

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Technologie des matériaux**

Intitulé du mémoire

**Etude de l'effet des agents de mouture sur la  
durabilité des mortiers.**

Présenté par :

Chibani Younes

Encadré par :

Mr : D. Touil

Année universitaire 2015/2016

## REMERCIEMENTS:

J'exprime ma profonde gratitude tout d'abord à « الله » de m'avoir donné le courage, la volonté et la force pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier ici :

Monsieur : D : Touil professeur à l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 01 par leur attentions et dévouement particulier ainsi que par leur directives ont permis d'atteindre humblement notre but escompté.

J'exprime ma reconnaissance aux Mr ; Hamid Derradji et Jacques TOUPIN directeurs successifs du laboratoire, pour m'avoir accueilli dans leurs équipes.

Je tiens également à remercier les membres du Laboratoire control qualité de SCMI Mafteh qu'ils ont répondu toujours répondu à mes interrogations et aux Problèmes divers (matériels entre autres), en particulier je remercie l'opérateur : Abdnour HAMRAOUI.

.je reste redevable également envers tous les professeurs qui se sont pencher de très près de notre formation durant l'année théorique et les remerciens pour que nous se sourions dire en les assurant dans ce mémoire et leurs prières ont se me transmettre le vœu de réussir.

Enfin, je remercie ma famille pour son soutien et pour m'avoir permis d'arriver à ce niveau de compétences.

Pour terminer, je tiens à remercier mes chers collègues et amis, pour leur accompagnement à tous les niveaux tout le long de la thèse.



## TABLE DES MATIERES :

- Résumé
- Remerciements
- Table des matières
- Liste des figures
- Liste des tableaux

**INTRODUCTION GENERALE :** ..... 01

### **CHAPITRE I : PROCEDES DE PRODUCTION DU CIMENT PORTLAND COMPOSITE A L'UNITE DE MAFTEH :**

I.1 Présentation de la Cimenterie de Meftah.....02

I.2. Procédé de fabrication de l'unité.....03

I.2.1 Réception et contrôle des matières premières.....03

I.2.2 Dosage, broyage, séchage et homogénéisation du mélange cru.....05

I.2.2.1 Propriétés d'usage du mélange cru .....06

Conclusion .....10

### **CHAPITRE II : BROYAGE DU CLINKER A CIMENT ET LES AGENTS DE MOUTURE.**

#### **Introduction :**

II.1 Le broyage du clinker à la cimenterie de Meftah.....12

II.1.1 Description du circuit de broyage du clinker.....12

II.1.2 Processus de broyage.....15

II.2 Performances du procédé de broyage.....16

II.2.1 Broyabilité du clinker .....16

II.2.2. Broyabilité des ciments.....17

II.2.3 Cinétique de broyage du clinker.....17

II.3 Quantification du procédé de broyage.....19

II.3.1 Test de Bond.....19

II.3.2 Utilisations pratiques des lois énergétiques.....20

II.4 Amélioration du rendement de broyage et moyens d'actions .....21

II.4.1 Paramètres opératoires du procédé de broyage.....21

II.4.2 Composition chimique et minéralogique du clinker.....21

II.5 Utilisations des agents de mouture et nature d'actions .....	23
II.5.1 Nature des agents de mouture :.....	23
II.5.2 Mécanisme global d'action des agents de mouture :.....	23
II.5.3 Analyse bibliographique sur la description du mode d'action des agents de mouture.....	24.
<b>CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES :</b>	
III.1 Matériaux utilisés .....	27
III.2 Caractérisation des matériaux utilisés .....	27
III.2.1 Caractérisation Chimique .....	27
III.2.2 Caractérisation de la finesse du ciment.....	28
III.3. Protocole expérimental .....	29
III.3.1 Préparation des éprouvettes de mortiers à ciment.....	29
III.3.2 Caractérisation mécanique des mortiers.....	31
III.3.3 Les teste de répétabilité / reproductibilité.....	32
III.3.4 : les tableaux de performance : .....	32
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATOPNS</b>	
IV.1 Caractérisation chimique du ciment :.....	33
IV.2 Caractérisation de la finesse des ciments .....	33
IV.3 Résistances mécaniques du mortier de ciment sans adjuvant.....	33
IV.3 Résistances mécaniques du mortier de ciment avec adjuvant.....	34
IV.3.1 Effet de l'addition des agents de mouture à différents dosage.....	34
IV.4. Comparaison de l'effet des agents de mouture sur les résistances du mortier.....	40
IV.4.1 Dosage de 250g/t .....	40
IV.4.2 Dosage de 350g/t .....	41
IV.4.3 Dosage de 500g/t .....	42
IV.4.4 Dosage 700g/t : .....	43
IV.5 : les testes de reproductibilité est de répétabilité : .....	45
IV.6 : Les tableaux de performance : .....	46
<b>CONCLUSIO GENERALE.....</b>	<b>48</b>
<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>49</b>



