- I. A. C : Indice d'Aptitude à la Cuisson.
- RC : La Résistance à la Cuisson.
- T.T.C : Température Théorique de Cuisson
- STG : Sidi moussa Travaux Généraux.
- C_3S : Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est $3CaO, SiO_2$.
- C_2S : Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est $2CaO, SiO_2$.
- C_3A : Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est $3CaO, Al_2O_3$.
- C_4AF : Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique est $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$.
- I.C : Indice de Croûtage.
- CRS : ciment résistant aux sulfates.
- H.S.R : haute résistance aux sulfates.
- M.S.R : moyenne résistance aux sulfates.
- API : American Petroleum Institute.
- CSH : Cristaux de Silicate mono-calcique Hydraté.
- XRF : La spectrométrie de Fluorescence X (SFX ou FX) ou en anglais X Ray Fluorescence(XRF).
- DRX : diffraction des rayons X.
- PAF : Perte au feu.
- E.D.T.A : Ethylène diamine tétra acétique.
- BK : Indicateur Colore.
- LTMGP : Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés.



*INTRODUCTION
GENERALE*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les recherches actuelles dans le domaine des ciments ont pour but d'optimiser le procédé de leur fabrication. Le processus de fabrication du ciment implique une suite de manipulations ou de transformations de la matière première. Chaque étape est importante et affecte directement la qualité du produit fini. Ces étapes peuvent offrir une teneur variée quant à la présence des oxydes indispensables à la fabrication du clinker. En effet, les teneurs d'oxydes de la matière première dépendent fortement du lieu d'extraction de cette dernière et peuvent grandement varier d'un endroit à l'autre de la carrière. Or, une entreprise donnée ne peut se permettre que des variations très réduites de ces teneurs par rapport à une composition optimale propre. Il est donc nécessaire d'affiner la composition entrant dans le four.

Les méthodes de confection des crus habituellement utilisées par les cimenteries prennent en charge les matières premières directement des halls de stockage et non des carrières. Ceci ne permet pas de stabiliser les fluctuations des éléments indispensables à la fabrication du clinker. Cette insuffisance de l'homogénéité de la farine crue peut avoir, dans certains cas, des conséquences incertaines (incalculables) sur la productivité du four sans autres possibilités de remède. Toutefois, la stabilité de cuisson est liée à la stabilité des matières premières utilisées. Cette dernière considération conduit à la notion d'homogénéisation qualitative des composants utilisés pour la fabrication du clinker. A ce stade, la connaissance des propriétés physico-chimiques et minéralogiques des matières premières est fondamentale.

La prise en charge des matières premières à partir des carrières, l'optimisation du processus d'homogénéisation et le calcul du mélange, en conformité avec les indices de qualité, permettront de résoudre le problème posé. Le calcul du cru permet d'atteindre deux objectifs essentiels : définir les proportions des divers oxydes, afin d'obtenir un clinker répondant à une qualité donnée, et prévoir les meilleures conditions possibles lors de l'exploitation du four. Partant d'une qualité donnée d'un clinker, la composition chimique qui en découle impose des valeurs définies des modules qui à leur tour renseignent sur les difficultés à prévoir dans le processus technologique et, par là même, les solutions à préconiser pour minimiser les frais inhérents à sa production (clinker).

L'Algérie, avec ses 17 cimenteries implantées en majorité au Nord, dispose de réserves importantes en matières premières à ciments. Les objectifs fixés dans notre travail

sont d'ordre scientifique, technologique et économique. Ils sont liés d'une part, aux difficultés quotidiennes rencontrées au niveau de la chaîne technologique d'homogénéisation de la farine cru et d'autre part, à l'optimisation de la marche du four.

Le présent travail est composé de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons une bibliographie sur le procédé de fabrication du ciment et sur la technologie et la chimie du ciment.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une étude sur l'aspect qualitatif des matières premières utilisées dans la fabrication du ciment, application à la cimenterie de Sidi Moussa, ADRAR.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus et leurs discussions.

On termine notre mémoire finale par une conclusion générale et des perspectives.



CHAPITRE I
CHIMIE DU CIMENT

CHAPITRE I :

CHIMIE DU CIMENT

Introduction

Le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. [1]

Le clinker portland est un produit renfermant en grande partie des silicates de calcium, obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle à 1450°C, d'un mélange dosé et homogénéisé de matières premières constituées essentiellement de chaux, de silice et de proportion moindre d'alumine et d'oxyde de fer. [2]

Ce chapitre comporte une caractérisation physiques chimiques et minéralogiques des matières premières utilisées dans la fabrication du ciment ainsi que les phases minéralogiques apparues lors de la cuisson du cru.

Il étudie aussi les modules régissant aux chimies du ciment et les caractéristiques physicochimiques de ciment pétrolier et ces domaines d'utilisation.

I.1. Chimie du ciment

I.1.1. Définition de chimie du ciment [3]

La chimie du ciment est une science qui étudie les phénomènes régissant l'obtention des principales combinaisons chimiques, englobées dans une roche appelée clinker, ainsi que leurs transformations par hydratation, à partir des principaux oxydes à savoir CaO, Al₂O₃ et Fe₂O₃ et des oxydes mineurs tels que MgO, SO₃, K₂O et Na₂O.

Le ciment, matériau à la fois ancien et très largement utilisé, a l'image d'un produit banal et simple. Pourtant, derrière cette apparente banalité, se trouve un matériau très complexe, imparfaitement connu aussi bien du point de vue des réactions physico-chimiques à hautes températures qui se produisent lors de la fusion des matières premières au niveau du four, que lors des réactions d'hydratation pendant la prise ou plus tard lorsque le matériau acquiert des propriétés de résistances mécaniques énormes (de 30 à 52.5 (MPa) 28 jours après l'hydratation).

I.1.2. Composition chimique des matières premières (ciment portland)

De la composition chimique des matières premières a ciment et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations. Le clinker comporte les oxydes suivants : [4]

- **CaO** : La chaux est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute CaO. Il s'agit d'une espèce minérale naturelle rare, isométrique de maille cubique, qu'il est possible d'observer en petites masses blanches avec les éjecta transformés à haute température parmi lesquels les laves communes sur les flancs des formations volcaniques. Il est lié avec la silice, Al_2O_3 et Fe_2O_3 , CaO à l'état libre provoque une intégralité de changement de volume de ciment lors de l'hydratation (l'expansion).

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

- **SiO₂** : il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium, un pourcentage élevé donne beaucoup de C₂S. Dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme.

L'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment surtout en milieux agressifs, sa teneur est de 21% à 24%.

- **Al₂O₃** : il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée. Sa teneur est entre 4% et 7%.
- **Fe₂O₃** : il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5 à 4%.
- **MgO** : une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de périclase (MgO cristallisé), provoque l'expansion pendant l'hydratation, sa teneur doit être inférieur à 5%.
- **TiO₂** : sa teneur est < 0,5 %, il provient des argiles.
- **MnO₂** : il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matière première. Sa teneur $\leq 1,5$ %.
- **P₂O₅** : il se trouve sous forme d'impuretés dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2% il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2% à 0,3%.
- **Les alcalis Na₂O, K₂O** : leur teneur est de 0,5% à 1%.

Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des minéraux principaux du ciment.

Le **tableau I.1** présente la composition chimique moyenne d'un ciment portland.

Tableau I.1: Composition chimique du ciment portland [4]

Oxydes	Teneur (%)
CaO	63-67
SiO ₂	21-24
Al ₂ O ₃	4-7
Fe ₂ O ₃	2,5-4
MgO	<5
TiO ₂	<0,5
MnO ₂	≤ 1,5
Alcalin (Na ₂ O, K ₂ O ...)	0,5 – 1
SO ₃	≤ 0,1

I.1.3. Composition minéralogique du ciment [5]

Lors de la cuisson du cru, les constituants principaux de la matière première réagissent entre eux pour former principalement quatre (04) composés minéralogiques présentés dans le **tableau I.2**.

Tableau I.2: Composition minéralogique du ciment.

Composés	Composition	Formule abrégée	Taux	Appellation
Silicate tricalcique	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	45 à 65%	Alite
Silicate bicalcique	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	15 à 35%	Belite
Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	04 à 14%	Cellite
Aluminoferrite étricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10 à 18%	Ferrite

I.2. Caractéristiques principales des minéraux du clinker [6]

I.2.1. Silicate tricalcique C₃S (Alite)

Le C₃S se trouve en très grande proportion dans le clinker, c'est l'élément actif des ciments artificiels. Il confère des résistances maximales à 7 jours de durcissement. Au niveau microscopique, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions incolores. Si on essaye de le dissoudre, il se décompose en C₂S + CaO.

I.2.2. Silicate bicalcique C₂S (Belite)

Il confère au ciment des résistances initiales moins élevées que le C₃S, mais développe des résistances mécaniques à long terme. Son aptitude au broyage est moins

bonne que celle de C_3S , à cause de sa dureté plus élevée. Au niveau microscopique, il apparaît sous forme de grains arrondis.

I.2.3. Aluminate tricalcique C_3A (Cellite)

Il confère au ciment de très bonnes résistances mécaniques initiales à 2 jours de durcissement.

Il est sensible à l'eau de mer, à cause des sulfates y contenant. Il forme avec les sulfoaluminates de chaux, le sel de Candlot, souvent très expansif. Sa réaction d'hydratation est fortement exothermique.

I.2.4. Aluminoferrite tétracalcique C_4AF (Ferrite)

Il confère au ciment des résistances faibles, mais il joue le rôle de fondant pendant l'opération de cuisson du clinker.

I.3. Notions de modules dans la chimie du ciment (Indice de qualité).

Le calcul du cru permet d'atteindre deux objectifs essentiels, à savoir : définir les proportions des divers oxydes, afin d'obtenir un clinker répondant à une qualité donnée et prévoir meilleures conditions possibles (qui restent fonction du type de clinker), lors de l'exploitation du four (optimisation de la durée de vie du garnissage réfractaire, et de la consommation du combustible entre autres). Partant d'une qualité donnée d'un clinker, la composition chimique qui en découle, impose des valeurs définies des modules qui, à leur tour, renseignent sur les difficultés à prévoir dans le processus technologique, et par là même, les solutions à préconiser afin de minimiser les frais inhérents à sa production (clinker), comme par exemple le choix judicieux du réfractaire devant garnir les diverses parties de la zone de cuisson. [3]

I.3.1. Modules régissant la chimie du ciment

I.3.1.1. Facteur de saturation en chaux [7-8]

Etant donné le caractère acide des oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , et celui basique de la chaux CaO , par combinaison chimique, cette dernière et en fonction de l'abondance des premiers oxydes cités, va plus ou moins se saturer, le facteur de saturation en chaux exprime justement le taux de combinaison de la chaux selon la relation suivante :

$$L.S.F = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad \text{Eq I.1}$$

Sa valeur donne des indications sur la composition minéralogique du clinker, car lorsque la valeur de L.S.F tend vers l'unité, la teneur en C_3S augmente dans le clinker.

Il est à noter que le L.S.F. varie de 90% à 102%. Les valeurs de L.S.F., au-dessus de 98%, prédisent des difficultés de cuisson, le croutage est plutôt faible. Du fait de la forte teneur en C_3S , les résistances mécaniques à 2 et 7 jours sont accrues, celles à 28 jours sont elles aussi élevées, la chaux libre est importante avec un risque d'expansion très grand, qui peut tout de même être minimisé par un broyage très poussé, cas des ciments H.R.I (haute résistance initiale avec S.S.B – 4500). La chaleur d'hydratation est très élevée. Les valeurs de L.S.F inférieures à 90 provoquent par l'importante phase liquide qu'ils engendrent, un lavage du croutage, avec infiltration de la brique réfractaire, il y a une plus grande tendance à la formation d'anneaux de clinker et de spurrite dans la zone de transition amont et de gros granules de clinker et même de boudins. Les résistances mécaniques et la chaleur d'hydratation sont amoindries, alors que la broyabilité diminue.

I.3.1.2. Module Silicique [9-10]

Il règle le rapport entre les silicates, les aluminates et les ferrites dans le cru. Il est donné par l'équation empirique suivante :

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_2} \quad \text{Eq I.2}$$

Ses valeurs limites sont comprises entre 1,9 et 3,2 et ses valeurs normales varient entre 2,3 et 2,7. Le module de silice exprime la relation entre les silicates de calcium $C_3S + C_2S$, l'aluminate et l'alumino-ferrite de calcium $C_3A + C_4AF$. Plus les silicates de calcium sont élevés plus le M.S est élevé. Pour des modules alumino-ferritiques inférieurs à 1,38 c'est le M.S qui contrôle le pourcentage de la phase liquide à 1450°C. Si M.S est supérieur à 3, l'aptitude de la cuisson du cru diminue du fait de la pauvreté du clinker en phase liquide. La conséquence est que les températures de cuisson sont plus importantes, le croutage est instable. Les résistances mécaniques du ciment sont élevées et la prise est plus lente.

Si M.S est inférieur à 2, l'aptitude de cuisson du cru augmente du fait de l'augmentation du pourcentage de la phase liquide. Le graphique ci-après, montre l'évolution de la quantité de la phase liquide en fonction de l'évolution du module silicique **figure I.1** :

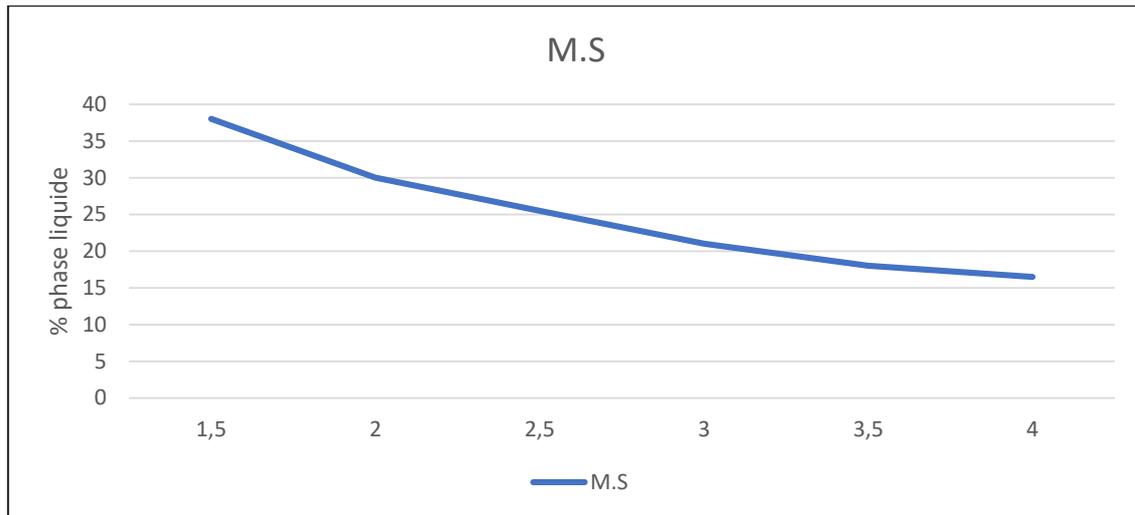


Figure I.1: Evolution de la quantité de la phase liquide en fonction du module silicique. [11]

Il existe une relation entre la température de cuisson et la valeur du module silicique comme le montre le graphique ci-dessous :

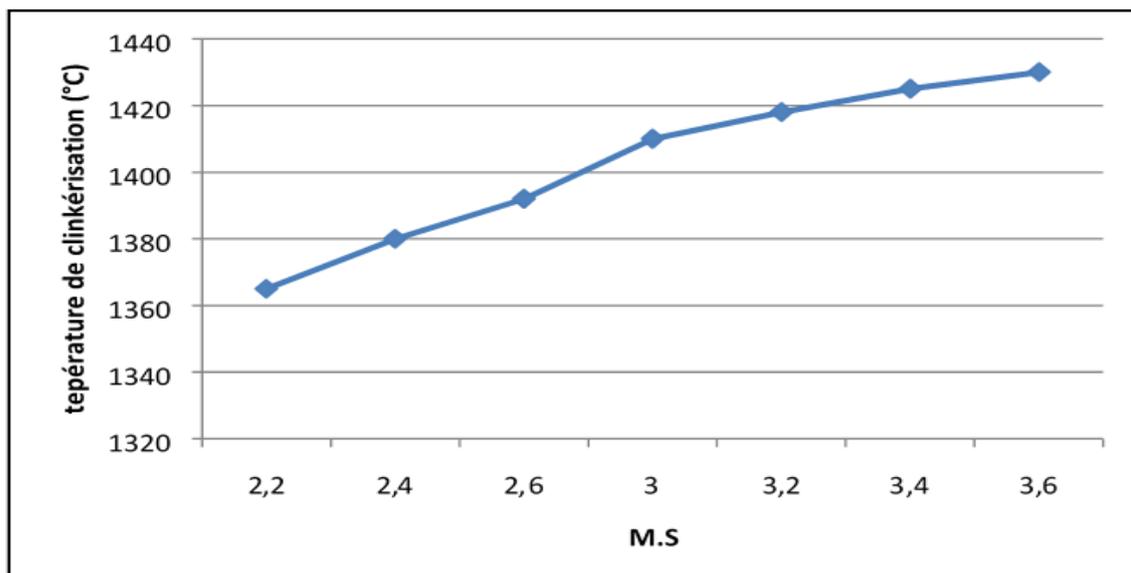


Figure I.2: Évolution de la température de Clinkérisation en fonction du module silicique. [11]

I.3.1.3. Module de silice "M.Si" [11]

On le détermine par l'équation :

$$MSi = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad \text{Eq I.3}$$

Sa valeur habituelle varie de 3 à 4, sa connaissance sert beaucoup dans l'appréciation de la qualité du croûtage. Si en plus le rapport SiO_2/Al_2O_3 est faible, la viscosité chute à des

valeurs telles qu'il y a infiltration des briques réfractaires par du C_4AF . Le croûtage est épais mais instable. Les résistances mécaniques du ciment chutent et le temps de prise est court.

I.3.1.4. Module Alumino-ferrique [7]

$$A/F = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} \quad \text{Eq I.4}$$

Il influe sur la proportion relative d'aluminates (C_3A) et d'alimino-ferrites (C_4AF) qui se forment lors de la cuisson.

Le module d'aluminate contrôle la viscosité de la phase liquide et la vitesse de formation de C_3S , qui à son tour enrichit la phase liquide. Ses valeurs limites sont comprises entre 1,5 et 2,5 et ses valeurs normales varient entre 1,3 et 1,6. Si le module A/F est supérieure à 2,5, la viscosité de la phase liquide augmente considérablement et compromet, de ce fait, la formation du C_3S . La teneur en C_3S étant élevée, la chaleur d'hydratation s'accroît et les résistances chimiques du ciment diminuent. Si le module A/F est inférieur à 0,64, la viscosité de la phase fondue diminue, la chaleur d'hydratation diminue. Il y a un risque certain d'infiltration des briques réfractaires. Notons que si A/F est égal à 1,38, le liquide apparaît à 1338°C (liquide eutectique) et pour A/F égale à 1,63 le liquide apparaît à 1301°C .

La proportion d'aluminate augmente quand le module d'alumine augmente. Ceci entraîne une augmentation de la viscosité de liquide, ce qui nécessite des températures de clinkérisation plus élevées **figure I.3**. Dans les ciments à haute résistance initiale, le L.S.F et le M.S sont élevés et A/F est au voisinage de 2,3. La température de cuisson est élevée, ceci afin de compenser l'aptitude à la cuisson plus faible.

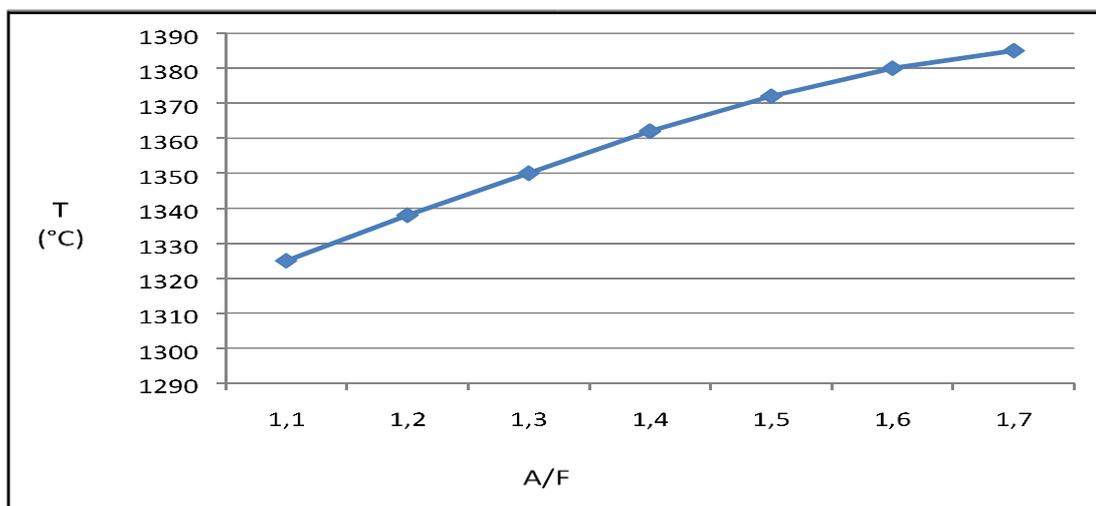


Figure I.3: Évolution de la température de clinkérisation en fonction du module d'alumine. [11]

I.3.1.5. Module hydraulique [12-13]

Il exprime le rapport entre les composants basiques et les composants acides ; sa valeur varie dans un cru de 1,7 à 2,4.

$$M.H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad \text{Eq I.5}$$

Si la valeur du module dépasse la limite supérieure, il se produit dans le ciment ayant fait prise un fort changement de volume ou expansion qui peut amener jusqu'à destruction du béton ou mortier. Au-dessous de la limite inférieure de ce module, il en résulte un effusement engendrant ainsi une détérioration complète du mortier.

I.3.1.6. Module delta [14]

Il exprime la quantité de chaux nécessaire pour combiner les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 afin de former C_3S , C_3A et C_4AF . Ce module est spécifique à la firme Lafarge.

$$\Delta = \frac{100.(2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 - CaO)}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO} \quad \text{Eq I.6}$$

I.3.1.7. Module de sulfates « H.S » [11]

$$H.S = \frac{(SO_3/80)}{[(K_2O/92) + (Na_2O/62) - (2.Cl/35,5)]} \quad \text{Eq I.7}$$

Cette relation exprime l'équilibre qu'il peut y avoir entre le SO_3 et les autres composés volatiles se retrouvant dans l'amère du four, et qui ont une fâcheuse tendance à boucher la boîte à fumée et le bas du préchauffeur (gaine et cyclone inférieurs). Si la valeur de HS est comprise entre 0,83 et 1,00, alors aucun problème ne sera posé.

Un autre module des sulfates est utilisé.

$$MS = \frac{SO_3}{0,85(K_2O + 1,5 - Na_2O)} \quad \text{Eq I.8}$$

I.3.1.8. Équivalent Alcalin « E.A » [11]

C'est la quantité d'alcalis K_2O et Na_2O exprimée en pourcentage Na_2O .

$$E.A = Na_2O + 0,659.K_2O \quad \text{Eq I.9}$$

L'équivalent alcalin devra être maintenu en dessous de 0,6 %. Dans le ciment des valeurs, de l'équivalent alcalin, supérieures à 0,6 % donnent de l'expansion alcaline.

I.3.2. **Contrainte technologique sur le four (Module régissant la chimie du clinker) [3]**

Afin de mieux cerner la technologie de cuisson du point de vue chimique, il y a lieu de considérer un certain nombre de modules, dans leur approche globale. Cependant, et afin

de mieux cerner la notion de module, pour permettre le calcul du cru, la composition potentielle du clinker qui prédétermine sa qualité acquiert toute sa dimension.

I.3.2.1. Composition potentielle de bogue [14]

Pour des proportions d'oxyde ferrique relativement faibles dans le cru, les principaux composants du clinker, se déduisent d'après les relations suivantes :

a. $A/F > 0,64$

$$C_3S = 4,0716CaO - 7,6SiO_2 - 6,718Al_2O_3 - 1,43Fe_2O_3 - 2,852SO_3 \quad \text{Eq I.10}$$

$$C_2S = 2,867SiO_2 - 0,754C_3S \quad \text{Eq I.11}$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3 \quad \text{Eq I.12}$$

$$C_4AF = 3,04Fe_2O_3 \quad \text{Eq I.13}$$

b. $A/F \leq 0,64$

$$C_3S = 4,071CaO - 7,6SiO_2 - 4,479Al_2O_3 - 2,859Fe_2O_3 - 2,852SO_3 \quad \text{Eq I.14}$$

$$C_2S = 2,867SiO_2 - 0,754C_3S \quad \text{Eq I.15}$$

$$C_3A + C_4AF = 2,1A + 1,7Fe_2O_3 \quad \text{Eq I.16}$$

$$C_4AF = 4,77Al_2O_3 \quad \text{Eq I.17}$$

Pour des proportions importantes d'oxyde ferrique :

$$\text{Phase liquide} = 3Al_2O_3 + 2,25Fe_2O_3 + MgO \quad \text{Eq I.18}$$

$$CaO = CaO_{\text{total}} - CaO_{\text{libre}} \quad \text{Eq I.19}$$

$$SiO_2 = SiO_{2\text{total}} - RI \quad \text{Eq I.20}$$

Contrainte technologique sur le Four :

La teneur des différents constituants dans le clinker est exprimée en fonction de celle du cru, le calcul de la teneur calcinée de différents éléments est réalisé par la relation suivante :

$$\% \text{Calciné} = \{ \% \text{Cru} \cdot 100 \} / (100 - PF) \quad \text{Eq I.21}$$

I.3.2.2. Indice d'aptitude à la cuisson [10]

Cet indice montre les difficultés à cuire attendues d'un cru produisant un clinker à faible teneur en C_3A . Ceci explique bien les difficultés à cuire un clinker d'un ciment résistant aux sulfates ou le taux de C_3A est inférieur à 5%.

$$I. A. C = \frac{C_3A}{C_3A + C_4AF} \quad \text{Eq I.22}$$

I.3.2.3. Facteur d'aptitude à la cuisson "F.A.C" [11]

Le facteur d'aptitude à la cuisson se calcule par la relation suivante :

$$F.A.C = L.S.F + 10 MS - 3(M + Alcalis) \quad \text{Eq I.23}$$

- Valeur limite entre 100 et 120
- Valeur idéale 108
- L'influence positive de la teneur en magnésie et en alcalins.
- Le rôle important du module silicique dont la répercussion est dix fois plus grand que le L.S.F.

I.3.2.4. Le coefficient de stabilité du croûtage [10]

Il doit se situer entre 20 et 30%. Une valeur inférieure à 20% conduira à un croûtage faible et instable et une valeur supérieure à 35% favorisera l'instabilité du croûtage et son érosion. [20]

$$A.W = C_3A + C_4AF + 0,2C_2S + 2Fe_2O_3 \quad \text{Eq I.24}$$

I.3.2.5. La résistance à la cuisson RC [10]

Elle doit se situer entre 100 et 120 pour une valeur idéale de 108.

$$RC = K.S.T + 10MS - 3(MgO + Alcalis) \quad \text{Eq I.25}$$

I.3.2.6. Température théorique de cuisson T.T.C [10]

$$T.T.C = 1300 + 4,51C_3S - 3,74C_3A - C_4AF \quad \text{Eq I.26}$$

Cette formule empirique nous renseigne d'une manière relativement exacte sur la température de cuisson théorique régnant dans la zone de cuisson.

I.4. Fabrication du ciment Portland

I.4.1. Principe de fabrication [15]

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru ;
- Cuisson;
- Broyage et conditionnement ;

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement des matériaux :

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

Le **tableau I.3** présente les opérations communes aux quatre procédés.

Tableau I.3: Procédés généraux de fabrication du ciment.

Opérations communes aux quatre procédés Extraction en carrière : calcaire, argile Concassage et transport	
<u>Voie humide</u> Délaiage + broyage Dosage Stockage Four <u>Voie semi-humide</u> Filtration Boudinage Four	<u>Voie sèche</u> Pré homogénéisation Broyage + séchage Homogénéisation Four <u>Voie semi-sèche</u> Granulation Four
Opérations communes aux quatre procédés Broyage Gypse + ajouts (pouzzolane, laitier...et) Stockage Expéditions	

I.4.2. Fabrication du ciment par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps, la plus simple mais qui requiert le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide (environ 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 mètres de diamètres. Elle est continuellement malaxée et homogénéisée, ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson. La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif. Le clinker, à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs pour subir une trempe.

Quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on obtient un même clinker qui est encore chaud. [15]

La longueur du four environ 200 m ; une partie du four sert à évaporer l'eau de la pâte. [16]

I.4.3. Fabrication du ciment par voie semi-humide [16]

Dans le processus semi-humide, on retrouve les mêmes étapes de préparation des matières premières, sauf que la pâte va être filtrée au travers d'un filtre presse pour arriver entre 17 et 21 % d'eau puis son introduction dans un préchauffeur, puis dans un four rotatif plus court que celui présent dans le processus de voie humide.

I.4.4. Fabrication du ciment par voie semi-sèche

Dans cette voie, on ne fabrique plus la pâte. Les matières premières sont broyées et homogénéisées. Cette farine obtenue est agglomérée sous forme de boulettes avant la cuisson.

I.4.5. Fabrication du ciment par voie sèche

Nous allons décrire en détail le procédé de fabrication du ciment par voie sèche de la cimenterie de Sidi Moussa, ADRAR. Ou Les différentes étapes de fabrication sont les suivantes : [14]

I.4.5.1. Carrière

Les matières premières qui apportent les oxydes nécessaires pour synthétiser le clinker sont extraites des carrières. [17]

Extraction des matières premières sont extraites au niveau des carrières sous forme de blocs de dimensions très variées.

I.4.5.2. Concassage du calcaire [18]

Le calcaire exploité de la mine et l'argile sont alimentés directement à la trémie réceptrice selon la proportion préalable d'ingrédient par le camion ou le chargeur, et ils entrent dans le concasseur par l'alimenteur à plaque, la finesse maximum des matériaux est de 1000mm (longueur de diagonale), la finesse des matériaux sortis du concasseur est $90\% \leq 50\text{mm}$, la capacité de production est de 1000t/h. Une fois par jour, le calcaire et l'argile mixés après le concassage sont transportés à la bande d'entassement aux cours d'entassement à pré-homogénéisation par le transporteur à bande.

I.4.5.3. Cour de pré-homogénéisation du calcaire et de l'argile [18]

Cour d'entassement de pré-homogénéisation pour le calcaire et l'argile la cour d'entassement à pré-homogénéisation pour le calcaire et l'argile adopte la cour d'entassement rond, la capacité de stockage est de 40000t.

Le calcaire et l'argile mixte sont entassés continuellement par le convoyeur à bande, et sont prise par la machine de prise de matériaux à racloir rond, la capacité d'entassement est 1200t/h, et la capacité de machine de prise de matériaux est 350t/h. Les matériaux pris sont transportés au silo d'ingrédient du calcaire et de l'argile mixte par le convoyeur à bande.

I.4.5.4. Cour unie d'entassement de pré-homogénéisation [18]

Cour unie d'entassement de pré-homogénéisation adopte la cour d'entassement rectangulaire, et en même temps, il est aussi pour l'homogénéisation d'ingrédient de la matière première et de celui du ciment. L'ingrédient de la matière première est divisé en trois parties : calcaire de haut-calcium 2900t, minerai de fer 2200t, grès 2800t.

