



Année Universitaire : 2016-2017

**Master Sciences et Techniques GMP
Génie des Matériaux et des Procédés**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Rationalisation de l'exploitation de la carrière de calcaire
et optimisation de la qualité du cru**

Présenté par:

AADNAN Imane

Encadré par:

- AYADI Abdelaziz de LH Fès
- ZEROUALE Abdelaziz de FST Fès

Soutenu Le 16 Juin 2017 devant le jury composé de:

- Pr. SQALLI HOUSSAINI Ouafae
- Pr. EL GHAZOUALI Ahmed
- Pr. ZEROUALE Abdelaziz

Stage effectué à : LafargeHolcim Fès





2016/2017

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: AADNAN Imane

Titre: orientation de l'exploitation de la carrière calcaire et optimisation de la qualité du cru

Résumé

La qualité du ciment dépend des matières premières utilisées, principalement le calcaire. Ce dernier donne après décarbonatation la chaux qui est un élément majeur dans la composition chimique du ciment.

Le but de la cimenterie est d'obtenir un mélange appelé cru ou « farine » sous forme de poudre très fine (de diamètre inférieur à 200 micromètre) possédant une composition chimique fixe.

La composition chimique reste habituellement dans les proportions suivantes :

Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83%

Silice (SiO_2) : de 13 à 14%

Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4%

Oxyde de fer (Fe_2O_3) : de 1.5 à 3% (ce sont ces oxydes qui donne au ciment portland sa couleur grise).

Afin de garantir ces proportions fixes, on a fait une simulation à l'aide de deux logiciels (QM et le QSO) dans le but de déterminer la composition chimique du calcaire dans les trois gradins pour avoir un cru obéissant aux normes de la cimenterie.

Mots clés: calcaire, chaux, cru, QM, QSO, simulation, composition chimique





Remerciements

« Il faut toujours remercier l'arbre à karité sous lequel on a ramassé de bons fruits pendant la bonne saison. »

[Ahmadou Kourouma].

Ce n'est pas parce que la tradition l'exige ou par habitude que cette page est présente dans ce mémoire, mais parce que les personnes auxquelles s'adressent mes remerciements les méritent sincèrement. L'arbre dont parle l'écrivain ivoirien Ahmadou KOUROUMA, représente pour moi tous ceux qui, par leurs conseils et leurs encouragements, ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et la réussite de ce travail.

Après nos louanges à Dieu, je tiens à remercier chaleureusement les managers de **LafargeHolcim** pour leur savoir-être, leur savoir et leur savoir-faire.

Mes vifs remerciements vont aussi à mon encadrant de l'université Pr. Abdelaziz ZEROUALE, pour sa disponibilité, son soutien et toute l'aide considérable qu'il m'a fourni.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi aux membres du jury Pr. SQALLI HOUSSAINI Ouafae et Pr. EL GHAZOUALI Ahmed d'avoir accepté de juger mon travail, ainsi qu'au corps administratif et professoral de la faculté des sciences et techniques (FSTF), particulièrement les enseignants du département de Génie de matériaux et de procédés.

M. Abdelaziz AYADI, responsable du service laboratoire et mon manager qui m'a accompagné le long de ce projet avec beaucoup de patience et professionnalisme et qui m'a aidé à orienter judicieusement mon travail avec ses connaissances et sa formidable capacité d'analyse et d'orientation.

Ma profonde gratitude s'adresse également à M. Abdellah MHAMDI pour sa collaboration, sa disponibilité et sa directive toujours constructives. Merci également à toute l'équipe de service laboratoire, pour leurs conseils durant toute la période de stage.

Finalement, que toute personne ayant participé à l'élaboration de ce travail trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Imane AADNAN

Table des matières

<i>Remerciements</i>	ii
Liste des figures :	v
Liste des tableaux :	v
Glossaire	vi
Introduction Générale.....	1
ORGANISATION DU MEMOIRE	2
Chapitre I :.....	3
Présentation de la société et procédé de fabrication.....	3
I Présentation et historique de HOLCIM MAROC (avant la fusion).	4
I-1 Présentation de HOLCIM MAROC.	4
I-2 Historique de HOLCIM MAROC.	5
II- Présentation générale de LafargeHolcim usine REM de FES.	8
II-1 Fiche technique de l'entreprise :	8
II-2 Organigramme de la société.	9
Généralités.....	11
III- Ciment et son procédé de fabrication	12
Chapitre II :	28
Analyses chimiques et physiques.....	28
I- Type d'analyse	29
I-1- Les analyses physiques	29
I-2 Détermination de la composition chimique	32
I-3- Essais mécaniques : Résistance à la flexion et à la compression	34
Chapitre III :	36
Partie expérimentale.....	36
I- Introduction	37
II- Moyens d'exploitation de la carrière REM	37
II-1 Exploitation avec explosif	38
II-1-1- Procédure de Tir	38
II-1-2- Foration	40
II-1-3- Choix de l'explosif	42
II-1-4- Nuisances liées au tir	42
II-2- Exploitation sans explosif	43
II-3- Choix du site d'implantation de l'usine	43
II-3-1-Exploitation à long terme	44
II-3-2-Exploitation à court terme	46



II-3-3- Résultats	49
II-3-4- Interprétations des résultats	50
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	52

Liste des figures :

Figure 1 : organigramme de LafargeHolcim Maroc.....	9
Figure 2 : divers procédé de fabrication du ciment.....	13
Figure 3 : vue globale procédé de l'extraction jusqu'à expédition	14
Figure 4 : principe du concasseur a doublé rotor.....	16
Figure 5 : schéma explicatif montrant le pré homo, le broyage du cru et le dépoussiérage.....	17
Figure 6 : l'analyse a tapis croisées (PGNAA)	18
Figure 7 : broyeur à galet pour le cru.....	19
Figure 8 : microscopie du clinker.....	21
Figure 9 : grains du clinker.....	21
Figure 10 : silo de stockage du clinker.....	22
Figure 11 : broyeur à boulet pour le broyage du ciment.....	24
Figure 12 : expédition ciment en sac et vrac.....	27
Figure 13 : principe de fonctionnement du Perméabilimètre de Blaine	30
Figure 14 : appareillage d'essai a aiguille de Vicat.....	31
Figure 15 : le module a aiguille.....	32
Figure 16 : appareil Vicat.....	33
Figure 17 : préparation et analyse des pastilles.....	35
Figure 18 : appareil IBERTEST (essai de flexion et compression).....	38
Figure 19 : trou de foration.....	39
Figure 20 : le remplissage du trou de foration par l'ammonix	39
Figure 21 : exécution du tir	40
Figure 22 : vue profonde des trous émis par la foreuse	41
Figure 23 : machine hydraulique foreuse.....	41
Figure 24 : Taillon.....	42
Figure 25 : ammonix, Tovex et amorce électrique.....	45
Figure 26 : vue 3D de la superposition des gradins de la carrière Ras El Ma.....	46
Figure 27 : vue du tir sous forme 3D.....	49

Liste des tableaux :

Tableau 1 : historique générale de Holcim Maroc.....	5
Tableau 2 : historique de Lafarge Maroc.....	7
Tableau 3 : fiche technique de l'entreprise	8
Tableau 4 : service de LafargeHolcim Ras El Ma.....	10
Tableau 5 : composition chimique du CPJ 35.....	12
Tableau 6 : composition chimique du CPJ 45.....	12
Tableau 7 : composition chimique du CPJ 55.....	13
Tableau 8 : rôle des composants du clinker sur le ciment.....	21
Tableau 9 : les différents composants du clinker et ses formules chimiques.....	22
Tableau 10 : composition des différents types de ciment.....	25
Tableau 11 : exemple de composition chimique de la matière première d'une cimenterie.....	44
Tableau 12 : tableau représentant les résultats de la simulation.....	49



Glossaire

CPJ : ciment portland avec ajout

HOLCIM: HOL (HOLDERBANK), CIM (ciment)

REM : Ras El Ma

PGNAA: Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

XRF: fluorescence par rayon X

QM: Quarry Master

QSO: Quarry System Optimizer



Introduction Générale

La consommation du ciment au Maroc a connu une forte croissance au cours des dernières années, due essentiellement à la politique de développement du logement social, des infrastructures de base et à la reprise des grands investissements touristiques et industriels. Cette tendance de la consommation devrait se poursuivre pour passer du niveau actuel (350 Kg/habitant/an) à celui de la plupart des pays du bassin Méditerranéen (500 et 600 Kg/habitant/an).

Le ciment est un matériau artificiel issu de la combinaison de plusieurs matières premières qui constituent «le cru» (Calcaire ; Argile ; Sable ; Schiste et minerai de fer). Après être broyé, ce cru est par la suite cuit dans un four rotatif de température maximale de 1450°C pour former le « Clinker ». Le clinker + les ajouts (calcaire ; gypse ; pouzzolane ; cendres volantes...etc.) sont broyés pour former le produit final qui est le « ciment ». La qualité du cru et du clinker constitue l'élément majeur qui assure une bonne qualité du ciment.

Le développement du secteur de la construction créé un besoin important en matériaux naturels extraits de carrières à ciel ouvert, la carrière de Ras El Ma a un grand avantage pour LafargeHolcim Fès.

Mon travail consiste à orienter l'exploitation de la carrière calcaire à l'aide d'un logiciel appelé QuarryMaster afin d'améliorer la qualité du cru.

ORGANISATION DU MEMOIRE

Ce rapport est réparti en 3 chapitres :

- **Le 1^{er} chapitre** est consacré à la présentation de la société et a une revue bibliographique sur les ciments, leur caractéristiques et les différents procédés de fabrication.
- **Le 2^{ème} chapitre** donne une vision globale sur toutes les analyses qui se font au sein des laboratoires physique et chimique de tous les types du ciment ainsi que les matières premières (calcaire, schiste, sable).
- **Le 3^{ème} chapitre** donne une vision globale sur la carrière calcaire et la manière de son exploitation. Ainsi que la présentation des procédures de simulation par les logiciels QuarryMaster et Quarry System Optimizer en intégrant les compositions chimiques du cutting.



Chapitre I :

Présentation de la société et procédé de fabrication

I Présentation et historique de HOLCIM MAROC (avant la fusion).

I-1 Présentation de HOLCIM MAROC.

HOLCIM est un groupe suisse fondée en 1912, il occupe la position de leader dans les produits des matériaux de construction pour un usage plus varié. Présent dans 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats, tels que le sable et graviers, ainsi que du béton, il compte 90000 employés à travers le monde.

HOLCIM (Maroc) HOL : rappelle les origines du groupe (le village HOLDERBANK) et CIM : symbolise l'activité du ciment, a été créé en 1976 par l'office du développement industriel (ODI) avec le concours de la banque Islamique sous le nom de CIOR (les ciments de l'oriental). Sa première cimenterie a été construite à OUJDA et elle a démarré en 1979 avec une capacité de production de 12 millions de tonnes par an.

En 1993, HOLCIM (Maroc) a mis en service sa deuxième cimenterie a Ras El Ma dans la région de Fès, avec une capacité de production 60000T/ans pour répondre aux besoins croissants du marché national. En outre, deux centres de broyage et de distribution ont été ouverts à Fès et à Casablanca dont la capacité totale est de 800000T/ans.

Le 15 avril 2002 CIOR devient HOLCIM (Maroc), ce changement affirme son apparence au groupe International HOLCIM, Groupe suisse leader dans le domaine de fabrication du ciment, du béton et du granulats. La nouvelle vision adoptée par la société permet de tenir ses engagements vis-à-vis de ses clients, de développer le système de formation de ses collaborateurs et de prendre en considération les problèmes liés à l'environnement.

I-2 Historique de HOLCIM MAROC.