## **LISTE DES FIGURES :**

**Figure I.1 :** Localisation de l'unité de Meftah

**Figure I.2 :** Procédé de fabrication de ciment par voie sèche

**Figure I.3 :** Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie

**Figure I.4 :** .Extraction des matières premières de leurs carrières

**Figure I.5 :** Atelier de concassage

**Figure I.6 :** Pré homogénéisation et stockage des matières premières

**Figure I.7 :** Broyeur à boulets du cru de la cimenterie

**Figure I.8 :** Le clinker

**Figure I.9 :** Ligne de cuisson d'une cimenterie

**Figure I.10 :** Circuit fermé de broyage du clinker

**Figure II.1 :** Circuit de broyage de la cimenterie de Meftah

**Figure II.2 :** Broyeur à deux compartiments boulets-boulets

**Figure II.3 :** Le séparateur des particules de ciment

**Figure II.4 :** Variation de la surface spécifique Blaine en fonction du temps de broyage [10]

**Figure II.5 :** Variation de  $X_0$  et  $n$  en fonction de la surface spécifique Blaine du clinker [10]

**Figure II.6 :** Représentation des erreurs de dimensionnement associées à l'utilisation de la méthode de Bond

**Figure III.1 :** Analyse par Fluorescence X

**Figure III.2 :** Le Perméabilimètre de Blaine

**Figure III.3 :** le malaxeur

**Figure III.4 :** le moule des éprouvettes et table à

**Figure III.5 :** Bains de conservation des éprouvettes.choc de moulage

**Figure III.6 :** Essais mécaniques de flexion et de compression

**Figure IV.1 :** Evolution de la résistance à la compression du mortier à ciment sans adjuvant

**Figure IV.2 :** Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant CRYSO

**Figure IV.3 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant CRYSO.

**Figure IV.4:** Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant BASF.

**Figure IV.5 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant BASF.

**Figure IV.6 :** Evolution de la résistance à la Flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant MAPEI.

**Figure IV.7 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant MAPEI.

**Figure IV.8 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant TEKNACEM.

**Figure IV.9 :** Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 250g/t sur les résistances à la compression

**Figure IV.10 :** Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 350g/t sur les résistances à la compression

**Figure IV.11 :** Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 500g/t sur les résistances à la compression

**Figure IV.12 :** Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 700g/t sur les résistances à la compression

## **LISTE DES TABLEAUX :**

**Tableau I.1 :** Teneurs des oxydes dans le cru.

**Tableau I.2 :** Teneurs moyennes des composants secondaires.

**Tableau I.3:** Différentes phases du clinker.

**Tableau I.4 :** Classes de résistances et domaines d'application des ciments avec ajouts.

**Tableau II.1 :** Dimensions géométriques et paramètres opératoires du broyeur.

**Tableau II.2 :** Spécifications du filtre à manches.

**Tableau II.3 :** Spécifications du filtre à manches.

**Tableau II.4 :** Caractéristiques des ventilateurs.

**Tableau II.5 :** Work index moyen du clinker .

**Tableau II.7 :** Avantages pratiques d'un agent de mouture.

**Tableau III.1 :** Quantités additionnées de l'adjuvant BACF au mortier.

**Tableau IV.1:** Analyse chimique du ciment sans adjuvant.

**Tableau IV.2 :** Refus cumulé et Surface spécifique de Blaine.

**Tableau IV.3 :** La reproductibilité de test n° :01.

**Tableau IV.4 :** La reproductibilité de test n° :02.

**Tableau IV.5 :** La reproductibilité de test n° :03.

**Tableau IV.6 :** La reproductibilité de test n° :04.

**Tableau IV.6 :** La reproductibilité de test n° : 5+6.

**Tableau IV.7 :** La reproductibilité de test n° :07.

**Tableau IV.7 :** la performance des agents de mouture sur le 02 jours.

**Tableau IV.8 :** la performance des agents de mouture sur le 07 jours.

**Tableau IV.9 :** la performance des agents de mouture sur le 28 jours.

## الملخص:

خلال تطوير اسمنت بورتلاند اصطناعي، الذي شارك في طحن الكلنكر مع إضافة الحجر الجيري المحرز في طواحين الكرات الصناعية. إدراج عامل طحن يساعد في هذه العملية يسهل سيولتها مسحوق الاسمنت ويحسن من إنتاج أسطح محددة. هذه الدراسة تتمثل في اختبار تأثير 04 عناصر طحن من الأسماء التجارية : CRYSO, BASF, MAPEI et TEKNACEM على استدامة الاسمنت المركب المتحصل عليه . لتقريب العملية الصناعية , التراكيز 250g/t, 350g/t, 500g/t, et 700 g/t الخاصة بالمضافات من اجل تحضير عينات من الاسمنت في الهاون . النتائج الأساسية المتحصل عليها تبين ان في عمر قصير : التركيز الأفضل هو 250g/t و المضاف الأفضل هو عامل CRYSO الذي يعطي زيادة حوالي 17% من المقاومة مقارنة مع الاسمنت بدون مضاف ( الشاهد) , و الأضعف هو عامل BASF الذي قدم نتائج منخفضة بحوالي 14% . في حالة الفترات الطويلة المدى : من اجل تركيز 500 g/t العامل BASF يتحول الى افضل مضاف و بدرجة اقل مضاف MAPEI 123

**الكلمات الرئيسية:** فذائف الهاون، الاستدامة، المضافات، القوة الميكانيكية.

## ABSTRACT:

During the development of the artificial Portland cement, the co-grinding of clinker with limestone addition made in mills Industrial balls. The incorporation of grinding aids in this process facilitates the powder flowability of the cement and improves the production of specific surfaces. This study is to examine the laboratory the effect of 04 milling agents of trade names CRYSO, BASF, MAPEI TEKNACEM and sustainability of the compound obtained cement. To approach industrial reality, dosages of 250g / t, 350g / t, 500g / t and 700 g / t of these agents in the material charge for the preparation of cement mortar specimens were selected. The main results show that young age and the dosage of 250g / t, the best additive is CRYSO with a 17% increase in compressive strength compared to mortar without adjuvant and the poor is the agent with BASF 14% decrease. As for long term for a dosage of 500 g / t , BASF agent becomes the best adjuvant and a lesser degree MAPEI 123 agent.

**Keyword:** mortars, sustainability, additives, mechanical strength.

## Résumé:

Lors de l'élaboration du ciment portland artificiel, le co-broyage du clinker avec l'ajout calcaire est effectué dans les broyeurs à boulets industriels. L'incorporation d'agents de mouture dans ce processus facilite la fluidité de la poudre du ciment et améliore la production de surfaces spécifiques. Cette étude consiste à examiner au laboratoire l'effet de 04 agents de mouture de noms commerciaux CRYSO, BASF, MAPEI et TEKNACEM sur la durabilité

du ciment composé obtenu. Pour approcher la réalité industrielle, les dosages de 250g/t, 350g/t, 500g/t, et 700 g/t de ces agents dans la charge du matériau pour la préparation des éprouvettes de mortier à ciment ont été sélectionnées. Les principaux résultats obtenus montrent qu'au jeune âge et au dosage de 250g/t, le meilleur additif est le CRYSO avec une augmentation de 17% de résistance de compression par rapport au mortier sans adjuvant et le médiocre est l'agent BASF avec une diminution de 14%. Quant à long terme pour un dosage de 500 g/t l'agent BASF devient le meilleur adjuvant et d'un degré moindre l'agent MAPEI 123.

**Mots clés:** mortiers, durabilité, adjuvants, résistance mécanique.

# **Introduction générale**

Le broyage du clinker dans les broyeurs à boulets est incontestablement le type de procédé le plus répandu dans l'industrie du ciment. L'incidence économique de ce type de procédé est lourde, à cause des frais d'entretien, de l'énergie électrique et de la charge des boulets consommés. Cette étape de broyage consomme 40% de l'énergie nécessaire à la fabrication du ciment, ce qui justifie qu'on cherche à accroître son efficacité. De plus, l'énergie électrique consommée par les broyeurs à boulets étant souvent réalisée par des centrales thermiques brûlant des combustibles pétroliers (fuel-oil, gaz), toute économie d'énergie permet de réduire non seulement la facture énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.).

Pour diminuer cette consommation d'énergie et afin d'améliorer certaines propriétés du ciment, les cimentiers utilisent des agents de mouture lors du broyage. Ces agents de mouture sont des produits qui augmentent l'efficacité du broyage quand ils sont ajoutés au clinker en petite quantité (0,02 à 0,3% de la masse du clinker). Ils permettent notamment d'augmenter la production, d'améliorer la finesse de mouture et de diminuer la durée et l'énergie de broyage. Par ailleurs, en empêchant les grains de s'agglomérer, les agents de mouture donnent une meilleure fluidité permettant d'éviter le bourrage et le colmatage du ciment dans ces systèmes.

Il est couramment constaté dans la littérature, lors des études réalisées sur les agents de mouture, que leur efficacité est liée à une action en surface des grains, qui diminue les forces d'agglomération de la poudre et améliore son écoulement, donc sa disponibilité dans la zone effective de broyage.

Par ailleurs, en dépit de son utilisation large et son intérêt pratique industriel dans le broyage du clinker à ciment, leurs effets sur la nocivité et les résistances mécaniques du béton et du mortier produits restent peu connues.

En conséquence et afin de répondre à cette insuffisance, l'étude expérimentale que nous effectuerons visera à analyser l'effet de différents agents de mouture utilisés par l'unité de de ciment de Meftah sur la durabilité du mortier produit.

## **Chapitre I**

### **Procédé de Production du Ciment Portland Composite de l'Unité de Meftah**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principales étapes du processus de fabrication du ciment Portland composite de l'unité de Meftah, tout en précisant sa composition finale à l'expédition pour la préparation du mortier et du béton.

La production de ciment s'effectue en deux étapes principales :

- La production d'un semi-produit désigné sous le nom de clinker par cuisson de matières premières (calcaire, argile, alumine et oxyde de fer), préalablement broyés finement et mélangées dans les proportions bien définies.
- La fabrication du ciment par co-broyage du clinker avec du gypse (régulateur de prise) et éventuellement le calcaire, appelé ajout.

Plusieurs types de ciments sont fabriqués. Les ciments « Portland CEMI » (ciment pur sans ajout, constitué de clinker et de gypse) et les ciments « Portland composite CEMII » (ciments avec ajouts de calcaire). Ces derniers représentent une part importante du ciment fabriqué par l'unité et le secteur cimentier national

### I.1 Présentation de la Cimenterie de Meftah

La Cimenterie de Meftah d'une superficie 429 60 m<sup>2</sup> est située à 27 kilomètres d'Alger. Elle est localisée à proximité de la Route Nationale N° 29, reliant la commune de Meftah à celle de Khemis-El-Khechna à l'est, et l'Arbaa à l'ouest et à 4 km de l'autoroute Est Ouest (Fig. I.1). La société des ciments de la Mitidja (S.C.MI) est une entreprise algérienne filiale de groupe industriel des ciments d'Algérie GICA. En partenariat avec Lafarge, depuis juin 2008, la SCMI enregistre le 31 décembre 2015 une production 1.350.000 tonnes de ciment.