L'ingrédient du ciment est divisé en deux partie, gypse 2400t, calcaire 4600t. Ils sont entassés continuellement par un transporteur d'entassement à bande, et sont pris transversalement par deux machines de prise de matériaux à racloir latérale. La capacité d'entassement est 1200t/h, et celle de machines de prise est 150t/h. Les matériaux pris sont transportés au silo d'ingrédient de la matière première et au silo d'ingrédient du ciment.

I.4.5.5. Station de dosage de matière première [18]

Il y a un silo en béton de $\Phi 8\text{m}$ dans la Station de dosage de matière première pour stocker le calcaire et l'argile mixtes, le volume est de 750t. Trois silos en acier de $\Phi 5.4\text{m}$ sont désignés au stockage du calcaire, grès et minerai de fer, les volumes sont respectivement 240t, 240t et 420t. Les matières premières de l'ingrédient sont déchargées par l'alimentateur à débit constant selon la proportion requise et transportées au moulin des matières crues par le transporteur à bande.

I.4.5.6. Système de broyage des matières crues [18]

Le broyage et la séchée de la matière première adopte un moulin vertical avec un séparateur à haute efficacité. La production du moulin des matières crue est 250t/h, la finesse est 12% par le tamis de 0.09mm.

I.4.5.7. Système brûlant

Le système brûlant comprend un préchauffeur à air spiral de cinq cascades de série simple avec un four de décomposition, un four rotatif de $\Phi 4.2 \times 60\text{m}$ et un refroidisseur.

La production du clinker est 3200t/d, la consommation calorifique est 760 kcal/kgcl. [18]

a) La cuisson [19]

À la sortie du préchauffeur, la farine arrive dans le four rotatif où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation. L'alimentation en farine s'effectue à l'extrémité opposée au brûleur, la rotation et l'inclinaison du four font progresser la matière.

A l'entrée du four, la décarbonatation de la farine se poursuit et s'achève au fur et à mesure que la farine avance dans le four, sa température augmente, ce qui permet la formation des minéraux de clinker. Le produit ainsi sortant du four est appelé clinker. Le four de sidi moussa à une capacité de 130t/heure.

La température nécessaire à la clinkerisation est de l'ordre de 1450 °C.

- De 100°C à 200°C départ de l'eau libre.
- De 400°C à 600°C départ de l'eau combinée.
- De 600°C à 750°C destruction des argiles suivant la réaction suivante :



- De 600°C à 900°C destruction de $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2$, et formation d'oxyde actif suivant la réaction suivante :



- De 900°C à 1000°C décomposition du calcaire ou décarbonatation suivant les réactions suivantes :



- De 800°C à 1300°C consommation de CaO par CaO, SiO_2 et formation de C_4AF Suivant les réactions suivantes :

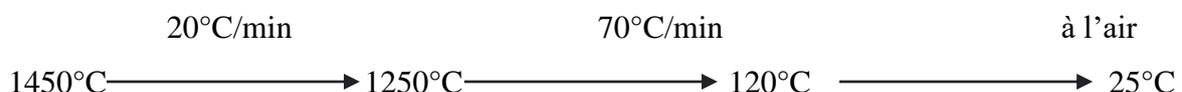


Avec :

- C signifie CaO
- A signifie Al_2O_3
- F signifie Fe_2O_3
- S signifie SiO_2
- C_4AF signifie $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$

À la sortie du four, le Clinker doit être refroidi et broyé avant d'être entreposé dans des silos.

➤ Profile thermique de refroidissement de Clinker :



b) Le refroidissement :

Quand le clinker sort du four, il passe au refroidissement à l'aide de cinq ventilateurs qui propulsent de l'air, ce mode de refroidissement est appelé Trempe : c'est un refroidissement rapide pour obtenir un clinker réactif, utilisé afin d'avoir la granulométrie désirée. Le clinker prêt à l'emploi est transféré à un silo de stockage. [19]

La **figure I.4** présent le processus de transformation des minéraux du mélange dans le four de cuisson.

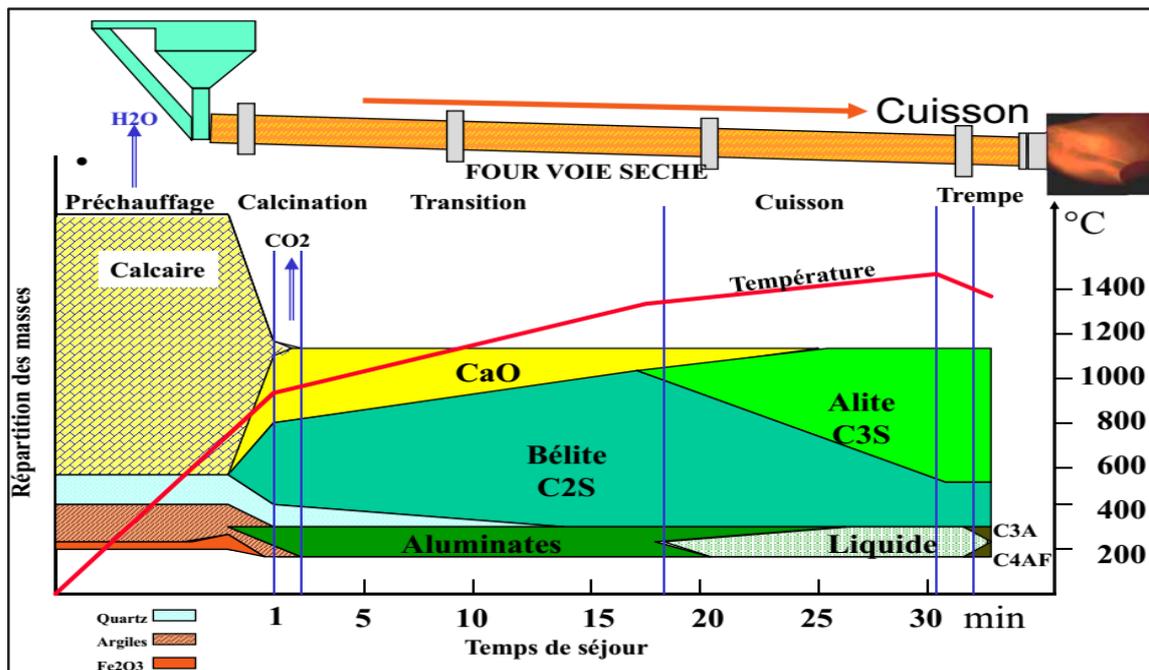


Figure I.4: Processus de transformation des minéraux du mélange dans le four. [21]

Le **tableau I.6** présent les composition chimique et minéralogique du clinker et ces rôles principales.

Tableau I.4: Composition chimique et minéralogique du Clinker. [5]

Minéraux	Formule chimique	Symbole	Rôle
Silicates tricalciques	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S	Résistance initiale
Silicates bicalciques	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ S	Résistance à long terme
Aluminates Tricalciques	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	Prise rapide
Alumino-ferrites Tétracalciques	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF	Sans effet sur la résistance du ciment

L'air chaud de la première grille est utilisé dans le four pour la combustion du coke de pétrole et une autre partie est transmise au pré-calciateur. Une partie des gaz de la

deuxième grille est utilisé pour le séchage dans le broyeur crû et dans le broyeur combustible. Le reste des gaz est refroidi dans un échangeur air-air, dépoussiéré dans un filtre à manches puis évacué dans l'atmosphère par la cheminée.

c) Croûtage [11]

Le croûtage encore appelé collage, revêt une importance capitale puis qu'il permet de protéger dans la zone la plus chaude du four, le garnissage réfractaire contre la température et l'attaque chimique du clinker liquide, de limiter les déperditions de chaleur et de permettre un meilleur retournement de la matière à cuire. Il est produit de la phase liquide du clinker qui colle aux parois du four qui en fonction des conditions de marche du four et de la composition chimique du clinker forme une certaine épaisseur. Le croûtage commence à coller à la paroi du four dès que la température atteint 1280°C. Le collage se fait par infiltration du liquide à l'intérieur des pores de la brique réfractaire.

Indice de croûtage (I.C)

La connaissance de l'indice de croûtage permet de prévoir et les possibilités de sa formation et sa stabilité ultérieure. L'influence de la teneur en oxyde ferrique est grande. En effet, sa relative abondance dans le clinker produit un croûtage plus dense et donc très sensible aux chocs thermiques, dont les conséquences sont des chutes fréquentes et par la même, la destruction du revêtement réfractaire.

Des valeurs de I.C inférieures à 20 dorment un croûtage faible et instable. Pour les clinkers des ciments ordinaires, I.C se maintient entre 29 et 31. Des indices de croûtage supérieurs à 30 renseignent sur une instabilité du croûtage du fait que celui-ci fond plus facilement.

I.4.5.8. Stockage et transport du clinker [18]

Le stockage du clinker adopte un silo de tente de clinker à 70m sans le mur de soutènement. Le volume du silo de tente est 50000t, la période de stockage est 14 jours. Le clinker refroidi par le refroidisseur est transporté au sommet du silo par deux transporteurs à godet, il y a un silo en vrac au relais pour le déchargement provisoire. Le clinker dans le grand silo tombe dans le silo colonnaire au milieu du silo. Chaque étage toroïdal du silo colonnaire possède plusieurs orifices de déchargement. Au fur et à mesure d'élévation de hauteur du clinker, le clinker sera déchargé graduellement d'orifice de déchargement, et entasse naturellement dans silo de tente. Le clinker dans le silo est déchargé du fond du silo par la vanne sectorielle, et transporté au silo du clinker dans le silo d'ingrédient du ciment par le transporteur à bande.

I.4.5.9. Station d'ingrédient du ciment [18]

Il y a quatre dépôts dans l'entrepôt d'ingrédient du ciment, soit deux dépôts de clinker de $\Phi 7.5 \times 17m$, le volume est $2 \times 550t$, un dépôt de calcaire de $\Phi 5.4 \times 17m$, le volume est $250t$, un dépôt de gypse avec le volume de $250t$. Il y a deux systèmes indépendants dans l'entrepôt d'ingrédient du ciment, le clinker gypse calcaire pour l'ingrédient sont transportés au moulin du ciment par le transporteur à bande après alimentation proportionnelle par l'alimentateur. Il y a un système en vrac pour le chargement du clinker à côté d'entrepôt d'ingrédient du clinker.

Ajouts cimentaires [5]

Ce sont des poudres fines actives ou inertes ajoutées au ciment pour réduire le coût de production, diminuer les émissions de CO_2 et améliorer les propriétés du béton. On peut citer :

- Le Laitier de haut fourneau : Matériaux issus de l'industrie de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est composé principalement de chaux (45-50%), de silice (30-35%), d'alumine (10-15%) et de magnésie (7-10%).
- Pouzzolane naturelle : Produits d'origine volcanique, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer.
- Fumée de silice : Particules sphériques très fines ayant une très haute teneur en silice ($\geq 85\%$), issue de l'industrie de fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.
- Calcaire : Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédant 5 %, en masse (constituant principal), les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes :
 - ✓ Teneur en calcaire $CaCO_3 \geq 75\%$ en masse ;
 - ✓ Teneur en argile (adsorption de bleu de méthylène) $\leq 1,20$ g/100 g ;
 - ✓ Teneur en matières organiques $\leq 0,50\%$ en masse.

I.4.5.10. Broyage du ciment [18]

Broyeur du ciment adopte le système de circuit fermé de broyeur à boulet avec deux systèmes de machine de presse à galet. Le norme du broyeur à boulet est $\Phi 3.2 \times 13m$, la production du système du broyage est $90t/h$.

I.4.5.11. Stockage du ciment [18]

Il y a quatre silos d'homogénéisation du ciment à $\Phi 15 \times 42m$ avec le cône de détente dans le silo de stockage du ciment pour stocker le ciment sorti du moulin. Le volume est $4 \times 5000t$. l'air du système de gonflement au fond du silo est approvisionné par le ventilateur

Roots. Le ciment sorti du silo est expédié respectivement à l'atelier d'emballage par la goulotte d'air et l'élévateur à godets. À chaque fond du silo de ciment, il y a une installation de camion en vrac pour le ciment, c'est pour satisfaire au transport du ciment en vrac.

I.4.5.12. Emballage et expédition du ciment [18]

Il y a trios emballeuse du ciment rotative à huit ouvertures dans l'atelier d'emballage du ciment, la capacité est $3 \times 100 \text{ t/h}$. Le ciment sorti du silo du ciment est alimenté dans le tamis vibrant par l'élévateur à godets et la goulotte de transport d'air, et après il entre dans l'emballeuse. Après l'emballage, le ciment est transporté à la machine de chargement pour le chargement au camion.

Il y a six machines de chargement à sac dans l'atelier d'emballage.

I.4.5.13. Schéma de la fabrication du ciment Portland

La figure ci-dessous présent un schéma explicatif de la fabrication de ciment.

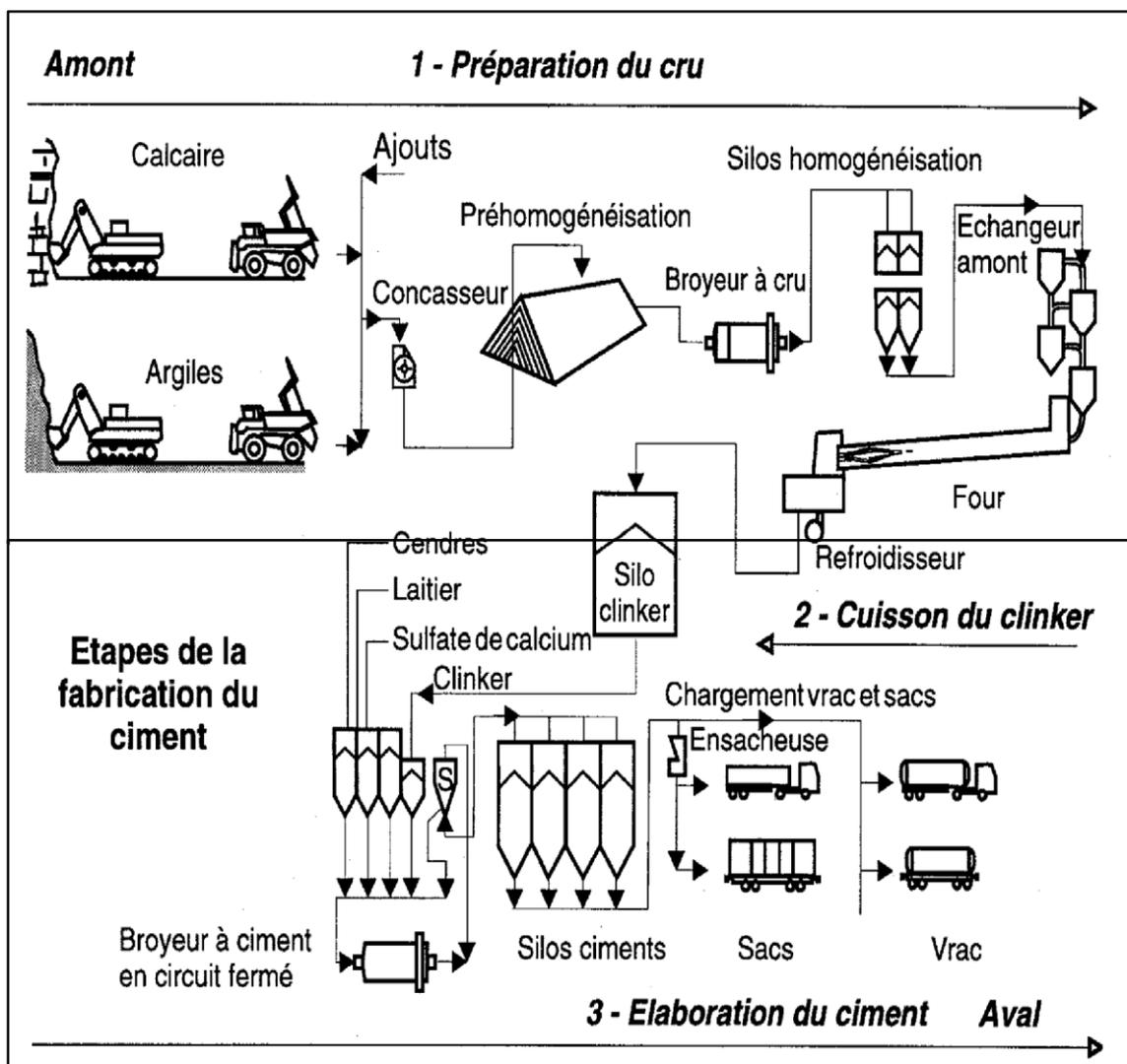


Figure I.5: Schéma explicatif de la fabrication du ciment Portland. [21]

I.5. Hydratation du ciment portland

I.5.1. Théories d'hydratation du ciment portland

Différentes théories ont été proposées sur l'hydratation du ciment. D'après la théorie colloïdale, il se produisait d'abord un phénomène de dissolution provoquant un gonflement des grains et l'apparition d'une solution très concentrée en chaux. Cette solution agirait sur les silicates pour donner un gel de silicates et de chaux qui augmenterait peu à peu de volume en absorbant continuellement l'eau et la chaux. Le gel durcirait et deviendrait imperméable et l'hydratation continuerait à l'intérieur des grains de ciment protégés par cette enveloppe colloïdale.

D'après la théorie de Le Chatelier, le ciment mis en présence de l'eau donnerait naissance à une solution sursaturée. Les composés anhydres se dissoudraient, puis les hydrates formés, peu solubles, précipiteraient sous formes de microcristaux, ce qui remettrait une nouvelle dissolution d'éléments anhydres. Les réactions se poursuivraient jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement serait dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

Cette théorie considère qu'un liant hydraulique est un système chimique de constituants anhydres, instable en présence d'eau, donnant après hydratation un système de composés hydratés, stable en présence d'eau, c-à-dire, faiblement soluble dans l'eau. Ce phénomène se poursuit jusqu'à l'épuisement de constituants anhydres ou de l'eau.

Aucune de ces théories n'est vraiment satisfaisante, mais on admet actuellement qu'elles présentent une certaine cohérence et que la pâte du ciment peut être considérée comme un gel colloïdal et cristallin, c'est à dire un système dont les particules sont colloïdales par l'échelle de leurs dimensions, et cristallines par leur structure. [2]

I.5.1.1. Hydratation de silicate tricalcique C₃S [4]

L'hydratation du C₃S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée dans cette phase est l'une des plus élevées. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année.

➤ *Produits d'hydratation de C₃S*

L'hydratation des silicates conduit à la formation de deux types d'hydrates :

C₃S₂H₃ (tobirmorite) Ca(OH)₂ portlandite



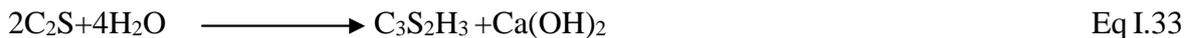
Les CSH sont peut cristallisés (gel) lorsqu'ils se forment, ce sont les hydrates les plus importants. Le rapport CaO /SiO₂ est compris entre 1,6 et 1,8.

La formule $C_3S_2H_3$ est approximative, car le produit est très peu cristallin et il existe plusieurs variétés de CSH.

Le CSH est le produit d'hydratation qui développe les résistances de la pâte de ciment.

Une partie des ions SO_4^{-2} qui proviennent du gypse utilisé dans le ciment, entre dans la structure du CSH et permet d'améliorer sa résistance.

I.5.1.2. Hydratation De Silicate Bi-calciq ue C_2S [4]



La formule de $C_3S_2H_3$ est approximative. La quantité de portlandite formée dans ce cas est plus faible de 1/3 que dans le cas de C_3S .

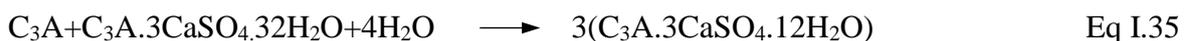
La vitesse d'hydratation de BC_2S est beaucoup plus faible que celle de C_3S . La faible quantité de la portlandite va favoriser le développement de meilleure résistance que dans le cas de C_3S .

Le BC_2S participe surtout au développement des résistances après 28 jours.

Comme dans le cas de C_3S , une partie des ions SO_4^{-2} qui proviennent du gypse ajouté, entre dans la structure de CSH et permet d'améliorer sa résistance.

I.5.1.3. Hydratation Des Aluminate C_3A [4]

L'hydratation des aluminates, C_3A en particulier, obéit à la séquence des réactions suivantes, dans l'ordre 1 ; 2 ; 3.

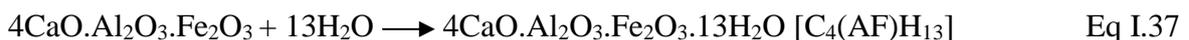


L'effet régulateur de prise de gypse est lié au fait que :

- La réaction 2 ne démarre que quand tout le gypse est consommé dans la réaction 1.
- La réaction 3 ne démarre que quand toute l'Ettringite est consommé dans la réaction 2.

I.5.1.4. Hydratation des aluminoférites de calcium C_4AF [4]

L'hydratation de C_4AF se déroule suivant la réaction :



Parmi ces produits, on remarque la présence de C_2AH_8 . A la température $> 30 - 35^\circ C$, on a formation de solutions solides cubiques de C_3AH_6 . Et à la température comprise entre 15 et $35^\circ C$, on a l'existence simultanée des solutions cubiques et hexagonales.

I.5.2. Durcissement et prise de ciment

Le mécanisme de durcissement du ciment est très différent de celui de la chaux. Le ciment durcit par hydratation des silicates et des aluminates de chaux, alors que la chaux durcit lentement à l'air en se carbonatant.

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux :

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou, C_3S ;
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou, C_2S ;
- L'aluminate de chaux ou, C_3A , le ferroaluminate tricalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou, C_4AF .

L'élément noble du ciment est le silicate tricalcique, qui lui donne ses fortes résistances.

Par hydratation, les silicates tri- et bi-calciques donnent du silicate mono-calcique hydraté et dégagent de la chaux libre hydratée. Ce sont les cristaux de silicate mono-calcique hydraté « CSH » qui, en se fixant entre eux et aux granulats, confèrent au ciment sa résistance.

L'aluminate tricalcique donne, par hydratation, l'aluminate mono-calcique hydraté « CAH » et dégage de la chaux libre hydratée. C'est aussi un élément actif de la résistance des ciments, il contribue notamment beaucoup, par la rapidité relative de sa réaction, aux résistances dans les 1ers temps. C'est également la première cristallisation du tri-sulfo-aluminate (ou ettringite) produite par l'hydratation de C_3A en présence de gypse, ainsi que des réactions physico-chimiques complexes qui sont à l'origine du raidissement de la pâte de ciment : ce qu'on appelle "**La prise du ciment**". [22]

I.6. Classification et domaine d'application des ciments [5]

I.6.1. Types du ciment

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- ✓ Résistances mécaniques
- ✓ Résistance à une attaque physique ou chimique
- ✓ Mise en œuvre particulière.

Le **tableau I.8** présent les différents types de ciment courants normalise par la norme NF P 1531.

Tableau I.5: Liste des différents types de ciments normalisés. [5]

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière Secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	----- -----	0 à 5%
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 %	
CEM II /B		65 à 79 %	- 21 à 35 %	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	- 35 à 65 %	
CEM III/B		34 %	Laitier - 66 à 80 %	
CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane - 10 à 35 %	
CEM IV/B		45 à 64 %	Ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V/ A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	Laitier - 18 à 30 %	
CEM V/ B		20 à 39 %	et Cendre - 31 à 50%	

La **figure I.6** present la codification des noms des difirents ciments.

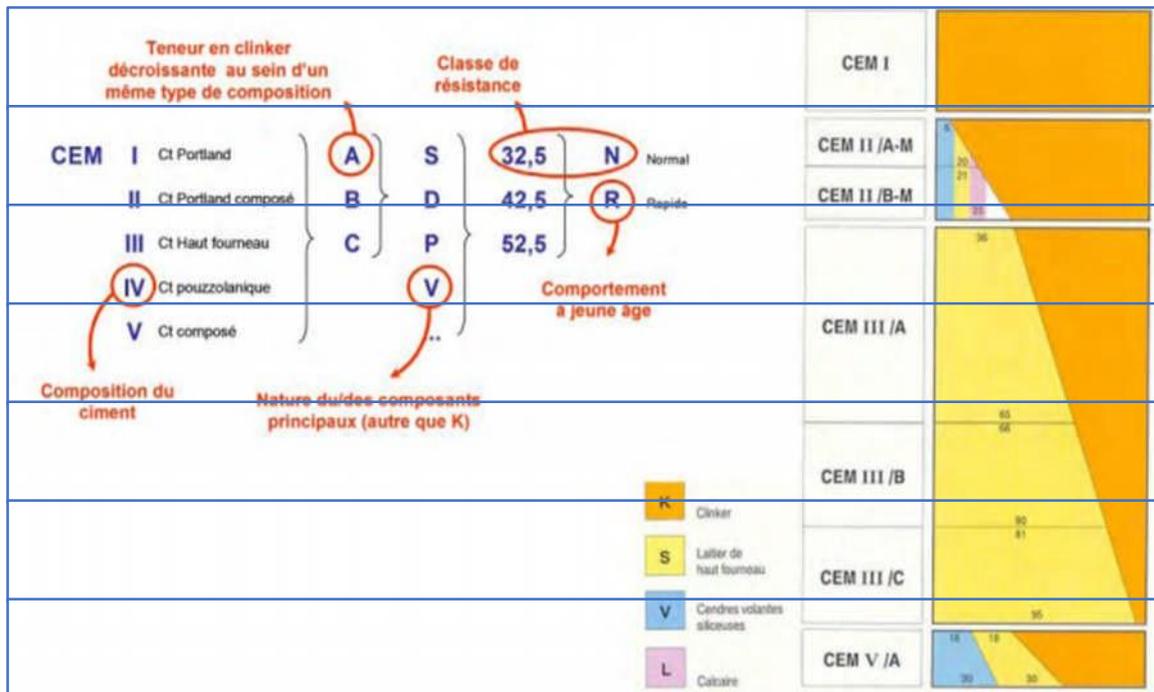


Figure I.6: Codification des ciments. [16]

Une nomenclature régit le nom des ciments, afin de donner des indications sur sa composition, simplement à partir de son nom.

- Le premier chiffre romain indique la composition du ciment.
- La lettre majuscule suivante indique la teneur en clinker.

- La lettre majuscule suivante indique la nature du ou des constituants principaux.
- Les chiffres suivants ces lettres indiquent la classe de résistance.
- Enfin, les dernières lettres indiquent le comportement au jeune âge. [16]

I.6.2. Classe de résistance du ciment [5]

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 7 et à 28 jours.

La résistance du ciment est déterminée sur des éprouvettes de mortier de ciment (Mortier normalisé ; 3sable/1ciment/0,5 Eau).

Le tableau ci-dessous présente les différentes classes de résistance du ciment.

Tableau I.6: Classes de résistance du ciment.

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)	
	2 jours Limite inf	28 jours Limite inf
32.5N (Normale)	-	≥ 32.5
32.5R (Rapide)	≥ 13.5	≥ 32.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5
52.5R	≥ 30	≥ 52.5

I.6.3. Domaine d'utilisation des différents ciments [5]

Le **tableau I.10** présente le domaine d'utilisation des différents types de ciment.

Tableau I.7: Domaine d'utilisation des différents ciments.

Ciment	Désignation	Utilisation	Contre-indication
Ciment Portland Ciment composé	CEM I CEM II	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tous travaux de béton armé ✓ Bonne résistance ✓ Décoffrage Rapide (Préfabrication) ✓ Bétonnage par temps froid 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Présence d'eaux agressives ✓ Travaux souterrains ✓ Bétonnage en grande masse
Ciment au laitier Et pouzzolanique Ou au laitier et cendre.	CEM III CEM IV CEM V	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Béton de masse (barrage) ✓ Béton de fondation (sol agressif) ✓ Bétonnage en temps chaud ✓ Eau usée ✓ Travaux souterrains ✓ Réservoir d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bétonnage par temps froid ✓ Béton préfabriqué ✓ Résistance à jeune âge élevée

I.7. Ciment pétrolier

I.7.1. Définition [6]

Le ciment pétrolier, est un ciment spécial utilisé pour la cimentation des puits de pétrole et de gaz, son objectif essentiel réside dans la séparation des différentes zones productrices, ainsi que la protection du tubage contre les milieux et les eaux agressives qui peuvent provoquer la corrosion des tubages.

Le ciment, dans ce cas, est soumis à certaines conditions telles que :

- La température qui augmente avec la profondeur ;
- La pression ;
- Les éléments agressifs, les sulfates, les chlorures et les hydrocarbonates.

I.7.2. Processus de fabrication de Ciment pétrolier [3]

Le ciment pétrolier est un ciment à base de portland broyé plus ou moins finement et mélangée avec d'autres produits.

Le mélange est composé de calcaire, d'argile et de quelques adjuvants comme le laitier de haut fourneau. A la température de 500°C, le mélange est déshydraté et 800°C le calcaire se décarbonate au-dessus de 900°C les réactions entre composants, commencent à se produire, et le mélange s'agglomère et donne naissance au clinker.

Quand la température atteint 1450°C on aura la formation du liquide qui est ensuite refroidi brusquement et se transforme au clinker granule. Ce dernier est concassé et stocké.

Enfin, il est broyé en lui ajoutant du gypse et essentiellement d'autres additifs, et prend la forme connue sous le nom de ciment.

I.7.3. Classification des ciments pétroliers [6]

Les ciments portland sont classés, suivant leurs compositions et leurs caractéristiques physicochimiques et mécaniques, en plusieurs catégories. La norme AFNOR couvre une grande partie de ces catégories, notamment celles destinées au domaine des travaux publics.

À cette classification, vient s'ajouter une autre classification propre aux ciments pétroliers. L'environnement créé par les conditions de fond et de mise en place du laitier de ciment, impose certaines caractéristiques et certains essais que les normes de la construction publique ne permettent pas de vérifier.

L'américaine petroleum Institute (API) a établi un classement de ciments pour sondages basé principalement sur la profondeur d'utilisation. Le classement API est suivant :

- Classe A : Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m) lorsqu’une caractéristique particulière n’est demandée.
- Classe B : Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m) lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates.
- Classe C : Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m) lorsque les conditions nécessitent une haute résistance initiale. (Disponible en type ordinaire ou en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).

Les ciments de classe C se caractérisent par une grande finesse, ce qui permet une vitesse d’hydratation élevée et donc une forte résistance initiale.

- Classe D : Utilise de 6000 à 10000 ft (1829 à 3048m) en condition de température et pression modérément élevées. (Disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
- Classe E : Utilise de 10000 à 14 000 ft (3048 à 4268 m) dans des conditions de température et pression élevées (disponible en type ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur ajouté en usine par le cimentier.
- Classe J : (normalisation en cours) utilisé de 12000 à 16000 pieds (3660 à 4880 m) pour des températures et pressions extrêmement élevées. Existe seulement en qualité à haute résistance aux sulfates.

Les ciments classe E et F possèdent dans leur formulation un retardateur. Il y a donc un risque d’incompatibilité avec d’autres additifs. Notamment si leur temps de pompabilité est trop court ou trop long il est pratiquement ; très difficile, sinon impossible de les retarder ou de les accélérer. Il faut donc les considérer comme des ciments spécifiques, ne possédant pas le caractère d’universalité des classe G et H.

Après avoir précisé les classes du ciment pétrolier normalisées, la norme API, fixe les caractéristiques chimiques et physiques exigées pour les ciments à utiliser dans les sondages, Voir **tableau I.8** et **tableau I.9**.

Tableau I.8: Caractéristiques et exigences chimiques des ciments pétroliers.