Les événements clés ayant marqué l'histoire de HOLCIM (MAROC) depuis sa création sont les suivants :

TABLEAU 1 : HISTORIQUE GENERALE DE HOLCIM-MAROC

1976	Création par l'Office de Développement Industriel (ODI) de la société CIOR, pour la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.
1978	Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.
1979	Installation à Fès Doukkarat d'un centre d'ensachage de distribution d'une capacité de 500000 tonnes par an, transformé en centre de broyage en clinker en 1989.
1982	Mise en service du centre d'ensachage et de distribution d'une capacité de 350000 tonnes.
1985	Création de la société Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.
1986	Création de la filiale Andira, dont l'activité consiste en la location du siège de HOLCIM(Maroc).
1990	Installation d'un centre de broyage à Fès RAS LMA d'une capacité de 350000 tonnes par an. Création de la société HOLCIM Béton, afin de porter le développement de l'activité BPE de HOLCIM(Maroc)
1992	Changement de dénomination de la société CIOR qui devient Ciments de l'oriental.
1993	Privatisation par voie de cession de 51% de la capitale sociale de la société Ciments de l'oriental au groupe suisse HOLCIM Ltd. Et introduction en bourse. Mise en service d'une ligne complète de production de clinker à Fès Ras El Ma
1997	Installation d'une centrale à béton à Rabat et à Casablanca.
1999	Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca et mise en service d'une centrale de broyage et d'ensachage

2000	Mise en service des installations de valorisation des combustibles de substitutions à l'usine de Fès Ras El Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador.
2001	Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie de Fès.
2002	<p>Changement de l'identité visuelle : la société Ciment de l'orientale devient HOLCIM(Maroc).</p> <p>Absorption par HOLCIM(Maroc) des sociétés ATLACIM et la société HOLCIM.</p>
2004	<p>Extension de la capacité de broyage et stockage du ciment à Fès Ras El Ma.</p> <p>Acquisition de 51% de la capitale de la société ASMENT OULED ZIANE qui devient HOLCIM AOZ. HOLCIM(Maroc) entend à travers cette opération disposer d'une capacité de production compétitive afin de consolider sa position sur le marché du centre-ouest du Maroc.</p> <p>Fermeture du centre de broyage de DOKKARAT en raison du surcout qu'il générerait du fait de son éloignement de la cimenterie de Fès Ras El Ma.</p>
2005	Mise en service du centre d'ensachage et de distribution de Settât, comme première étape du processus de réalisation graduelle d'une cimenterie.
2006	<p>Extension du centre de broyage de Nador (500 000 tonnes de Clinker)</p> <p>Création de la filiale ECOVAL, spécialisée dans le traitement des déchets industriels.</p> <p>Mise en service du centre de broyage de Settât.</p>
2007	<p>Entrée en production de l'usine de Settât avec une capacité de production 1,7 millions de tonnes de ciments.</p> <p>Création de la société (Promotion H.A.S), spécialisée dans les opérations immobilières afin de promouvoir la construction durable avec des matériaux innovants, dans le cadre d'un partenariat avec des opérateurs spécialisés.</p>
2008	<p>Lancement du projet de dédoublement de l'usine de Fès pour une capacité totale de 1.2 Mt à horizon 2012.</p> <p>Lancement d'une émission obligatoire de 1.5 milliards de Dirhams.</p> <p>Certification ISO9001 et ISO 14001 du centre de Nador.</p>

2009	<p>Démarrage de la carrière de Shkirat qui permet de stimuler le volume des ventes de granulats (1160KT en 2009 vs.653KT en 2008).</p> <p>Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : BATIPRO Distribution avec un réseau de plus de 100 franchisés à travers le Maroc.</p> <p>Signature d'une convention avec le Groupe AL OMRANE pour la réalisation d'une opération de 1000 logements BOUZNIKA et BENSLIMANE dont 400 logements à 140000 MAD.</p>
2010	<p>Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settat et de la plateforme de traitement de déchets d'Ecoval à EL GARA.</p> <p>Recrutement de 70 nouveaux franchisés par BATIPRO dont le réseau atteint 170 points de vente à fin 2010.</p>
2011	Implémentation d'une nouvelle organisation commerciale.
2012	<p>Mise en service de la nouvelle capacité de production de l'usine de Fès.</p> <p>Le réseau de BATIPRO atteint les 215 franchisés à fin 2012.</p>
2013	Mise en arrêt d'une de deux lignes de cuisson de l'usine d'Oujda en mai 2013 en raison d'un ralentissement de la demande au niveau national.

TABLEAU 2: HISTORIQUE DE LAFARGE MAROC

2001	Signature d'une convention d'investissement avec le Gouvernement de 2, 3 milliards de dirhams. Pose de la première pierre pour le lancement de la construction de la nouvelle cimenterie de Tétouan.
Mai 2004	Inauguration de la nouvelle cimenterie de Tétouan, dont le démarrage remonte à Septembre 2003
Juin 2004	Démarrage de l'unité de chaux de Tétouan
2006	Lancement du projet d'investissement pour la modernisation de l'unité de Tanger

Septembre 2006	Inauguration de l'usine de plâtres de Safi suite à son réaménagement.
Décembre 2006	Inauguration officielle de la nouvelle ligne de production de Bouskoura
Février 2007	Signature du contrat entre Lafarge Ciments et Kawasaki pour la réalisation de la deuxième ligne de cuisson de la cimenterie de Tétouan

II- Présentation générale de LafargeHolcim usine REM de FES.

Située à 25 Km au sud de Fès, l'usine de REM. utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale avec une capacité annuelle de 2 millions de tonnes, il comporte des ateliers de : Concassage, broyage, stockage de la farine, cuisson, stockage du clinker, broyage des Combustibles, broyage du ciment, ensachage et expédition du ciment. La cimenterie de REM est certifiée ISO 9001 version 2008 et ISO 14001 version 2004.

II-1 Fiche technique de l'entreprise :

TABLEAU 3: FICHE TECHNIQUE DE L'ENTREPRISE

Raison social	LafargeHolcim Maroc
Forme juridique	Société anonyme de droit privé marocain
Date de création	1976
Activité principale	Production et commercialisation du ciment portland
Capacité social	421 000 000 DH
Capacité de production	2 000 000 tonnes/an
Effectif	200 personnes et sous-traitants

II-2 Organigramme de la société.

L'organisation opérationnelle de LafargeHolcim (Maroc) repose sur un comité de direction, présidé par le directeur général, dont le rôle est de coordonner l'action de l'ensemble des directions de la Société. Dans un souci d'efficacité fonctionnelle l'ensemble des processus et des tâches à accomplir sont répartis en catégories associées chacune à un service.

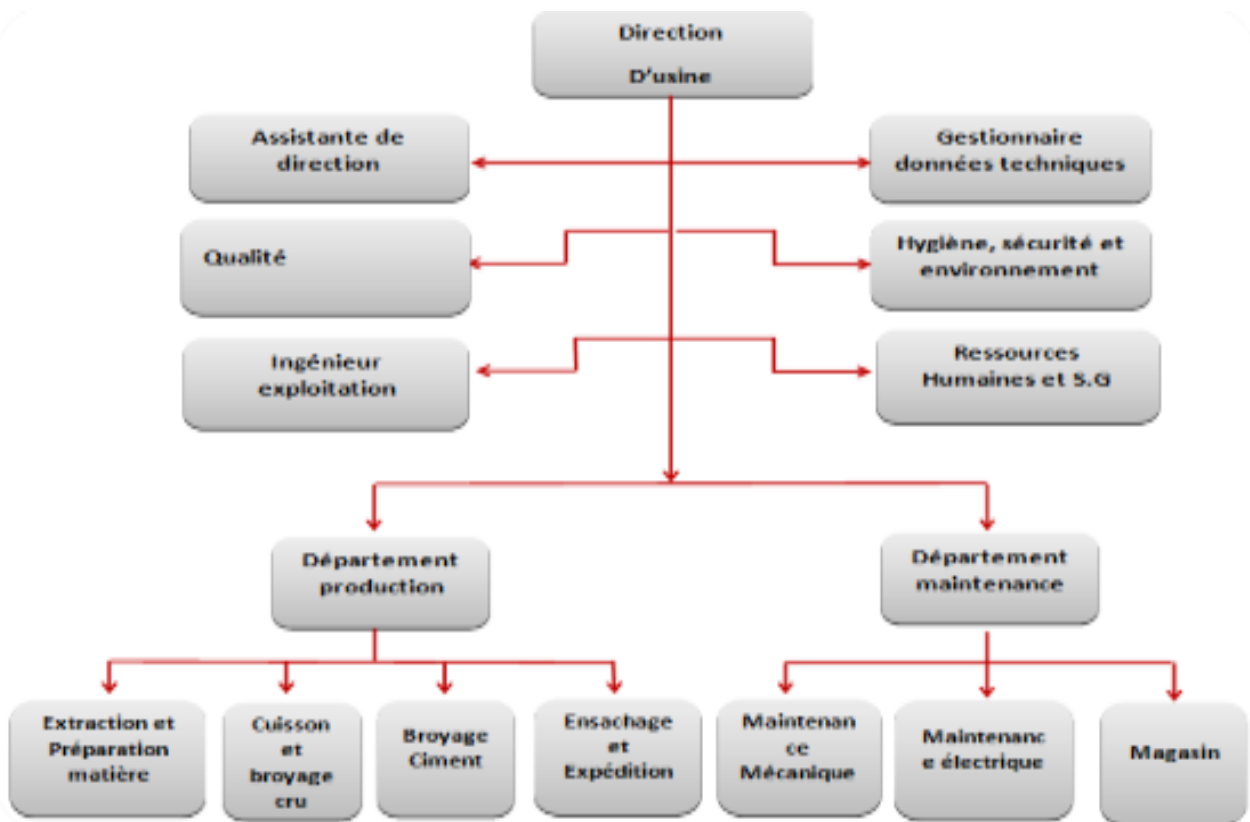


FIGURE1:ORGANIGRAMME DE LAFARGEHOLCIM MAROC

II-3 Différents services de LafargeHolcim REM :

TABLEAU 4 : SERVICE DE LAFARGEHOLCIM RAS EL MA

Service	Activité
Service contrôle et qualité	Organisation assurée par un laboratoire de qualité pour améliorer les produits et réduire les risques de mise en marche de produits défectueux.
Service sécurité et environnement	Chargée d'assurer une qualité des ciments, du béton et des granulats, répondant aux meilleurs standards internationaux.
Service exploitation	Mettre en œuvre la stratégie opérationnelle de la société y compris la gestion technique et commerciale (gestion des achats et gestion des stocks)
Service des ressources humaines	Recrutements assurance maladie, gestion des congés, paie de personnel, et la gestion de la formation.
Service production	Service d'accueil divisé en 3 secteurs : Secteur 1 et 2 : concassage, broyage et cuisson des MP pour préparer le clinker. Secteur 3 : chargé du broyage ciments et expédition.
Service maintenance	Assurer la disponibilité des machines, pour produire dans les meilleures conditions de qualité, sécurité et cout.

Généralités

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

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de «pâte» de ciment durcissant» sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide

Les principaux composants du ciment sont :

- **Le clinker** : Produit obtenu par la cuisson du mélange : Calcaire +Sable+ Schiste + Minerai de Fer.

Il est constitué principalement d'oxydes métalliques, notamment :

- La Silice (SiO_2): 17 à 25 %
- L'alumine (Al_2O_3): 3 à 6 %
- La Chaux (CaO): 54 à 65 %
- L'Oxyde de fer (Fe_2O_3): 2 à 5 %

Suivant leur type, les ciments courants peuvent contenir autres constituants :

- **Les cendres volantes** : produits résultant de la combustion des houilles et lignites dans les centrales thermiques.
- **Les pouzzolanes** : produits d'origine volcanique.
- **Les ajouts chimiques de fabrication** : sulfate de calcium (gypse), agents de mouture...

Ces ajouts possèdent :

- **Des propriétés hydrauliques** : par hydratation se forment des microcristaux fibreux stables et enchevêtrés dont résulte une cohésion progressive.
- **Des propriétés pouzzolaniques** : faculté de fixer le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour donner naissance à des composés hydrauliques stables.
- **Des propriétés physiques** : maniabilité, compacité,...