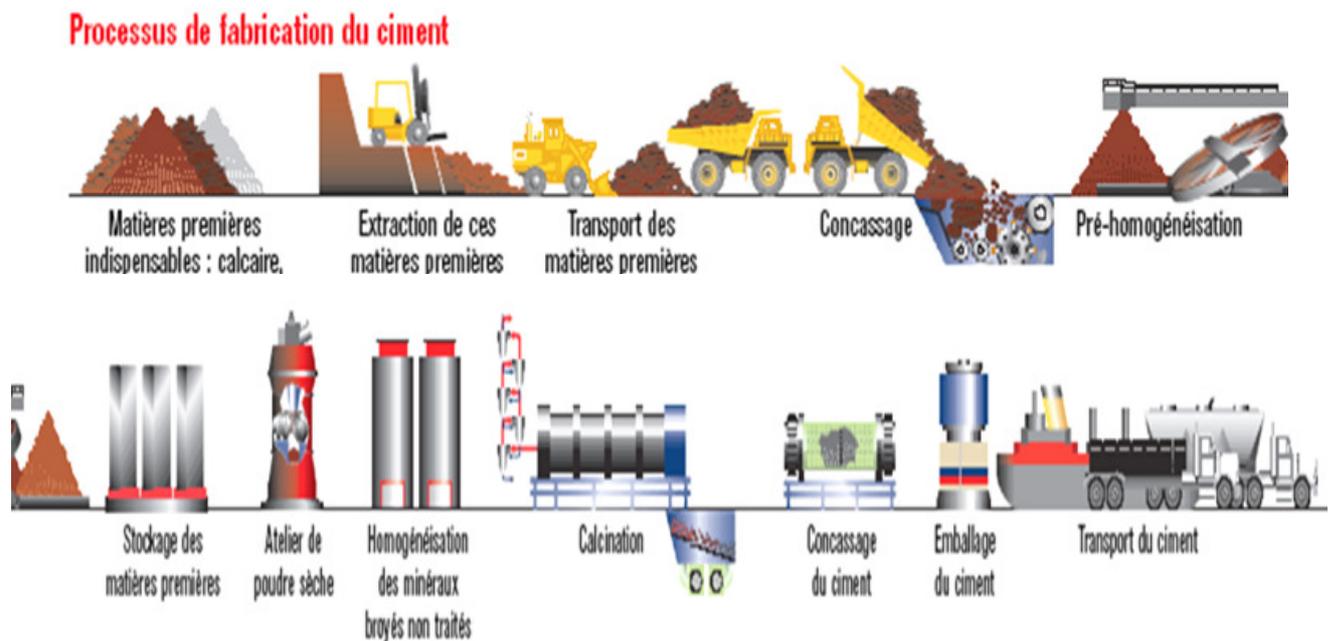


Fig.I.1. Localisation de l'unité de Meftah

## I.2. Procédé de fabrication de l'unité

Les procédés de fabrication du ciment par voie sèche constituent à ce jour les modes d'élaboration du ciment les plus modernes et les plus performants. La fabrication du ciment Portland par voie sèche passent par différentes étapes de transformations physico-chimiques, sous l'action d'importantes quantités d'énergie tel qu'illustré en figure I.2.

Comme son nom l'indique, ce procédé utilise une matière sèche où les étapes de séchage se déroulent à l'extérieur du système de cuisson. La récupération d'une grande partie des calories, contenues dans les gaz du four, et l'absence de déshydratation en font la méthode la moins vorace en consommation d'énergie thermique [1]. Le progrès dans la mouture fine et l'homogénéisation des mélanges secs permet d'obtenir aujourd'hui des ciments Portland de qualité.



**Fig. I.2. Procédé de fabrication de ciment par voie sèche**

### I.2.1 Réception et contrôle des matières premières

Les matières premières principales entrant dans la fabrication des ciments portlands sont constituées de calcaire, d'argiles, de sables, et de minerais de fer (figure I.3). Les contrôles de réception des matières premières acceptées sont souvent limités à la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de base du matériau (titre en carbonate d'un calcaire, etc..),

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert, les

Carrières de calcaire et d'argile se situent respectivement à 1 km et 4km de la cimenterie. L'extraction de ces matières premières (figure I.4) se fait par abattage à l'explosif. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière.

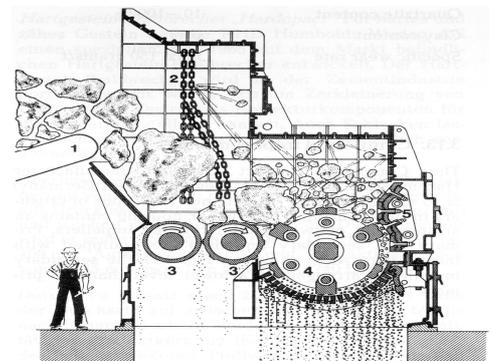


**Figure I.3. Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie**



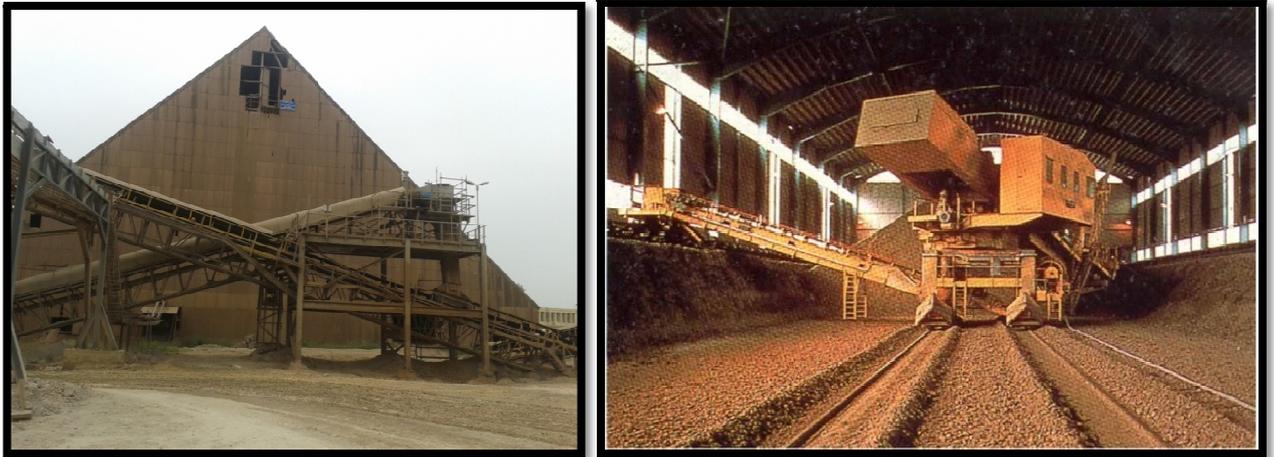
**Figure I.4. Extraction des matières premières de leurs carrières.**

Le calcaire abattu à l'explosif subit deux opérations de concassage (figure I.5). Un concassage primaire qui permet de réduire la granulométrie de 1000 mm à l'entrée jusqu'à 100 mm à la sortie et un second concassage qui permet de réduire la granulométrie jusqu'à 30mm. L'argile subit un concassage unique qui réduit la taille des particules à 30 mm



**Figure I.5 : Atelier de concassage**

Après le concassage, une combinaison intime des différents matériaux préalablement concassés doit être réalisée, de manière à disposer d'un mélange de caractéristiques chimiques et physiques uniformes dans sa masse, cette étape est la pré homogénéisation des matières premières dans des silos de stockage (figure I.6).