Caractéristiques et exigences chimiques	Classe de ciment					
	A	B	C	D, E, et F	G	H
Type ordinaire (O)						

Magnésie (MgO) %max.	6.0		6.0			
Anhydride sulfurique (SO ₃) %max.	3.5		4.5			
Perte au feu %max.	3.0		3.0			
Résidu insoluble %max.	0.75		0.75			
Aluminates tricalciques (C ₃ A) %max.			15			
Type à moyenne résistance aux sulfates (MSR)						
Magnésie (MgO) %max.		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Anhydride sulfurique (SO ₃) %max.		3.0	3.5	3.0	3.0	3.0
Perte au feu %max.		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Résidu insoluble %max.		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicates tricalciques (C ₃ S) %max.					58	58
C ₃ S %min.					48	48
C ₃ A %max.		8	8	8	8	8
Alcalis (exprimés en Na ₂ O) %max					0.75	0.75
Type à haute résistance aux sulfates (HSR)						
Magnésie (MgO) %max.		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Anhydride sulfurique (SO ₃) %max.		3.0	3.5	3.0	3.0	3.0
Perte au feu %max.		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Résidu insoluble %max.		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C ₃ S %max.					65	65
C ₃ S %min.					48	48
C ₃ A %max.		3	3	3	3	3
Ferro-aluminates tétracalcique (C ₄ AF) + 2 C ₃ A %max.		24	24	24	24	24
Alcalis (exprimés en Na ₂ O) %max.					0.75	0.75

Tableau I.9: Les caractéristiques physique d'un ciment pétrolier classe G. [23]

PARAMETRE	EXIGENCES	METHOD D'ESSAI
Eau ciment (%)	44	Eau distillée
Expansion à l'autoclave (%) maximum	0,8	ASTMC 115 ou NEP 15-442
Surface spécifique de ciment (cm^2/g)	2500+250	ASTMC 115 ou NEP 15-442
Eau libre (cm^3)maximum	3,5	API Spec 10 Section 6
Résistance à la compression après 8h (Kg/cm^2) <ul style="list-style-type: none"> • 38°C pression atmosphérique • 60°C pression atmosphérique 	Min. 21 Min. 105	API Spec 10 Section 7
Temps de pompabilité (Minutes)	Min. 90 Max. 120	API Spec 10 Section 8 Régime 5
Consistance après 15 à 30 (U.C) D'agitation maximum	30	

Pour assurer les conditions de cette norme, il est nécessaire de préparer un cru ayant un module A/F très bas (légèrement supérieur à 0,638) et un module LSF moyen (au voisinage de 0,92).

I.7.4. Domaine d'utilisation [20]

Le ciment pétrolier classe G est utilisé comme ciment de base pour cimenter les puits de pétrole et de gaz. Il est aussi utilisé dans les puits d'eau, les puits de dépôts de déchets et les puits géothermaux. Il joue un rôle important dans le succès du forage d'un puits. Il est utilisé dans le but d'isoler les zones faibles de la paroi du puits au moment du forage.

Le ciment pétrolier se caractérise par les propriétés suivantes :

- Avoir une faible perméabilité ;
- Avoir une bonne adhésion à la paroi ;
- Maintenir ses propriétés sous la pression et la température du puits ;
- Protéger l'ouvrage des vibrations causées par le forage continu ;
- Protéger l'ouvrage des fluides agressifs ;
- Protéger l'ouvrage contre l'effondrement.

Conclusion

Les matières premières principales utilisées dans la fabrication de ciment portland sont l'argile et le calcaire avec un faible pourcentage de fer.

Les phases principales qui composent le clinker de ciment portland sont : Silicate tricalcique ou C_3S (45 à 65%), Silicate bicalcique ou C_2S (15 à 35%), Aluminate tricalcique ou C_3A (10 à 18%) et l'Aluminoferrite tétracalcique ou C_4AF (4 à 14%).

Le clinker de ciment pétrolier class G et un clinker normal fabriqué avec des conditions qui respectent des normes spéciales, ses propriétés physiques et chimiques donnant à ce type de ciment le privilège d'être utilisé dans des milieux agressifs tels que les puits de pétrole et de gaz.



CHAPITE II
PRESENTQTION DU SITE ET
PROTOCOLE EXPERIMENTAL

CHAPITRE II : Présentation de la cimenterie et Protocole expérimental

Introduction

L'élaboration d'un projet de fabrication du ciment, l'étude du site est nécessaire pour connaître toutes les caractéristiques de la zone d'étude, qui nous permettrons de mener à bien notre travail lors de la réalisation des travaux. Dans ce chapitre on a présenté les matières utilisées au niveau de la cimenterie Sidi Moussa/Adrar ainsi que les différents principes des méthodes utilisées dans notre étude.

II.1. Présentation du site

II.1.1. Situation géographique

La cimenterie est installée dans la province d'Adrar, la ville de lagan Algérie, près de 27°16' de latitude Nord, 1°12' de longitude Est, l'altitude est 330m. Il appartient au climat de désert, l'air est sec et chaud.

Les figures II.1 et II.2 présentent la localisation géographique et les coordonnées. Dans le système Nord SAHARA, fuseau 31R.



Figure II.1: Localisation de la cimenterie SIDI MOUSSA.

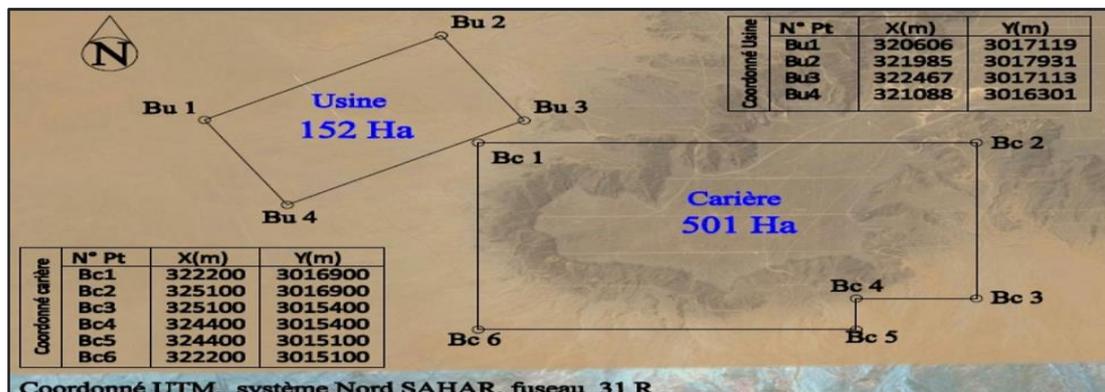


Figure II.2: Situation du carrière sidi moussa. [18]

II.1.2. Topographie du site

La forme de Tidikelt se compose de trois stades continus, une bande parallèle s'éteint du Nord au Sud, et elle divise les trois zones en roche tortueuse et en escarpe. Avec l'effet de corrosion, les terrains sont montueux. Les vallées sont constituées de zones plates, les stades sont successivement : Les plateaux calcaires Tademaït et Tingher sont vastes, l'altitude moyenne est de 600m, la zone est accidentée et sans le changement, au long de l'escarpement de Tidikelt, les zones de bordure sont en effet de l'affouillement. [18]

Le plein sud au bord de Tidikelt sud, il se forme au pied de l'arrête Mouydir et l'arrête Ahnet sur les fleuves de la partie inférieure du plateau Tidikelt.

Le socle et la partie intermédiaire entre le Cristallophyllien inférieur et le Cambrien supérieur est le revêtement paléozoïque assez complet entre la série Cambrien supérieur et le Carbonifère inférieur. Ce revêtement est en forme d'une bande à la direction du nord au sud, et il est couvert par ces matières ci – dessous :

- Remblayage du continent : en sédiment créatique supérieur, Les terres se composent des argiles et les grès affleurés à Tidikelt.

Stade du Crétacé Marine : la couche vaste représente ce stade :

- Grès gypse Cénomaniens et argile ;
- Calcaire compris dolomie Turonien ;
- Roche de calcaire à silex Schiner Étage. [18]

II.1.3. Situation climatologique [18]

II.1.3.1. Température

Adrar a un climat désertique sec, nous citons les conclusions ci – dessous selon les études des valeurs maximum et minimum des températures mensuelles des dernières années :

La température la plus basse se manifeste en Décembre, en Janvier et en Février, ses valeurs successivement sont : 20°, 20°, 24°; La température augmente graduellement en Mars, en Avril et en Mai, les mois d'Octobre et Novembre représentent une période de transition, les valeurs de température sont successivement : 29°, 35°, 35°, 33°, 27°; Les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre représentent la saison chaude, les valeurs de température sont successivement : 45°, 49°, 35°, 42°; en général la température diminue peu à peu à partir de la 2^{ème} semaine de Septembre. Selon les fiches techniques de la condition météorologique d'Adrar, la température plus haute est de 56°, mais la température de ce mois se varie

généralement entre 47° et 53°, si la température en été atteint 50°, la température d'hiver peut arriver à moins de 0°, la température plus basse à Adrar est de -2° à 8°, avec cette température basse, il y a des verglas à épaisseur de 1 à 2 mm, ça signifie un froid extrême dans la région.

II.1.3.2. Précipitation

Les précipitations de cette région ne sont pas régulières. Les précipitations moyennes annuelles maximales sont moins de 47,5mm, les précipitations sont presque nulles de 0mm. Selon la quantité totale des précipitations, l'automne commence à pleuvoir, le volume total des précipitations du mois d'Octobre et Novembre est de 6 mm, le volume des précipitations du mois de Février et Mars est important : 4,5 mm, entre Avril et Septembre, les précipitations sont moins importantes, avec les tempêtes, chaque mois a environ une douzaine de millimètre de précipitation, en Juillet, les précipitations sont nulles.

II.1.3.3. Vent

Le vent de cette région est du vent d'Est et du vent de Nord – Est. Les mois entre Janvier et Avril sont du vent de Nord, mais le vent de Nord est plus faible que le vent d'Est. En Mai, le vent de Nord – Est assez fort que le vent d'Est. Entre Juin et Septembre, le vent principal est le vent d'Est, le vent d'Est commencé à souffler au mois de Juillet. En Octobre, le vent d'Est est assez fort que le vent Nord – Est. Le vent de Nord – Est commencé au mois d'Octobre. Les mois entre Mars et Mai a du vent de Sud – Ouest, et le vent de Sud – Ouest est plus fort que le vent de Nord – Est et le vent d'Est. Par conséquent, le vent principal de cette région est le vent d'Est, mais l'orage est du vent de Sud – Ouest.

II.1.3.4. Séisme

Selon le plan algérien, Adrar est dans la zone de Niveau 0 : soit une zone de faible sismicité.

II.1.4. Situation géologique

Selon la structure géologique, la zone d'étude se situe à l'Ouest de Sahara. La zone dans la montagne étendue de la montagne Ougarta, et elle divise les deux bassins sédimentaires Reggane et Timimoun. Au tour des montages, les sédiments ont des lithologies (océanique et continentale), avec le mouvement de la croûte terrestre, les croûtes au bord des bassins sont Sur le plan de lithologie des couches, nous présentons les informations ci – après :

II.1.4.1. Précambrien

La roche cristalline à Hoggar se découvre à l'est (en feuille à ourlien) et au sud (en feuille à Tessalit), la roche cristalline se découvre au bout de l'ouest.

Le socle de la roche du Précambrien est brisé et métamorphique, il se présente par la granulite, le schiste et les différents gneiss.

II.1.4.2. Paléozoïque

Les plissements métamorphiques du Paléozoïque se composent de grès, de quartzite et de schiste, La couche du Paléozoïque se forme par la roche de calcaire, l'argile, le grès qui compose le calcaire et l'argile du Viséan Étage et l'argile du Tournaisien Étage, ces roches se découpent par la dolérite.

II.1.4.3. Crétacé

Le sédiment du continent du Crétacé inférieur s'appelle l'intercalation continentale qui est composée de la couche de schiste et de l'argile, la nappe complique d'eau est importante dans cette zone, elle se découvre dans plusieurs endroits : Adrar, Reggane, Aoulef et Timimoune.

Le plateau de Tademaït se forme par le sédiment ingression du Cénomaniens supérieur Étage qui compose du calcaire dolomitique.

Le sédiment du Crétacé supérieur à la dépression de Tanezrouft se signifie le système du terrigène inférieur (épaisseur à 300 m) et le système de la carbonatation supérieur (épaisseur à 60m).

II.1.4.4. Cénozoïque

➤ Tertiaire supérieur

Le sédiment du Pliocène se compose le grès gros y compris l'argile en rouge et brunâtre, l'argile verdâtre, la marne gris clair, et compose aussi du calcaire, ils se réunissent partiellement au nord.

II.1.5. Exploitation des carrières

II.1.5.1. Calcaire

a) Méthode d'exploitation

La méthode d'exploitation est une succession de réalisation des travaux d'enlèvement du minerai et du stérile dans un ordre bien déterminé.

En autre terme un système d'exploitation caractérisé par le développement des travaux préparatoire de découverte et d'extraction dans le temps et dans l'espace.

Le mode d'exploitation adoptée dans la carrière de sidi moussa est à ciel ouvert en plateau, et la méthode d'exploitation adoptée par découverte simple selon les travaux de forage et de tir.

b) Paramètres pour choisir la méthode d'exploitation :

Lors de la détermination de la hauteur du gradin on tient compte de quelque facteur commun :

- ❖ La sécurité des travaux miniers ;
- ❖ La production de la carrière ;
- ❖ La qualité des minéraux ;
- ❖ Les caractéristiques du gisement ;
- ❖ Le mode d'extraction les moyens de production.

En général lors de l'exploitation des gisements horizontaux, la hauteur des gradins est déterminée en fonction de la matériel disponible et la puissance des couches des minéraux et des stériles.

La forme du gisement de sidi moussa est plate et contient deux couches qui ont des caractéristiques comme suite :

- ✓ La première couche exploitable et riche en CaO ;
- ✓ La deuxième couche inexploitable et riche en MgO.

c) Paramètre des trous

- La longueur des trous est de 5.5 à 6m ;
- Le diamètre des trous est de 0.89m ;
- La distance entre les trous est de 2m ;
- La maille utilisée est sous forme de zigzag.

d) Travaux de forage et de tir (TFT)

Généralités sur les méthodes de préparation des roches à l'abattage

- L'abattage des roches est l'un des principaux procédés de la chaîne technologique minière ;
- Le cout d'abattage à la tonne est estimé de 15 à 20% du cout total dans l'exploitation minière à ciel ouvert ;
- L'abattage des roches consiste à la destruction des roches au niveau du massif et leur obtention sous forme de morceaux abattu de grosseurs et de volumes différents.

En pratique, il existe un certain nombre de méthodes d'abattage à savoir :

- L'abattage mécanisé ;
- L'abattage hydro mécanisé ;
- L'abattage par ripage ;
- L'abattage à l'explosif...etc.

Dans la plupart des cas, la préparation des roches à l'extraction renferme la destruction du massif rocheux jusqu'à l'obtention des morceaux des dimensions nécessaires et admissible pour la rentabilité de tous les complexes d'extraction et de transport.

Exigences technologiques des travaux de forage et de tir

La fragmentation des roches par l'explosif est très répandue dans les mines à ciel ouvert, c'est une méthode principale pour la préparation des roches dures. La qualité de la préparation a une influence importante sur les indices techniques et économiques des processus technologique et sur les indices principaux de travail de l'Enterprise minière.

Les travaux de forage et de tir en carrière doivent assurer :

- ✓ Degré nécessaire et régularité de la fragmentation des roches ;
- ✓ Formation du tas de la masse minière extrait par l'explosifs avec forme et dimension nécessaire ;
- ✓ Volume nécessaire de la masse explosée pour le travail régulier des engins ;
- ✓ Action sismique minéral pour l'installation au jour et l'environnement ;
- ✓ Dépense minimale et grande sécurité du travail ;
- ✓ Les dimensions maximales admissibles des blocs de roche abattus en fonction de capacité du godet de la chargeuse et les paramètres de l'installation.

II.1.5.2. L'argile

La carrière d'argile qui se situe à 35 km de l'usine, à laquelle la matière est acheminée par camion (capacité 20 tonne).

Le gisement des matières premières est le premier maillon de la chaîne de fabrication du ciment.

Il a dû être déterminé par une prospection de sondage, une étude géologique avec une évaluation des réserves. Le gisement est à proximité de l'usine afin de minimiser les dépenses nécessaires à l'acheminement de la matière. Il faut environ 1,6 tonnes de cru pour faire 1 tonne de ciment. [25]

II.2. Protocoles expérimentaux

II.2.1. Préparation mécanique d'échantillons

Le traitement mécanique des échantillons est la phase la plus délicate pour préparer les échantillons représentatifs. Pour atteindre cet objectif, les opérations suivantes sont réalisées :

II.2.1.1. Plan d'échantillonnage

Notre travail porte sur une série de cinq échantillons de matières premières acheminés des carrières utilisées par la cimenterie sidi moussa à savoir : le calcaire des couches (1 et 2), le déchet de marbre, l'argile et le minerai de fer. Ces échantillons sont prélevés de manière circulaire autour d'un gisement de différentes matières premières. Ces dernières vont subir une série de traitements mécaniques tels que le concassage, le quartage, le tamisage et le broyage tout en assurant la représentativité en poids par la relation de statistique (empirique) de RICHARDSE.

$$Q \geq Kd^2$$

$$m \leq Qi/Kd^2$$

$$m = 2^n, n = 1n(m)/1n(2)$$

Eq II.1

Q : masse de l'échantillon (tamisât) en Kg ;

d : diamètre du plus gros grain en mm

K : coefficient de répartition de la minéralisation ; il dépend de la nature de l'échantillon. Mais en général nous prenons $K > 0,1$ pour un échantillon hétérogène ($k=0,5$) et $k=0,1$ pour un échantillon homogène.

n : nombre de quartages. [20]

II.2.1.2. Concassage

Cette opération sert à réduire les dimensions de la matière première à une granularité de l'ordre de quelques millimètres. Pour cela, nous avons utilisé un concasseur à mâchoires de type RETSTH de la cimenterie sidi moussa **figure II.3**. La matière première initiale est

sous forme de grain de diamètre supérieur à 1cm. Le concassage a permis de réduire, le diamètre des grains jusqu'à environ 2 mm.



Figure II.3: Concasseur à mâchoire disponible à la cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR.

II.2.1.3. Broyage

C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière première à une granularité assez fine, atteignant quelques micromètres. L'opération de broyage est réalisée soit manuellement soit à l'aide d'un broyeur à disque de marque HERZOG de la cimenterie de sidi moussa qui donne des diamètres d'ordre des micromètres, il est présenté dans la **figure II.4**.



Figure II.4: Broyeur à disque disponible à la cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR.

II.2.1.4. Tamissage

Le tamissage consiste à répartir les grains d'un échantillon brut à travers une série de tamis de norme AFNOR de plus en plus de petites ouvertures allant de 2mm jusqu'à 63 μ m (2 ; 1 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125 ; 0.063). ces ouvertures sont formées par des mailles carrées faites dans des toiles métalliques (cas de tamissage par voie sèche).

Dans notre travail nous avons utilisé un seul tamis de diamètre 100 μ m pour les cinq matières (calcaire1, 2, déchets de marbre, le minerai de fer et l'argile).

II.2.1.5. Homogénéisation

C'est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon de manière à le rendre homogène.

II.2.1.6. Quartage

Le quartage est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à homogénéisation du minerai, la matière finement broyée est mise en forme d'un cercle partagé en quatre parties égales **figure II.5**, dont nous prenons les deux parties opposées. C'est une opération de réduction de poids de l'échantillon souhaité pour l'analyse. [20]



Figure II.5: Exemple de quartage d'un calcaire.

II.2.2. Méthodes d'analyse chimique

II.2.2.1. Composition chimique par spectrométrie de fluorescence X

La fluorescence X est une méthode spectrale d'analyse qui exploite la fluorescence des atomes dans le domaine des rayons X, afin d'obtenir des renseignements quantitatifs sur la composition élémentaire d'un échantillon solide. Lorsqu'un échantillon est irradié avec

une source de photons à grande énergie (5 à 60 keV), une photoluminescence située dans le domaine des rayons X, caractéristique des éléments présents, est émise par ce dernier. Cette fluorescence, perpendiculaire au faisceau primaire, se diffracte alors sur un cristal analyseur selon la loi de Bragg : Les éléments concernés sont : (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O ...etc.). Au total il y a 13 Oxydes. [26]

Cette analyse par un spectre de fluorescence des rayons X au niveau du laboratoire de la cimenterie de sidi moussa nécessite la préparation d'une pastille avec 12g de la matière plus 1g de cellulose pour favoriser le colmatage de cette dernière avec le porte échantillon **figureII.6**.

Pour le clinker avant d'effectuer analyse on doit déterminer la perte au feu (PF) par la mise d'échantillon dans le four à 1050°C durant 30 min, exprimé par l'expression mathématique suivante :

$$\text{PF} = [(m_0 - m_1) / m_{\text{ech}}] * 100 \quad \text{Eq II.2}$$

Avec :

m_0 : masse initiale d'échantillon avec le creuset.

m_1 : masse d'échantillon avec le creuset après la mise en four.

m_{ech} : masse d'échantillon.



Figure II.6: Les étapes d'analyse par spectromètre de fluorescence des rayons X.

✚ Les étapes principales de quantification des oxydes par FX sont les suivants :

➤ On mélange 12 g de l'échantillon avec 1 g de cellulose ;

- La formation des pastilles d'analyse ;
- On met les pastilles à l'intérieur des tasses de l'appareil ;
- On dépose ces dernières dans l'appareil ;
- Le spectromètre de fluorescence des rayons X va analyser automatiquement les pastilles d'échantillons un par un dans la cellule d'analyse.

II.2.2.2. Composition minéralogique (analyse par diffraction des rayons X) (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés. Elle s'applique sur des poudres ou des échantillons massifs **figure II.7**, elle sert à la détermination de la nature des phases minérales cristallisés et à leurs quantifications. Actuellement la diffraction des rayons x intervient dans la quasi-totalité des thématiques et constitue un complément indispensable aux observations optiques, microscopiques ou spectroscopiques.

La condition de la réflexion est donnée par l'équation de Bragg :

$$n.\lambda = 2d\sin(\theta) \quad \text{Eq II.3}$$

Avec :

- n : ordre de la diffraction (entier) ;
- λ : la longueur d'onde des rayons x.
- θ : L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant, il dépend que du réseau du cristal ;
- d : La distance inter réticulaire entre deux plans diffractant d'un cristal.

➤ **Principe**

La méthode générale consiste à bombarder le matériau par un faisceau de rayons X monochromatique ($0,1 \text{ \AA} < \lambda < 10 \text{ \AA}$) de longueur d'onde $1,54051 \text{ \AA}$, produit par une anticathode de cuivre, à mesurer l'angle par rapport au rayonnement incident des rayons X diffractés et l'intensité des rayonnements X diffractés au moyen d'un compteur à scintillation. Celui-ci tourne autour du même axe que l'échantillon mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence θ , l'angle mesure par le déplacement du compteur sera donc de 2θ , voir la **figure II.7**. [28]

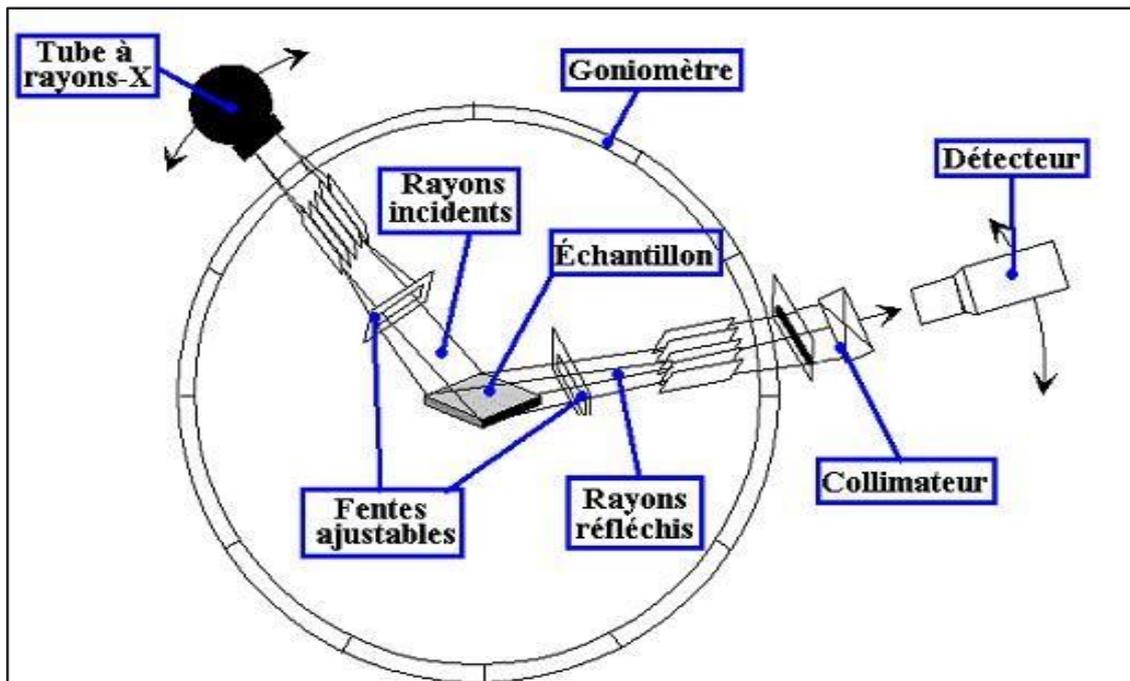


Figure II.7: Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X.

Le traitement des diffractogrammes ou spectres s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les fiches d'une base de données faisant correspondre les distances inter réticulaires des angles 2θ enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon analysé. [26]

II.2.3. Méthode d'analyse chimique pour détermination des compositions chimiques des matières (calcaire, argile, fer, sable)

✚ Etapes de détermination de la composition chimique des échantillons

❖ On met 0.5000g d'échantillon (dans creusé en platine);

Illustre en **figure II.8**.



Figure II.8: Creusé platine.

- ❖ On met 3g de Na_2CO_3 dans le sable et 2g de Na_2CO_3 dans l'argile et le fer et calcaire;
- ❖ On met Dans le four à température de 960C pendant 10min ;
- ❖ Une fois sorti du four, ajoutez une quantité d'eau distillée;
- ❖ On Verse dans le plat, et puis on ajoute 10ml de HCl concentré + 3 gouttes de HNO_3 dans un bain marin ;

Illustre en **figure II.9**.



Figure II.9: bain marin pour chauffer la solution.

- ❖ On met 1g de NH_4Cl ;
- ❖ (La filtration) on filtre les échantillons à l'aide d'un papier filtre;
- ❖ Après cette étape on titre les solutions obtenues;

Illustre en **figure II.10**.



Figure II.10: Filtration de solution

- ❖ On complète la fiole avec l'eau distillé jusqu'au trait de jauge ;

Illustre en **figure II.11**.



Figure II.11: La solution avec l'eau distillé.

- ❖ L'agitation de 15 à 20 fois ;

II.2.3.1. Methode classique de titrage des elements chimique

- Détermination du titre CaO :

Pour connaitre la quantité ou bien le pourcentage de chaux(CaO) dans chaque échantillon on suit les étapes suivantes :

- ❖ On prend 25ml de l'échantillon dans un bécher de 300ml avec une pipette graduée;
- ❖ On ajoute l'eau distillé jusqu'à 200ml ;
- ❖ On verse dans le bécher 5ml de triethanolamine plus 20ml de KOH+ l'indicateur Coloré CMP (rouge brique);

Illustre en **figure II.12**.



Figure II.12: les solutions qui consulter les composants chimiques.

- ❖ On titre avec solution d'EDTA ($c=0.015\text{mol/l}$) jusqu'à changement de couleur (vert à orange clair) ;
- ❖ On prend le volume d'EDTA et on calcule le pourcentage CaO ;

$$\% \text{CaO} = \frac{V(\text{EDTA}) * T(\text{CaO})}{m(\text{matière})} \quad \text{Eq II.4}$$

Avec $T(\text{CaO}) = 0.8673$.

➤ Détermination du titre MgO :

- ❖ 25ml d'échantillon dans un bécher de 300ml ;
- ❖ On ajoute l'eau distillé jusqu'à 200ml ;
- ❖ 1ml de potassium tartrate ;
- ❖ 5ml de triethanolamine ;
- ❖ 20ml de solution d'amunique ;
- ❖ L'indicateur colore KB (vert);
- ❖ On titre avec l'EDTA, on remarque un changement du couleur marron clair à bleu.

$$\% \text{MgO} = \frac{(V_2 - V_1) * T(\text{MgO})}{m(\text{matière})} \quad \text{Eq II.5}$$

Avec $T(\text{MgO}) = 0.6234$

➤ Détermination du titre Fe_2O_3

- ❖ On verse 25ml de l'échantillon dans un bécher de 250ml, on complète le bécher avec l'eau distillé jusqu'à 100ml;
- ❖ On ajoute 10 gouttes de sodium sulfocalicylate (la couleur devant mauve) plus des gouttes d'ammonac 1.1 (jusqu'à changement de couleur vers orange).
- ❖ Plus quelque goutte d'acide hydrochlorique (Hcl) (la couleur devant mauve) puis on ajoute 5 gouttes pour la fixation;
- ❖ On met le bécher sur un chauffage à la température de 70c° ;
- ❖ On titre avec la solution d'EDTA (la couleur devient transparente);
- ❖ On prend le volume d'EDTA et on calcule le pourcentage;

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{V(\text{EDTA}) * T(\text{Fe}_2\text{O}_3)}{m(\text{matière})} \quad \text{Eq II.6}$$

Avec $T=1.2347$.

➤ Détermination du titre Al_2O_3

- ❖ Dans le même bécher précédant (Fe_2O_3), on Ajoute 15 degré de solution (20 degré dans l'argile) plus 15ml de solution tampon $\text{pH}=4.3$;
- ❖ On complète avec l'eau distillée jusqu'à 200ml plus 15 gouttes de PAN;
- ❖ On met sur le chauffeur jusqu'à la température de 100c° ;

- ❖ On titre avec CuSO_4 jusqu'au changement de couleur (vers mauve);

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{sable}) = \frac{(15 - V_{\text{Cu}}(\text{SO}_4) * K) * T(\text{Al}_2\text{O}_3)}{m(\text{sable})} \quad \text{Eq II.7}$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{argile}) = \frac{(20 - V_{\text{Cu}}\text{SO}_4 * K) * T\text{Al}_2\text{O}_3}{m(\text{argile})} \quad \text{Eq II.8}$$

Avec $T=0.7885$ et $K=1.00$.

- Détermination du titre SiO_2

Pour connaître le pourcentage de SiO_2 , après la filtration des solutions.

- ❖ On pèse les creuses en porcelaine vide;
- ❖ On Met les papiers filtre qui contiennent de petite quantités de l'échantillon dans creusé;
- ❖ On met les creusés (avec les papiers filtre) dans le chauffeurr 30min et on les dans le four pendant 30min;
- ❖ Les creusés en porcelaine sont ensuite mis à l'intérieur du refroidisseur et pesés.

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{m(c) - m(\text{vide})}{m(\text{matériau})} * 100 \quad \text{Eq II.9}$$

- Détermination du titre Cl

- ❖ L'échantillon est pesé (argile 0.1 g, sable 0.05g) ; puis mis dans le tube ;
- ❖ 5 gouttes de H_2O_2 et 5 ml de H_2PO_2 sont ajoutés ;

illustre en **figure II.13**.