III- Ciment et son procédé de fabrication

III-1-Différent types du ciment produit par LafargeHolcim

III-1-1-CPJ 35 : (Ciment Portland aux Ajouts 35)

Le ciment CPJ 35 est un produit particulièrement adapté à la fabrication des mortiers et enduits pour la maçonnerie ainsi que des bétons non armés peu sollicités et à résistances mécaniques peu élevées. Les principaux constituants sont le clinker, le calcaire et le gypse.

TABLEAU 5: COMPOSITIONS CHIMIQUES DU CIMENT CPJ 35

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 35	12.80	3.54	2.23	65.63	0.96	0.61	3.04

III-1-2-CPJ 45 : (Ciment Portland aux Ajouts 45)

Le ciment CPJ 45 est un ciment portland dont les constituants principaux sont le clinker, le calcaire, le gypse et la pouzzolane. La classe de résistance de 45 Méga pascals lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistances mécaniques élevées.

Les résistances élevées à jeune âge du CPJ 45 permettent d'obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

TABLEAU 6: COMPOSITIONS CHIMIQUES DU CIMENT CPJ 45

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 45	13.96	3.83	2.42	64.89	1.07	0.60	2.92

III-1-3-CPJ 55 : (Ciment Portland Avec Ajouts 55)

Le ciment CPJ 55 est un ciment portland artificiel composé de clinker, calcaire, gypse, pouzzolane et les cendres volantes.

La résistance de 55 MPa et les résistances élevées à jeune âge du CPJ 55 lui confèrent l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités. Le CPJ 55 est adapté aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

TABLEAU 7: COMPOSITIONS CHIMIQUES DU CIMENT CPJ 55

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
CPJ 55	15.24	4.08	2.74	64.75	1.01	0.63	3.07

III-2-Divers procédés de fabrication du ciment

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

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

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

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

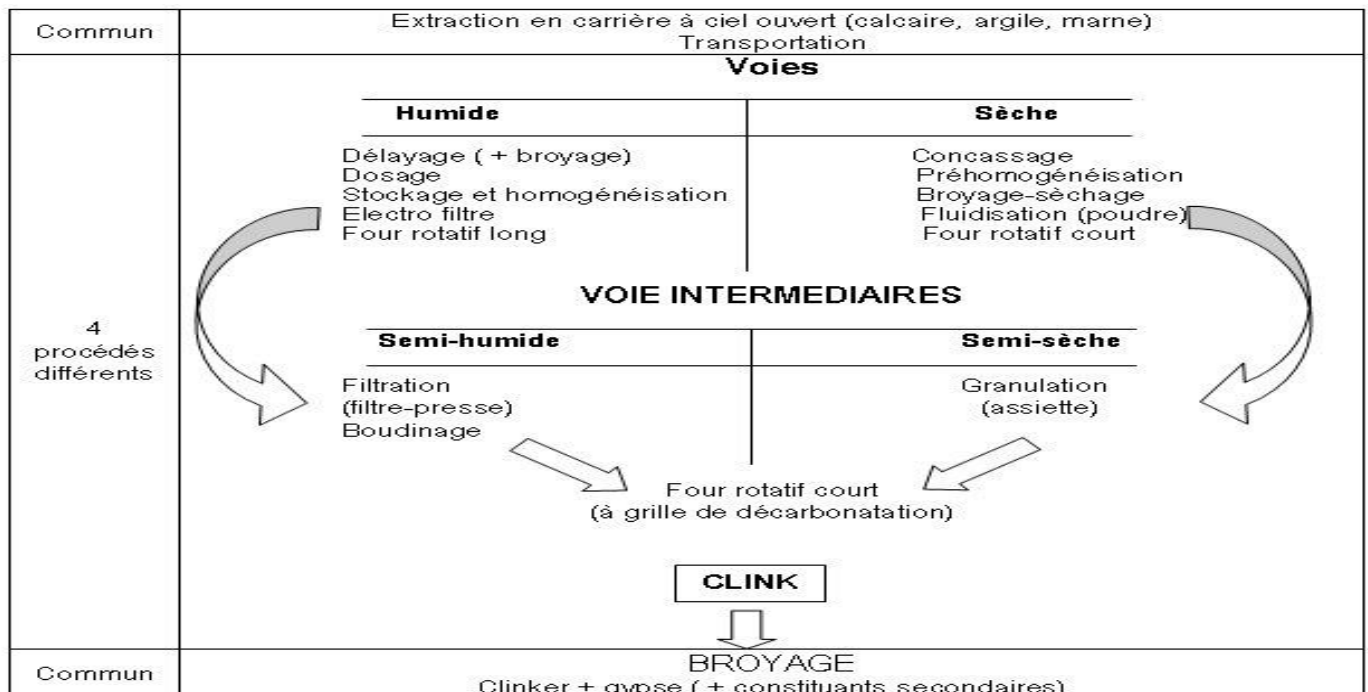


FIGURE 2 : DIVERS PROCEDES DE FABRICATION DU CIMENT

III -3. Procédé de fabrication de ciment par voie sèche (Le cas de LafargeHolcim de Fès):

Depuis la carrière d'où sont extraites les matières premières jusqu'à la distribution, la fabrication du ciment est réalisée suivant différentes étapes qui sont des transformations physiques et chimiques.

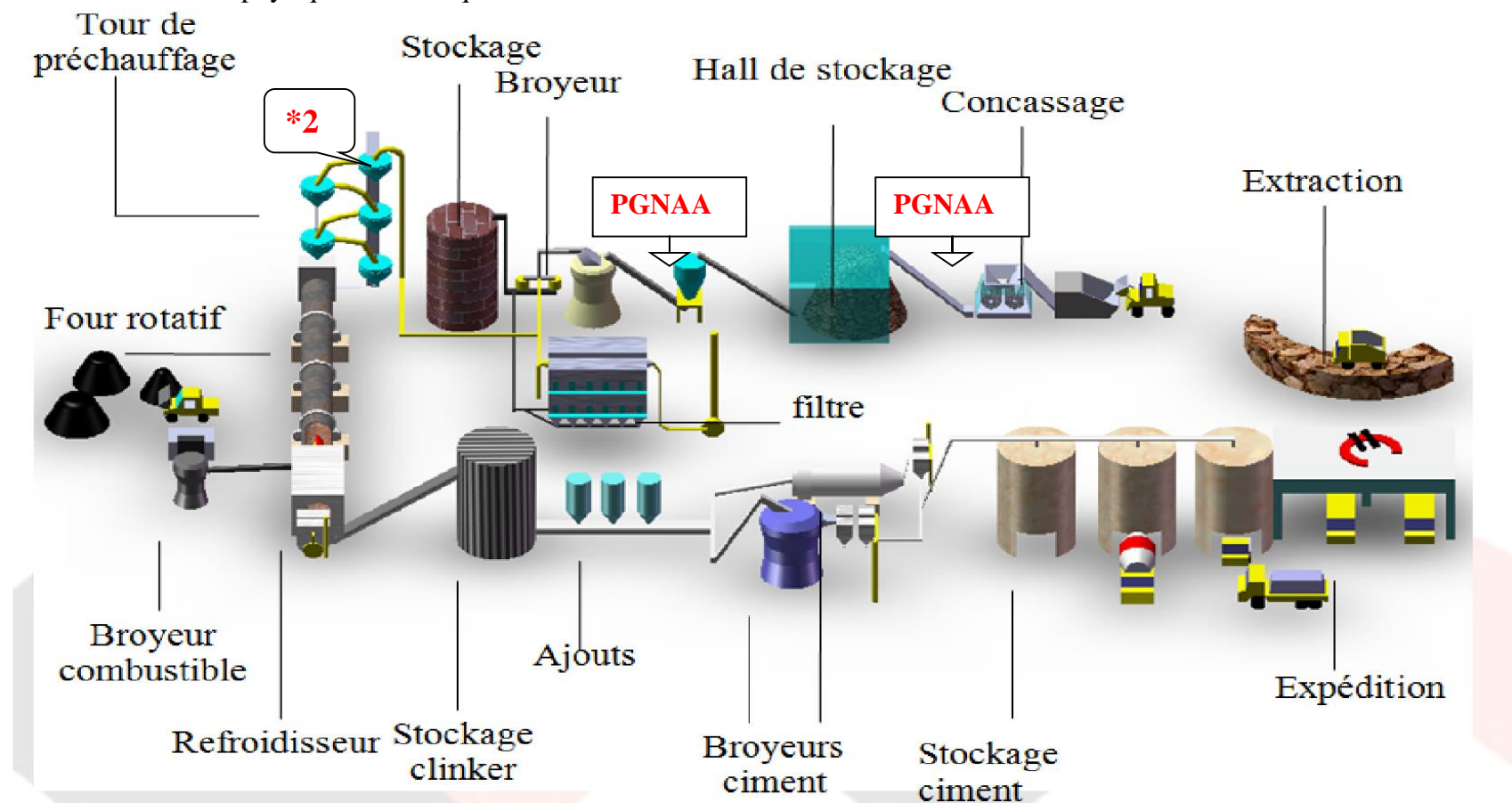


FIGURE 3 : VUE GLOBALE DU PROCÉDE DE L'EXTRACTION JUSQU'A EXPEDITION

III-3-1 Carrière

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières, lesquelles subissent des transformations pour fabriquer le produit ciment. Les matières premières doivent contenir certains éléments chimiques (Carbonate de calcium, oxyde de fer, Alumine et silice) et sont généralement des calcaires et des schistes. Elles sont extraites au niveau de la carrière à proximité de l'usine à ciel ouvert sous forme de blocs de dimensions très variées par abattage en grande masse, au moyen d'explosifs.

Les autres matières premières : Fluorine, Sable et Minerai de Fer sont extraites d'autres carrières et sont transportés jusqu'à l'usine pour être stockés.

III-3-2- Concassage

L'atelier de concassage est situé à 50 m de la carrière calcaire. Il comprend un concasseur à marteau à double rotor, qui convient pour le concassage de toutes matières friables ou demi-dures.

Toutes les matières premières et les ajouts (à part les cendres volantes) sont concassés séparément pour assurer les stocks nécessaires à la marche du broyeur cru et des broyeurs à ciment. La marche du concasseur est entièrement automatisée, lui conférant un fonctionnement optimum et très sécurisé.

Les blocs du calcaire et de schiste sont concassés en même temps pour donner un mélange qui est la matière principale de la fabrication du cru avec des proportions bien déterminés (78% calcaire et 22% d'argile ou schiste). Cette répartition est contrôlée par un PGNAA (analyse instantané par activation neutronique) qui donne des informations importantes sur la composition chimique du mélange et sur les proportions de chaque composé chimique. Ces données sont interprétées ensuite par le contrôleur du concasseur.

Le concasseur de débit 1500t/h peut concasser des blocs de dimensions maximales 1.3 m. La granulométrie des produits à la sortie du concasseur est à 99% inférieure à 100 mm.

Le dépoussiérage de l'atelier de concassage est assuré par un filtre à manches qui permet la récupération des matières très fines pour les remettre dans le circuit. Ceci permet à la fois un gain en productivité et une réduction des nuisances engendrées par les poussières aussi bien pour l'installation que pour le personnel.