**Figure I.6. Pré homogénéisation et stockage des matières premières**

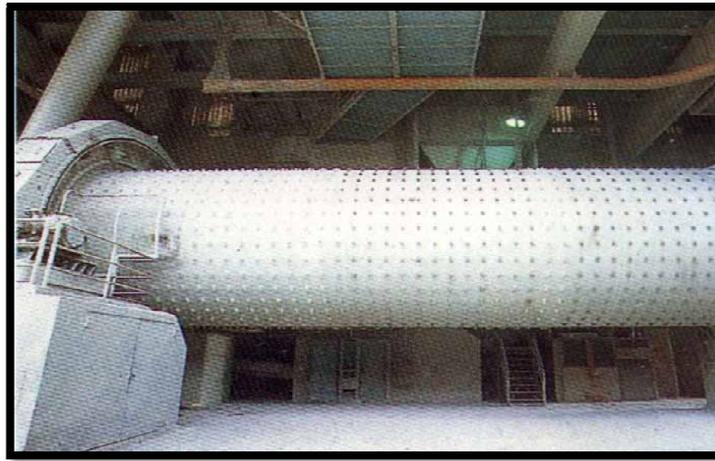
### **I.2.2 Dosage, broyage, séchage et homogénéisation du mélange cru**

Le dosage précis des matériaux introduits dans le broyeur est important car il détermine la constance de la composition chimique du cru, essentielle pour la stabilité de fonctionnement du four et pour l'obtention d'un ciment de qualité. La matière première ainsi dosée, conformément aux analyses du laboratoire, est acheminée au moyen d'une bande transporteuse vers une trémie, pour être ensuite déversée dans un convoyeur d'alimentation du broyeur.

Le mélange cru est broyé dans un broyeur à boulets (figure I.7) à deux compartiments (compartiment de dégrossissage et de finition) en poudre fine et séché simultanément à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur. Le réglage des paramètres de la séparatrice aéraulique du circuit de broyage utilisé pour trier le produit à la sortie du broyeur permet d'obtenir la finesse désirée de la farine crue d'un refus de l'ordre de 13 % sur le tamis de 90  $\mu\text{m}$ . Après broyage, l'homogénéisation pneumatique du mélange cru est réalisée par un brassage intime par l'air dans des silos conçus pour contenir plusieurs heures de production de farine crue.

#### **I.2.2.1 Propriétés d'usage du mélange cru :**

La finesse et la composition chimique du produit issu du broyage des matières premières jouent un rôle important dans la cuisson du clinker.



**Figure I.7. Broyeur à boulets du cru de la cimenterie**

### 1.1. Composition chimique du mélange cru

La préparation du cru consiste à réaliser un mélange homogène de matières premières dans les proportions permettant d'obtenir un clinker dont la composition chimique respecte les limites précisées par le tableau I.1 suivant:

**Tableau I.1 : Teneurs des oxydes dans le cru**

Teneur %	Oxyde						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Limite	60-69	18-24	4-8	1-8	< 5	< 2	< 3
Moyenne	65	21	6	3	2	1	1

Ce tableau indique les valeurs usuelles dans lesquelles s'inscrit la composition de cru de la cimenterie. Il faut élaborer des mélanges des matières de base, de façon à obtenir la composition chimique voulue. Il est très souvent nécessaire d'affiner cette composition par l'ajout. Les composants secondaires de la farine crue peuvent influencer la qualité du clinker, leur dosage ne doit pas être négligé. De ce fait, les normes de qualité de clinker imposent une limite supérieure de ces constituants. Des exemples de teneurs moyennes d'une farine crue industrielle sont cités dans le tableau I.2. La composition chimique de la farine crue, est déterminée au niveau du laboratoire de la cimenterie par Diffraction des rayons X.

**Tableau I.2 : Teneurs moyennes des composants secondaires [2]**

Element	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	MgO
Teneur (%)	0,5 – 1,3	0,05 -0,5	0,01- 0,02	0,1 – 0,5	< 2

### I.2 Finesse du mélange cru :

La finesse optimale de broyage de cru se détermine expérimentalement, il convient cependant de noter que les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de crus très fins. A l'échelle industrielle, la finesse de la farine crue se caractérise par un refus au tamis 90 $\mu\text{m}$  de l'ordre de 5 à 20 % [2]. Pliskin[3] rapporte que la finesse de la farine crue utilisée dans l'industrie cimentière française, est un refus de l'ordre de 1 à 1.5 % au tamis 160  $\mu\text{m}$ .

### I.3 Cuisson du clinker :

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant, pour obtenir des réactions chimiques complètes (clinkérisation) conduisant à la formation des principaux composés de ce semi-produit (figure I.8).

Le procédé de cuisson (figure I.9) comporte un préchauffeur à cyclones, un four rotatif et un refroidisseur à grilles. Le préchauffage de la farine crue s'effectue dans la partie supérieure du préchauffeur à cyclones. La décarbonatation a lieu dans la partie basse du préchauffeur et la partie amont du four rotatif. La clinkérisation se fait toujours dans la partie aval du four rotatif. Les gaz chauds sont produits dans le four par combustion du gaz naturel. Des ventilateurs situés après le préchauffeur et le refroidisseur aspirent les gaz à travers ces installations. Après passage dans le préchauffeur, la farine progresse vers l'aval sous l'effet de la rotation et la pente du four (3.5%). Au fur et à mesure de son acheminement, la matière s'échauffe jusqu'à clinkérisation vers 1400 à 1500°C. A la sortie du four, le clinker tombe dans un refroidisseur où se produisent les échanges thermiques.

Le clinker se compose essentiellement des 4 phases cristallines principales indiquées au tableau I.3 ci-dessous. Ces phases représentent environ 95% de la masse du clinker et sont constituées par les quatre oxydes  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .



Figure I.8. Le clinker



Figure I.9 : Ligne de cuisson d'une cimenterie

Les composants secondaires du clinker sont les oxydes MgO, SO<sub>3</sub>(sous forme de l'ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Cl, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et TiO<sub>2</sub>. Les abréviations C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF correspondent réellement à des phases pures qui n'existent pas dans le clinker industriel. Chacune des combinaisons citées forme des solutions solides avec d'autres oxydes.

Minéraux purs	Formules	Abréviation	Minéral présent dans le clinker	% dans le clinker
Silicate tricalcique	3 CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Alite	45-65
Silicate bicalcique	2 CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	Belite	10-30
Aluminate tricalcique	3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Aluminate	5-15
Ferrite d'aluminium tetracalcique	4 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> AF	Alumino-Ferrite	5-15

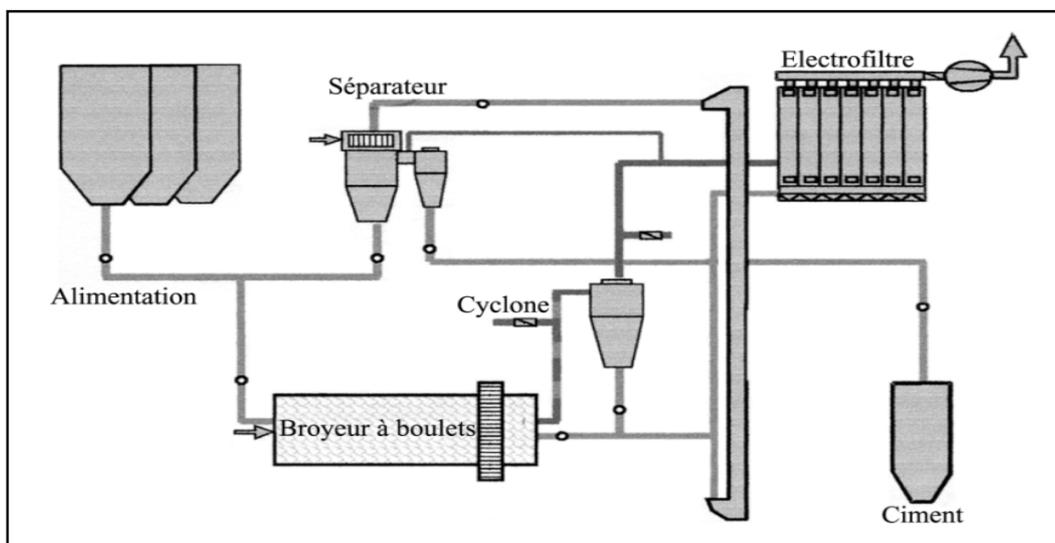
**Tableau I. 3 : Différentes phases du clinker[2]**

#### I.4 Broyage de clinker et production du ciment :

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granulés de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 – 5%) comme régulateur de prise et éventuellement 15 à 20 % d'un ou deux constituants secondaires. Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains. Ce traitement développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques.