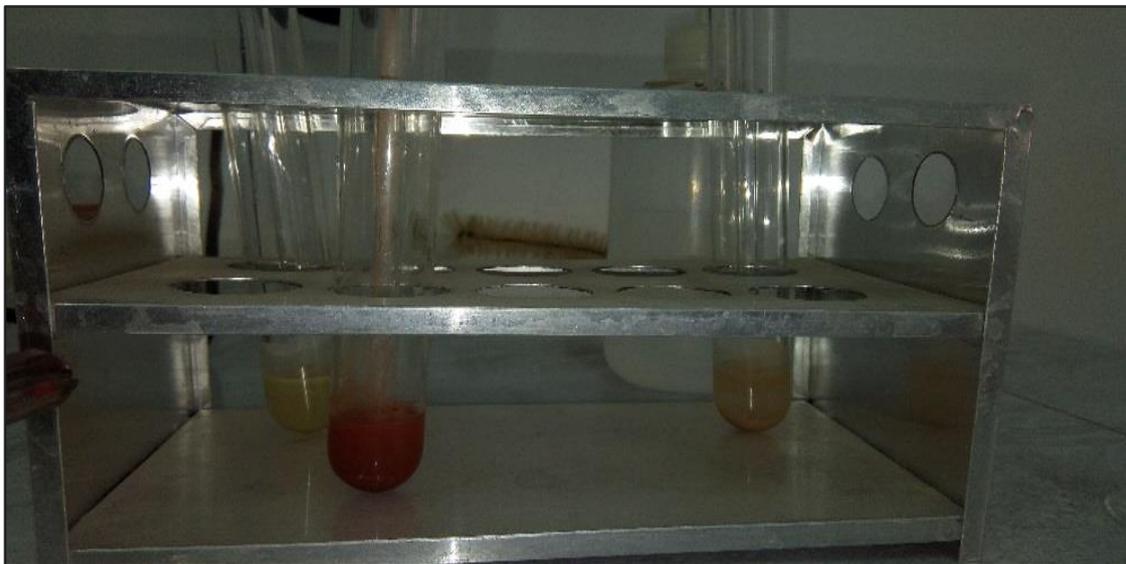


Figure II.13: Tubes utilisés.

- ❖ Mettez dans un fiole 3 ml d'eau pure ;
- ❖ entrer dans un fiole le tube pour distillation ;
- ❖ On met le tube qui contient l'échantillon dans un détecteur de Cl^- pendant 10 min au four à une température de 255°C ;
- ❖ Le tuyau est nettoyé ensuite par le $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

❖ Puis on ajoute les solutions suivantes :

- * 1 ou 2 goutte de bromophenolblue jusqu' à change la couleur en jaune.
- * 2 ou 3 goutte de Na₂OH jusqu' à change la couleur en bleu
- * 1 ou 2 goutte de HNO₃ jusqu' à change la couleur en jaune ;

Illustre en **figure II.14**.



Figure II.14: Les solutions qui révèlent le Cl.

❖ Après le titrage avec le Hg(NO₃)₂ jusqu' à change la couleur en violet pour calcul la %Cl ;

$$\%Cl = \frac{(V_1 - V_0) \cdot TCl}{m(\text{matière})} \cdot 0.1TCl = 0.0689 \quad \text{Eq II.10}$$

V₀ : volume de Hg(NO₃)₂ témoin

V₁ : volume de Hg(NO₃)₂ l'échantillon.

➤ Détermination du titre K₂O et NaO

- ❖ Dans un creuse en platine, nous pesons (argile=0.2g et sable =0.1g) d'échantillon ;
- ❖ Ajouter 5 à 7 ml de HF ;
- ❖ Plus 15 à 20 gouttes de H₂SO₄;
- ❖ Mettez-le sur le chauffeur jusqu'à ce que la solution sèche complètement;
- ❖ Ajouter 40 à 50ml d'eau distillée chaude ;
- ❖ Ajouter une goutte de méthyle rouge, puis 4 gouttes de ammonia (1,1), jusqu'à ce que la couleur vire de violet au jaune ;
- ❖ Ajouter 10ml de l'ammonium carbonate ;
- ❖ On met dans le chauffeur pendant 20 à 30 min;
- ❖ Mettez la solution dans une fiole de 100ml, puis on ajoute 2 gouttes du Hcl (1.1)

➤ Détermination du titre SO₃

Pour déterminer le dosage de SO₃ dans une matière première il faut suivre les étapes suivantes :

- ❖ On pèse 0.2g de matière première ;

Illustre en **figure II.15**.



Figure II.15: Balance disponible à la cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR..

- ❖ On laisse la masse (0.2g) avec la résine (5g) + 50ml (l'eau) sur plaque chauffant pendant 7min.

Illustre en **figure II.16**.



Figure II.16: Chauffeur disponible à la cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR..

- ❖ Après 7min on filtre le mélange dans un bécher qui contient 2g de la résine et puis on ajoute l'eau distillée ;

Illustre en **figure II.17**.



Figure II.17: Filtration disponible à la cimenterie de Sidi Moussa-ADRAR..

- ❖ Et puis on laisse sur plaque chauffant pendant (3min),
- ❖ On filtre et ajoute l'eau distillé jusqu'à 150 ml,
- ❖ Puis on ajoute 6 gouttes de phénol phtaléine,
- ❖ On Dose la solution par NaOH jusqu'à l'apparition de la couleur rose clair,
- ❖ Et à la fin on prend la valeur qui affiche sur détectrice qui a ensuite changé la couleur. La loi utilisée pour calculer SO_3 et donné par l'équation II.11.

$$\%SO_3 = (v_1 - v_2) * (T * SO_3 * 0.1) / m \quad \text{Eq II.11}$$

Tell que :

v_1 : volume dosé NaOH ;

v_2 : volume pour dosé la résine (NaOH) ;

m : masse de matière premier.

II.3. Présentation du logiciel de gestion de la qualité du ciment (homogénéisation et fabrication) [3].

Organisation du logiciel est illustrée en plusieurs étapes dont les principales sont les suivantes :

Étape 1 : À partir du logiciel global, par un simple clic sur le bouton « fabrication », on accède à l'interface du logiciel de fabrication de différents types de clinkers. Cette dernière (**figure II.18**) est constituée de plusieurs tableaux qui permettent l'introduction de toutes les informations sur le clinker désiré, et facilite la communication entre le logiciel et l'opérateur.

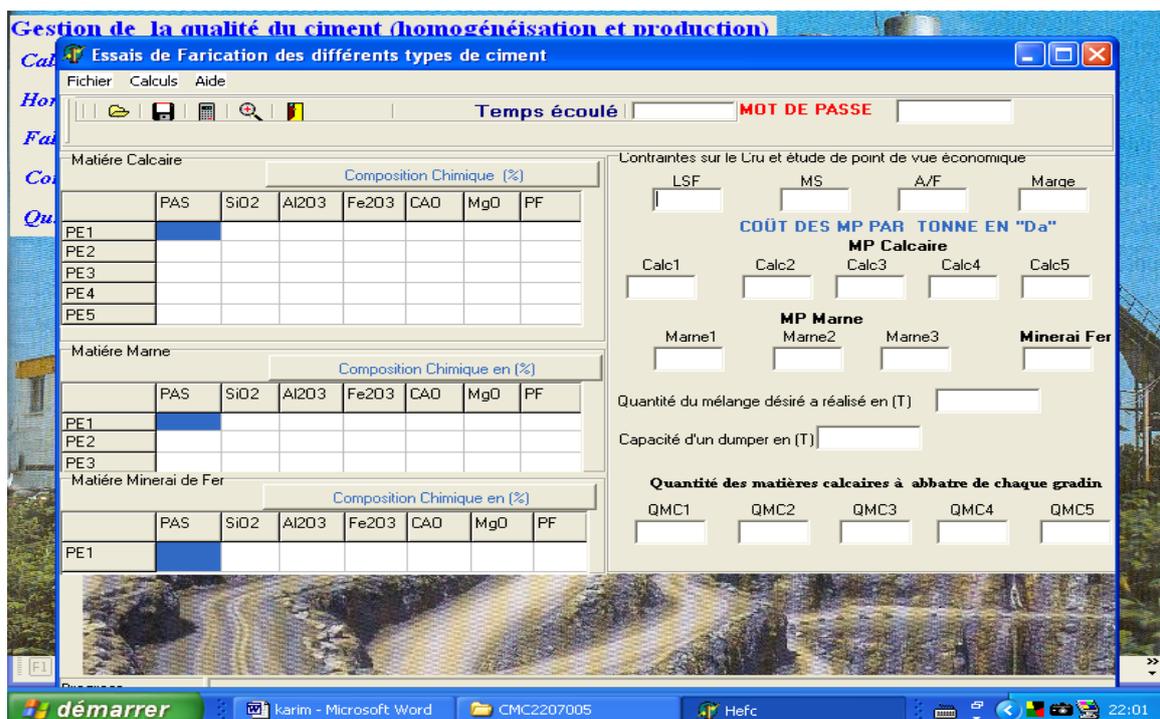


Figure II.18: Interface de communication [3].

Étape 2 : On introduit toutes les informations nécessaires à la fabrication d'un clinker désiré. Les interfaces illustrées en **figure II.19** montrent une organisation optimale dans l'introduction des informations dans le logiciel. Dans un premier temps, on introduit la composition chimique de toutes les matières premières utilisées et les contraintes technologiques sur le cru ; dans un second temps, on choisit le type de clinker à fabriquer, puis on injecte les contraintes technologiques de ce dernier (composition minéralogique...etc) dans le logiciel, Comme illustre en **figure II.20**.

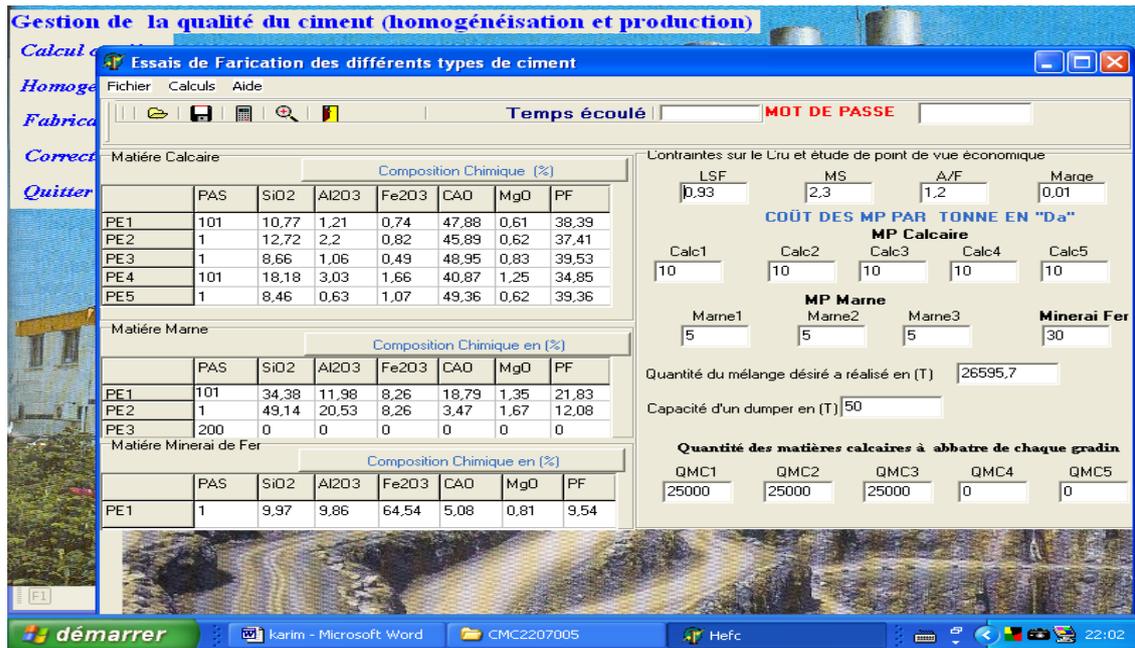


Figure II.19: Organisation optimale dans l'introduction des informations dans le logiciel [3]

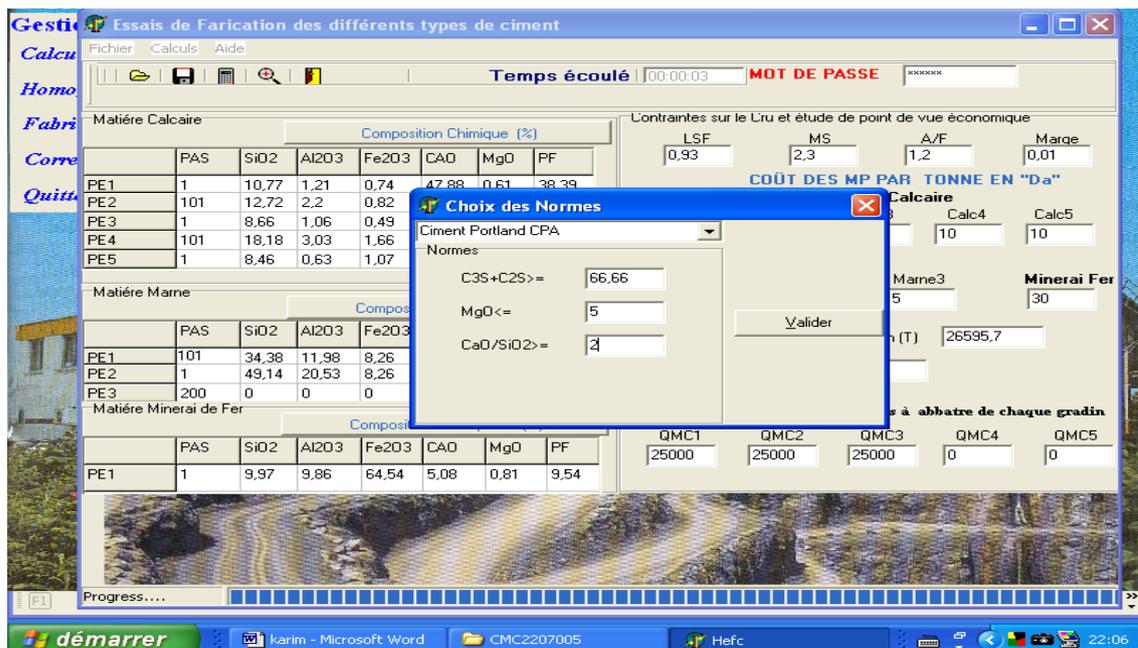


Figure II.20: Interfaces d'introduction des informations concernant un type de clinker désiré [3].

Étape 3 : À l'aide du bouton « process » on exécute le logiciel, son évolution est contrôlée par une barre de progression située en bas de l'interface (figure II.21). Une fois l'exécution achevée, le logiciel affiche le nombre total de variantes (solutions) trouvées pour le cas étudié sur une petite interface.

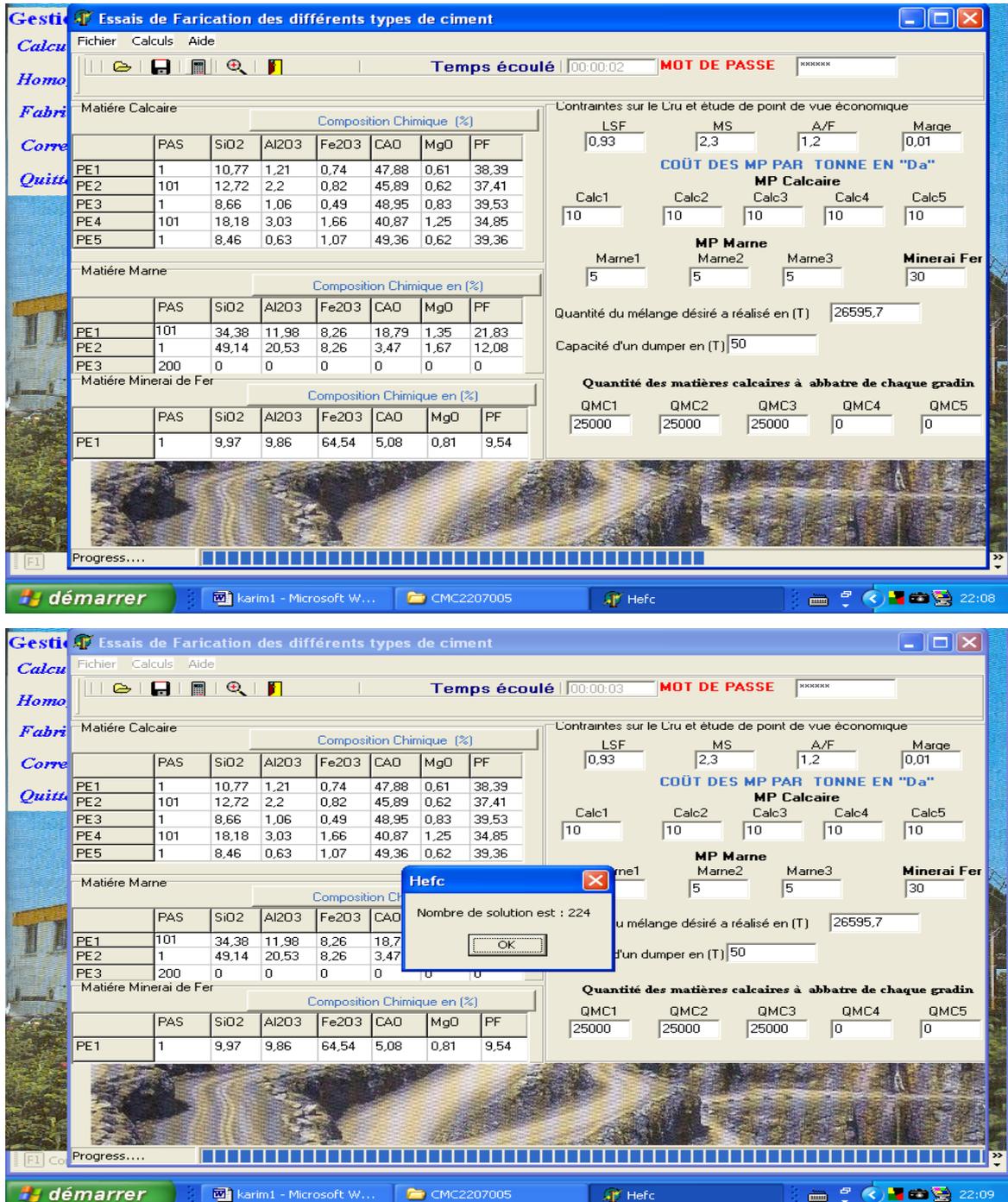


Figure II.21: Interface de progression de l'exécution du logiciel [3].

Étape 4 : Une fois que l'exécution est terminée, à l'aide d'un bouton « visualisation » on visualise toutes les variantes données comme solutions au problème posé. On affiche tous les résultats souhaités sur une interface qui est illustrée en figure II.22.

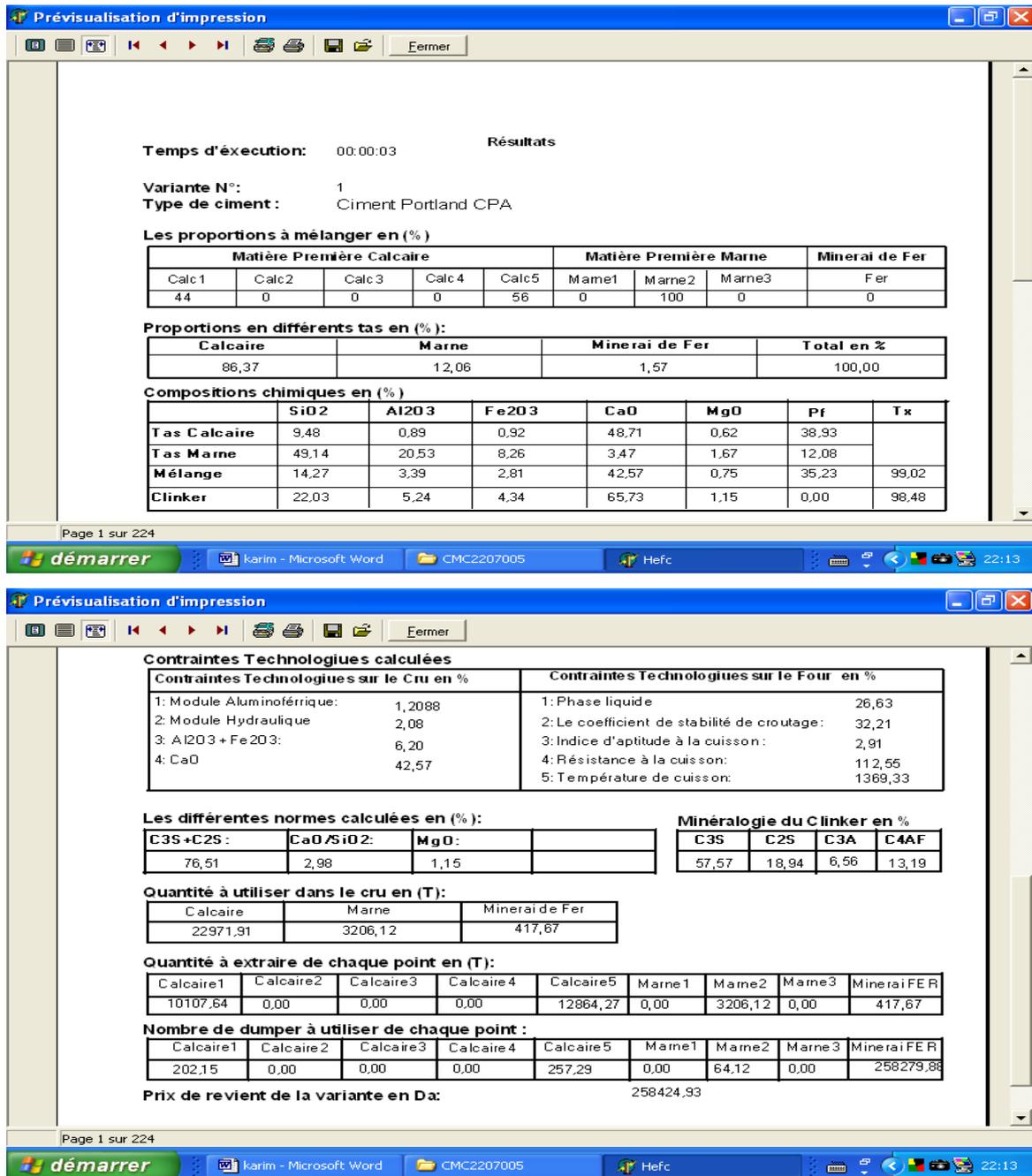


Figure II.22: Interface d'affichage des solutions trouvées [3].

Conclusion

La qualité du ciment dépend du bon choix des matières utilisées dans la fabrication et la bonne surveillance des phases expérimentales de tous côtés ainsi que le respect des normes utilisées dans la fabrication du ciment et la stratégie du site pour faciliter la connectivité entre les zones d'extraction et l'unité de traitement.



CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

La qualité des matières premières dans le système carrière-usine et la bonne préparation mécanique (concassage, broyage, pré-homogénéisation et homogénéisation) jouent un rôle important qui récite sur l'aspect qualitatif et quantitatif des ciments produits.

III.1. Étude et suivi de la production du ciment au niveau de la cimenterie sidi-moussa (ADRAR).

Le cru (mélange des matières premières) utilisé au niveau de la cimenterie est constitué de trois matières premières essentielles à la production du ciment CPA, à savoir :

1. Le calcaire qui apporte l'un des constituants principaux, CaO, nécessaire pour la fabrication de ciment.
2. La Marne qui apporte les constituants principaux, Al₂O₃ et SiO₂, nécessaires pour la fabrication de ciment.
3. Le minerai de fer utilisé par la cimenterie, comme troisième matière dans la constitution du cru à ciment, dans le but d'apporter l'oxyde de fer (Fe₂O₃) déficient dans le calcaire et la marne.

III.1.1. Contrôle des variations des compositions chimiques et des modules LSF, MS, et A/F du cru.

Le suivi de la composition chimique réalisé avec Diffraction des Rayons X au niveau de la cimenterie et les indices de qualité des crus conçus le long d'une journée de production a donné les résultats illustrés dans le **tableau III.1**. Il est à noter que la composition chimique du cru est vérifiée chaque deux heures.

Tableau III.1. Composition chimique et les indices de qualité des crus conçus le long d'une journée.

Heurs	Composition chimique						Indice de qualité		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LSF	MS	A/F
09H00	14,55	3,27	2,28	42,84	1,17	0,56	0,93	2,62	1,43
11H00	13,78	3,26	2,28	42,71	1,15	0,57	0,97	2,49	1,43
13H00	13,75	3,33	2,30	43,01	1,15	0,56	0,98	2,44	1,45
15H00	13,86	3,29	2,29	43,03	1,14	0,56	0,97	2,48	1,44
17H00	14,50	3,35	2,29	42,83	1,15	0,56	0,93	2,57	1,46
19H00	14,86	3,31	2,28	42,27	1,15	0,55	0,90	2,66	1,45
21H00	14,69	3,34	2,27	42,51	1,4	0,55	0,90	2,62	1,47

23H00	15,14	3,39	2,28	42,25	1,13	0,55	0,88	2,67	1,49
01H00	14,89	3,33	2,28	42,52	1,12	0,55	0,90	2,65	1,46
03H00	14,10	3,31	2,28	42,50	1,14	0,57	0,95	2,52	1,45
05H00	14,25	3,64	2,30	42,38	1,13	0,55	0,96	2,40	1,58
07H00	14,11	3,68	2,31	42,50	1,17	0,55	0,94	2,36	1,59
09H00	14,37	3,32	2,28	42,62	1,15	0,56	0,93	2,57	1,46

En général, les fluctuations des teneurs des éléments chimiques dans les crus, le long d'une journée, sont insignifiantes, implique une stabilité du cru CPA. Le suivi des fluctuations des indices de qualité des crus est illustré dans les figures III.1, III.2 et III.3 suivantes :

Les fluctuations du module silicique, de 26%, enregistrées sur la figure III.1 montrent l'instabilité de ce dernier. On remarque que les valeurs de module silicique M.S des crus conçus est comprise entre]2,36- 2,67[, avec une valeur moyenne de $M.S_{moy} = 2,54$. Les valeurs du module silicique sont acceptables pour la fabrication du ciment CPA, ainsi que ces dernières sont incluses dans l'intervalle standard de valeurs normales [2,3-2,7].



Figure III.1. Evolution du module silicique (M.S) des crus conçus pendant 24H.

Les fluctuations des valeurs du facteur de saturation en chaux L.S.F, de 10%, enregistrées sur la figure III.2 montrent l'instabilité de ce dernier. On remarque que les valeurs de facteur de saturation en chaux L.S.F des crus conçus est comprise entre]0,88- 0,98[, avec une valeur moyenne de $LSF_{moy} = 0,93$. Les valeurs du facteur de saturation en

chaux sont acceptables pour la fabrication du ciment CPA, ainsi que ces dernières sont incluses dans l'intervalle standard de valeurs normales [0,9-0,98].



Figure III.2. Fluctuations des valeurs du Facteur de saturation en chaux (L.S.F) des crus conçus pendant 24H.

Les fluctuations des valeurs du Module Alimino-ferrique A/F, de 6%, enregistrées sur la **figure III.3** montrent l'instabilité de ce dernier. On remarque que les valeurs de module Alumino-ferrique A/F des crus conçus est comprise entre]1,43- 1,59[, avec une valeur moyenne de $A/F_{moy} = 1,47$. Les valeurs du module Alimino-ferrique sont acceptables pour la fabrication du ciment CPA, ainsi que ces dernières sont incluses dans l'intervalle standard de valeurs normales [1,3-1,6].

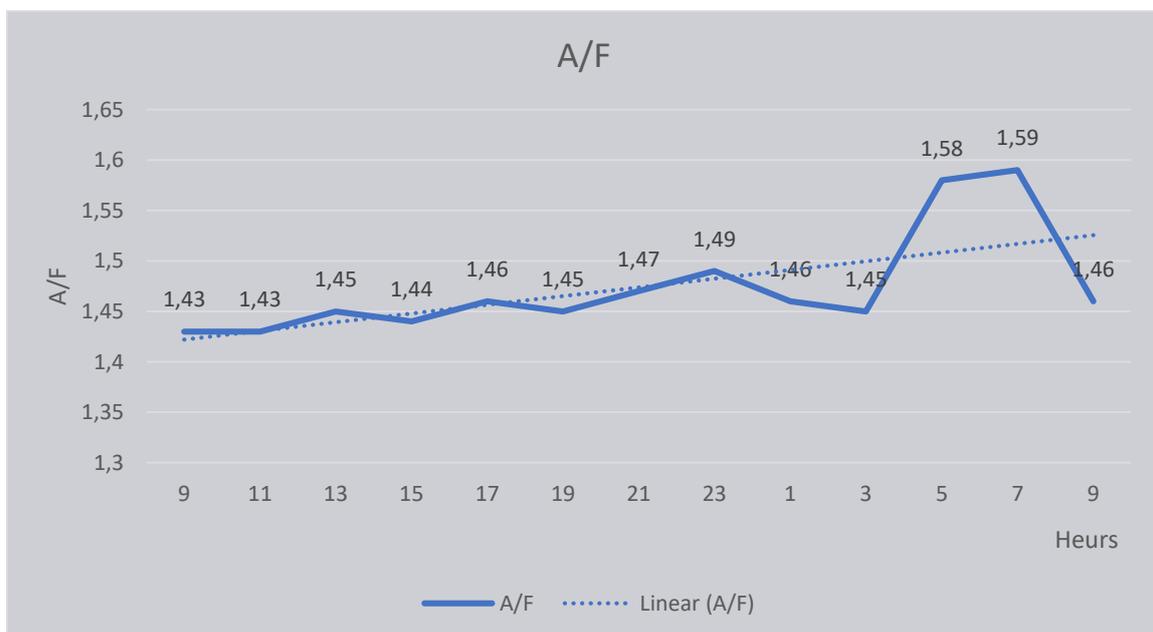


Figure III.3. Fluctuations des valeurs de Module Alimino-ferrique (A/F) des crus conçus pendant 24H.

En résumé, le cru préparé au niveau de la cimenterie de SIDI-MOUSSA, ADRAR, pour la fabrication du ciment C.P.A est acceptable malgré la présence de fluctuations notables dans les valeurs des indices de qualité du cru. Les fluctuations des valeurs des indices de qualité enregistrées restent incluses dans les intervalles standards.

Cependant, pour niveler les fluctuations des indices de qualité, on propose dans la suite du travail la préparation de crus C.P.A par le calcul de mélange à l'aide d'un logiciel de gestion de la qualité du ciment. [3]

III.1.2. Contrôle de la composition chimique et minéralogique du clinker sur dix jours de production au niveau de la cimenterie d'ADRAR.

Le suivi de la composition chimique et de la composition minéralogique des clinkers fabriqués le long de dix jours de production a donné les résultats illustrés dans les **tableaux III.2 et III.3.**

Tableau III.2. Compositions chimiques du clinker de la cimenterie de Sidi Moussa

Composition chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO-L	PAF
01/01/2018	22,33	5,06	3,21	65,78	1,39	0,65	0,80	0,25
02/01/2018	22,16	5,01	3,26	65,95	1,46	0,68	1,00	0,34
03/01/2018	22,17	5,03	3,25	65,56	1,39	0,69	0,90	0,30
04/01/2018	22,29	5,20	3,32	65,64	1,39	0,60	1,12	0,23
05/01/2018	22,13	5,06	3,36	65,53	1,02	0,71	0,98	0,22
06/01/2018	22,02	5,15	3,39	65,85	1,40	0,63	1,08	0,25
07/01/2018	22,08	5,15	3,52	65,62	1,27	0,60	0,89	0,24
08/01/2018	21,96	5,18	3,52	65,72	1,33	0,72	0,96	0,39
09/01/2018	21,85	5,11	3,56	65,48	1,27	0,73	0,80	0,16
10/01/2018	22,14	5,17	3,64	65,42	1,33	0,66	0,90	0,40

Tableau III.3. Compositions minéralogiques potentielle du clinker.