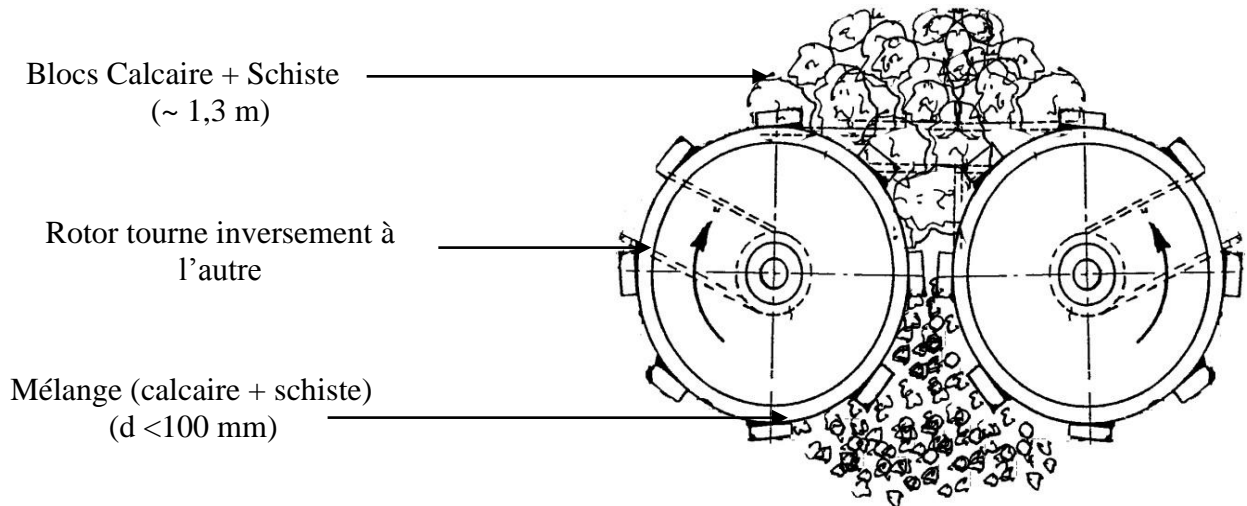


FIGURE 4 : PRINCIPE DU CONCASSEUR A DOUBLE ROTOR

III-3-3-Transport des matières premières

Le transport et la manutention des matières premières est assuré par des engins mécaniques (pelles mécaniques, chenilles, camions bennes, ...) et des équipements de manutention. Les engins mécaniques sont utilisés lors des phases d'extraction et d'alimentation du concasseur et pour le transport des ajouts. Les équipements de manutention (bandes, aéroglisseurs, élévateurs, ...) sont utilisés après le concassage pour transporter les différentes matières entre hall de stockage et les différentes installations de l'usine.

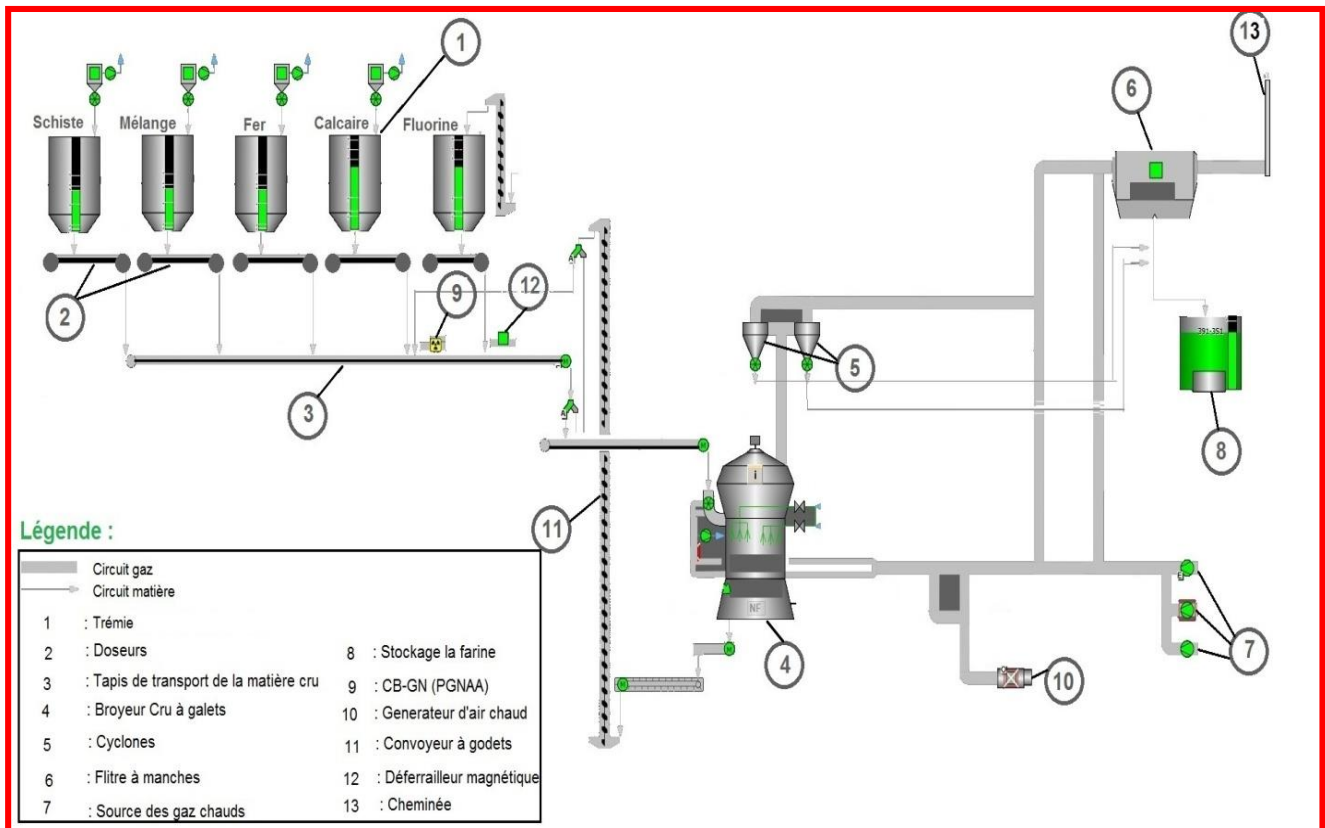


FIGURE 5 : SCHEMA EXPLICATIF MONTRE LA PRE HOMOGENEISATION, LE BROYAGE DU CRU ET LE DEPOUSSIERAGE

III-3-4-Pré homogénéisation

Le calcaire pur, le schiste, le minerai de fer, et le sable concassés, alimentent une « sauterelle » située juste à la sortie du concasseur par un transporteur à courroie permettant ainsi de les stocker séparément dans des trémies.

La pré homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage. Ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières, « **Analysé et corrigé par le PGNAA et validé par le chimiste** » ce mélange est dénommé le cru.

Avant que ce cru entre dans le broyeur, cette matière traverse un analyseur placée autour du tapis de transport. Ce dernier nous donne une analyse élémentaire non destructive du matériau qui le traverse. L'analyse est réalisée à l'aide d'une méthode appelée analyse instantanée par activation neutronique (PGNAA). Les résultats de l'analyse sont affichés dans un ordinateur avec un logiciel spécifique qui assure une correction automatique de chaque matière dans le mélange grâce aux doseurs.

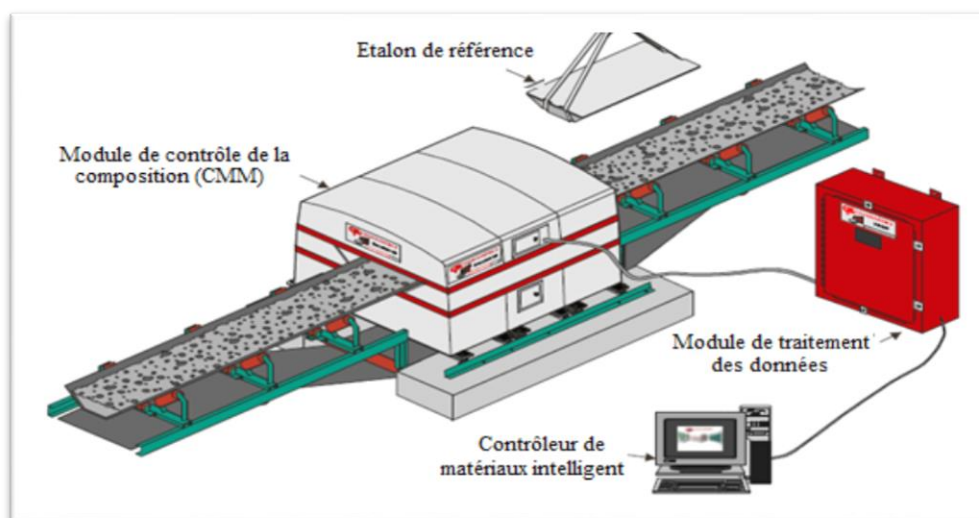


FIGURE 6 : ANALYSEUR A TAPIS CROISES (PGNAA).

III-3-5- Broyage

Le broyage du cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine.

Le broyage du cru consiste à l'introduire dans le broyeur, dans lequel il subit des actions mécaniques pour l'obtention de la farine. Cette dernière (une poudre fine de dimension comprise entre 0 et 200 μ) est stockée par la suite dans un silo d'homogénéisation.

Le broyage et le séchage des matières premières se fait dans un broyeur vertical à deux paires de galets de marque 'Polysius' avec séparateur de troisième génération incorporé. Le séchage de la matière est assuré par les gaz chauds en provenance de la tour de préchauffage et du refroidisseur en cas du besoin.

La matière fine à la sortie du séparateur est récupérée sous forme de farine dans les cyclones et dans le filtre cru. Quand aux grandes particules, elles sont remises dans le broyeur par un élévateur.

L'alimentation du broyeur est constituée soit par la matière reprise au pré homogénéisation (additionnée ou non de matières de correction) soit par différents constituants qui sont dosés.

Remarque : *Les gaz chauds sont introduits dans le broyeur à une température moyenne de 200°C, à cette température la matière crue (entre à une température de 20°C) subit une évaporation de l'eau libre et une perte de l'eau physiquement adsorbée.*

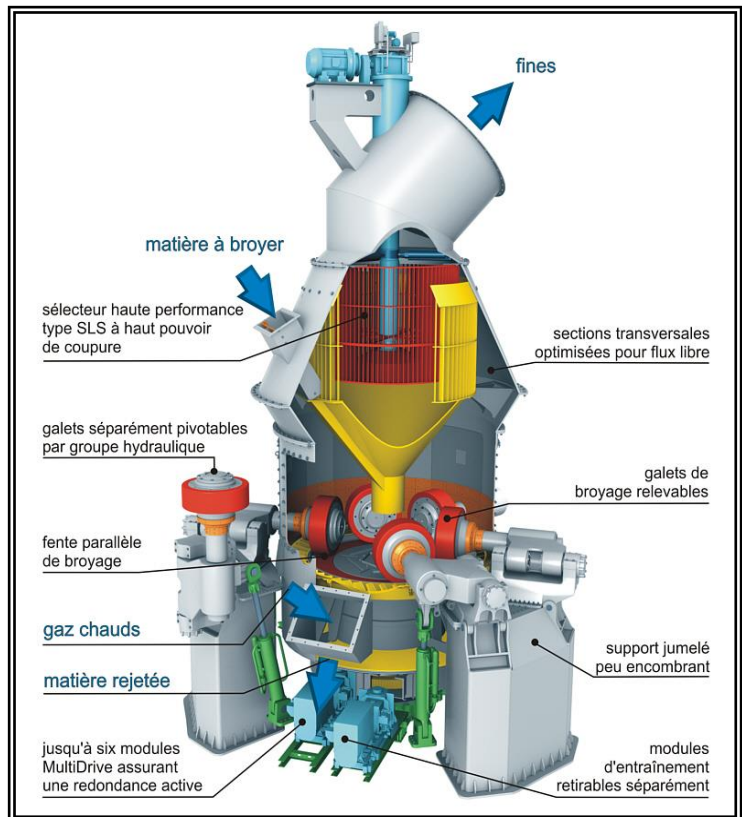


FIGURE 7 : BROYEUR A GALET POUR LE CRU

III-3-6- Homogénéisation :

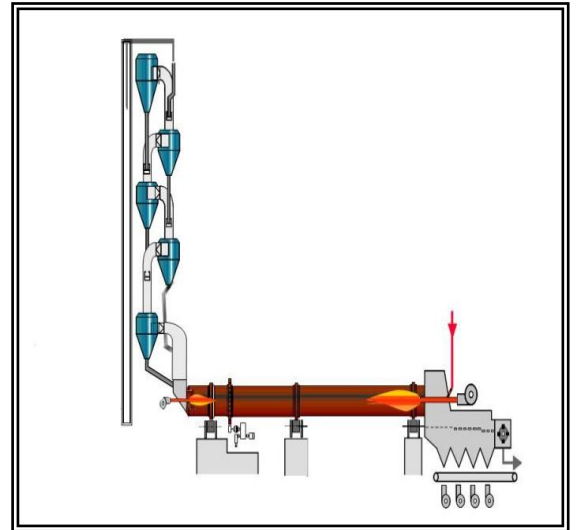
La farine produite est ensuite récupérée dans des aéroglissières, qui alimentent deux élévateurs à godets et à bandes ; elle est stockée par la suite dans le silo d'homogénéisation et de stockage. Le remplissage de ce silo se fait à partir d'un pot de distribution fluidisé et de quatre aéroglissières. Ce mode d'alimentation en quatre points permet une meilleure répartition de la matière dans le silo et augmente l'efficacité de l'homogénéisation qui se fait dans un pot situé à la sortie du silo.