##### I.4.1 Procédé de broyage du clinker :

Le broyage du clinker est généralement réalisé en circuit fermé (figure I.10). Le processus de broyage sera détaillé en chapitre suivant :



**Figure I.10 : Circuit fermé de broyage du clinker**

#### **I.4.2 Finesse du ciment :**

La finesse du ciment lors du broyage du clinker est exprimée en termes de surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), mesurée par le test de Blaine, et parfois par la courbe granulométrique. La surface spécifique Blaine est la surface totale des grains contenus dans l'unité de masse de l'ensemble des particules. La surface spécifique Blaine d'un ciment portland ordinaire, d'une valeur supérieure ou égale à  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  [4] dans l'industrie du ciment, est une condition de première satisfaction pour la préparation du béton. Plus les particules du ciment seront fines, plus la surface mouillable sera grande et plus les performances du ciment seront élevées.

#### **I.4.3 Les ajouts dans le ciment :**

L'utilisation des ajouts actifs minéraux dans l'industrie cimentière présente plus d'avantages par rapport aux ajouts inertes. Les tufs sont des ajouts actifs minéraux d'origine volcanique, de la famille des pouzzolanes, les cendres, les pierres ponce, les trass et les vitrophires. Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la "portlandité" ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) du ciment qui se dégage lors de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$ , pour former des composés difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment. Les constituants secondaires ayant une réactivité moindre que le clinker Portland, les ciments composés sont broyés plus finement que les ciments purs, de  $3500$  à  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Le rapport entre le clinker et l'ajout minéral est établi en fonction de l'activité de l'ajout et de la composition minéralogique du clinker. Les ciments avec ajouts actifs sont classés au tableau I.4 selon leur résistance à la compression après l'âge de 28 jours.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source de minéraux actifs. Ainsi, pour la cimenterie de Meftah, le calcaire est essentiellement utilisé comme ajout inerte à cause de sa disponibilité à proximité des installations cimentières.

#### **I.4.4 Addition de l'agent de mouture :**

Deux types d'agents de mouture liquides, légèrement basiques avec un pH compris entre 8 et 11, contenus dans des réservoirs sont dosés par une pompe doseuse et ajouté alternativement à la charge d'alimentation du broyeur l'aide d'un dispositif spécial sur la bande transporteuse.

### I.5 Expédition du ciment :

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. Il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas. Pour se faire, on installe, des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo. Par ce procédé, le ciment acquière les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur et quitte l'usine en sacs ou en vrac.

**Tableau I.4. Classes de résistances et domaines d'application des ciments avec ajouts [4].**

Quantité d'ajouts actifs par rapport au % du poids du ciment	Exigences envers la composition minéralogique du clinker	Type et domaine d'application du ciment dans la construction	Classe de résistance à la compression après 28 jours (kg/cm <sup>2</sup> )
15 à 20 %	Clinker ordinaire C <sub>3</sub> S : 50 – 70 % C <sub>2</sub> S : 15 – 40 % C <sub>3</sub> A : 5 – 12 % C <sub>4</sub> AF : 9 – 15 %	CEMI : Ciment portland d'utilisation universelle dans la construction de masse. Excepté des bétons spéciaux.	400 – 600
20 à 30 %	" "	CEMII : recommandé pour les constructions de gros ouvrages, non recommandé pour les bétons qui subissent le traitement hydrothermal.	300 – 500

### Conclusion

A travers ce chapitre nous avons décrit les principales étapes nécessaires à la production du ciment portland artificiel de la cimenterie de Meftah.

Le broyage du clinker dans les broyeurs à boulets est le type de procédé le plus répandu dans l'industrie de ciment. Cette étape de broyage consomme 40% de l'énergie nécessaire à la fabrication du ciment, elle participe fortement à des coûts de production.

## **Chapitre II**

### **Broyage du Clinker à Ciment Et les agents de mouture**

## Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons le circuit de broyage du ciment de l'unité de Meftah, tout en précisant certaines notions fondamentales dans le domaine du broyage du clinker à ciment, dans un broyeur à boulets. Nous nous intéresserons ensuite, à l'influence des différents paramètres opératoires sur la performance de ce procédé. Enfin, nous présentons l'intérêt d'utilisation des agents de mouture et leurs avantages pratiques industriels.

## II.1 Le broyage du clinker à la cimenterie de Meftah

### II.1.1 Description du circuit de broyage du clinker

Le circuit fermé de broyage de l'unité est représenté en figure II.1, il se compose de différentes installations.