Composition Minéralogique	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
01/01/2018	57,68	15,49	7,98	11,08
02/01/2018	59,85	18,40	7,76	09,91
03/01/2018	58,03	19,81	7,83	09,88

04/01/2018	56,46	21,33	8,16	10,09
05/01/2018	57,80	19,86	7,72	10,21
06/01/2018	59,52	18,25	7,91	10,31
07/01/2018	58,03	19,55	7,69	10,70
08/01/2018	58,80	18,62	7,77	10,70
09/01/2018	59,05	18,12	7,52	10,82
10/01/2018	56,28	21,04	7,54	11,06

En général, la composition chimique des clinkers produits, pendant dix jours de suivi, répond aux normes de composition chimique moyenne du clinker, ainsi sur plan quantification de phases minéralogiques on enregistre une distribution équitable normée pour un ciment C.P.A.

Cependant, pour la préparation de cru et clinker pétrolier, les résultats obtenus ne peuvent répondre aux normes standards exigées pour ce type de ciment. La méthode classique de préparation actuelle utilisée au niveau de la cimenterie de SIDI MOUSSA-ADRAR a montré ces limites dans la préparation de ce type de ciment. A cet effet, l'introduction d'une méthode numérique s'avère indispensable.

III.2. Essais de préparation de cru et clinker C.P.A et pétrolier

III.2.1. Plan d'échantillonnage (cartographie)

Les points d'extractions du calcaire 1 et 2 sont présentés dans la **figure III.4**.

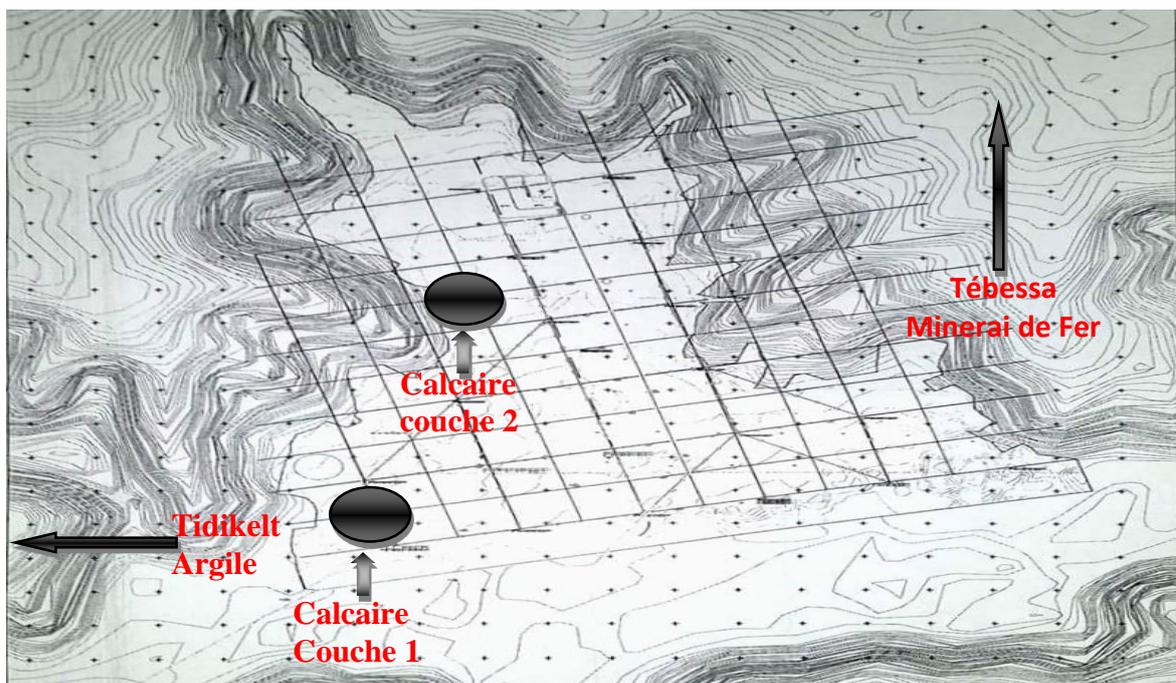


Figure III.4 : points d'extraction des échantillons calcaire. [25]

III.2.2. Caractérisation des matières premières utilisées

Les matières premières, prélevées de la carrière Sidi Moussa, utilisées par la cimenterie de Sidi Moussa illustrées sur le **tableau III.4** vont subir un traitement mécanique afin de déterminer l'aspect qualitatif, quantitatif et la faisabilité de fabriquer d'un ciment C.P.A et pétrolier répondants aux normes exigées.

III.2.2.1. Etapes de préparation des échantillons de matières premières pour analyses.

Les quantités de matières premières prélevées et acheminées de différents points d'extractions (gisements de cimenterie de SIDI MOUSSA) au Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP) sont enregistrées dans le **tableau III.4**.

Tableau III.4. Masse des échantillons prélevées et acheminés au laboratoire LTMGP.

Echantillon		Masse en (g)
Calcaires	Point d'extraction de couch 1	1800
	Point d'extraction de couch 2	1800
Marbre	Unité de elkseur	1200
Argile	Gisement 1	1500
Minerai de fer	Boukhedra ou elouanza	1500

La préparation des matières premières passe par un tas d'opérations, à savoir : (1) le concassage et le broyage afin de réduire les diamètres des grains pour favoriser la mise en solution lors de l'analyse chimique, (2) le quartage est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation du minerai, par mise de l'échantillon de matière sous forme d'une galette d'épaisseur de plus gros grain, puis la galette est partagée en quatre quarts égaux dont on prélève deux quarts opposés, les deux autres quarts seront ainsi gardés comme témoins **figure III.4**.

Selon l'équation statistique de RICHARDSE et pour un diamètre maximum des grains des échantillons de 2 mm, la représentativité en poids des échantillons à prélever sera de 400 g au premier stade de préparation, comme illustré en diagramme suivant ; $Q \geq Kd$, $Q \geq (0,1) * (2^2) \geq 0,4\text{kg}$ ($K=0,1$; $Q = 1800\text{g}$ - couch 1).

Diagramme des étapes de préparation des échantillons de calcaire 1 pour caractérisation présenté dans la figure ci-dessous :

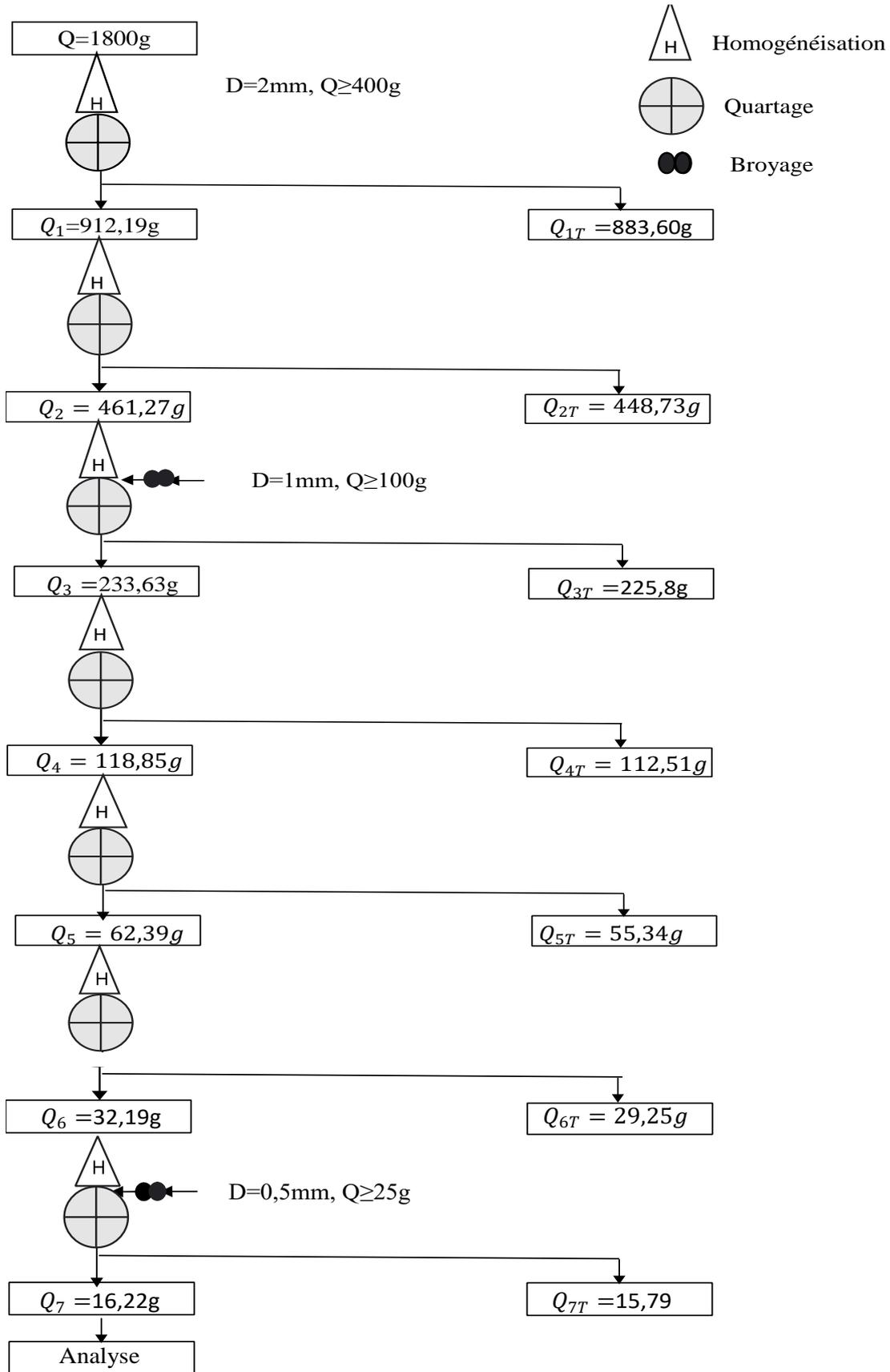


Figure III.5. Étapes de préparation des échantillons de calcaire 1 pour caractérisation et analyses.

III.2.2.2. Composition chimique

L'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X (XRF) a permis de déterminer et de quantifier les éléments présents dans les échantillons de matières premières brutes. Il a été noté que cette composition chimique a été déterminée au niveau de la cimenterie de SIDI MOUSSA et de Ain El-KEBIRA pour confirmation.

La répartition des teneurs chimiques des échantillons bruts par matière première obtenue pour les différents types, d'échantillons calcaire, marne, déchet de marbre et minerai de fer est présentée dans le **tableau III.5** et la **figure III.6**.

Il est noté que la masse des échantillons à analyser par XRF de type ZETIUM de la cimenterie de Sidi Moussa doit être égale à 15 g et broyée à un diamètre inférieur à 100 μm .

Tableau III.5. Compositions chimiques des matières premières.

Composants		Composition chimique (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF
Calcaire	1	5,62	1,67	0,79	49,55	4,5	0,78	36,99
	2	4,99	1,53	0,53	50,97	3,72	0,8	37,46
Déchets de Marbre	1	0,06	0,08	0,18	62,97	1,1	ND	34,74
Argile	1	58,25	12,06	6,52	2,73	2,98	0,25	9,09
Minerai de fer	1	20,93	2,73	47,98	9,71	3,49	0,25	15

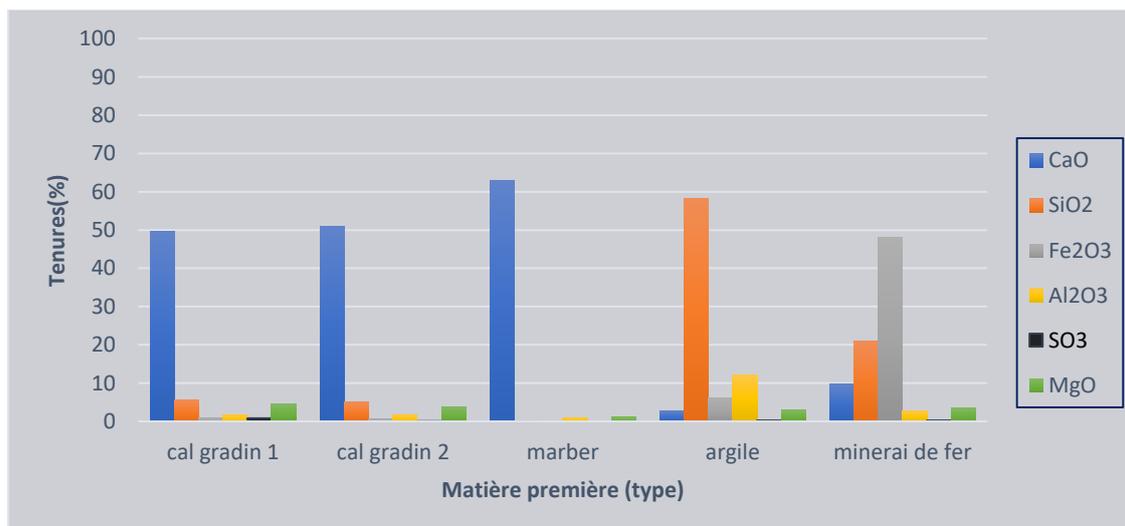


Figure III.6. Evolution des teneurs des éléments chimiques, en fonction de type de la matière première utilisée.

D'après les résultats inscrits dans le **tableau.III.5** et représentés sur la **figure.III.6**, des différences très notables sont enregistrées entre les teneurs en éléments des différents types de matières premières utilisées dans la fabrication du ciment. Ces fluctuations confirment dans l'ensemble la nécessité d'une homogénéisation au niveau du cru. Cette hétérogénéité détermine un ensemble des qualités (chimique, minéralogique, granulométriques.....etc.) que possèdent les matières premières exploitables dans la fabrication du ciment. Sur ces critères, les matières sont réparties en plusieurs qualités, à savoir : (1) le calcaire et le marbre qui apportent le CaO, la marne qui apporte la silice et l'alumine et enfin le minerai de fer qui apporte Fe_2O_3 (Hématite) nécessaire à la fabrication du ciment.

III.3. Exécution du logiciel de gestion de la qualité du ciment dans le système carrière usine de fabrication.

L'exécution du logiciel de calcul de mélange et de fabrication de clinker à ciment a donné plusieurs solutions de fabrication et de confection de mélanges et clinkers C.P.A et pétroliers. Les résultats obtenus sont présentés en annexes.

III.3.1. Préparation du cru CPA

Pour la préparation du cru nécessaire pour la fabrication du clinker CPA, notre choix s'est porté sur deux variantes données par le logiciel de fabrication.

III.3.1.1. Préparation du cru CPA par matières premières ordinaires

La première variante est obtenue selon le schéma de mélange donné en **figure III.7**:

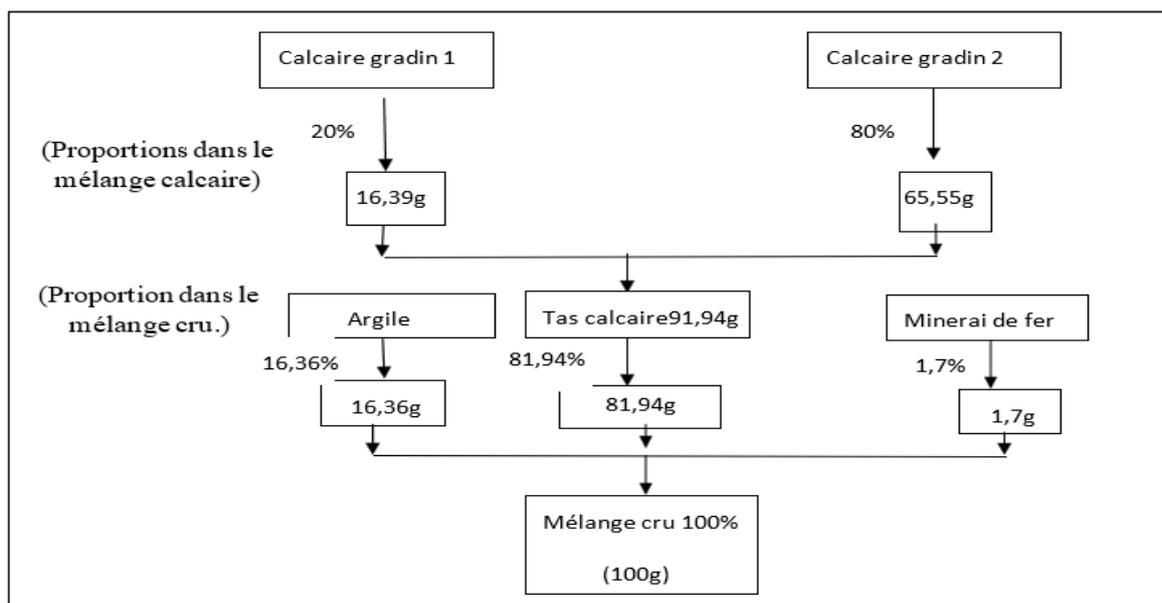


Figure III.7. Schéma de mélange des matières premières à ciment, cru C.P.A.

L'exécution du logiciel a donné plusieurs variantes de mélange pour les modules LSF= 0,94, MS=2,49 et A/F= 1,3 ±0,1. Notre choix est porté sur la variante N°21, la variante donnant les paramètres et compositions représentés dans le **tableau III.6**.

Tableau III.6. Paramètres et compositions théoriques donnés par le logiciel.

Les proportions à mélanger (%)					
Calcaire		Argile		Minerai de fer	
81,94		16,36		1,7	
Proportion des différents calcaires dans le mélange calcaire (%)					
Calcaire 1		Calcaire 2		Calcaire 4	
20		80		0	
Composition chimique de mélange calcaire (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
5,12	1,56	0,58	50,69	3,88	37,37
Composition chimique du cru (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
14,08	3,30	2,36	42,15	3,72	32,36
Composition chimique du mélange après calcination (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	
20,81	4,87	3,49	62,31	5,50	
Estimation minéralogique du mélange après calcination (%)					
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Phase liquide	
57,73	16,16	7,02	10,61	27,96	

La confection du cru conformément aux données du logiciel, est réalisée de façon suivante :

On prépare 100g de mélange cru, à partir des matériaux issus des dernières opérations de quartage de diamètre inférieur à 100µm. Les matériaux sont ensuite quartés et broyés jusqu'à la quantité désirée. Les quantités préparées **Figure III.7** seront ainsi représentatives pour tous les matériaux.

Le cru préparé est soigneusement homogénéisé puis réparti en deux portions de 85g pour la clinkérisation et 15g pour l'analyse chimique et minéralogique de cru, **Figure III.8**.

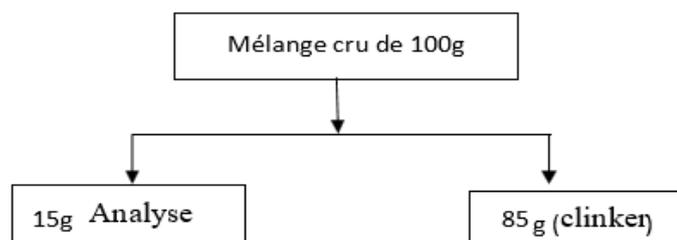


Figure III.8. Schéma de répartition du mélange préparé.

III.3.1.1.1. Caractérisation du cru C.P.A confectionné

Les analyses chimiques par XRF fluorescence des rayons X sont déterminées sur le spectromètre ZETIUM, au niveau de laboratoire de la cimenterie de Sidi Moussa. La répartition des teneurs chimiques des échantillons du tas calcaire et du cru CPA est présentée dans le **tableau III.7**.

Tableau III.7. Composition chimique du tas calcaire et de cru.

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Tas calcaire (%)	14,89	2,28	0,90	43,36	1,09	0,31	36,84	99,67
Cru (%)	14,77	2,73	3,98	42,12	1,04	0,31	34,70	99,65

Le calcul des modules LSF, MS, A/F, du cru CPA préparé, a donné les résultats présentés dans le **tableau III.8**.

Tableau III.8. Modules du cru.

Modules	LSF	MS	A/F
Valeurs	0,94	2,44	1,30

La composition chimique ainsi que les valeurs des modules du cru préparé sont proches des valeurs théoriques prévues par le logiciel, tableau III.9. La comparaison des résultats pratiques de la formation du cru avec les prévisions du logiciel est assez significative (comparable). Il est à remarquer un léger écart qui est du probablement aux problèmes liés à la préparation des échantillons.

Tableau III.9. Comparaison de la composition chimique du cru, tas calcaire et modules du Cru C.P.A.

Mélange cru (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	14,08	3,30	2,36	42,15	3,72	/	32,36	97,97
Pratique	13,94	3,24	2,48	41,70	3,59	0,61	33,52	99,32
Modules								
Résultats	LSF			MS		A/F		
Théorique	0,94			2,48		1,39		
Pratique	0,94			2,44		1,30		
Tas calcaire en (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	5,12	1,56	0,58	50,69	3,88	nd	37,37	99,02
Pratique	5,16	1,48	0,51	50,88	3,95	0,59	36,70	99,27

III.3.1.1.2. Analyse minéralogique du cru par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X au niveau de laboratoire de génie des procédés à l'université de A/MIRA-Bejaia a montré la présence de six phases minéralogiques : la cubanite (Cu) en majeure partie, la calcite (Ca), la gebthelvite (Ge), la colerainite (Co), la faylite-magnesian (Fa), la calomel-bromian (Cb) en phases mineures comme le montre la **figure III.9**.

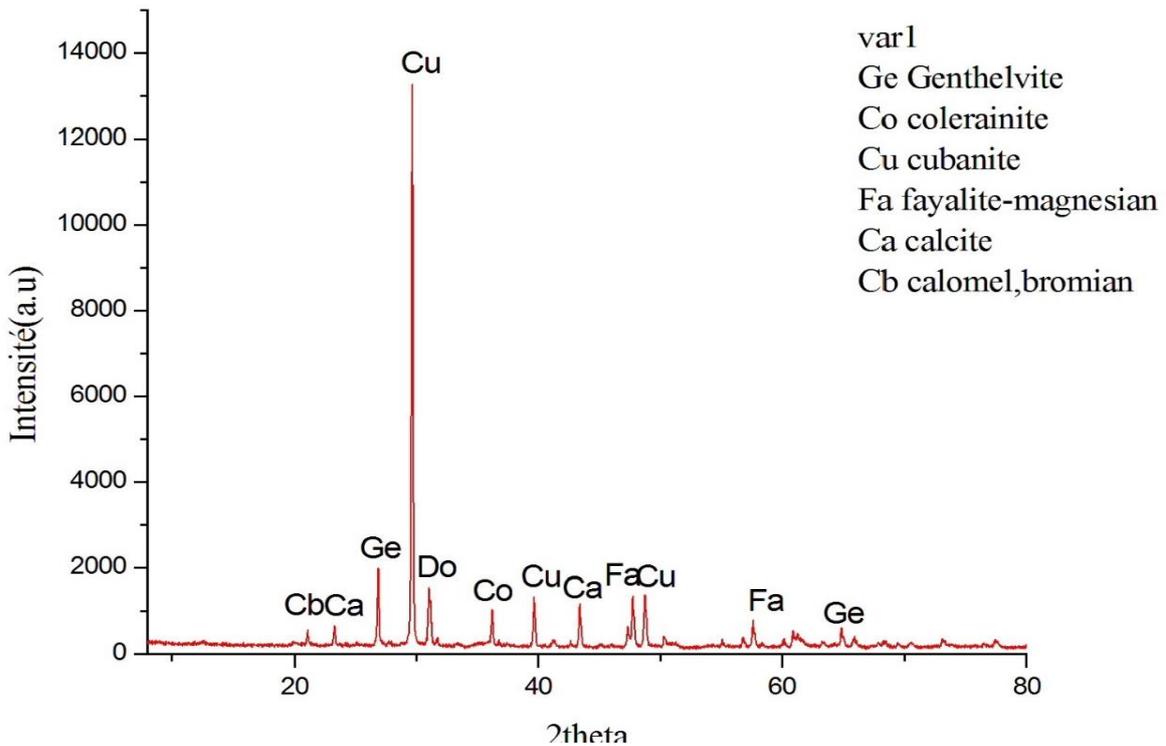


Figure III.9. Phases cristallisées du cru CPA.

Les compositions chimiques des minéraux composants le cru CPA présenté dans le **Tableau III.10**.

Tableau III.10 : composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 1).

Minéral	Formule chimique
Genthelvite	$\text{Be}_3\text{Zn}_4(\text{SiO}_4)_3\text{S}$
Colerainite	$4\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Cubanite	CuFe_2S_3
Fayalite- magnesian	Fe_2SiO_4
Calomel-bromain	HgCl_2
Calcite	CaCO_3

On conclut que le clinker préparé par le logiciel de gestion de la qualité du ciment répond aux normes d'un clinker C.P.A, à savoir :

- (1) Présence de quatre phases cristallisées normées et quantifiées par le logiciel de gestion de la qualité des ciments, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF ;
- (2) $C_3S + C_2S > 66,66$, $MgO < 5\%$ et $CaO/SiO_2 > 3$.

III.3.1.2. Préparation du cru CPA par valorisation de déchet de marbre.

Même étapes de simulation sur logiciel de gestion de la qualité du ciment ont été suivies pour la préparation du cru nécessaire pour la confection du cru CPA par valorisation de déchet de marbre, notre choix est porté sur la variante N°103, la variante est obtenue selon le schéma de mélange donné en **figure III.10**.

L'exécution du logiciel a donné plusieurs variantes du mélange pour les modules $LSF = 0,94$, $MS = 2,3$ et $A/F = 1,2 \pm 0,001$. Notre choix est porté sur la variante N°103 donnant les paramètres et compositions représentés dans le **tableau III.11** :

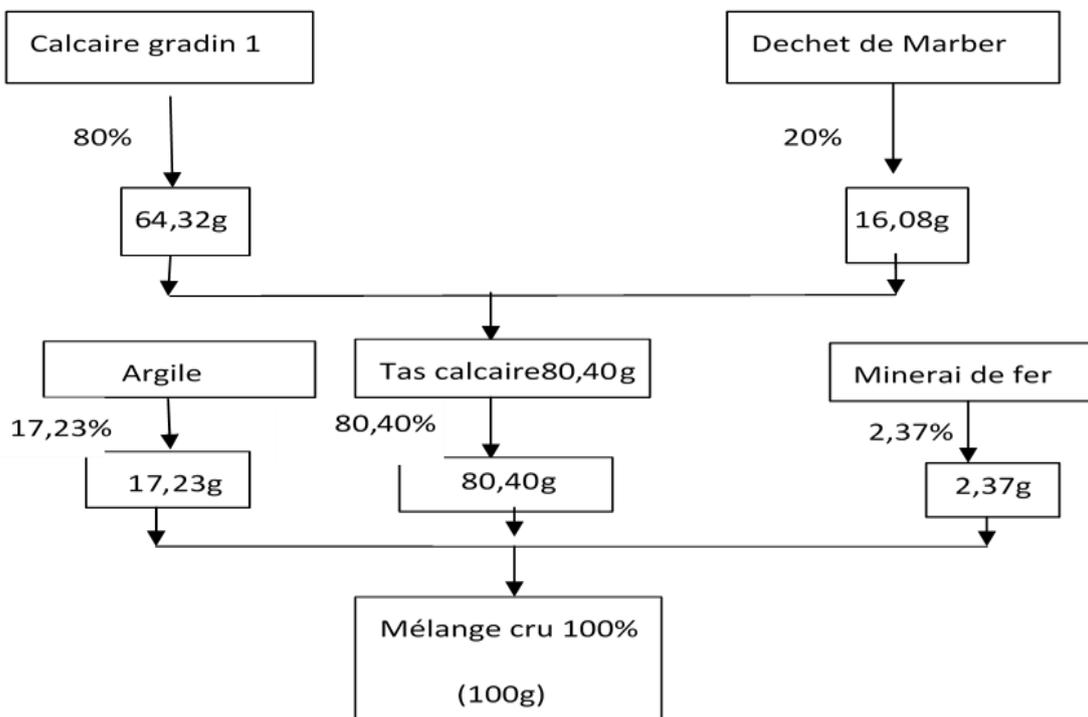


Figure III.10. Schéma de mélange des matières premières à ciment.

Tableau III.11. Résultats donnés par le logiciel.

Les proportions à mélanger (%)					
Calcaire		Argile		Minerai de fer	
80,40		17,23		2,37	
Proportion des déferents calcaires dans le mélange calcaire (%)					
Calcaire 1		Calcaire 2		Déchet de marbre	
20		0		80	
Composition chimique de mélange calcaire (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PAF
4,51	1,51	0,67	52,23	3,82	36,54
Composition chimique du cru (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PAF
14,16	3,36	2,80	42,70	3,67	31,30
Composition chimique du mélange après calcination (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	
20,61	4,89	4,07	62,15	5,34	//
Estimation minéralogique du mélange après calcination (%)					
C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	Phase liquide	
57,68	15,61	6,07	12,39	29,16	

La confection du cru conformément aux données du logiciel, est réalisée de façon suivante : On prépare 100g de mélange cru, à partir des matériaux issus des dernières opérations de quartage de diamètre de 100 μ m. Les matériaux sont ensuite quartés et broyés à un diamètre inférieur, jusqu'à la quantité désirée. Les quantités préparées tableau **III.12** seront ainsi représentatives pour tous les matériaux.

Tableau III.12. Préparation du cru conformément aux résultats du logiciel.

Les quantités à mélanger (g)			
Calcaire	Argile	Minerai de fer	Total
81,94	17,23	2,37	100
Les masses des différents calcaires dans le mélange calcaire (g)			
Calcaire 1	Calcaire 2	Déchet de marbre	Total
64,32	0	16,08	81,94

Le cru préparé est soigneusement homogénéisé puis réparti en deux portions de 85g pour la clinkérisation et 15g pour l'analyse chimique et minéralogique, **Figure III.11.**

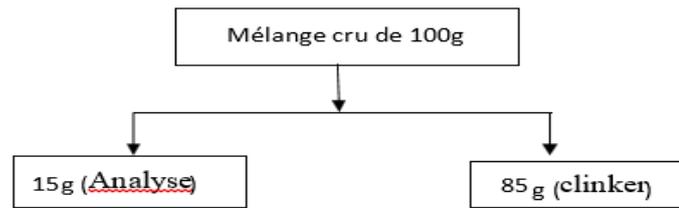


Figure III.11. Schéma de répartition du mélange préparé.

III.3.1.2.1. Caractérisation du cru CPA

L'analyse chimique par XRF fluorescence des rayons X sont déterminées sur le spectromètre ZETIUM, au niveau du laboratoire de la cimenterie de Sidi Moussa. La répartition des teneurs chimiques des échantillons du tas calcaire et du cru CPA est présentée dans le **tableau III.13**:

Tableau III.13. Composition chimique du tas calcaire et de cru.

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Tas calcaire (%)	5,03	1,54	0,57	50,68	3,67	0,79	37,72	100
Cru (%)	11,24	4,12	2,37	41,15	2,74	0,54	37,74	99,9

Le calcul des modules LSF, MS, A/F, du cru pétrolier préparé, a donné les résultats présentés dans le **tableau III.14**.

Tableau III.14. Modules du cru.

Modules	LSF	MS	A/F
Valeurs	0,93	2,38	1,23

La comparaison des résultats pratiques de la formation du cru avec les prévisions du logiciel est assez significative (comparable), **tableau III.15**. Il est à remarquer un léger écart qui est du probablement due aux problèmes liés à la préparation des échantillons.

Tableau III.15. Comparaison de la composition chimique et des modules du cru.