III-3-7-Cuisson :

La cuisson s'effectue selon le procédé de la voie sèche intégrale. La ligne de cuisson est constituée de :

- Deux tours de préchauffage chacun à cinq étages de cyclones dite aussi tour DOPOL.
 - Un pré-calcinateur.
 - Un four rotatif de 3.8 m de diamètre, de 62 m de longueur utile et dont la vitesse de rotation peut atteindre 4.5 tour /min et d'un débit nominal de 2800 tonne/Jour.
- Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique.



Cette préparation

consiste à sécher, déshydrater et décarbonater partiellement la matière crue en réutilisant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gaz d'exhaure du four.

Le four rotatif est conçu pour la cuisson de matières pulvérulentes de faibles dimensions. Le capot de chauffe à la sortie du four est équipé d'un brûleur spécial qui atteint une température maximale d'environ 1450°C.

L'air secondaire chaud qui vient du refroidisseur situé en aval pénètre dans le four en étant mélangé à l'air primaire de combustion et traverse le four à contre-courant de la matière. La flamme résultante de la combustion du coke de pétrole se trouve à l'extrémité la plus basse du four. La matière est introduite à l'autre extrémité et avance lentement sous l'effet de la rotation et de l'inclinaison du four.

Pour protéger la virole du four et ses équipements auxiliaires et pour éviter les pertes de chaleurs importantes, le four rotatif est garni de briques réfractaires, adaptées aux nécessités de chaque zone.

Au fur et à mesure de son avancement dans le four, la matière complète sa décarbonatation et se transforme par cuisson jusqu'à ce qu'il devient « clinkérisé ».

La matière qui sort du four est le clinker qui se présente sous forme de grains gris foncés arrondis dont les dimensions sont irrégulières.



Les gaz sortant de la tour de préchauffage passent dans le broyeur cru ou directement dans le filtre à manches dont le dé-colmatage se fait par contre-courant.

Le refroidissement du clinker se fait à l'aide de quatre ventilateurs latéraux, dans un refroidisseur à deux grilles CPAG équipé d'un concasseur à marteaux.

Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage.

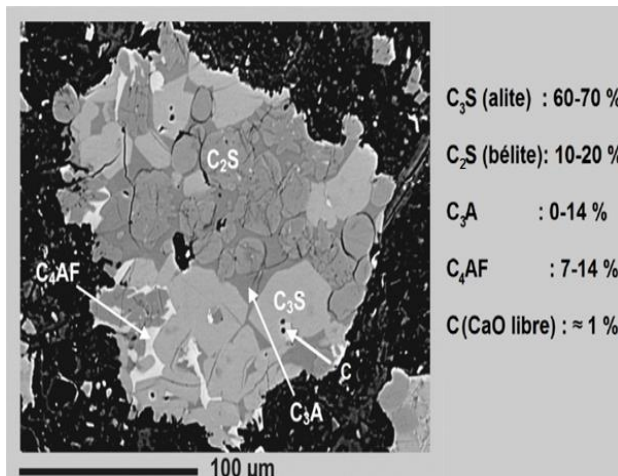


FIGURE 8 : MICROSCOPIE DU CLINKER MONTRANT SES QUATRE PHASES CRISTALLINES PRINCIPALES



FIGURE 9: GRAINS DU CLINKER

Le tableau ci-dessous montre l'influence ou la participation des éléments présents dans le clinker sur la prise et la résistance que ça soit à jeune âge ou à long terme du Ciment.

TABLEAU 8: ROLE DES COMPOSANTS DU CLINKER SUR LES CIMENTS

Minéraux	Formule chimique	Symbole	Rôle
Silicates tricalciques	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	Résistance initiale
Silicates bi-calciques	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	Résistance long Terme
Aluminates Tricalciques	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	Prise rapide
Aluminoferrite Tétra-calcique	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	Sans effet sur la résistance du ciment

Le refroidissement du clinker:

- Pré-refroidissement: Entre 1450 – 1200 °C
- Refroidissement ou la trempe: Entre 1200 – 300 °C

L'air chaud de la première grille est utilisé dans le four pour la combustion du coke de pétrole, une partie des gaz de la deuxième grille est utilisée pour le séchage dans le broyeur cru 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.

Le stockage du clinker se fait dans un silo métallique de 50000 tonnes, équipé de trois casques d'extraction et d'un transporteur à godets et à chaînes.

Le stockage du clinker d'une part, confère à l'atelier de broyage ciment une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunissent le clinker d'une dégradation physicochimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre.



FIGURE 10 : SILO DE STOCKAGE DU CLINKER

Composition chimique du clinker:

Le clinker est un minéral artificiel hétérogène. Les cimentiers ont trouvés, la symbolisation chimique trop compliquée de ses compositions, et ils l'ont simplifiée.

TABLEAU 9 : LES DIFFERENTS COMPOSANTS DE CIMENTS ET SES FORMULES CHIMIQUES

Désignation des corps	Symbolisation chimique	Symbolisation cimentière
Chaux	CaO	C
Silice	SiO₂	S
Alumine	Al₂O₃	A
Oxyde de fer	Fe₂O₃	F
Silicate tricalcique / Alite	SiO₂-3CaO	C₃S
Silicate bi calcique / Bélite	SiO₂-2CaO	C₂S
Aluminate tricalcique / Céliste	Al₂O₃-3CaO	C₃A
Aluminoferrite tétra calcique	Al₂O₃, Fe₂O₃-4CaO	C₄AF

Les grandes étapes de la cuisson sont les suivantes :

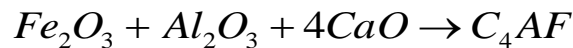
Phase décarbonatation :

- 100 °C : Dessiccation du mélange cru.
- 400-850°C : Dissociation de CaCO_3 .



Phase transitoire ou phase liquide : formation des combinaisons provisoires.

- 900-1300°C : Formation des Ferro-aluminates :



Formation des aluminates :



Formation des silicates bi calciques :



- 1250-1300°C : Apparition de la phase liquide.
- 1308°C : Formation du liquide eutectique.

Phase de clinkérisation : transformation de C_2S en C_3S :

- 1300-1450°C : Formation de silicate tricalcique :



- 1450-1200°C: Pré refroidissement.

1200-100°C : Refroidissement dans le refroidisseur.

III-3-8- Broyage à ciment et Expédition

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm environ.

Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage afin d'obtenir le ciment qui est d'une finesse inférieure à 40 microns.

Un **broyeur à boulets** d'un débit de 25 t/h «Figure ci-contre » et un autre **broyeur vertical à galets** «même génération que le broyeur Cru» d'un débit de 130 t/h assurent le broyage à partir d'un mélange de clinker, gypse, calcaire et cendres volantes (dans le cas du ciment spécial). Ces ajouts sont mélangés au clinker pour diminuer le rapport clinker/ciment afin de réduire le cout du ciment.

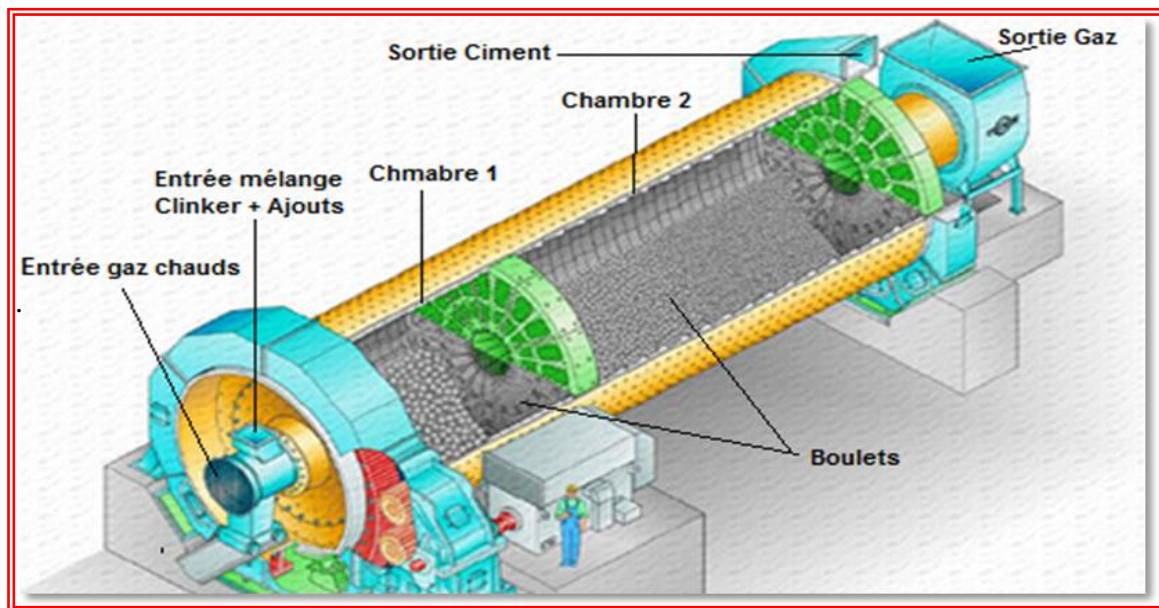


FIGURE 11 : BROYEUR A BOULETS POUR LE BROYAGE DU CIMENT.

La composition des différents constituants est réglée par un système de dosage automatique. Le ciment produit est acheminé au moyen des élévateurs à bandes et à godets puis stocké dans des silos en béton.

Ces silos alimentent par la suite le système d'expédition du ciment en vrac et des ateliers d'ensachage. Un dispositif est installé à la sortie de chaque broyeur pour assurer les prélèvements d'échantillons.

● Ajouts :

L'utilisation d'ajouts dans les industries du ciment et du béton présente les avantages techniques et économiques suivantes :

Bénéfices fonctionnels

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité du béton.
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.
- Amélioration de prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.

Bénéfices économiques

- La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
- Le procédé de fabrication du clinker est coûteux. En diminuant la fraction du clinker dans le ciment on diminue le rapport Clinker/Ciment en respectant les normes.

Bénéfices écologiques et environnementaux

- Diminution de l'émission du CO₂.

TABLEAU 10: COMPOSITIONS DES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT

<i>%</i>	<i>CPJ 35</i>	<i>CPJ 45</i>	<i>CPJ 55</i>	<i>Ciment spécial</i>
<i>Clinker</i>	<i>55.5</i>	<i>61</i>	<i>76.5</i>	<i>56.5</i>
<i>Gypse</i>	<i>6.5</i>	<i>6</i>	<i>6.5</i>	<i>6.5</i>
<i>Calcaire</i>	<i>38</i>	<i>33</i>	<i>23</i>	<i>5</i>
<i>Pouzzolane</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>26</i>
<i>Cendres volantes</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>6</i>

Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire composée en grande partie ou entièrement de carbonate de calcium (CaCO_3).