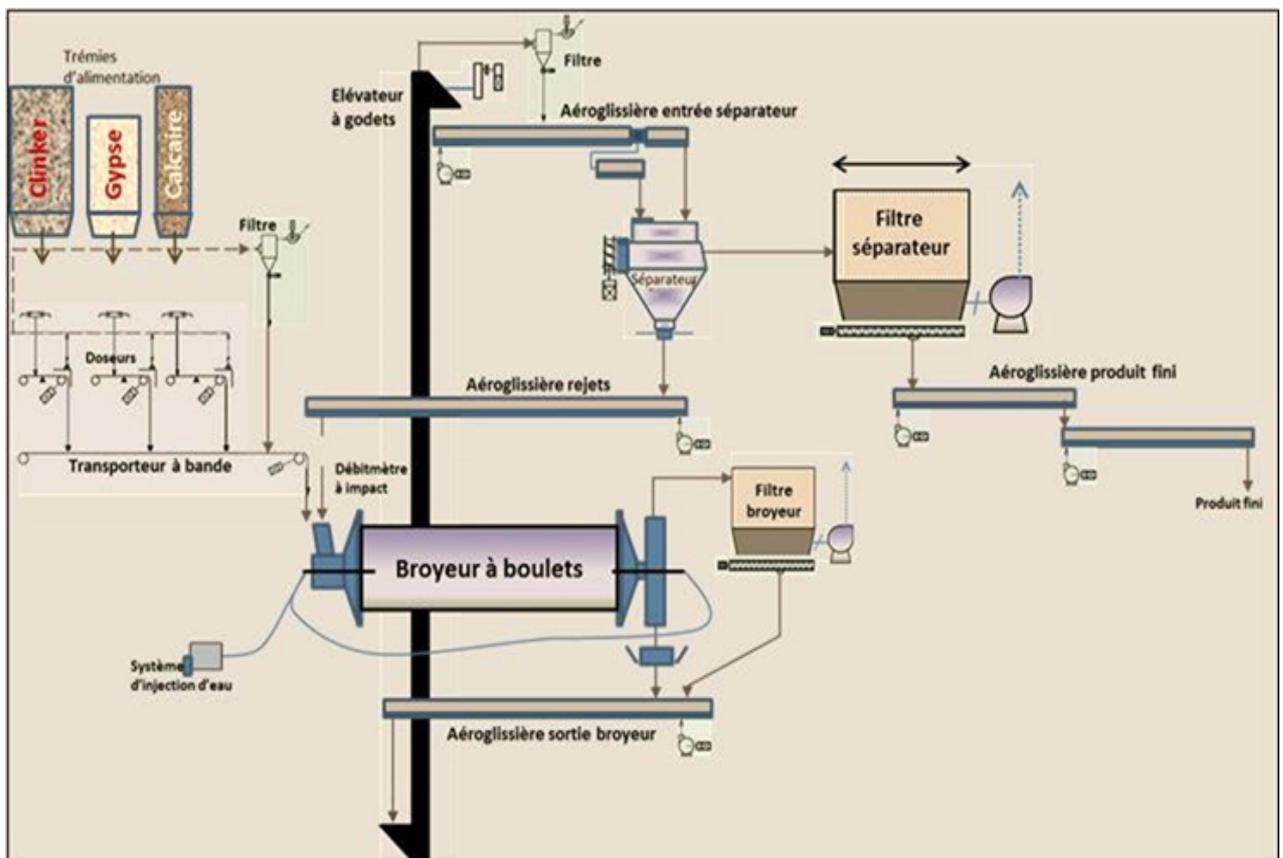


Figure II.1 Circuit de broyage de la cimenterie de Meftah

- **Le broyeur**

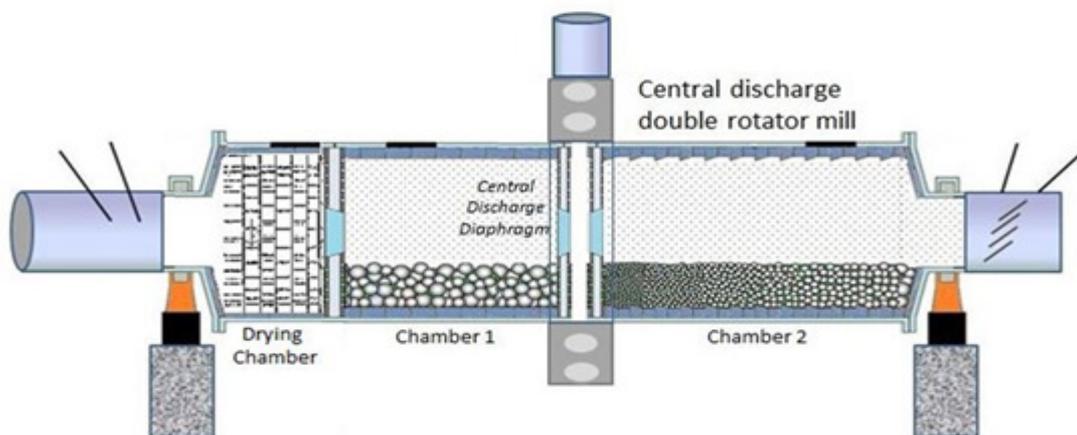
Le broyeur à boulets comporte un compartiment de dégrossissage à l'entrée et un compartiment de finissage à la sortie, respectivement équipés de blindages releveurs et

classant. Ces compartiments sont séparés par une cloison relevée permettant le passage des particules broyées (figure II.2). Ce broyeur conçu pour une vitesse de rotation de 70 à 80% de la vitesse critique, avec un volume de boulets de 30% du volume du broyeur. Dans le premier compartiment, les tailles des boulets sont telles que leur porosité au repos soit minimale et leur granulométrie soit bien représentée par une loi de type Gaudin Schumann. Dans le compartiment de finissage, la granulométrie des boulets est définie par des méthodes basées sur le coefficient d'aptitude à l'agglomération [5]. Ce coefficient représente la fraction de surface perdue à la suite de l'agglomération des particules, mesuré selon un protocole d'essais basé sur la variation de la surface spécifique en fonction de la durée de broyage.

Le tableau II.1 donne les dimensions géométriques, la taille des boulets et les paramètres opératoires de ce broyeur.

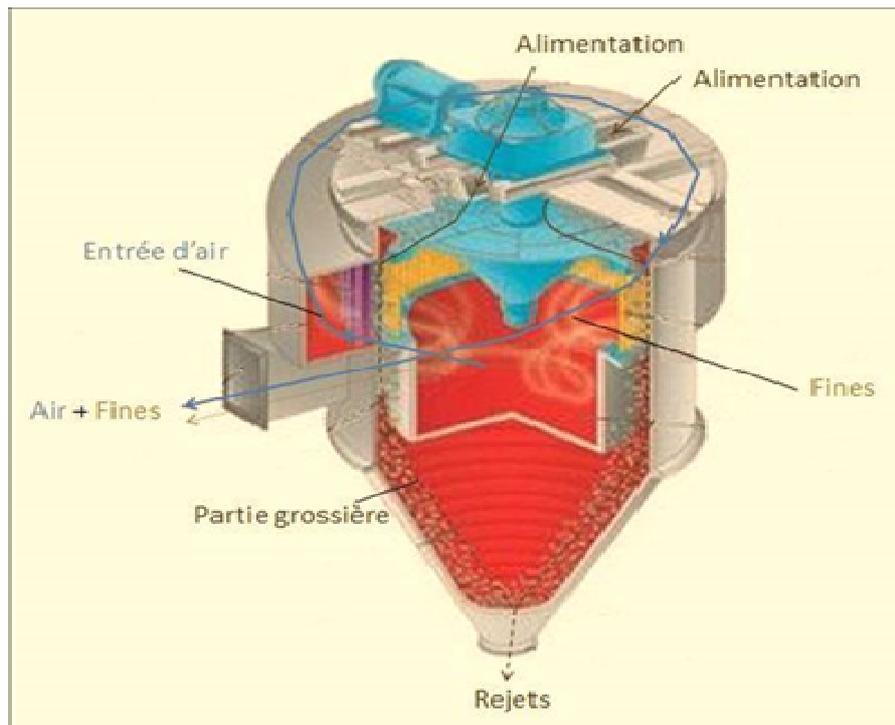
**Tableau II.1 .Dimensions géométriques et paramètres opératoires du broyeur**

Longueur (mm)			Diamètre (mm)	Puissance absorbée (kW)	Masse des boulets (tonne)	Dimensions et fraction des Boulets (mm)		Vitesse de rotation (tr/min)
1 <sup>er</sup> Compt	Grille	2 <sup>eme</sup> Compt				1 <sup>er</sup> Comp	2 <sup>eme</sup> Comp	
4500	200	8530	4200	2800	225	90mm 32%	60 22,31%	15,2
						80 24,36%	50 49,59%	
						70 24,36%	40 28,10%	
						60 19,28%		



**Figure : II.2 : Broyeur à deux compartiments boulets-boulets**

- **Le séparateur**



**Figure II.2. Le séparateur des particules de ciment**

La séparation air -particules de ciment se fait dans un séparateur de 2<sup>ème</sup> génération (figure II.2). Ce séparateur est considéré comme performant et permet aussi le refroidissement du ciment.

- **Le filtre à manches**

Le Filtre à manches sert à l'épuration de l'air poussiéreux émanant d'un ou de plusieurs points de dépoussiérage. Le filtre est modulaire et peut être livré avec une surface de filtration comprise entre 322 et 866 mm<sup>2</sup>. Les manches du filtre sont décolmatés par un fort jet d'air qui les traverse en sens contraire du passage de l'air poussiéreux. La poussière à l'instant de décolmatage des manches est asservie à la chute de pression dans le système. Une vis et un sas rotatif, commandés par un même moto-réducteur, évacuent la poussière accumulée dans la trémie de fond du filtre. Le tableau II.3 donne les spécifications de ce filtre.

**Tableau II.3. Spécifications du filtre à manches**

Surface filtrante (m <sup>2</sup> )	644×2
Nombre de manches	560×2
Milieu de filtration	tissu filtrant, feutre
Dimension manches	120×3020
Mode de nettoyage	air comprimé a 7 bars

- **Les ventilateurs**

Deux ventilateurs sont utilisés pour la ventilation du broyeur à boulets (ventilateur de tirage ou d'aspiration) et la recirculation de l'air chargé de ciment dans le séparateur (ventilateur de recirculation). Le tableau II.4 donne les caractéristiques de ces ventilateurs. L'élévateur à godets et les aéroglisteurs flux assurent le transport et la circulation du ciment.