Mélange cru (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	14,16	3,36	2,80	42,70	3,67	//	31,30	97,99
Pratique	14,24	3,29	2,67	42,15	3,74	0,54	37,74	99,90
Modules								
	LSF		MS		A/F			
Théorique	0,94		2,29		1,20			
Pratique	0,93		2,38		1,23			

Tas calcaire en (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	4,51	1,51	0,67	52,23	3,82	//	36,54	99,9
Pratique	5,03	1,54	0,57	51,96	3,67	0,79	36,72	100

III.3.1.2.2. Analyse minéralogique du cru par diffraction des rayons X(DRX)

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X au niveau du laboratoire de sciences exactes de l'université de A/MIRA-Bejaia, a montré la présence de sept phases minéralogiques, du cru CPA : l'Anadite 2/TO/RG (An) en majeure partie, la calcite (Ca), le chlorite (Ch), la manganocalcite (Ma), la violarite (Vi), la kutnohorite-magn (Ku), la microcline(Mi) en phases mineures comme le montre la **figure III.12**.

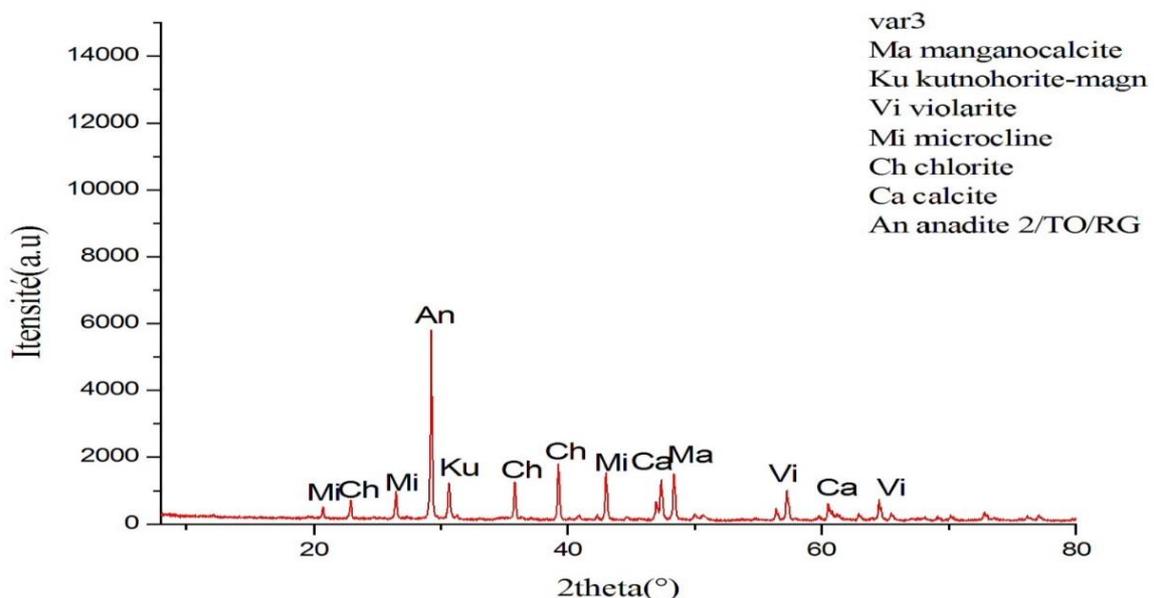


Figure III.12. Diffraction des rayons X du cru CPA.

Les compositions chimiques des minéraux composants le cru CPA présenté dans le **Tableau III.16**.

Tableau III.16 : composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 2).

Minéral	Formule chimique
Calcite	CaCO ₃
Manganocalcite	(Ca,Mn)CO ₃
violarite	Fe ²⁺ Ni ₂ ³⁺ S ₄
Microcline	KAlSi ₃ O ₈
Chlorite	(Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
Anadite 2/TO/GR	(Ba,K)(Fe ²⁺ ,Mg) ₃ ((Si,Al,Fe) ₄ O ₁₀)(S,OH) ₂
Kutanhorite-magnesian	CaMn ²⁺ (CO ₃) ₂

On conclut que le clinker préparé, par valorisation du déchet de marbre, en utilisant le logiciel de gestion de la qualité du ciment répond aux normes d'un clinker C.P.A, à savoir :

(1) Présence de quatre phases cristallisées normées et quantifiées par le logiciel de gestion de la qualité des ciments, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF ;

(2) $C_3S + C_2S > 66,66$, $MgO < 5\%$ et $CaO/SiO_2 > 3$.

III.3.2. Préparation de cru pétrolier

Pour la préparation du cru nécessaire pour la fabrication du cru pétrolier, nous avons opté pour deux variantes données par le logiciel de fabrication, l'une en utilisant le calcaire et l'autre en valorisant le marbre.

III.3.2.1. Préparation du cru pétrolier par matières premières ordinaires

L'exécution de logiciel de gestion de la qualité du ciment a donné plusieurs variantes pour les modules $LSF = 0,96$, $MS = 2,14$ et $A/F = 0,99 \pm 0,01$, on présente dans ce qui suit le schéma de mélange de l'une des variantes sélectionnées, **figure III.13**.

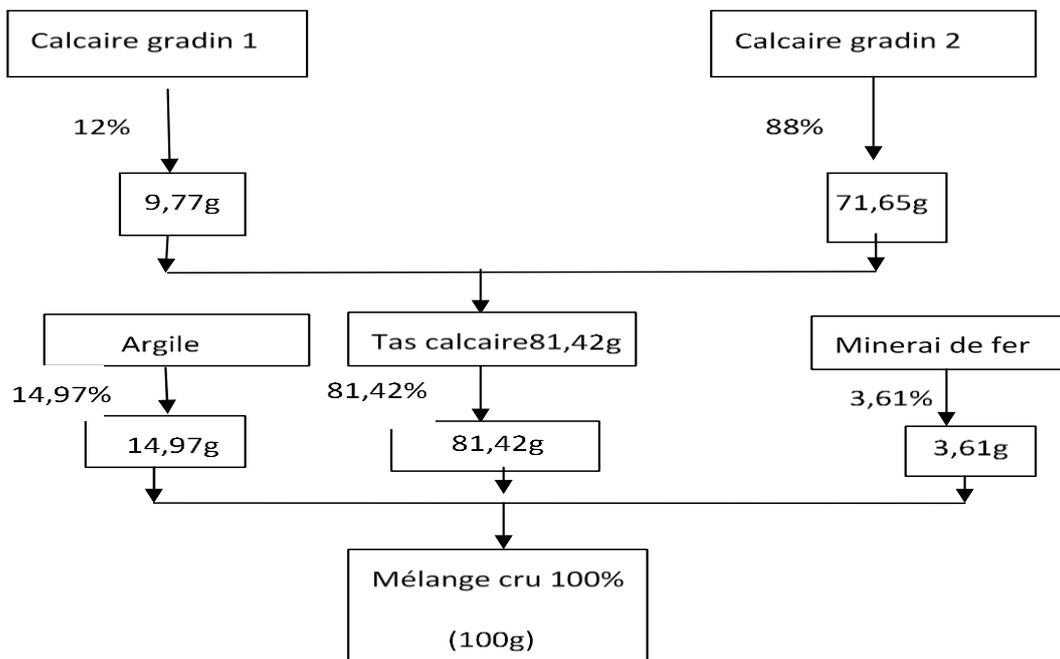


Figure III.13. Schéma de mélange des matières premières à ciment.

L'ensemble des paramètres et les compositions chimiques et minéralogiques de différentes matières, cru et clinker sont illustrés dans le **tableau III.17**.

Tableau III.17. Résultats théorique donnés par le logiciel.

Les proportions à mélanger (%)					
Calcaire		Argile		Minerai de fer	
81,42		14,97		3,41	
Proportion des déferents calcaires dans le mélange calcaire (%)					
Calcaire 1		Calcaire 2		Calcaire 3	
12		88		0	
Composition chimique de mélange calcaire (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PAF
5,07	1,55	0,56	50,80	3,81	37,40
Composition chimique du cru (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PAF
13,60	3,16	3,17	42,12	3,68	32,36
Composition chimique du mélange après calcination (%)					
SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	
20,11	4,68	4,68	62,27	5,44	
Estimation minéralogique du mélange après calcination (%)					
C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	Phase liquide	
62,51	10,53	0,53	4,48	30,00	

La confection du cru conformément aux données du logiciel, est réalisée de façon suivante : On prépare 100g de mélange cru, à partir des matériaux issus des dernières opérations de quartage (diamètre 100 μ m). Les matériaux sont ensuite quartés et broyés à un diamètre inférieur, jusqu'à la quantité désirée. Les quantités préparées **Figure III.14**, seront ainsi représentatives pour tous les matériaux.

Tableau III.18. Préparation du cru conformément aux résultats du logiciel.

Les quantités à mélanger (g)			
Calcaire	Argile	Minerai de fer	Total
81	14,97	3,61	100
Les masses des différents calcaires dans le mélange calcaire (g)			
Calcaire 1	Calcaire 2	Calcaire 4	Total
9,77	71,65	0	81,42

Le cru préparé est soigneusement homogénéisé puis réparti en deux portions de 100g pour la clinkérisation et 15g pour l'analyse chimique et minéralogique, **figure III.14**.

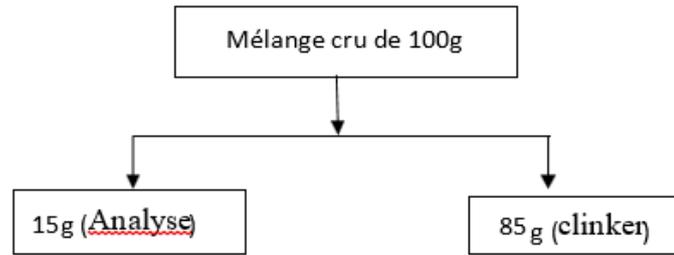


Figure III.14. Schéma de répartition du mélange préparé.

III.3.2.1.1. Caractérisation du cru pétrolier confectionné

Les analyses chimiques par XRF fluorescence des rayons X sont déterminées par le spectromètre ZETIUM, disponible au niveau de laboratoire de la cimenterie de Sidi Moussa. La répartition des teneurs chimiques des échantillons du tas calcaire et du cru pétrolier est présentée dans le **tableau III.19**.

Tableau III.20. Composition chimique du tas calcaire et de cru.

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Tas calcaire (%)	4,97	1,52	0,55	50,85	3,60	0,81	37,69	99,99
Cru (%)	13,36	3,09	2,94	41,87	3,73	0,54	33,30	99,43

Le calcul des modules LSF, MS, A/F, du cru pétrolier préparé, a donné les résultats présentés dans le **tableau III.21**.

Tableau III.21. Modules du cru.

Modules	LSF	MS	A/F
Valeurs	0,97	2,21	1,05

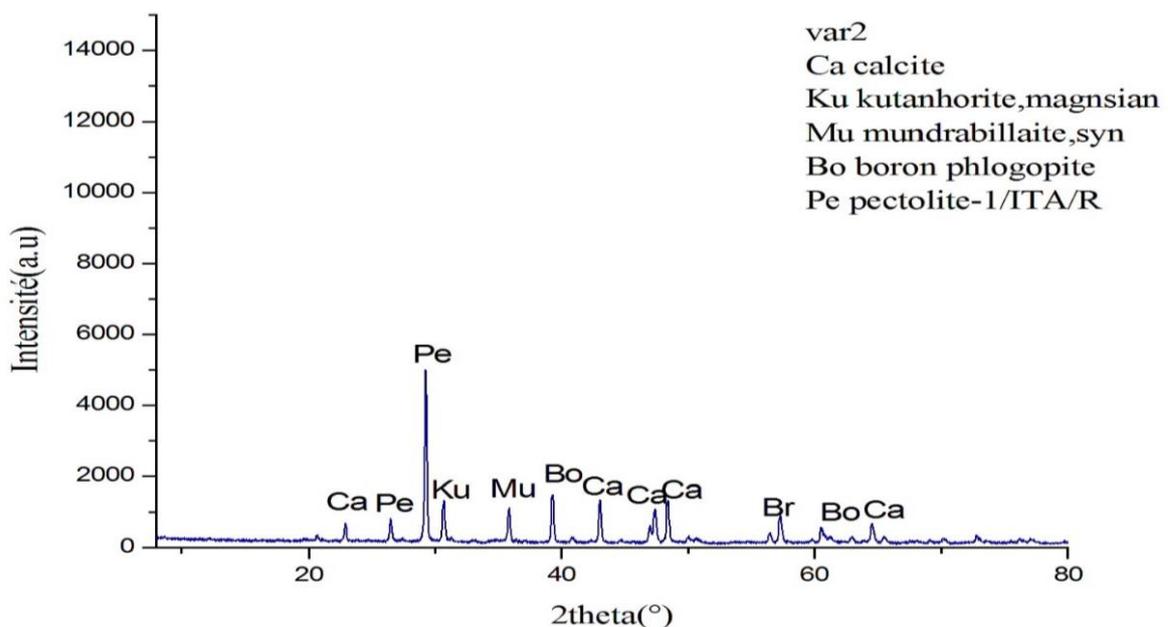
La comparaison chimique du cru et du tas calcaire préparés ainsi que les valeurs des modules **tableau III.22**, sont proches des valeurs théoriques prévues par le logiciel. La comparaison des résultats pratiques et théoriques est assez représentative il ressort l'intérêt accordé à la préparation des échantillons et leurs représentativités.

Tableau III.22. Comparaison de la composition chimique du cru, tas calcaire et modules.

Mélange cru (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	13,60	3,16	3,17	42,12	3,68	/	32,36	98,09
Pratique	13,36	3,09	2,94	41,87	3,73	0,54	33,3	99,43
Modules								
Résultats		LSF			MS		A/F	
Théorique		0,96			2,14		0,99	
Pratique		0,97			2,21		1,05	
Tas calcaire en (%)								
Résultats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	5,07	1,55	0,56	50,80	3,81	/	37,40	99,19
Pratique	4,97	1,52	0,55	50,85	3,60	0,81	37,69	99,99

III.3.2.1.2. Analyse minéralogique du cru par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X au niveau de laboratoire de sciences exactes de l'université A/MIRA-Bejaia, a montré la présence de cinq phases minéralogiques, du cru pétrolier à savoir : la pectolite-1/TTA/R (Pe) en majeure partie, la calcite (Ca), la kutanhorite-magnésienne (Ku), la mundrabillaite-syn (Mu), la boronphlogopite (Bo) en phases mineures comme le montre la **figure III.15**:

**Figure III.15.** Diffraction des rayons X du cru pétrolier de class G.

Les compositions chimiques des minéraux composants le cru pétrolier présenté dans le **Tableau III.23**.

Tableau III.23 : composition chimique des minéraux du cru pétrolier (Var 1).

Minéral	Formule chimique
Calcite	CaCO ₃
Kutanhorite-magnésien	CaMn ²⁺ (CO ₃) ₂
Boron phlogopite, syn	KMg ₃ BSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂
Pectolite-1/1TA/R	Ca ₂ Na
Mundrabillaite, syn	(NH ₄) ₂ Ca(HPO ₄).H ₂ O

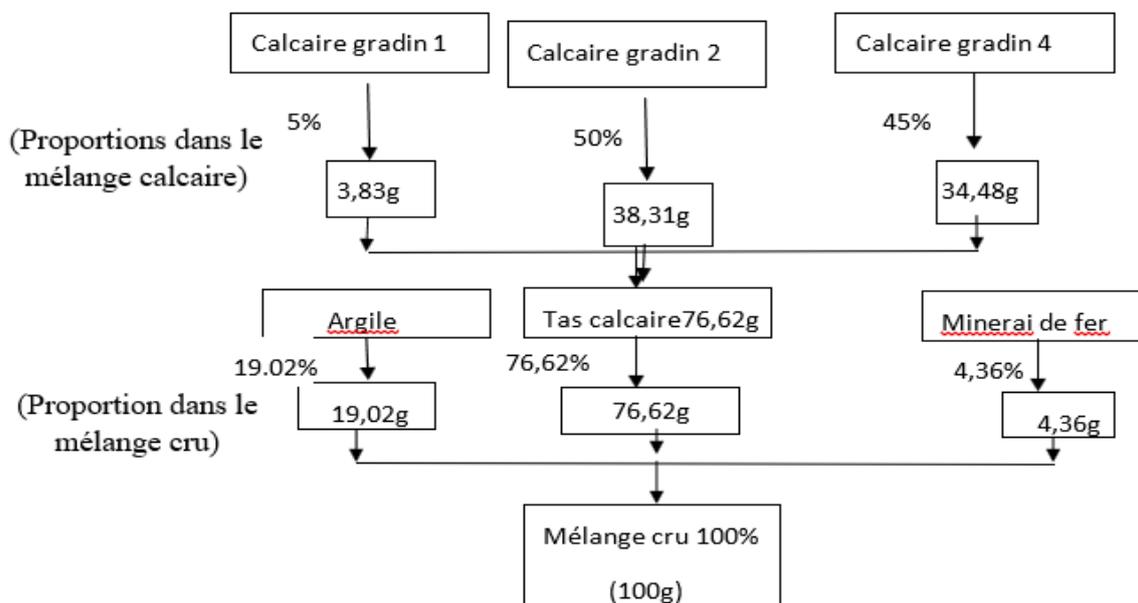
On conclut que le clinker préparé par le logiciel de gestion de la qualité du ciment répond aux normes d'un clinker Pétrolier de classe G, à savoir :

Présence de quatre phases cristallisées normées et quantifiées par le logiciel de gestion de la qualité des ciments ; C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF ;

Avec : C₃A < 3%, 48 < C₃S < 65, C₄AF + C₃A ≤ 24% et MgO < 6%.

III.3.2.2. Préparation du cru pétrolier en substituant le calcaire par le déchet de marbre.

Le cru nécessaire pour la fabrication du cru pétrolier, conformément aux résultats de la deuxième variante du logiciel, est obtenu selon le schéma de mélange donné en **figure III.16**.

**Figure III.16.** Schéma de mélange des matières premières à ciment.

L'exécution du logiciel a donné plusieurs variantes du mélange pour les modules LSF= 0,96, MS=2,02 et A/F= 1±0,13.

Les différents paramètres et les compositions chimiques et minéralogiques sont représentés dans le **tableau III.24**.

Tableau III.24. Résultats donnés par le logiciel.

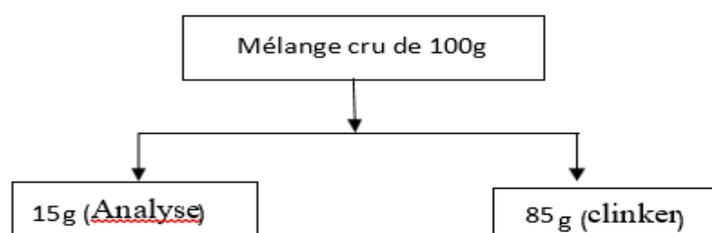
Les proportions à mélanger en (%)					
Calcaire	Marne pétrolier		Minerai de fer		
76,62	19,02		4,36		
Proportion des différents calcaires dans le mélange calcaire en (%)					
Calcaire gadin 1	Calcaire gradin 2	Calcaire gradin 3	Déchet de marbre		
5	50	0	45		
Composition chimique du mélange calcaire en (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
2,80	1,24	0,39	56,30	2,58	36,21
Composition chimique du cru en (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
14,14	3,37	3,63	44,08	2,70	30,13
Composition chimique du mélange après la calcination (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
22,25	4,02	6,00	65,26	1,53	00
Estimation minéralogique du mélange après la calcination (%)					
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Phase liquide	
63,21	10,37	3,98	15,81	30,00	

La préparation du cru pétrolier par substitution du calcaire à l'aide de déchet de marbre en se basant sur les résultats donnés par le logiciel est réalisée de la même manière que celle du cru préparé par matière ordinaires. Les masses utilisées pour préparer un cru pétrolier de 100g sont portées dans le **tableau III.25**.

Tableau III.25. Préparation du cru pétrolier par valorisation de déchet de marbre.

Les quantités à mélanger (g)			
Calcaire	Marne pétrolier	Minerai de fer	Total
76,62	19,02	4,36	100
Les masses des différents calcaires dans le tas (g)			
Cal Gradin 1	Cal Gradin 2	Déchet de marbre	Total
3,83	38,31	34,48	100

Le cru préparé est soigneusement homogénéisé puis réparti en deux portions de 100g pour la clinkérisation et 15g pour l'analyse chimique et minéralogique, **Figure III.17**.

**Figure III.17.** Schéma de répartition du mélange préparé.

III.3.2.2.1. Composition chimique et minéralogique du cru pétrolier

L'analyse chimique du mélange calcaire et du cru préparé, a été effectuée au niveau du laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Sidi Moussa à l'aide d'un spectre de fluorescence des rayons X de type ZETUIM. Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau III.26**.

Tableau III.26. Composition chimique du tas calcaire et du cru.

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Tas calcaire (%)	2,76	1,18	0,32	56,19	2,51	0,82	36,14	99,92
Cru (%)	14,17	3,34	3,57	44,02	2,71	0,55	30,17	98,53

On remarque que la composition chimique du mélange calcaire analysé est très proche de la composition donnée par logiciel. En ce qui concerne le cru, on remarque que les résultats des compositions chimiques coïncident à un degré très important. Le calcul des modules LSF, MS et A/F du cru préparé, a donné les résultats présentés dans le **tableau III.27**.

Tableau III.27. Modules du cru pétrolier.

Modules	LSF	MS	A/F
Valeurs	0,95	2,05	0,93

La composition chimique du cru préparé ainsi que les valeurs des modules **tableau III.28**, sont proches des valeurs théoriques prévues par le logiciel. La comparaison des résultats pratiques de la formation du cru avec les prévisions du logiciel est significative (comparable).

Tableau III.28 : Comparaison des résultats théoriques et pratiques.

Mélange cru (%)								
Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	14,14	3,37	3,63	44,08	2,70	//	30,13	98,04
Pratique	14,17	3,34	3,57	44,02	2,71	0,55	30,17	98,53
Modules								
	LSF		MS		A/F			
Théorique	0,96		2,02		0,92			
Pratique	0,95		2,05		0,93			
Tas calcaire (%)								
Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PAF	Total
Théorique	2,80	1,24	0,39	56,30	2,58	//	36,21	99,52
Pratique	2 ;76	1,18	0,32	56,19	2,51	0,82	36,14	99,92

III.3.2.2.2. Analyse minéralogique du cru par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X de la deuxième variante a montré la présence de quatre phases minéralogiques, du cru pétrolier à savoir : la garrelite (Ga) en majeure, la calcite (Ca), la kutnohorite-magn (Ku), la colusite (Co), la westerveldite (We), la boron phlogopite (Bp), la yedinite (Ye) en phases mineures comme le montre la **figure III.18** :

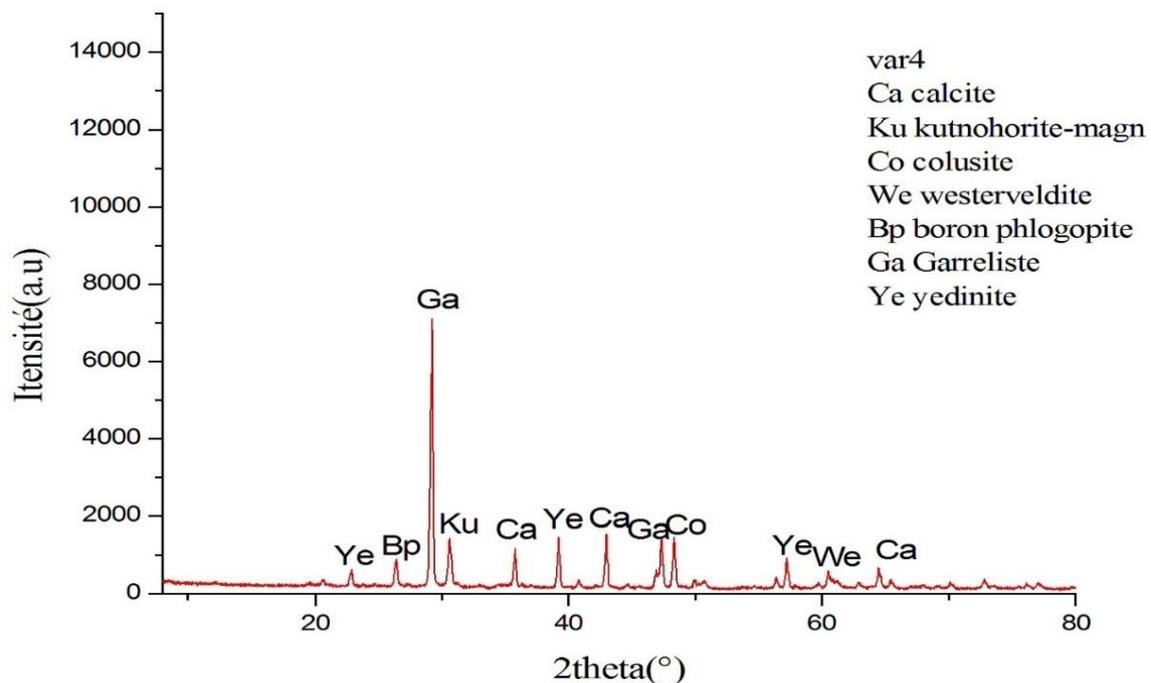


Figure III.18: Diffraction des rayons X du cru pétrolier de class G.

Les compositions chimiques des minéraux composants le cru pétrolier sont présentés dans le **Tableau III.29**.

Tableau III.29 : composition chimique des minéraux du cru CPA (Var 2).

Minéral	Composition chimique
Calcite	CaCO_3
Kutanhorite-magnesian	$\text{CaMn}^{2+}(\text{CO}_3)_2$
Boron phlogopite, Syn	$\text{KMg}_3\text{BSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Colusite	$\text{Cu}_{12-13}\text{V}(\text{As},\text{Sb},\text{Sn},\text{Ge})_3\text{S}_{16}$
westerveldite	$(\text{Fe},\text{Ni},\text{Co})\text{As}$
Garrelite	$\text{NaBa}_3\text{Si}_2\text{B}_7\text{O}_{16}(\text{OH})_4$
yedinite	$\text{Pb}_6\text{CrC}_{16}(\text{O}, \text{OH})_8$

On conclut que le clinker préparé par le logiciel de gestion de la qualité du ciment répond aux normes d'un clinker Pétrolier de classe G, à savoir :

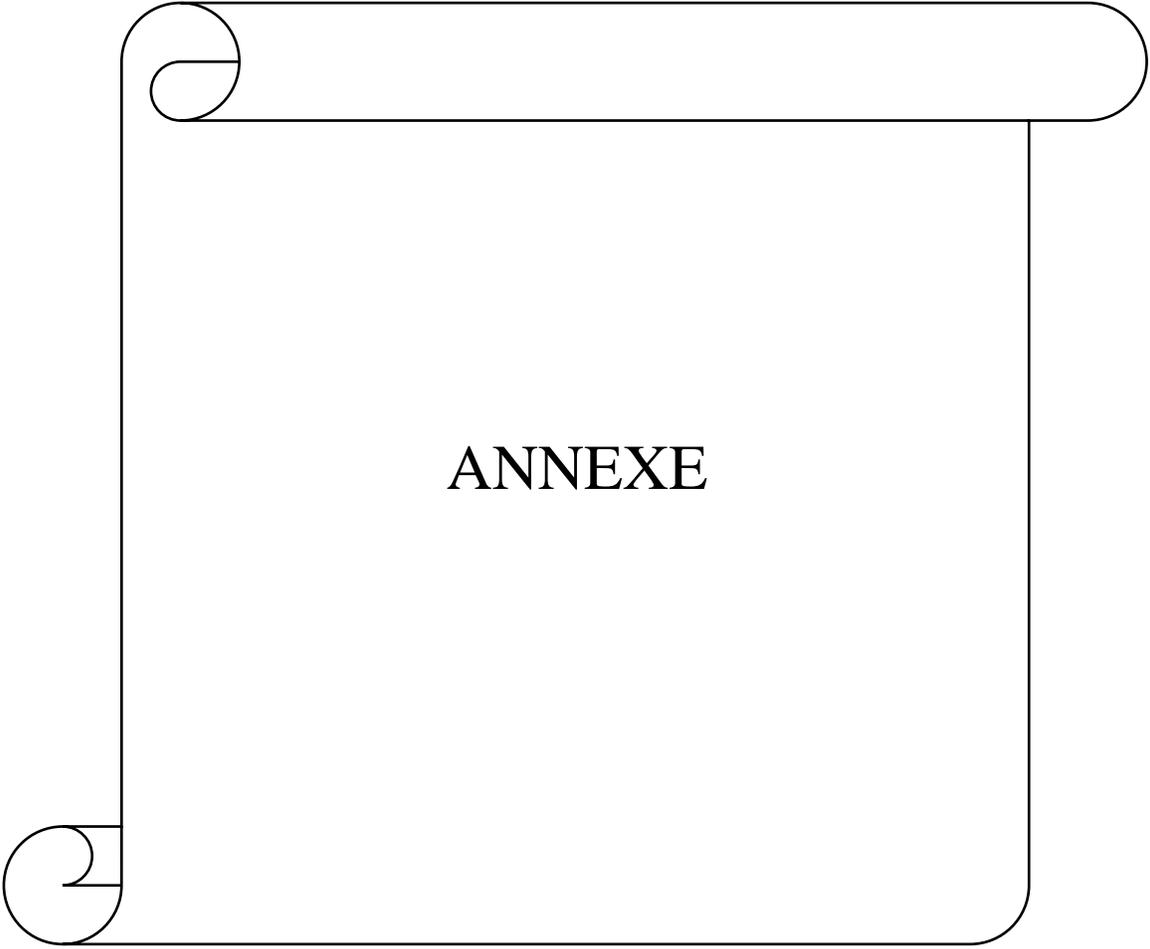
Présence de quatre phases cristallisées normées et quantifiées par le logiciel de gestion de la qualité des ciments ; C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF ;

Avec : $C_3A < 3\%$, $48 < C_3S < 65$, $C_4AF + C_3A \leq 24\%$ et $MgO < 6\%$.