La chaux vive (CaO) est formée par un procédé de calcination qui consiste à chauffer le calcaire à une température provoquant la dissociation des carbonates ($402\text{-}898\text{ }^\circ\text{C}$) et à maintenir celle-ci assez longtemps pour libérer le dioxyde de carbone.

Gypse

Le gypse, minéral courant composé de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est un minéral sédimentaire très répandu, Il est ajouté au clinker et éventuellement avec d'autres constituants au moment du broyage pour produire les ions sulfates nécessaires pour réguler la prise et améliorer les performances finales.

Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. La plupart des cendres volantes existantes sur le marché sont des sous-produits des centrales thermiques.

III-3-9-Conditionnement et distribution du ciment

Le ciment est transféré par voies pneumatique et mécanique vers des silos de stockage de plusieurs milliers de tonnes.

L'atelier d'ensachage et de distribution du ciment de l'usine de Fès-Ras El Ma est conçu pour la livraison des différents types de ciments, en sac ou en vrac sur camions ou wagons. Il comporte trois ensacheuses rotatives : une de capacité 90t/h et deux de capacité 120t/h.



Sa distribution se fait par l'intermédiaire de négociants en matériaux de constructions répartis sur un vaste secteur de rayonnement économique avec une forte concentration dans les zones urbaines.



**FIGURES 12 : EXPEDITION CIMENTS
EN SACS ET EN VRAC.**



Chapitre II :

Analyses chimiques et physiques

Le laboratoire a pour mission le contrôle de qualité des échantillons prélevés de façon régulière tout au long du procédé de la fabrication depuis les matières premières jusqu'au produit fini, afin de connaître leur teneur en différents composés et de pouvoir ainsi les doser.

Les différentes analyses réalisées au laboratoire sont :

- Un contrôle du cru du sorti du broyeur chaque heure.
- Un contrôle du clinker chaque 2 heures.
- Un contrôle du ciment chaque 2 heures.
- Un contrôle de la farine chaude 3 fois/jour.
- Un contrôle du combustible 3 fois /jour.
- Un contrôle des matières premières 1 fois/semaine.

Les résultats de ces contrôles sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs qui sont rectifiées automatiquement depuis la salle de contrôle.

I- Type d'analyse

I-1- Les analyses physiques

I-1-1- La finesse :

Son objectif est de déterminer la granulométrie des échantillons. À l'aide d'un courant d'air on crée une différence de pression entre les deux niveaux du tamis. Les passants à travers le tamis sont entraînés par le courant d'air et les grains dont les dimensions sont supérieures aux mailles du tamis constituent donc les refus.

Expression du résultat :

$$\text{Taux de refus (\%)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

Avec :

- m_1 : masse avant tamisage.
- m_2 : masse après tamisage.



L'analyse de finesse nous aide à contrôler l'homogénéisation de l'échantillon et de contrôler aussi le bon fonctionnement des broyeurs et des séparateurs.

I-1-2- Finesse de Blaine

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

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse par unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains du ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est grand.

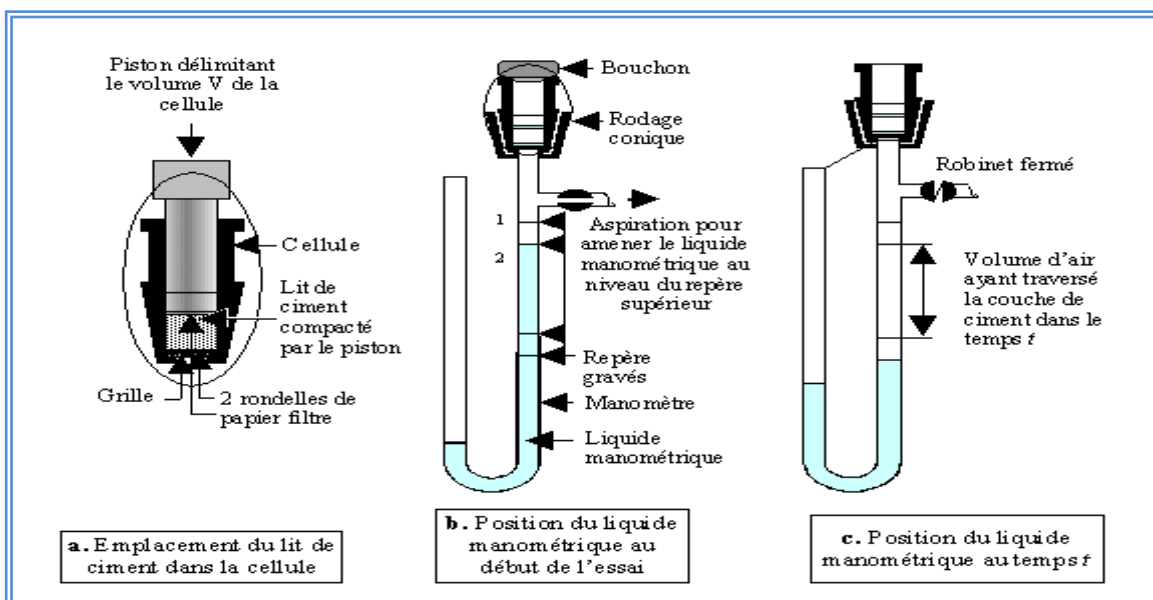


FIGURE 13 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE PERMEABILIMETRE DE BLAINE

I-1-3- Essai de prise (Temps de Prise)

Cet essai a pour but de déterminer le temps de prise pour un ciment, c'est à dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant (ciment) est mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise. Cet essai se fait à l'aide de l'aiguille de Vicat. En enfonçant cette aiguille dans un moule tronconique rempli de pâte pure, on mesure ce temps et on le compare aux temps standards.

Les essais sont réalisés à l'aide de l'aiguille de Vicat donnant deux repères pratiques, le début de prise et la fin de prise. L'appareil de Vicat est équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.

Sous l'effet d'une charge de 300 g, le début de prise est marqué par l'arrêt de l'aiguille dans le mortier à une distance de $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ du fond du moule. On mesure alors le temps de début de prise. Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce pas plus de 0,5 mm dans le mortier.

Dans nos essais, le temps de fin de prise est appelé temps de prise. L'intervalle de descente de l'aiguille est de 10 minutes.

Le mode opératoire consiste à mélanger une quantité de 500 g de ciment avec de l'eau nécessaire pour avoir une pâte du ciment.

I-1-4- Essai de consistance

Cet essai nous permet de déterminer la quantité d'eau qu'on doit ajouter au ciment, la pâte est introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. On enlève l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule, l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat. La sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (où après 30 s d'attente), on relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.



**FIGURE 14 : APPAREILLAGE
D'ESSAI A AIGUILLE DE VICAT**

La pâte a une consistance normale si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$:

- Si $d > 7\text{mm}$: il n'y a pas assez d'eau
- Si $d < 5\text{mm}$: il y a trop d'eau.

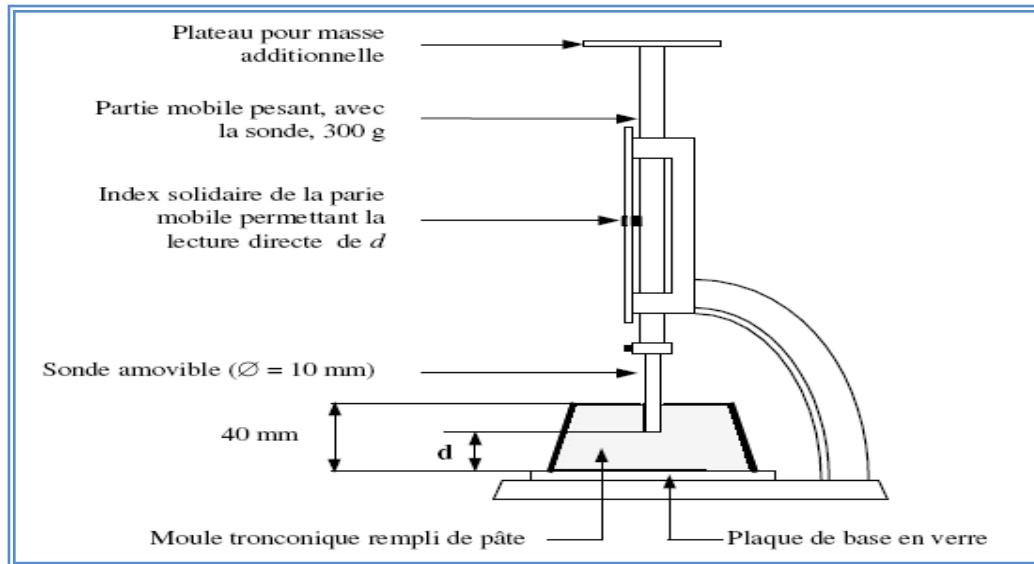


FIGURE 15 : APPAREIL VICAT

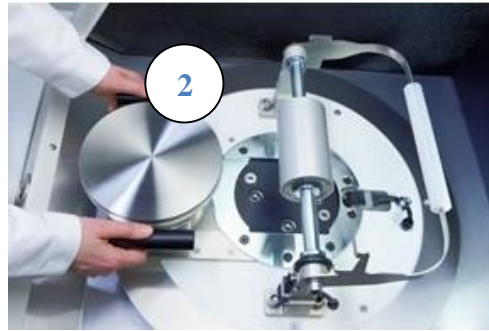
I-2 Détermination de la composition chimique

I-2-1- Analyse par fluorescence RX

C'est une technologie moderne qui facilite la tâche d'exploitation de plusieurs résultats. Le principe de cette analyse consiste à surbroyer l'échantillon à analyser dans un sur broyeur pour avoir des granulats de dimension plus fines. Par la suite on met presque 15 g dans un pressoir hydraulique pour former ainsi une pastille qu'on va la mettre en contact avec les rayons X dans un analyseur par fluorescence. Les résultats sont traités automatiquement par l'ordinateur qui nous affiche le pourcentage de chaque constituant.

Les résultats de ces contrôles sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs qui sont rectifiées automatiquement par la salle de contrôle et pour suivre la conformité du produit au cours de son production.

Les produits analysés sont : Matière première, Cru, farine chaude, Clinker et Ciment.



- 1) L'échantillon à analyser est introduit dans le bol en carbure en tungstène et on met deux gouttes de **Triéthanolamine** pour éviter le colmatage de la matière dans l'assiette et faciliter le compactage de la pastille.
- 2) Ensuite l'assiette est introduite dans un sur-broyeur pendant 3 min pour obtenir des particules très fines.
- 3) La figure représente le moule de la pastille.
- 4) Après broyage, l'échantillon est introduit dans un moule en acier chromé et le produit à analyser dans une presse à pastiller.
- 5) Récupération de la pastille.
- 6) Analyse de la pastille par le spectromètre à fluorescence X, les résultats sont afficher dans un ordinateur liée à l'analyseur.

FIGURE 16 : PREPARATION ET ANALYSE DES PASTILLES

I-3- Essais mécaniques : Résistance à la flexion et à la compression

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la résistance du ciment. Pour cela, des éprouvettes de ciment sont préparées dans les conditions précises ci-dessous :

- On pèse directement 225g de l'eau dans un bol du malaxeur séché et nettoyé convenablement.
- On pèse 450g de ciment et le verse dans le bol du malaxeur.
- On met le malaxeur en marche en mode automatique.
- Après 30 secondes, on verse en haut du bol 1350g (plus ou moins 30g) de sable normalisé.



- Après l'arrêt automatique du malaxeur, on racle les parois et le fond du bol et on verse le contenu du bol sur une plaque inoxydable puis on forme une patte rectangulaire. On fixe le moule sur la table à choc, on introduit une partie du mélange puis on fait démarrer la machine à 60 choc/min. Après l'arrêt automatique de la machine, on verse le deuxième contenu sur le premier puis racle par une raclette. On met une deuxième fois la machine à choc en marche. Une fois la machine arrêtée, on fait raser les moules à l'aide d'une règle métallique et on les conserve dans une chambre humide pendant 24h.
- Après 24h, on fait sortir les moules de l'armoire et on les démoule puis on remet les éprouvettes dans l'armoire pour les essais de flexion et de compression à 2j, 7j et 28j.