**Tableau II.4. Caractéristiques des ventilateurs**

	Ventilateur de tirage	Ventilateur de recirculation
Débit (m <sup>3</sup> /min)	1370	2900
Pression statique (mm C.E)	400	300
Température (°C)	100	120
Puissance ventilateur (kW)	115	400

### II.1.2 Processus de broyage

La fragmentation de grains de clinker, de dimensions données, dans le broyeur à boulets conduit à l'obtention de grains de dimensions inférieures par fragmentations successives, produites par l'effet de chocs et des frottements entre boulets et matière. Le broyage en circuit fermé, procédé le plus répandu, permet de renvoyer à l'entrée du broyeur les particules insuffisamment réduites qui ont été collectées par le séparateur dynamique. Le refus des particules grossières quittant le séparateur est recyclé en amont du circuit de broyage afin de subir à nouveau la fragmentation dans le broyeur à boulets. Afin d'éviter le sur broyage des particules, le broyeur est traversé par un courant d'air dont le rôle est d'emporter les fines particules au fur et à mesure de leur formation. L'air sortant du broyeur contient 50 à 500 g/m<sup>3</sup> de fines particules de matière (les poussières). Celles-ci ne sont entraînées que si la vitesse du flux d'air est suffisamment élevée (au moins 15 à 20 m/s); en pratique le débit d'air nécessaire est de l'ordre de 700 à 1500 Nm<sup>3</sup>/h par tonne de produit. Le filtre à manches, est utilisé pour épurer les gaz des poussières résiduelles qu'ils contiennent avant leur rejet à l'atmosphère.

Le broyeur à boulets est entraîné en rotation autour de son axe provoquant ainsi le mouvement des boulets. Le lit formé par les boulets et la matière qui s'y trouve, mis en mouvement par la rotation du broyeur se détend, permettant ainsi à la matière de mieux combler les vides et d'accroître la surface totale de contact. La forme de la paroi interne du broyeur doit être telle

qu'aucun glissement du lit ne soit possible, mais qu'au contraire tous les boulets soient mis en mouvement. A l'intérieur du lit se produit un mouvement de friction relatif entre la matière et les boulets, qui s'apparente à une abrasion des particules. Les différentes données de conception et d'utilisation du broyeur sont : la charge, la taille, la forme et la dureté des boulets, la forme de la paroi, le rapport entre la longueur et le diamètre du broyeur, la vitesse de rotation et le taux de remplissage en matière. Ces données doivent permettre au mode de broyage de s'accomplir de la manière la plus efficace possible.

## **II.2 Performances du procédé de broyage**

Les performances d'une installation de broyage dépendent, entre autres, des caractéristiques physiques et mécaniques du produit broyé, et plus particulièrement, de la combinaison de deux phénomènes : l'aptitude à la fragmentation ou broyabilité du produit et la capacité de réagglomération des particules broyées.

### **II.2.1 Broyabilité du clinker**

Le broyage du clinker comporte des étapes distinctes, et dans chacune d'elle certains facteurs déterminent l'avancement de la fragmentation. Dans une première étape, il existe une corrélation entre la broyabilité et la porosité contenue dans l'édifice cristallin du clinker. Ensuite, pour des surfaces supérieures à 2000 cm<sup>2</sup>/g, le broyage dépend :

- des microfissurations du clinker,
- des dimensions et de la nature des cristaux de clinker

Plusieurs recherches ont montré qu'il existe une corrélation entre la composition chimique et minéralogique d'un clinker et la quantité d'énergie nécessaire au broyage [6] à étudié l'influence du taux de chaux libre et d'alumine sur la broyabilité de plusieurs clinkers. Dans un premier temps, il a pu remarquer par l'expérience que l'on peut exprimer la relation entre l'énergie de broyage et la surface spécifique atteinte avec une fonction exponentielle. Ensuite, il a pu déterminer que les constantes de cette fonction dépendent de la composition chimique du clinker. Cependant, il reste complexe de déterminer précisément l'effet de la composition chimique seule sur la consommation de l'énergie de broyage ; d'autres paramètres chimiques et physiques du clinker entrent en jeu.

Les broyabilités comparées du clinker et des ajouts minéraux utilisés pour la fabrication de ciments composés montrent que ce constituant principal du ciment est plus difficilement broyé par rapport au calcaire et au tuf volcanique [7]. D'autre part la broyabilité du clinker est sensiblement meilleure en présence du laitier de haut fourneau.

## II.2.2. Broyabilité des ciments

La broyabilité d'un mélange de clinker avec des ajouts minéraux est généralement meilleure que celle du clinker broyé seul. Par exemple, le mélange de clinker avec du laitier de haut fourneau a une meilleure broyabilité que le clinker seul, ce qui est lié à l'effet abrasif des grains de laitier sur les grains de clinker, qui conduit à la production d'une grande fraction de grains très fins[7]. Les classes de particules les plus grosses sont d'ailleurs les plus efficaces pour augmenter la production de fines particules du clinker co-broyé avec du laitier [8]. Par conséquent, la broyabilité d'un mélange de matières minérales n'est pas simplement obtenue par la moyenne des broyabilités de chaque constituant. En fait, le type d'interaction entre les différentes natures de particules dans le broyeur a un rôle majeur dans la modification de la broyabilité globale du mélange. Ainsi dans des conditions favorables, le co-broyage de clinker avec des ajouts minéraux pour fabriquer les différents types de ciments, participe à l'amélioration du rendement énergétique du broyage.

Par ailleurs, plus proche de la réalité industrielle Sohoni et al[9]ont considéré le broyage d'un lot de clinker hétérogène, composé de différentes tailles dans un broyeur à boulets à deux compartiments. La charge de ces boulets est composée des diamètres 50 mm, 40 mm et 30 mm. L'évolution de la surface spécifique Blaine en fonction du temps, montre que le broyage du clinker, avec l'addition de 4,3% de gypse, est très favorable par rapport au broyage du clinker seul. En effet, après 20min heures de broyage, l'addition du gypse fait augmenter la surface spécifique Blaine de 22% par rapport au clinker seul, pour atteindre la valeur de  $594 \text{ m}^2 / \text{kg}$ .

## II.2.3 Cinétique de broyage du clinker

En utilisant un broyeur de volume 5litres, rempli de 8 kg de cylpebs (barres) de dimension  $20 \times 20$  mm et tournant à la vitesse de rotation de 68 révolutions par minute,[10] a montré que la variation de la surface spécifique Blaine peut être décomposée en trois étapes distinctes. Il les dénomme les étapes de Ritinger, de l'agrégation et de l'agglomération, schématisées sur la figure (II.4) en page suivante. De ce fait, les variations de la taille caractéristique  $x_0$  et de la dispersion granulométrique  $n$  du modèle de Rosin-Rammler (équation II.1) pour ce matériau, en fonction de la surface spécifique Blaine, sont représentées en figure (II.5) en page suivante.

$$Y=100* [1- e^{-(X-X_0)^n}] \quad (\text{II.1})$$

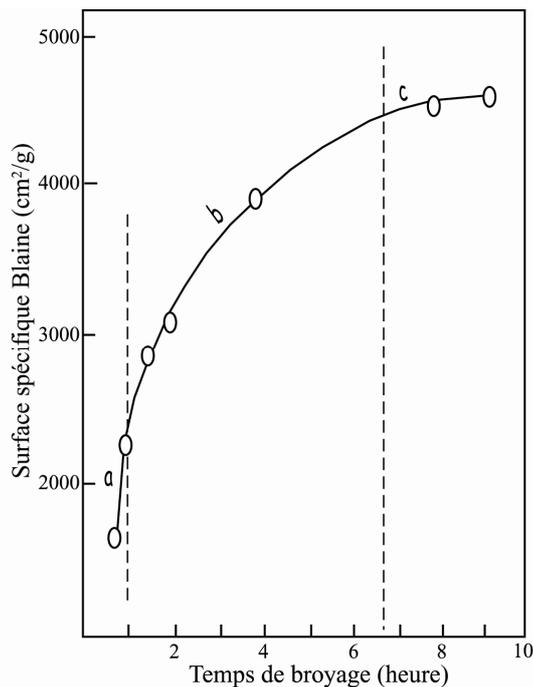
Y, pourcentage de grains inférieurs à la taille X (%)

X, taille de grains (mm)