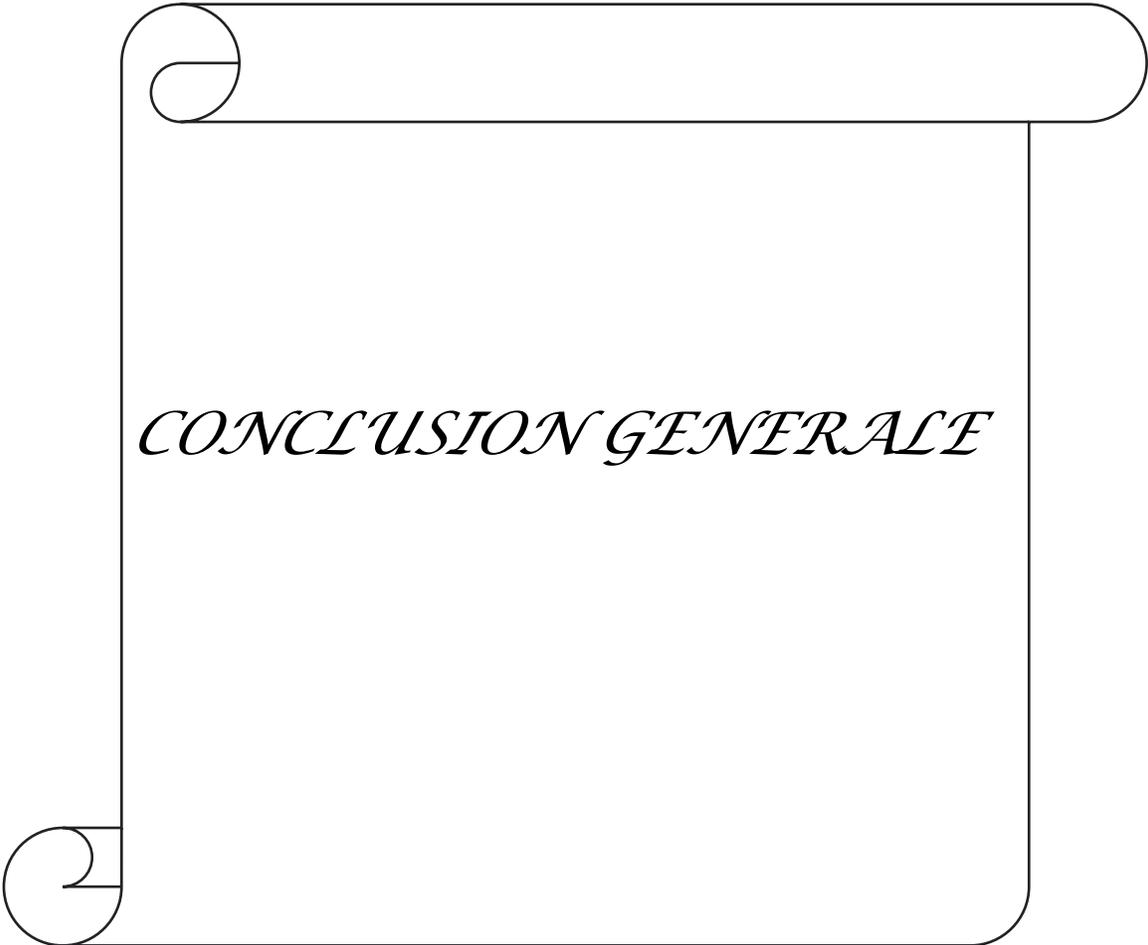
Conclusion

D'après les résultats donnés par l'analyse de fluorescence X(FX) et par diffraction des rayons X(DRX) sur le cru, et par comparaison de ces résultats avec ceux donnés par le logiciel d'homogénéisation et fabrication de ciment.

On conclut que le cru préparé répond aux normes d'un ciment CPA pour les deux premières variantes et au ciment pétrolier classe G pour les deux variantes dernières.



ANNEXE



CONCLUSION GENERALE

Conclusion général

Le ciment est un matériau fondamental dans la construction et la reconstruction et développement l'infrastructure de n'importe quel pays dans le monde, ou est considéré comme un produit important en donnant un saut économique est important de pays producteurs.

En ce que concerne notre pays Algérie dans le domaine du ciment est considéré de plus grand pays producteurs de ciment dans le monde, ou elle dispose de 17 cimenterie publiques et privées d'une capacité de production globale de près de 19.5 MT/ an alors que la demande est de 24.5MT annuellement soit un déficit de 5MT qui est contenté par les importations. En ce que concerne notre travail nous avons essayé d'étudier un type de types du ciment utilisées en Algérie et ce type est appelé ciment pétrolier ce que on a remarqué de manque ce type en Algérie, malgré la présence des entreprises pétrolières et gazières ont besoin de ce type du ciment.

Ce travail était réalisé pour le but ultime de combler nos importations de ciment pétrolier et notre objectif était de réaliser une production de cette matière à partir des composants disponibles au niveau de la cimenterie de sidi moussa –Adrar savoir le calcaire, la marne et le minerai de fer, et notre travail était selon les étapes suivantes :

- Les matières premières ont été extraites de différentes couches et ont subi une série de traitement en vue d'assurer une meilleure représentativité des échantillons ;
- Préparation mécanique de la matière première (concassage, broyage, tamisage, Homogénéisation, quartage) ;
- Les analyses chimiques réalisées ont montré que la composition chimique des matières premières utilisées par la cimenterie sidi moussa hétérogène (différent d'un cru à l'autre) et Le calcaire a une teneur de CaO pouvant atteindre 50%. ;
- Préparation des mélanges (crus) a travers les compositions chimique des matières première par logiciel de gestion de la qualité du ciment ;
- Composition minéralogique par rayon x pour détermination de la nature des phases minérales et à Leur quantification ;
- Détermination les différents indices de qualité des matières premières montre que ces derniers à savoir : L.S.F, M.S, et A/F sont variables ;

Le clinker pétrolier est donc composé de trois phases principales dont l'alite ou C3S (=48-65%), la bélite ou C2S (= 15-30%), l'aluminate tricalcique ou C3A (max 3%) et (C4AF + 2(C3A)) (max 24%), l'étude bibliographique a montré que chacune de ces phase présentait de

nombreuses variétés polymorphiques complexes en fonction de cycle thermique, mais aussi selon la nature et la teneur des impuretés (apportées par les matières premières ou ajoutés dans le processus industriel jouant un rôle de stabilisateur de phase. Ainsi l'ensemble des réactions physico-chimique entrant dans la production du clinker explique la formidable complexité de ce matériau anhydre mais aussi celle de son hydratation.

Dans ce travail nous avons réussi à préparer du cru de fabrication du ciment pétrolier au niveau de la cimenterie sidi moussa –Adrar.

PERSPECTIVES

Notre ambition était de réaliser un travail intégré, mais nous nous sommes opposés des certains problèmes et des obstacles, mais malgré cela nous avons essayé de donner la vraie image à ce que on a aspiré à lui, où nos aspirations visaient à présenter une assistance aux cimenteries existantes en Algérie dans la préparation du ciment pétrolier pour la cimentation des puis de forage au niveau des entreprises gazières et pétrolières.

Nous savons que tous les entreprises gazières et pétrolières sont situées dans le sud de l'Algérie. Ces entreprises nécessite une qualité spécial du ciment qu'on appelle ciment pétrolier classe G(CRS) pour réaliser ses travailles (cimentation des puits de pétrole et de gaze).

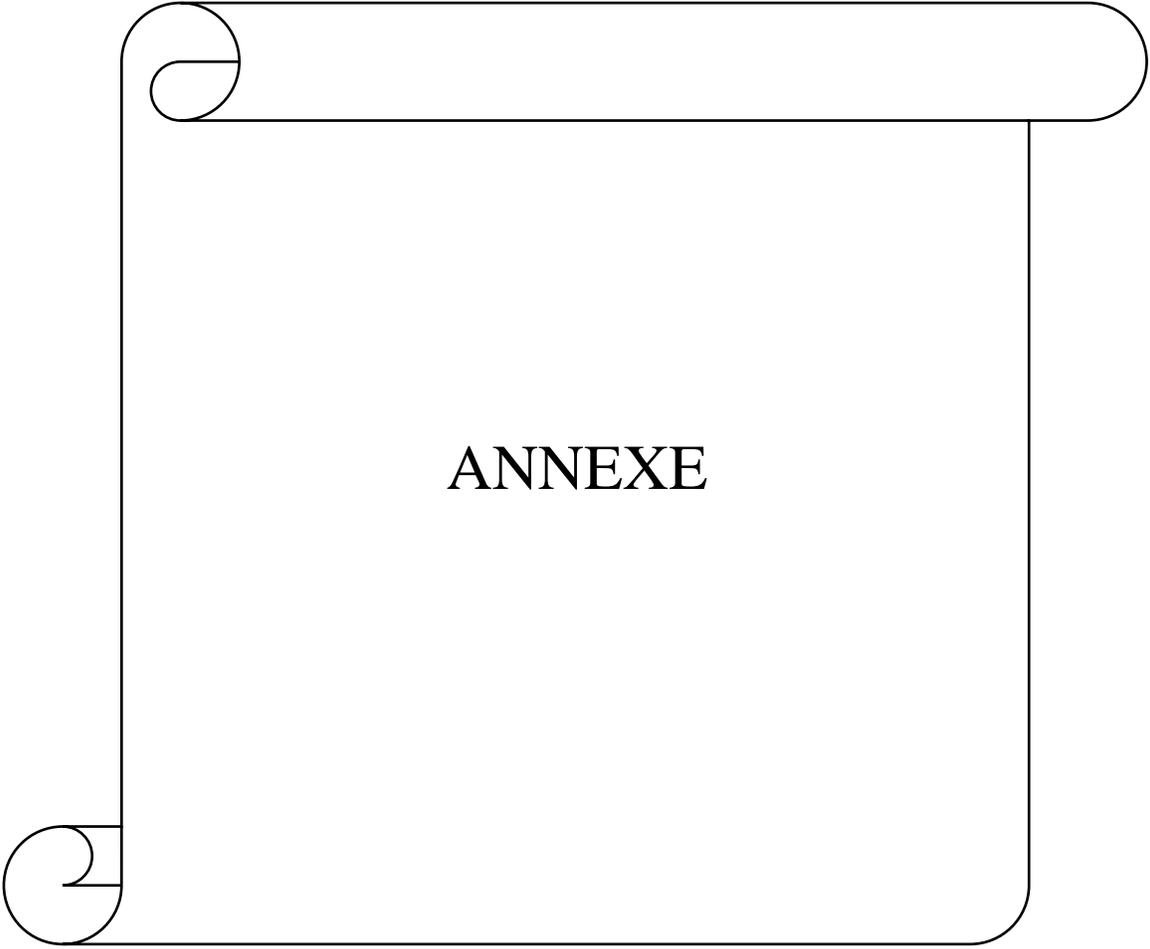
Notre choix de cimenterie sidi moussa Adrar pour réaliser ce travail était pour réduit la pression aux autres cimenteries, éviter l'importation et limite la coûte de transport de cette matière (ciment pétrolier), car la cimenterie sidi moussa est plus proche des entreprises gazières et pétrolières et être le seul au niveau le grand sud.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. ADAM, « Guide pratique pour l'emploi des ciments », édition Eyrolles 1985.
- [2] Taylor, H. F. W. The chemistry of cements. Academic press Inc. Ltd., London. (1964).
- [3] K. MOUSSACEB, « Optimisation du système de gestion de l'homogénéisation du cru et du processus technologique de fabrication de ciment, Application le système carrière usine de fabrication, Application aux cimenteries Algériennes », thèse doctorat en génie des procédés, Université de Bejaia 2007.
- [4] HAMRIOUI MOHAMED et FSEIL SIDALI, « Effet de la CemCRETE sur les propriétés physicomécaniques et rhéologiques d'un laitier de ciment destiné à la cimentation des puits pétroliers », Mémoire de fin d'étude, Université de Boumerdes 2016.
- [5] Dr HADJ SADOK.A, cours Le ciment Portland, édition 2011.
- [6] BOUZIANI TAYEB, « CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DES CIMENTS ALLEGES A BASE DE MATERIAUX LOCAUX, EN VUE DE LEUR UTILISATION DANS LA CIMENTATION DES PUIITS DE PETROLE DANS LES ZONES SALIFERES », 2001-2002, P. 3-5.
- [7] CECORAMA, cour de cimenterie, théorie et technologie, édition Edward Cecorama, liège, Belgique, p.22-54, 1994.
- [8] H. KUHL, Chimie du ciment, Edition Vetlag Technik, Berlin, Allemagne, p.12, 1952.
- [9] Y. BERTON and P. LE BERRE, Guide de prospection des matériaux de carrières, Collection annuels et méthodes N°5, édition BRGM et OPU, p.87-94, Alger, 1990.
- [10] S.A. MAGNESITA, Aide-mémoire, Division d'assistance technique, Barcelone, p. 1-2, Espagne, 1993.
- [11] S. BEY, cimenterie de Hama Bouziane, Manuel sur la technologie du ciment, 2001.
- [12] O. LABAHN, Le guide de l'ingénieur en cimenterie, Edition Eyrolles, p. 1-16, France, 1964.
- [13] M. PAPADAKS and VENUI, Fabrication et utilisation des liants hydraulique Eyrolles, p. 22, France, 1966.
- [14] L.S. VIVIERS. Matières premières pour cimenterie, Edition ciment Lafarge diffusion, Le tiel, p.13-17, France, Janvier 1972.
- [15] BENHADDA, Mohammed Amine « La durabilité du mortier à base de ciment de Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et NH₄OH », Mémoire, Université Abou-Bakr Belkaïd, 2011/2012, P.2-13.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [16] CHRISTOPHER CHARRON, « L'industrie du ciment ; Données générales. Ecole thématique « matériaux cimentaires », 21 au 24 septembre 2008, Holcim, P.17-69. P.7-8.
- [17] ELODIE ROMILLIAT, « Étude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker », Génie de procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet de Saint-Etienne. N° d'ordre : 396GP, France, 20janvier 2006, P.3-8.
- [18] M. KHLEF, fichier technique de la société des ciments de sidi moussa, 2017.
- [19] SABI Mohammed, Mémoire « CONTROLE DE FIABILITE DES DOSEURS D'AJOUTS », 2011.
- [20] GUENNOUCHE NOURA, « Préparation à la fabrication d'un ciment pétrolier classe G à partir des matériaux disponibles au niveau de la cimenterie de Ain El Kebira », 2016-2017.
- [21] [geniecivil.univ-tlse3.fr/L3GC/enseigne/cours ciment et béton](http://geniecivil.univ-tlse3.fr/L3GC/enseigne/cours%20ciment%20et%20béton) [Mode de Compatibilité]
- [22] Livre du forage et cimentation de SONATRACH.
- [23] LAFARGE, S.A, «API well cement class “G” type HSR», cement produced according to standard, API SPEC 10 A, Oficinas Centrales: C/ Orense, 70 - 28020 Madrid 1997.
- [24] TAKLA Issam, Comportement Thermo-Hydro-Hécanique d'un ciment petolrier sous l'effet du CO₂.
- [25] M. YOUNS, rapport technique de l'entreprise, la société des ciments de Sidi Moussa ,2017.
- [26] K. MOSSACEB, cours valorisation et gestion des rejets minières, 2017.
- [27] ALGEREIE PRESSE SERVICE. [WWW.aps.dz/economie /68087-ciment](http://WWW.aps.dz/economie/68087-ciment) .



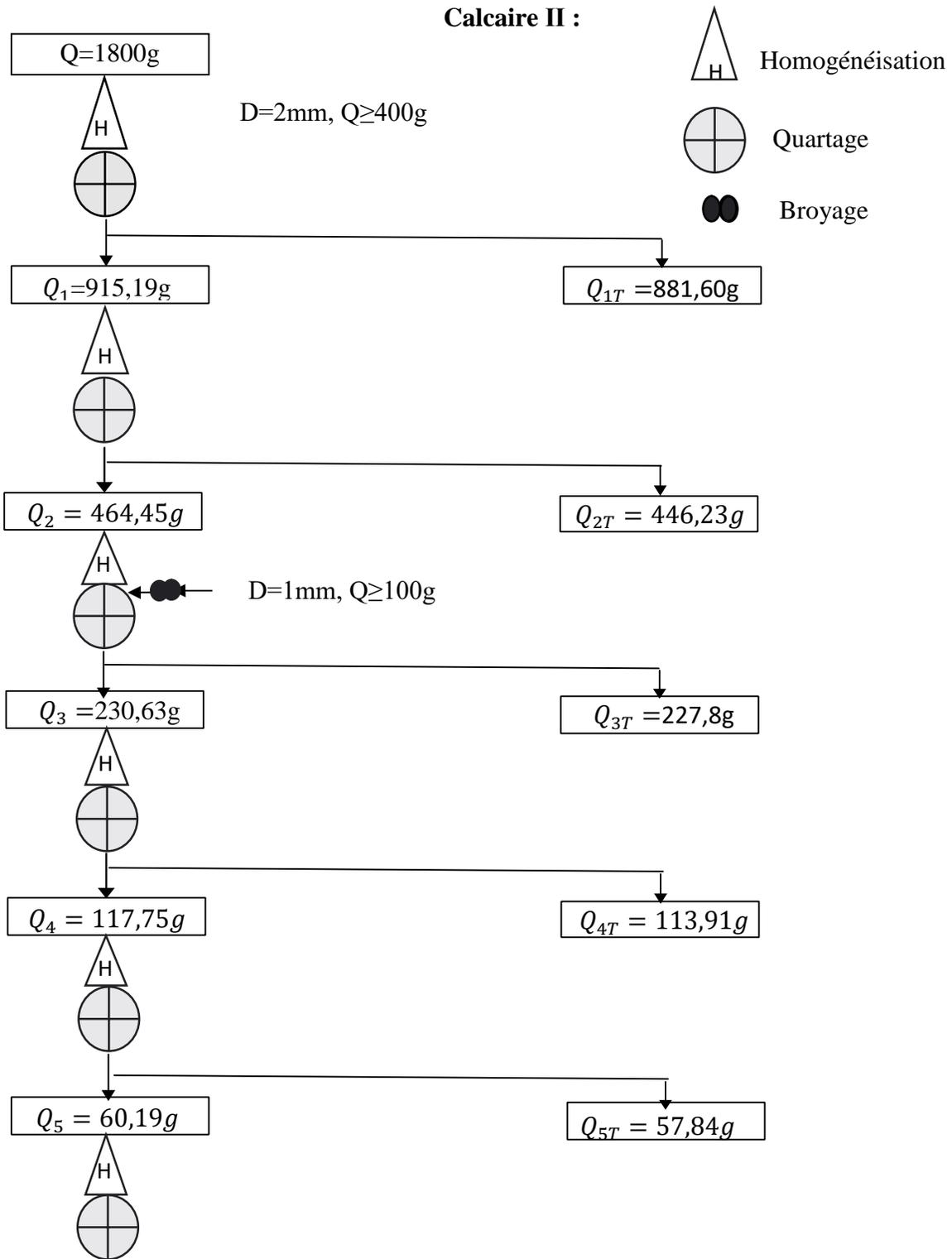
ANNEXE



CHAPITRE I
CHIMIE DU CIMENT

Les figures suivantes présentent les traitements mécaniques des matières premières.

Calcaire II :



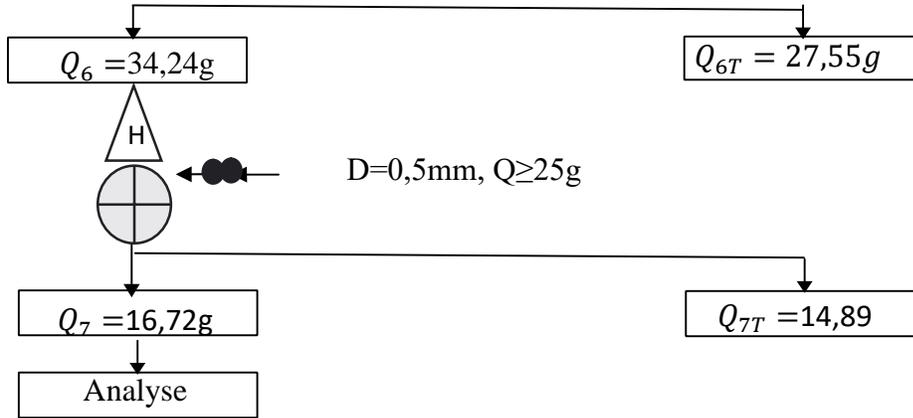
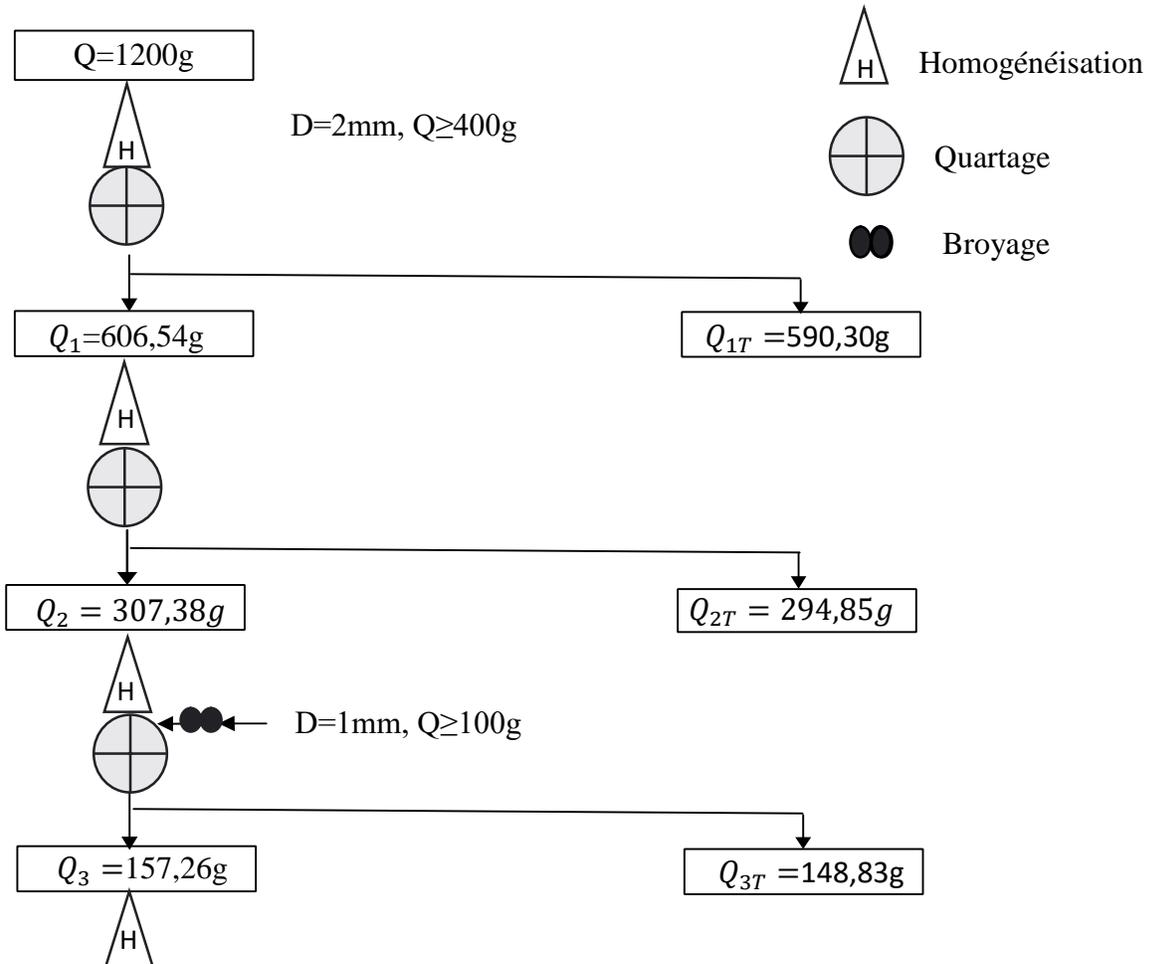


Figure 1 : Diagramme de quartage pour l'échantillon calcaire II

Déchets de marbre :



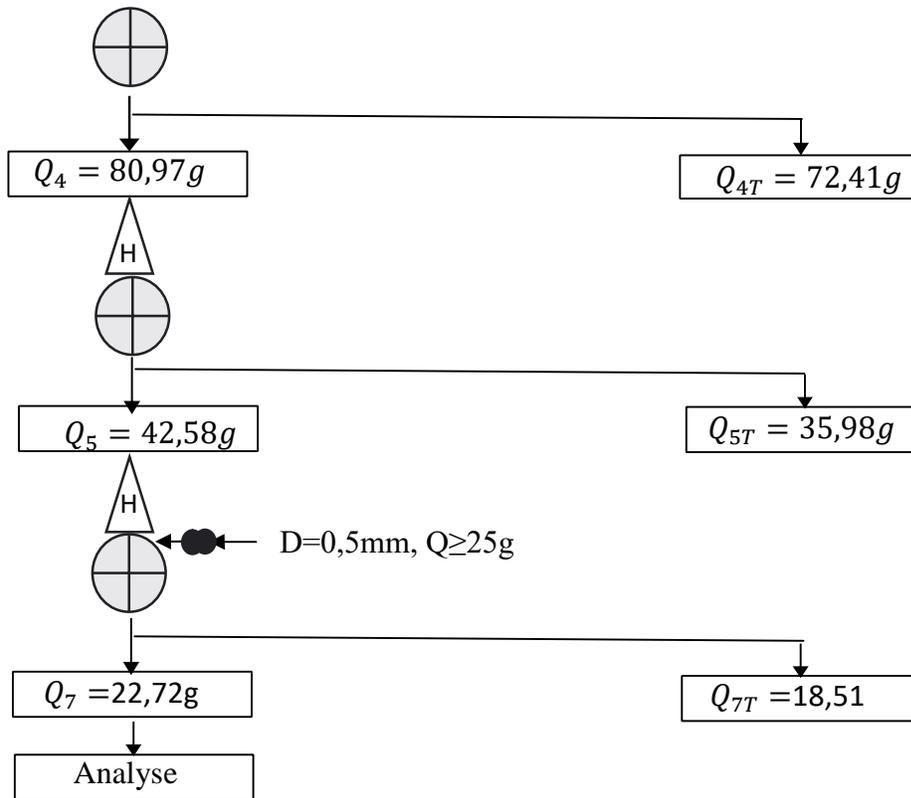
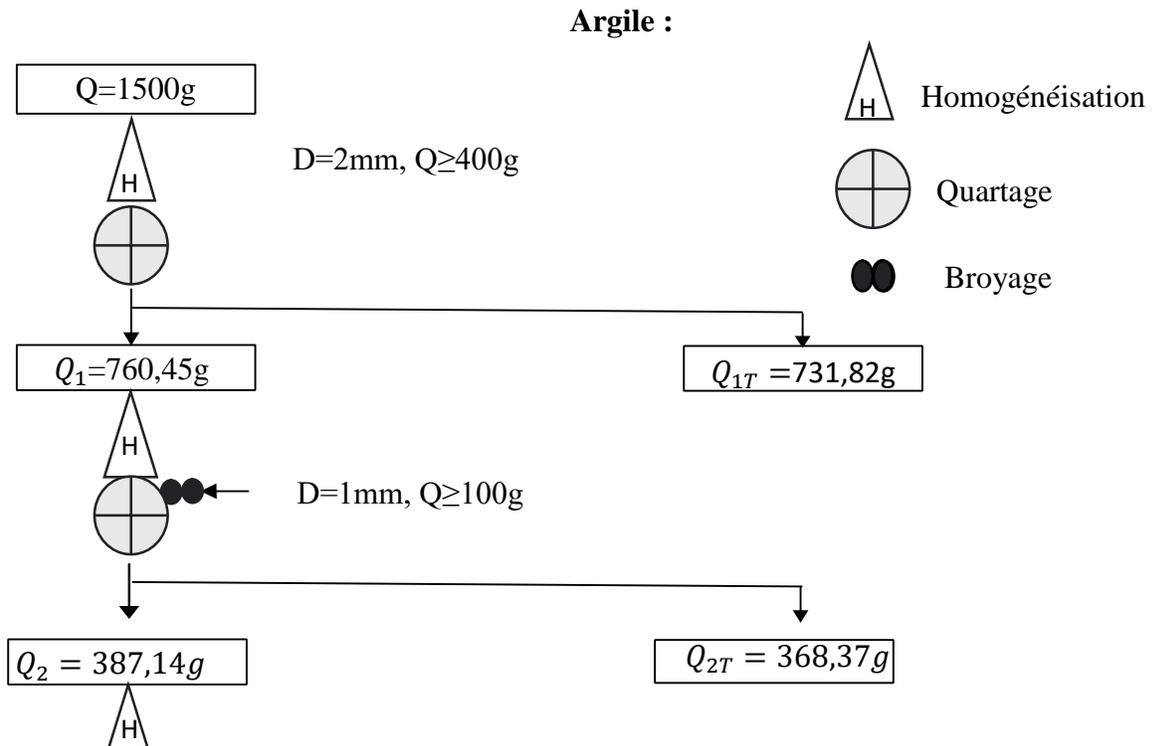


Figure 2 : Diagramme de quartage pour l'échantillon Déchets de marbre



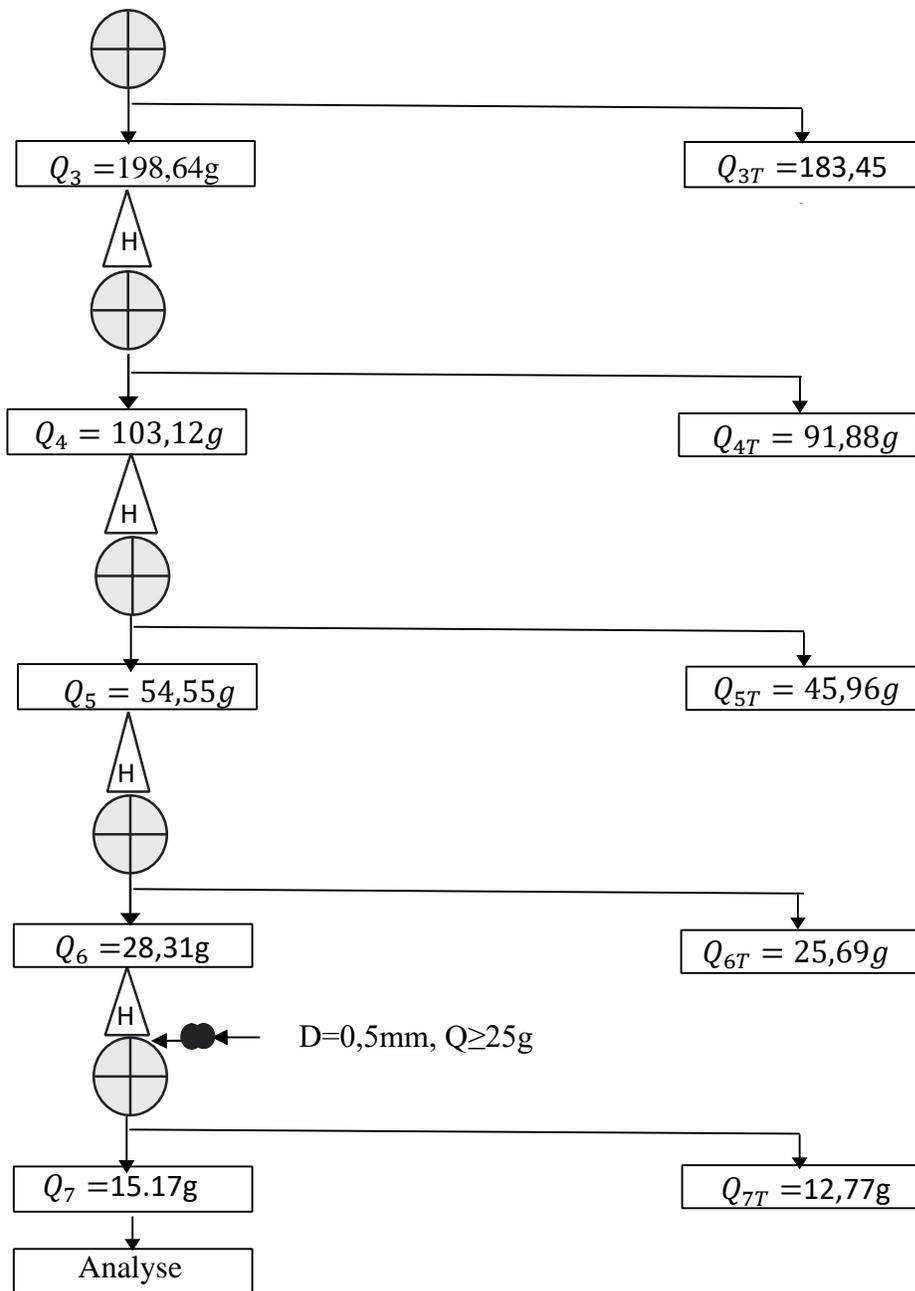
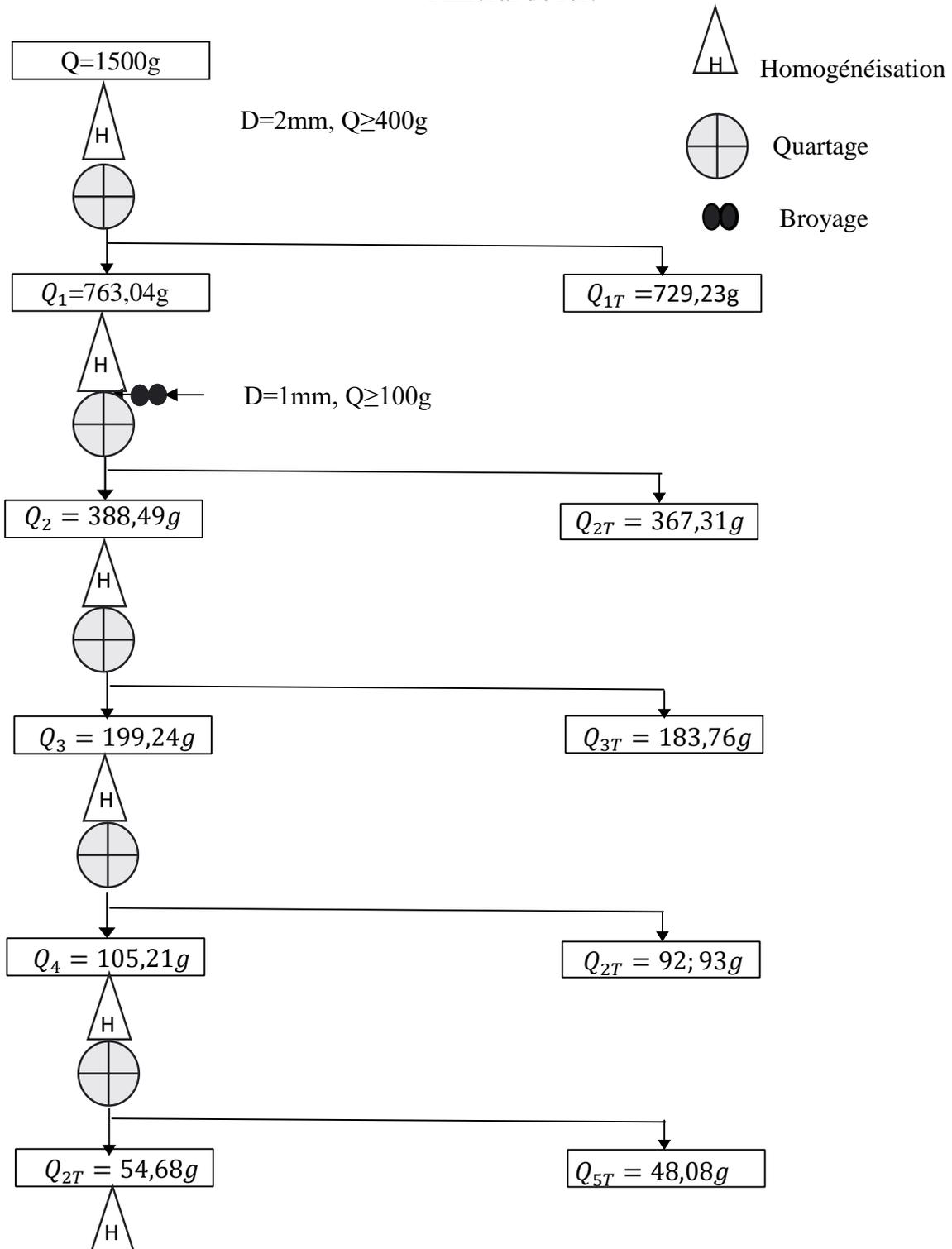


Figure 3: Diagramme de quartage pour l'échantillon Argile

Minerai de fer.