- **Test de Flexion :** Le test permet de déterminer la contrainte de traction par flexion. La rupture est effectuée à l'aide d'un appareil à presse muni d'un dispositif qui casse l'éprouvette en affichant la pression supportée en *Megapascal*.
- **Test de Compression :** Chaque demi éprouvette passe en compression sur faces latérales, entre deux plaques de métal dur. Enfin, l'appareil à presse indique la pression limite à laquelle l'éprouvette a résisté.



FIGURE 17: APPAREIL IBERTEST (ESSAI DE FLEXION ET COMPRESSION)



Chapitre III :

Partie expérimentale

I- Introduction

Le calcaire est la matière première principale du ciment, son exploitation à un impact important sur les coûts d'exploitation. Une connaissance détaillée de cette matière permet de prolonger la durée de vie de la carrière en mélangeant efficacement les différentes qualités et d'assurer la production d'un cru constant en termes de qualité et de quantité.

De plus, les opérations en carrière peuvent être simplifiées ce qui permet une diminution de la consommation de diesel et des coûts de maintenance par tonne de matière première extraite. La production d'un mélange de cru constant permet d'optimiser la production de clinker, et un clinker de meilleure qualité permet de diminuer la quantité des ajouts.

Afin de contrôler la qualité du cru et d'optimiser l'exploitation de la carrière, une étude complète doit être conduite dont les grandes lignes de cette étude sont :

- Choix du site.
- Maîtrise des moyens d'exploitation.
- Evaluation de la qualité des matières premières.
- Modélisation 3D de la géologie et estimation des ressources.
- Traitement des résultats d'échantillonnage.
- Optimisation de l'exploitation en se basant sur des logiciels informatiques (QuarryMaster et le Quarry system optimizer).

II- Moyens d'exploitation de la carrière REM

L'extraction consiste à extraire les matières premières comme le calcaire, les schistes et l'argile, à partir des carrières à ciel ouvert ; (c'est-à-dire une mine ayant pour mode d'exploitation à la surface de la terre en non pas des galeries). Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses. Les techniques d'exploitation sont influencées par la forme et la nature du gisement, la structure chimique des matériaux à extraire, la nécessité de faire à tout moment le mélange cru convenable pour la fabrication du ciment.

II-1 Exploitation avec explosif

Les travaux de tir sont largement utilisés dans les exploitations à ciel ouvert des roches dures, Dans ce cas, la roche est séparée du massif à l'aide des explosifs placés dans des trous réalisés à cet effet.

- ✓ Carrière de calcaire

Chez LafargeHolcim, le Calcaire est exploité à partir de la carrière située à proximité de l'usine, l'extraction se fait à partir d'un abattage à l'explosif, le pourcentage du calcaire dans la production peut atteindre 80%.

II-1-1- Procédure de Tir

- Implantation du tir dans la carrière ;
- Foration des trous de mine ;



FIGURE 18 : TROU DE FORATION

- Remplissage en explosifs : Les explosifs, d'une nature et d'une puissance adaptée, sont disposés en colonne dans des trous réalisés par forage et correspondant à la hauteur de la roche à abattre



FIGURE 19 : LE REMPLISSAGE DU TROU DE FORATION PAR L'AMMONIX

- Raccordements : Des détonateurs électriques, placés en fonds de trous, sont réglés avec des micros-retards ;
- Mise en sécurité des lieux ;
- Tir ;
- Temps de sécurisation.



FIGURE 20 : EXECUTION DU TIR

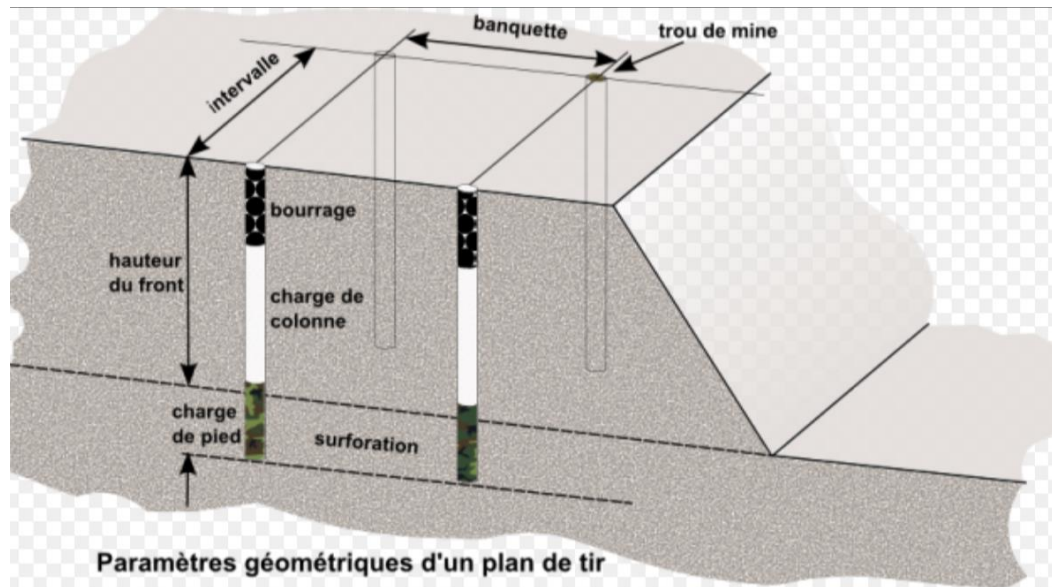


FIGURE 21 : VUE PROFONDE DES TROUS EMIS PAR LA FOREUSE

Définitions

- Front : c'est une surface sensiblement verticale qui limite le massif rocheux à abattre et en arrière de laquelle on implante la foration.
- La maille : on appelle maille le quadrilatère formé par la succession de deux trous et leur projection sur le front. C'est la grandeur caractéristique du plan de tir et s'exprime en m^2 .
- Espacement : c'est la distance séparent deux trous successifs d'une même rangée.
- Banquette : c'est la distance qui sépare le trou de mine du front.
- Bourrage : constitué en haut de colonne pour empêcher la libération verticale de gaz.

II-1-2- Foration

C'est une technique comme étant la première étape de la chaîne cinématique dans la carrière de Ras El Ma. Elle consiste à réaliser des trous dans un terrain dur pour y mettre de l'explosif dans le but de le fragmenter. On utilise couramment des machines hydraulique foreuse car l'eau a tendance à réduire la résistance de la matrice rocheuse et par conséquent à faciliter la pénétration de l'outil de foration. Cependant, la vitesse instantanée de la foration augmente. Le tir est caractérisé par son diamètre, sa profondeur et son inclinaison par rapport à la verticale.



FIGURE 22 : MACHINE HYDRAULIQUE FOREUSE

L'exécution de ces trous doit être faite suivant une maille bien déterminée tout en respectant la hauteur à forer. La précision avec laquelle ces paramètres sont respectés aura une grande influence sur les résultats des tirs.

↗ Diamètre du trou

C'est le diamètre du Taillon qui permet de forer le trou destiné à recevoir l'explosif. Les résultats des montres qu'avec l'augmentation du diamètre de sondage, le degré de fragmentation diminue. Pour notre cas dans la plus part des forations effectuées, on utilise un Taillon diamètre 89mm.



FIGURE 23 : TAILLON

↗ Hauteur et inclinaison du forage

L'inclinaison du forage est très importante. Elle est en fonction de la hauteur du front et des conditions de la stabilité de la roche :

Si la hauteur est faible (moins de 10m), l'inclinaison est entre 0 et 5°

Si la hauteur est élevée (plus de 10m), l'inclinaison est entre 5 et 30°

II-1-3- Choix de l'explosif

Le choix de l'explosif dépend aussi dans large mesure de présence d'eau dans le massif à abattre ou des conditions climatiques, parce qu'il y a des explosifs très sensibles à l'eau et d'autres résistants (comme par exemple le nitrate fioul, leur emploi est prohibé lors de présence d'eau). Cependant c'est à l'utilisateur de bien choisir le type d'explosif ou jouer sur les techniques permettant la conservation ou la protection de l'explosif contre l'eau.



FIGURE 24 : LES PRODUITS D'EXPLOSIF UTILISE PAR LAFARGEHOLCIM (AMMONIX, TOVEX ET AMORCE ELECTRIQUE)

II-1-4- Nuisances liées au tir

Les principales nuisances liées au tir de mines sont :

- Les vibrations liées à la déformation élastique des matériaux
- Le bruit ou énergie acoustique

Le contrôle des vibrations émises par les tirs est devenu une préoccupation majeure des exploitants de carrière. Le tir s'appuie sur l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 qui définit :

- La méthodologie ;
- Les valeurs limites d'exploitation ;
- Une loi de pondération en fonction des fréquences ;

Les tirs de mine sont de la responsabilité de LafargeHolcim. Ils sont exécutés par du personnel spécialisé encadré par un chef mineur, qui est formé à cette fin notamment par la fédération des industries extractives. Il doit disposer d'un certificat officiel après réussite d'un examen. Tous les tirs de mines réalisés sur la carrière LafargeHolcim sont enregistrés avec leurs paramètres complets : tableau de suivi des tirs avec positionnement sur un plan topographique (plan de tir). Des sismographes- enregistreurs homologués, placés sur les fondations des habitations les plus proches enregistrent les émissions vibratoires.

Les résultats des vibrations mesurés voisinage de la carrière ne dépassent pas 4 mm/s alors que la réglementation tolère jusqu'à 10 mm/s.

La fréquence des minages est normalement en moyenne de 2 tirs par semaine. Il n'y a pas de stockage d'explosifs sur le site, les livraisons ont toujours lieu le jour du tir. La quantité est limitée par une autorisation préfectorale. Le registre des tirs est contrôlé annuellement par la gendarmerie.

II-2- Exploitation sans explosif

LafargeHolcim utilise l'extraction sans explosif dans les terrains meubles, c'est le cas des schistes dans la carrière de Beni Mellala, qui est exploitée avec les engins traditionnels de travaux publics comme pelles ou les chargeuses.

- ✓ Carrière de schiste :

La carrière du schiste est située à 45 Km du site de l'usine, l'extraction est sous-traitée et le pourcentage de la silice peut aller de 13 à 14%.

II-3- Choix du site d'implantation de l'usine

Les sondages de reconnaissance géologique effectués, ont permis d'identifier d'importantes réserves de calcaire et de matériaux silico-alumineux pouvant répondre aux besoins de l'usine pour une période proche de 100 ans. La carrière de calcaire Ras El Ma s'étend sur une surface de 120 ha.

II-3-1-Exploitation à long terme

Le calcaire est la matière de base de fabrication du ciment, ce qui implique que la qualité de cette dernière, le souci est donc dans la qualité d'où la nécessité de la maîtrise de sa consommation à travers la maîtrise de sa qualité.

Mais la difficulté se situe dans la variation de la composition chimique du calcaire d'un gradin à un autre. Dans le cas de REM l'exploitation se fait sur des gradins qui se répartit sous forme de grandes marches. L'exploitation commence par la partie supérieure jusqu'à un niveau de 32m.

Cette opération est dite *sondage à long terme* afin de prédire si le calcaire peut servir pour la fabrication du ciment ou non, car il existe plusieurs types de calcaire (marnes, craie, calcite...) et qui ne peuvent pas être utilisés dans la fabrication du ciment.