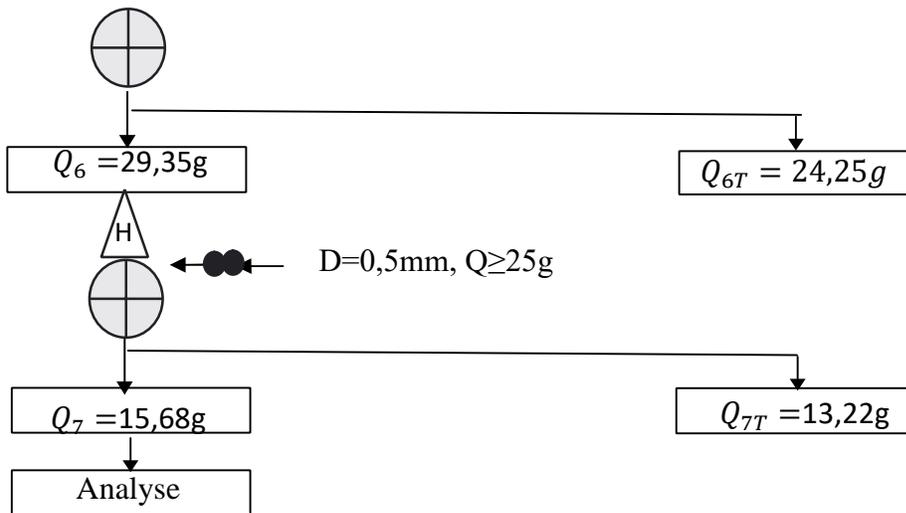


Figure 4 : Diagramme de quartage pour l'échantillon Minéral de fer

Les figures suivantes présentent les diagrammes de diffraction des Rayons X (DRX) des matières calcaire 1, calcaire 2, argile et le minéral de fer successivement :

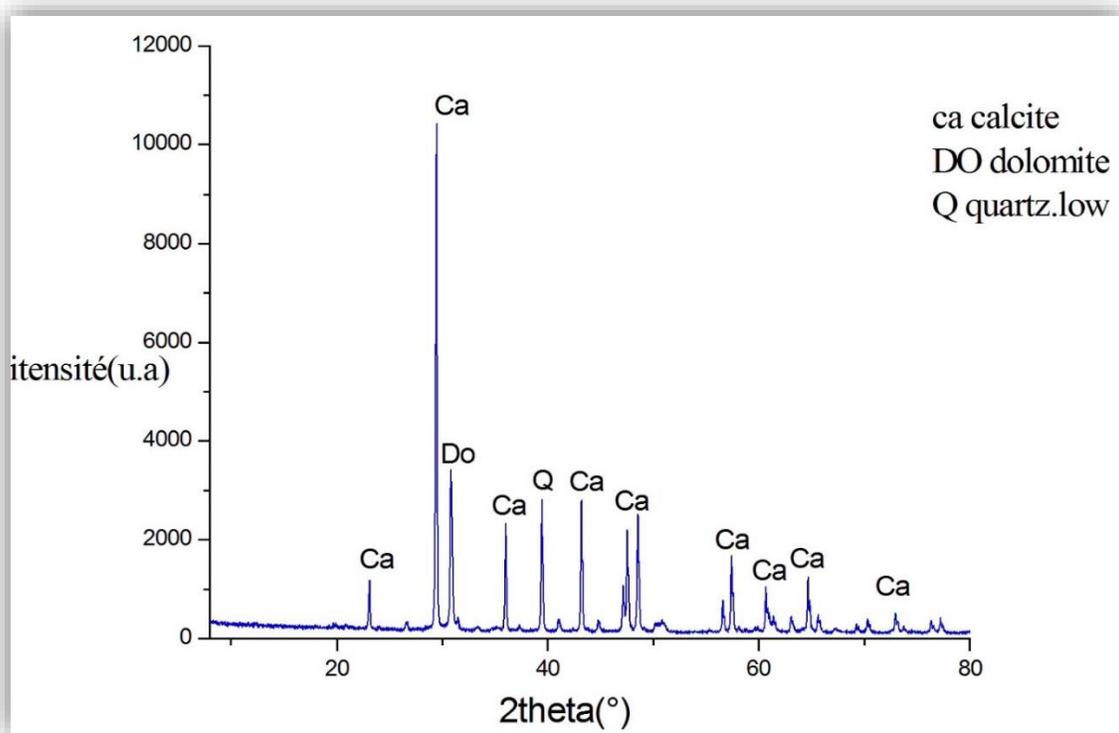


Figure 5 : Diffractogram des rayons X du calcaire I.

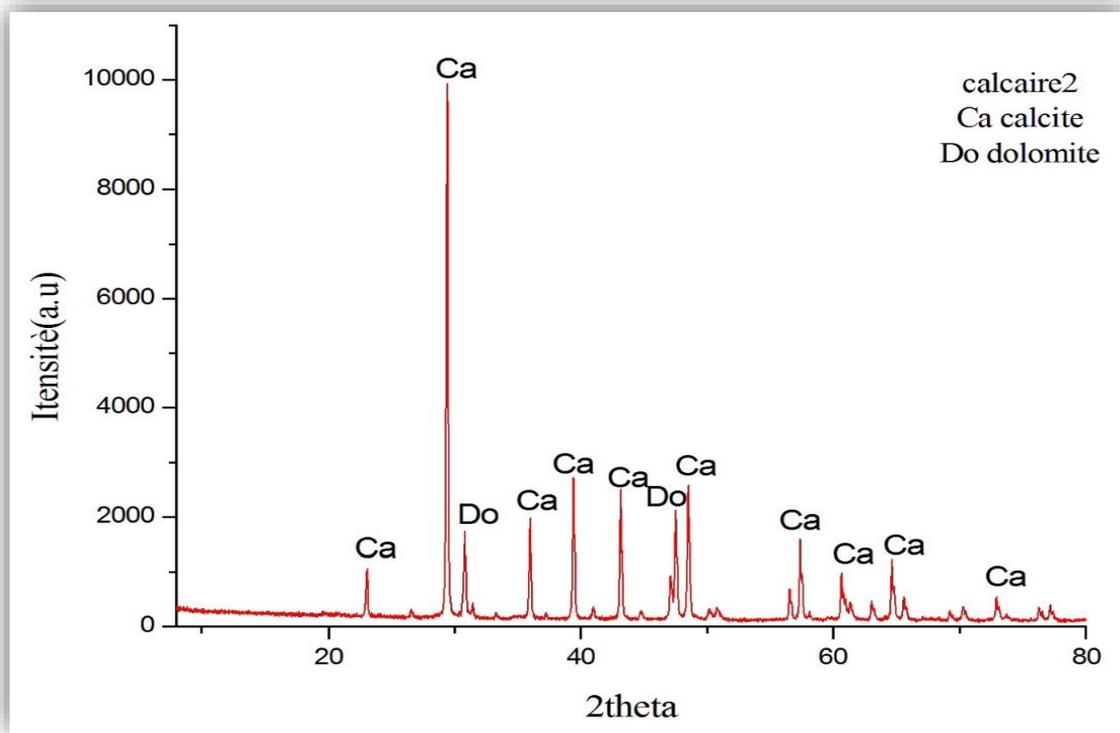


Figure 6 : Diffractogram des rayons X du calcaire 2.

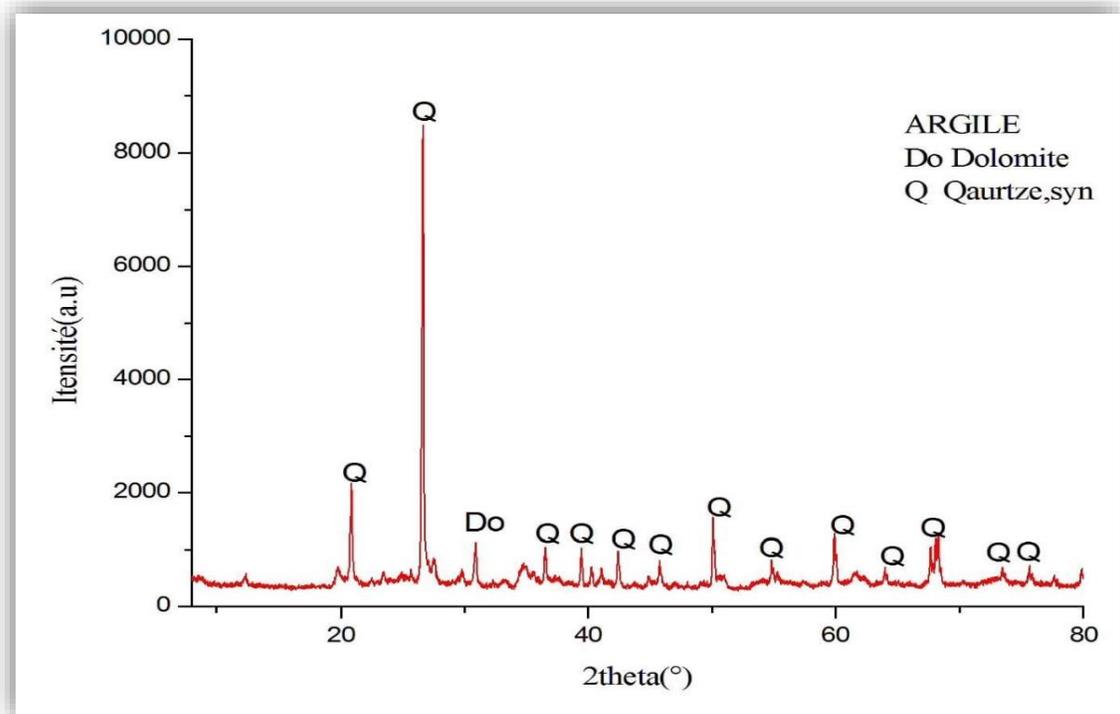


Figure 7 : Diffractogram des rayons X d'argile.

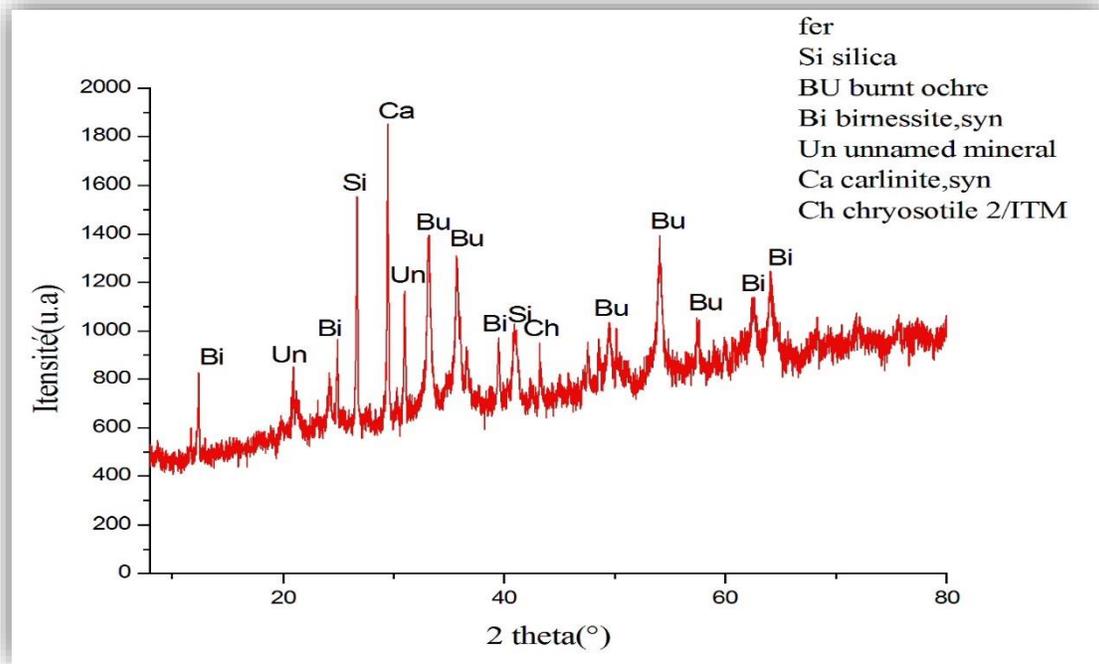
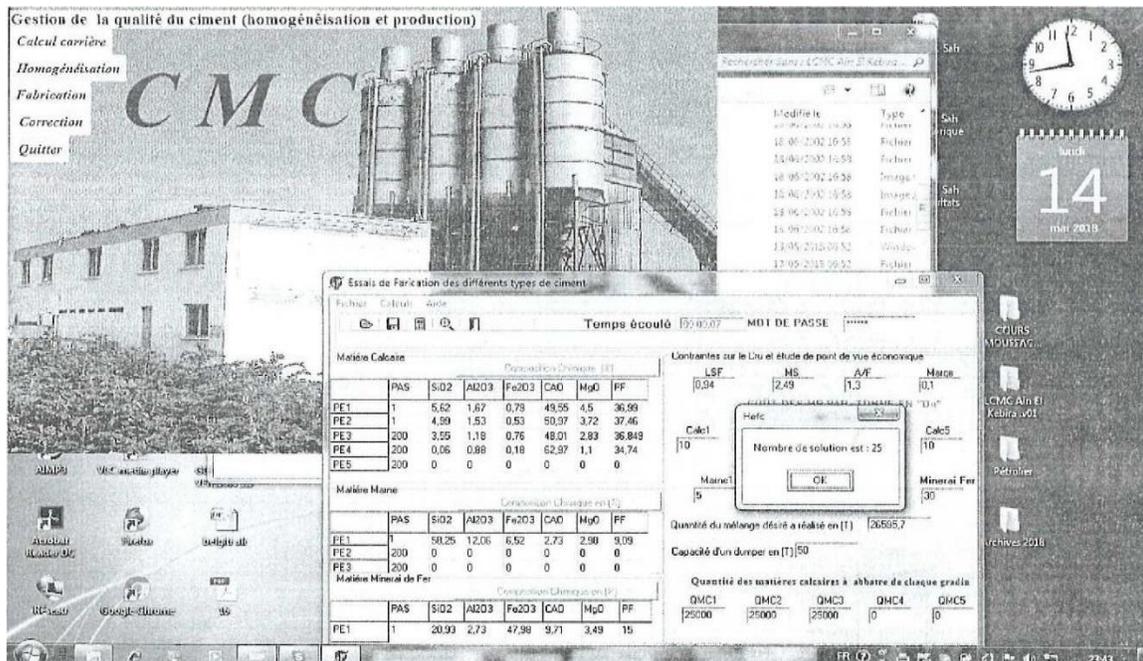


Figure 8 : Diffractogram des rayons X du minerai de fer

ETAPES SUIVIES POUR SIMULATION SUR LE LOGICIEL DE GESTION DE QUALITES DESCIMENTS POUR OBTENIR DES SOLUTIONS DE FABRICATION DE CRUE.

VAR 01 : CPA



ANNEXE

Prévisualisation d'impression

Variante N°: 21
Type de ciment : Ciment Portland CPA

Les proportions à mélanger en (%)

Matière Première Calcaire					Matière Première Marne			Minerai de Fer
Calc1	Calc2	Calc3	Calc4	Calc5	Marne1	Marne2	Marne3	Fer
20	80	0	0	0	100	0	0	100

Proportions en différents tas en (%):

Calcaire	Marne	Minerai de Fer	Total en %
81,94	16,36	1,70	100,00

Compositions chimiques en (%)

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Pf	Tx
Tas Calcaire	5,12	1,56	0,58	50,69	3,88	37,37	
Tas Marne	58,25	12,06	6,52	2,73	2,98	9,09	
Mélange	14,08	3,30	2,36	42,15	3,72	32,36	97,96
Clinker	20,81	4,87	3,49	62,31	5,50	0,00	96,98

Page 21 sur 25

Prévisualisation d'impression

Contraintes Technologiques calculées

Contraintes Technologiques sur le Cru en %		Contraintes Technologiques sur le Four en %	
1: Module Aluminoférique:	1,3982	1: Phase liquide	27,96
2: Module Hydraulique	2,14	2: Le coefficient de stabilité de croutage:	27,82
3: Al2O3 + Fe2O3.	5,65	3: Indice d'aptitude à la cuisson:	3,28
4: CaO	42,15	4: Résistance à la cuisson:	102,39
		5: Température de cuisson:	1401,05

Les différentes normes calculées en (%):

C3S+C2S:	CaO/SiO2:	MgO:
73,89	2,99	5,50

Minéralogie du Clinker en %

C3S	C2S	C3A	C4AF
57,73	16,16	7,02	10,61

Quantité à utiliser dans le cru en (T):

Calcaire	Marne	Minerai de Fer
21793,74	4350,88	451,08

Quantité à extraire de chaque point en (T):

Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Minerai FER
4358,75	17434,99	0,00	0,00	0,00	4350,88	0,00	0,00	451,08

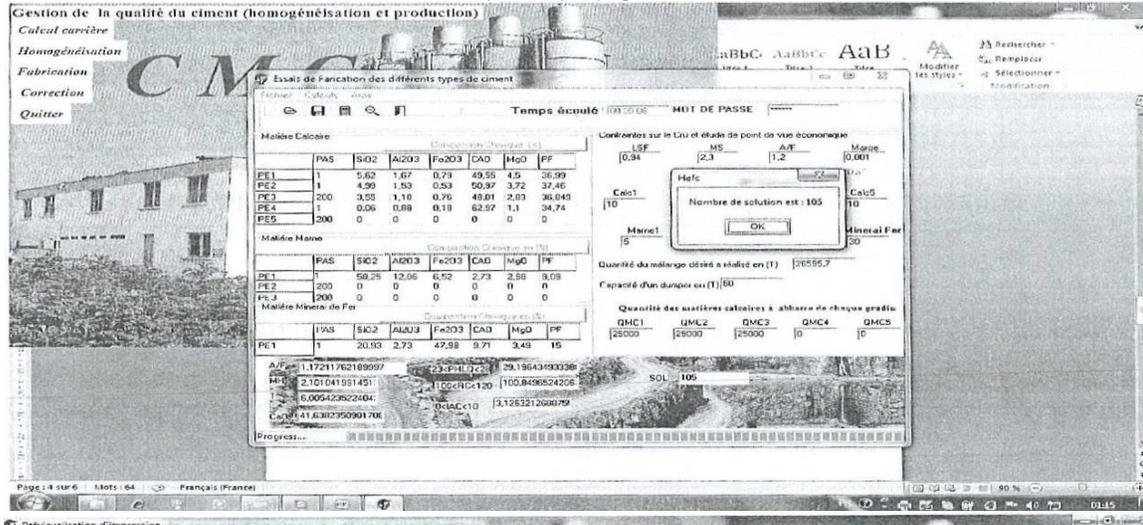
Nombre de dumper à utiliser de chaque point :

Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Minerai FER
87,17	348,70	0,00	0,00	0,00	87,02	0,00	0,00	9,02

Page 21 sur 25

Figure 1 : Processus de simulation par logiciel pour la variante 1 (CPA).

VAR 02 : CPA



Variante N°: 103
 Type de ciment : Ciment Portland CPA

Les proportions à mélanger en (%)

Matière Première Calcaire					Matière Première Marne			Minéral de Fer
Calc1	Calc2	Calc3	Calc4	Calc5	Marne1	Marne2	Marne3	Fer
80	0	0	20	0	100	0	0	100

Proportions en différents tas en (%):

Calcaire	Marne	Minéral de Fer	Total en %
80,40	17,23	2,37	100,00

Compositions chimiques en (%)

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Pf	Tx
Tas Calcaire	4,51	1,51	0,67	52,23	3,82	36,54	
Tas Marne	58,25	12,06	6,52	2,73	2,98	9,09	
Mélange	14,16	8,36	2,80	42,70	8,67	31,30	97,98
Clinker	20,61	4,89	4,07	62,15	5,34	0,00	97,05

Contraintes Technologiques calculées

Contraintes Technologiques sur le Cru en %		Contraintes Technologiques sur le Four en %	
1: Module Aluminométrique:	1,2007	1: Phase liquide	20,16
2: Module Hydraulique	2,10	2: Le coefficient de stabilité de croutage:	29,72
3: Al2O3 + Fe2O3:	6,16	3: indice d'aptitude à la cuisson:	3,13
4: CaO	42,70	4: Résistance à la cuisson:	100,99
		5: Température de cuisson:	1381,84

Les différentes normes calculées en (%):

C3S+C2S:	CaO/SiO2:	MgO:
73,29	3,02	5,34

Minéralogie du Clinker en %

C3S	C2S	C3A	C4AF
57,68	15,61	6,07	12,39

Quantité à utiliser dans le cru en (T):

Calcaire	Marne	Minéral de Fer
21882,95	4582,81	629,94

Quantité à extraire de chaque point en (T):

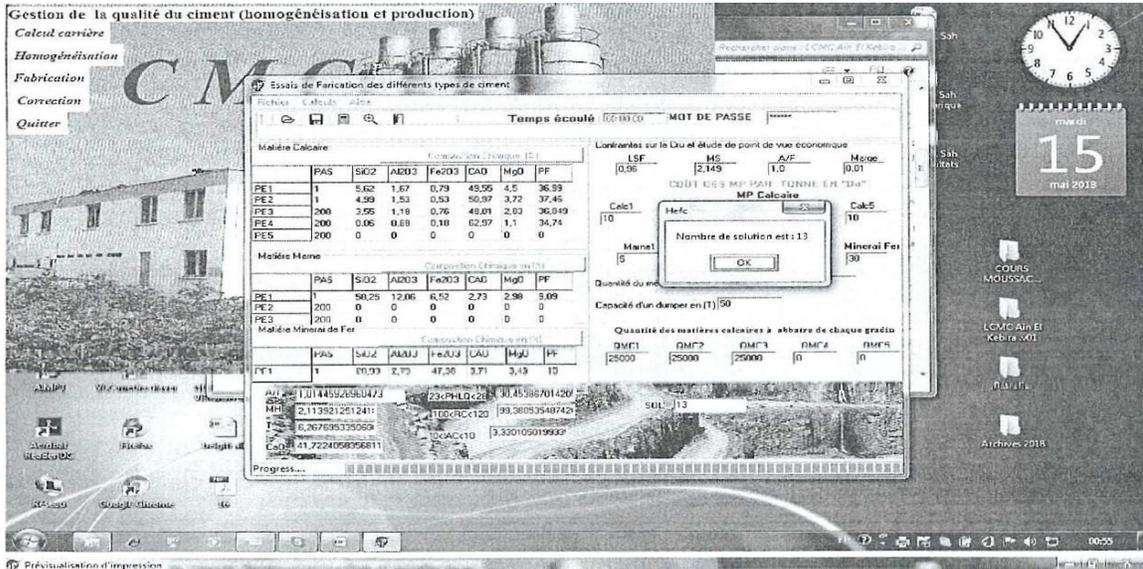
Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Minéral FER
17106,36	0,00	0,00	4276,59	0,00	4582,81	0,00	0,00	629,94

Nombre de dumper à utiliser de chaque point :

Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Minéral FER
242,12	0,00	0,00	85,52	0,00	91,66	0,00	0,00	12,60

Figure 2 : Processus de simulation par logiciel pour la variante 2 (CPA).

VAR 01 : PETROLIER.



Variante N°: 13
Type de ciment : Ciment pétrolier de classe G

Les proportions à mélanger en (%)

Matière Première Calcaire					Matière Première Marne			Mineral de Fer
Calc1	Calc2	Calc3	Calc4	Calc5	Marne1	Marne2	Marne3	Fer
12	88	0	0	0	100	0	0	100

Proportions en différents tas en (%):

Calcaire	Marne	Mineral de Fer	Total en %
81,42	14,97	3,61	100,00

Compositions chimiques en (%)

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Pf	Tx
Tas Calcaire	5,07	1,55	0,56	50,90	3,81	37,40	
Tas Marne	58,25	12,06	6,52	2,73	2,98	9,09	
Mélange	13,60	3,16	3,17	42,12	3,68	32,36	98,08
Clinker	20,11	4,68	4,68	62,27	5,44	0,00	97,16

Contraintes Technologiques calculées

Contraintes Technologiques sur le Cru en %		Contraintes Technologiques sur le Four en %	
1: Module Aluminoférrique:	0,9994	1: Phase liquide	30,00

Page 13 sur 13

Contraintes Technologiques calculées

Contraintes Technologiques sur le Cru en %		Contraintes Technologiques sur le Four en %	
1: Module Aluminoférrique:	0,9994	1: Phase liquide	30,00
2: Module Hydraulique	2,11	2: Le coefficient de stabilité de croutage:	30,18
3: Al2O3 + Fe2O3:	6,33	3: Indice d'aptitude à la cuisson:	3,34
4: CaO	42,12	4: Résistance à la cuisson:	101,18
		5: Température de cuisson:	1386,18

Les différentes normes calculées en (%):

C3S:	C3A:	2* C3A+C4AF:	Minéralogie du Clinker en %			
C3S	C2S	C3A	C4AF			
82,51	4,48	23,19	82,51	10,53	4,48	14,24

Quantité à utiliser dans le cru en (T):

Calcaire	Marne	Mineral de Fer
21653,49	3661,91	960,30

Quantité à extraire de chaque point en (T):

Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Mineral FER
2598,42	19065,07	0,00	0,00	0,00	3981,91	0,00	0,00	960,30

Nombre de dumper à utiliser de chaque point .

Calcaire1	Calcaire2	Calcaire3	Calcaire4	Calcaire5	Marne1	Marne2	Marne3	Mineral FER
51,97	381,10	0,00	0,00	0,00	79,64	0,00	0,00	19,21

Page 13 sur 13

Figure 3 : Processus de simulation par logiciel pour la variante 1 (pétrolier).

Résumé

Ce travail était pour essais de préparation de cru-clinker CPA et pétrolier et valoriser le déchet de marbre dans le clinker au niveau de la cimenterie sidi moussa Adrar ,où nous avons adopté dans ce travail sur les matières premières utilisées (calcaire, argile, fer,) au niveau de la cimenterie, nous les avons étudiées et on les a analysés pour savoir leurs structures et leurs caractéristiques chimiques pour la vérification de ces matières premières sont-ils valable pour atteindre à notre objectif ou pas et pour savoir ça nous sommes passés par les étapes suivants :

- ✚ La première étape préparation des matières premières nécessaire pour la production du ciment (calcaire, argile, fer) par : Concassage, Broyage, Tamisage, Homogénéisation et Quartage.
- ✚ À l'aide d'un logiciel de gestion de la qualité du ciment (carrière- usine), on a déterminé les proportions nécessaires de chaque matière pour la préparation du mélange cru ;
- ✚ Détermination de la composition chimique et les phases minéralogiques pour chaque matière par fluorescence des rayons X (FX) et DRX ;
- ✚ Analyse des résultats obtenus et sa discussion.

Cette étude réalisée à l'échelle laboratoire a montré qu'il y a possibilité de fabriquer un ciment pétrolier class G (M.S.R) répondant aux normes à partir des matières premières disponibles au niveau de la cimenterie de Sidi Moussa.

Mots clé : Ciment pétrolier, clinker, cru et calcination, Indice de qualité

Abstract

This work for the preparation of trails CPA, oil and valorize marble waste in the clinker at the sidi moussa-ADRAR cement plant where we adopted in this work on the raw materials used (limestone, clay, iron) at the cement plant, we have stated them and analyzed them to know their structure and their chemicals characteristics for the verification of these raw material, if are they valid to reach our goal or not and to know that we went through the following steps coming next :

- ✚ The first stage is the preparation of the raw materials necessary for the production of the cement (limestone, clay, iron) using: Crashing, Grinding, Sifting, homogenization and quating;
- ✚ With help of cement quality management software(quarry-plant), we get the necessary proportions of each material for the preparation of the raw;
- ✚ Determination of the chemical composition and mineralogical phases for each material by X-rays fluorescence(FX) and DRX analyzes;
- ✚ Analyses of the results obtained and discussion.

This laboratory-scale study has showed that it's possible to manufacture a class G(MSR) oil cement meets the standers from the raw materials available at the sidi moussa cement plant

Key word: clinker, raw, marble waste, calcination and a hetract quality index.