Dans la composition chimique du calcaire on trouve des éléments majeurs comme la chaux, et d'autres mineurs :

TABLEAU 11 : EXEMPLE DE COMPOSITION CHIMIQUE DE LA MATIERE PREMIERE D'UNE CIMENTERIE

		Eléments majeurs (%)				Eléments mineurs (%)				% CRU
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Chlorures	
Matières principales	Calcaire	1.85	0.88	0.49	52.51	0.52	0.31	0.01	0.0055	79
	schiste	48.95	11.77	5.53	12.58	2.29	0.85	0.03	0.0125	15
Matières de correction	Schiste	60.52	20.51	5.93	1.61	0.68	3.58	0.09	0.0085	5
	Minerai de fer	38.52	4.02	50.23	1.23	0.55	0.47	0.05	0.0075	1

D'après ce sondage on trouve des zones avec des pourcentages convenables à la fabrication, donc il faut faire une procédure d'exploitation, après avoir situé des zones, il faut les positionner.

Pour ce faire on a utilisé un GPS : Simble Juno SB pour avoir des coordonnées de chaque zone dont on va faire un tir.

A l'aide d'un logiciel propre à la société on peut fait une estimation de la carrière tout en identifiant les coordonnées et les analyses d'une telle zone de tir. Ce logiciel est appelé le QSO.

Qu'est-ce que le QSO:

Le Quarry System Optimizer est utilisé pour l'analyse interactive des ressources. C'est un outil de planification des carrières pour les besoins spécifiques de la préparation des matières premières pour le ciment.

Ce logiciel se présente sous forme de blocs dont chacun vaut 1000 tonnes de calcaire.

Les caractéristiques les plus importantes du QSO sont :

- ↗ Améliorer les vues 3D avec des éléments topographiques.
- ↗ Utiliser un module d'optimisation linéaire pour calculer les ressources et les réserves.
- ↗ Appliquer les restrictions d'angle d'extraction et inclure le gaspillage.
- ↗ Développer les horaires miniers d'une manière semi-automatique (interactive).
- ↗ Les résultats donnent une forme numérique ou graphique.
- ↗ Permettre de combiner plusieurs carrières en un seul modèle de dépôt.

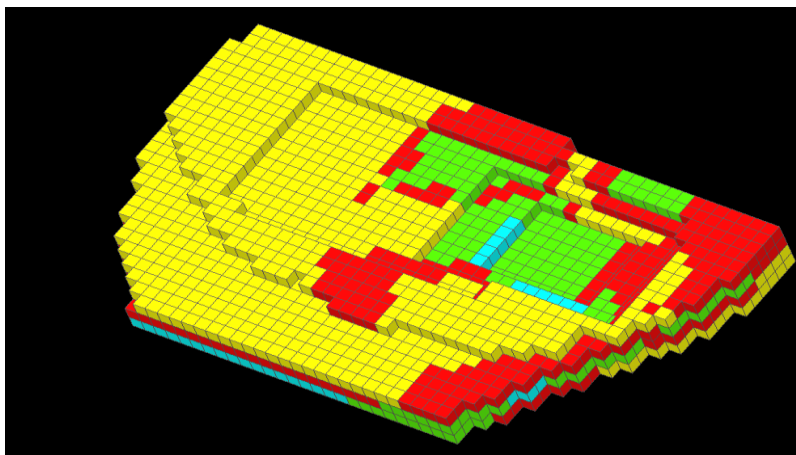


FIGURE 25: VUE 3D DE LA SUPERPOSITION DES GRADINS DE LA CARRIERE RAS EL MA

Avec ce logiciel on peut savoir si la carrière est limitée ou non, une estimation des consommations futures, l'état de la carrière et les coordonnées de chaque position de tir telle quelle. Donc on peut estimer les réserves

L'importance du QSO apparait lorsqu'on parle des gradins. Dans notre carrière on a trois gradins, donc la consommation du calcaire doit contenir un mélange des trois en garantissant la qualité voulue.

II-3-2-Exploitation à court terme

Après avoir travaillé sur l'exploitation à long terme à l'aide du QSO on va maintenant s'intéresser à l'exploitation a cours terme.

Le QuarryMaster est un autre logiciel propre à la société chargé de cette mission.

Qu'est-ce que le QM :

Il s'agit d'un programme informatique pour la planification de production quotidienne. Il a été conçu pour aider le gestionnaire de carrière et de s'assurer que :

- ↗ Le tonnage requis et garanti.
- ↗ Les limites de qualités sont emplies.
- ↗ La qualité est constante et homogène.
- ↗ La consommation de correctifs est dans la fourchette souhaitée.
- ↗ Les équipements disponibles et la main-d'œuvre sont utilisés de la manière la plus efficace.
- ↗ Les couts sont maintenus aussi bien que possible.
- ↗ La topographie doit être mise à jour après chaque sautage.

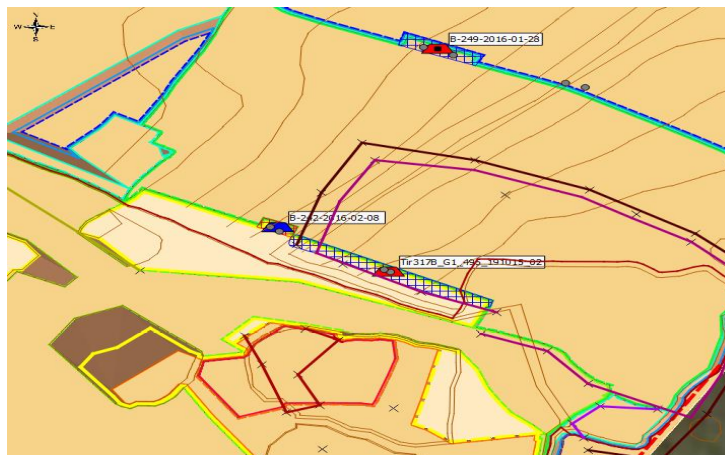


FIGURE 26 : VUE DU TIR SOUS FORME 3D

Ce logiciel est capable de faire une simulation entre les 3 gradins. On procède de la façon suivante :

Ont fait entrer 3 inputs :

- Les analyses des cutting,
- Les coordonnées de la zone exploitée (Z=470, X=304856.2, Y=3757907.9)
- Notre objectif concernant les pourcentages de silice, d'alumine, de Fer et aussi les modules (MS, MAF, LSF) qu'on veut avoir dans notre cru.

Ce sont des modules cimentiers qui rassemblent principalement les éléments majeurs pour la fabrication du ciment

☛ **FSC : Facteur de Saturation en Chaux** : c'est la teneur en chaux réellement présente par rapport à la chaux standard.

$$FSC = \frac{CaO}{(2.8 \times SiO_2 + 1.18 \times Al_2O_3 + 0.6 \times Fe_2O_3)} * 100$$

Le F.S.C idéal est de 100 (avec pet coke comme combustible)

- Si le F.S.C est élevé (>> 100), on a :
 - Une consommation calorifique élevée (cuisson difficile),
 - Une consommation des briques
 - Une augmentation de la teneur en chaux libre,
 - Une augmentation de C₃S (par conséquent résistance du ciment),
 - Une augmentation de la Chaleur d'hydratation (Si C₃A augmente).
- Si le F.S.C est faible (<< 100), on obtient :
 - Un cru facile à cuire
 - Une faible consommation calorifique
 - Une faible teneur en chaux libre (en raison de l'excès de la phase liquide dans la zone de cuisson)
 - Le croutage est lavé
 - Une baisse de C₃S et augmentation de C₂S. qui facilite la formation des boulets du clinker dans le four

↗ **MS : Module silicique.**

- **MAF : Module Alumino-Ferrique.**

$$MS = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

$$MAF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

La caractérisse la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Quand MAF augmente, la viscosité de la phase fluide augmente, par conséquent, la cuisson devient d'où une grande consommation d'énergie.

- Quand A/F est faible, la viscosité de la phase fluide diminue ;
- Un A/F < 1.65 il ne se forme plus de phase C_3A ;
- Plus A/F est élevé, plus la proportion d'alumine est grande plus la phase liquide est visqueuse et plus la température de clinkérisation sera élevée ;
- Les ciments ne contenant pas de C_3A possèdent une forte résistance chimique aux sulfates.

II-3-3- Résultats

Donc le résultat de cette simulation nous donne le rapport suivant :

TABLEAU 12 : TABLEAU REPRESENTANT LES RESULTATS DE LA SIMULATION

Raw Mix	Raw Mix		Raw Mix		Blast/Pile	Blast/Pile	Quarry	Corrective 1	Corrective 2	Corrective 3
	QuarryMaster	User	Min	Max	B-485_1-2017-05-24	B-485_2-2017-05-24		Fe_Ore	Sand	Schist
Tonnage Total					886	343	1229	99999976	100000000	99999728
Taken QuarryMaster	100				0	89	89	1	3	8
percentage Taken User		100	0	100	0	89	89	1	3	8
percentage		100,0%			0,0%	88,5%	88,5%	0,5%	3,1%	7,9%
Rest Tonnage Blast/Pile					886	255				
SiO2	13,45	13,45	0,00	100,00	6,64	6,37	6,37	32,45	90,15	61,43
Al2O3	3,53	3,53	0,00	100,00	2,16	2,11	2,11	6,24	1,41	20,07
Fe2O3	1,96	1,96	0,00	100,00	1,53	1,26	1,26	52,14	3,90	5,83
CaO	43,97	43,98	0,00	100,00	49,04	49,47	49,47	2,79	1,07	1,89
MgO	0,63	0,62	0,00	100,00	0,53	0,52	0,52	0,98	0,30	1,89
K2O	0,44	0,45	0,00	100,00	0,19	0,17	0,17	0,35	0,17	3,66
Na2O	0,08	0,08	0,00	100,00	0,06	0,06	0,06	0,15	0,01	0,33
SO3	0,05	0,05	0,00	100,00	0,07	0,05	0,05	0,11	0,00	0,10
LS	102,00	102,07	102,00	103,00	221,55	233,96	233,96			
SR	2,45	2,45	2,45	2,50	1,80	1,89	1,89			
AR	1,80	1,80	1,80	1,85	1,41	1,67	1,67			



FIGURE 27 : VUE DE 3D DE LA POSITION DU TIR

II-3-4- Interprétations des résultats

Le tableau précédent nous donne la composition chimique du cru réalisé d'après les exigences demandées.

A travers ce rapport les services concernés vont suivre d'une manière permanente l'orientation de l'exploitation de la carrière (position de tir, zone à exploiter...).

Le rapport nous donne les informations suivantes :

↻ Les proportions de chaque matière qui entre dans la préparation du mélange cru, ces proportions sont comparées à celles utilisées au cours de la production.

L'écart entre les proportions de la simulation et celles réalisées devrait être très faible, ce qui montre la fiabilité de cette simulation.

↻ A travers ce rapport le producteur devrait prendre connaissance de :

- ✚ Quantités nécessaires pour la réalisation de ce mélange (gestion de stock des matières premières).

- ✚ Nature de ce mélange (composition chimique) qui va servir pour la production.

↻ Ce rapport nous permet l'optimisation des proportions des matières consommées (principalement les matières achetées : sable et minerai de fer) dont le prix est très élevée.

Conclusion générale

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (chaux, silice, alumine et minéral de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des carrières par extraction ou dynamitage. Ces minéraux naturels sont ensuite broyés mécaniquement. A ce stade, d'autres minéraux sont ajoutés pour corriger la composition chimique du ciment. Le broyage permet de produire une fine poudre, appelée « cru de ciment », qui est ensuite préchauffée, puis placée dans un four ou elle est soumise à d'autres procédés.

Donc la qualité du ciment dépend en premier lieu de la qualité du cru, ce dernier dépend des matières premières principalement le calcaire.

Une étude concernant le calcaire dans la carrière de Ras El Ma est effectuée afin de voir la composition chimique de ce dernier dans les trois gradins qui semblent être hétérogènes.

Une simulation basée sur des modules (MS, MAF, LSF) a été faite à l'aide des logiciels (QM et QSO).

Les résultats de cette simulation sont 20% du 1^{er} gradin 50% du 2^{eme} gradin et 30% du 3^{eme} gradin pour produire un meilleur cru avec une meilleure qualité et un coût bas.



Références bibliographiques

<http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants/ciment>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Holcim>

www.holcim.co.ma

www.lafarge.ma