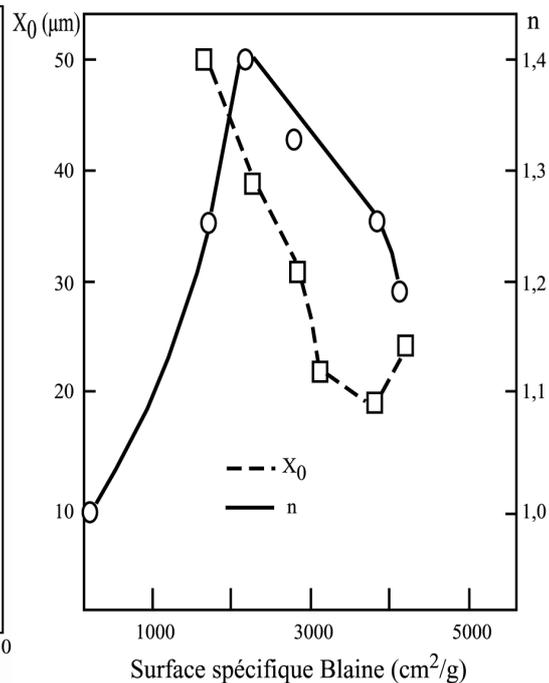
X<sub>0</sub>, taille moyenne de grains (mm)

n, coefficient d'uniformité sans dimension

Cette figure montre que la dispersion granulométrique présente un maximum au début de l'agrégation, où commence l'adhésion des grosses et des petites particules du clinker. Par contre, la taille caractéristique présente un minimum situé au-delà du début de l'agrégation. De ce fait, l'auteur conclut d'une part que les exigences de la qualité du ciment (finesse et résistance) ne peuvent pas être décrites par la seule étape énergétique (étape de réduction de taille), et d'autre part que les données d'investigation de la distribution de la taille des particules, ne suffisent pas à elles seules pour décrire et interpréter les phénomènes du broyage du clinker.



**Figure II.4: Variation de la surface spécifique Blaine en fonction du temps de broyage [10]**



**Figure II.5 : Variation de X<sub>0</sub> et n en fonction de la surface spécifique Blaine du clinker [10]**

## II.3 Quantification du procédé de broyage

### II.3.1 Test de Bond

Le test de Bond test permet de déterminer le Work-Index ( $W_i$ ) d'un matériau donné, appelé aussi indice énergétique.  $W_i$  est déterminé par des essais expérimentaux en laboratoire sur un protocole d'essais d'un broyeur à boulets défini par Bond (1952). Cet indice calculé par l'équation suivante, exprime la valeur de l'énergie nécessaire en kWh pour réduire une tonne du matériau étudié de la dimension  $X_1$ , proche de 2mm à la dimension  $X_2$ .

$$W_i = \frac{48,95}{P_1^{0,23} G_{bp}^{0,82} \left[ \frac{10}{\sqrt{x_1}} - \frac{10}{\sqrt{x_2}} \right]} \quad (\text{II.2})$$

$P_1$  est la dimension de l'ouverture du classificateur utilisé dans le test ;  $x_1$  et  $x_2$  sont les dimensions en ( $\mu\text{m}$ ) des grains avant et après broyage, choisies comme correspondant à la dimension  $d_{80}$  de la maille carrée du tamis laissant passer en masse 80% du matériau ;  $G_{pb}$  est la masse nette du produit passant par révolution du broyeur.

Cependant, les marges d'incertitude au niveau du dimensionnement peuvent varier jusqu'à 50% [5]. Afin de diminuer ces marges, Bond a proposé des coefficients multiplicateurs correctifs selon le mode de broyage, le type de circuit (ouvert ou fermé), la taille du produit à l'alimentation, la finesse voulue, et le rapport de réduction taille finale / taille initiale.

Le tableau II.6 donne quelques valeurs de  $W_i$  du clinker telles que résultant d'études faites par Bond sur le broyage humide et sec.

Nombre d'essais	Densité moyenne (kg/litre)	W index moyen Voie humide	W index moyen Voie sec
60	3,09	13,49	17,54

**Tableau II.5. Work index moyen du clinker [5]**

Ces tests montrent que l'énergie spécifique de broyage est empiriquement liée à l'alimentation et au produit par :

$$E = W_i \left[ \frac{10}{\sqrt{x_1}} - \frac{10}{\sqrt{x_2}} \right] \quad (\text{II.3})$$

10 : la racine carrée de la dimension 100 $\mu\text{m}$

E : l'énergie spécifique de broyage

Bond propose pour le calcul de l'indice énergétique  $W_i'$  des broyeurs industriels, les équations d'extrapolations (II.4) et (II.5) pour  $D \leq 3,81\text{m}$  et  $D > 3,81\text{ m}$  respectivement.

$$W_i' = W_i \left( \frac{2,44}{D} \right)^{0,2} \quad (\text{II.4})$$

$$W_i' = 0,914 W_i \quad (\text{II.5})$$

De plus, Bond propose pour le calcul de la puissance d'entraînement (kW) de ce type de broyeur l'équation empirique suivante :

$$P = 7,33 J N^* (1 - 0,937 J) \left[ 1 - \left( \frac{0,1}{2^{9-10 N^*}} \right) \right] \rho_b L D^{2,3} \quad (\text{II.6})$$

$N^*$  : le rapport  $N/N_c$

$L$  : longueur du broyeur

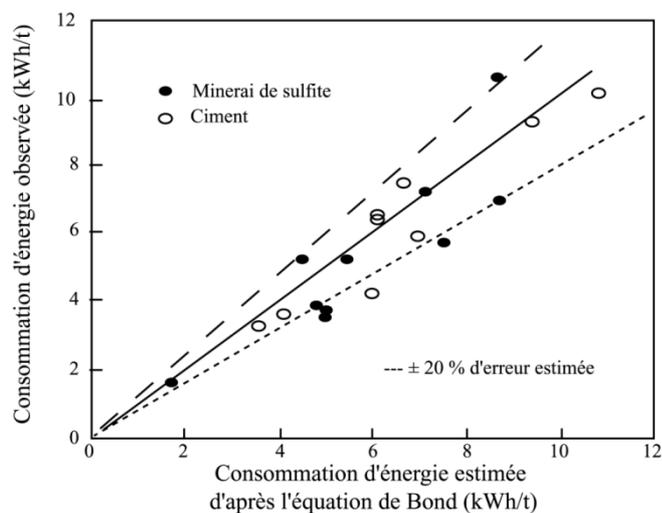
$\rho_b$  : densité des boulets

$J$  : taux de charge des boulets

### II.3.2 Utilisations pratiques des lois énergétiques

Lors du broyage des clinkers, les lois énergétiques sur la fragmentation sont vérifiées dans un domaine de finesse Blaine bien défini. Au-delà, tout gain de finesse nécessite une énergie supérieure à ce que prévoient les lois énergétiques, en raison d'une réagglomération des grains et du colmatage des corps broyants ou des équipements internes du broyeur.

Ainsi, Herbst et Fuersteneau (1980)[11], lors d'une procédure d'extrapolation pour la conception des broyeurs à boulets, utilisant le modèle cinétique du bilan de population, révèlent que les valeurs des conditions opératoires réelles des unités industrielles de ciment différent de  $\pm 20\%$  (figure II.6) par rapport à celles prévues par l'approche de Bond pour le design et la conception de ces installations.



**Figure II.6 : Représentation des erreurs de dimensionnement associées  
à l'utilisation de la méthode de Bond**

#### **II.4 Amélioration du rendement de broyage et moyens d'actions**

Plusieurs rapports et articles ont été publiés dans la littérature affirmant que les broyeurs à boulets utilisés dans le broyage du ciment sont particulièrement inefficaces. En effet, il a été rapporté que 95 % de l'énergie introduite dans ces broyeurs ne sert pas effectivement à la création de nouvelles surfaces [12]. Cette statistique remarquable souligne la nécessité de contrôler le procédé de production pour limiter la perte d'énergie et de préconiser plusieurs moyens d'actions pour l'augmentation de son efficacité

##### **II.4.1 Paramètres opératoires du procédé de broyage**

- La présence d'un séparateur dynamique à air des particules les plus fines conduit à une économie de 10 à 15 % d'énergie électrique. Dans ce cas l'agglomération des particules et leur adhérence sur les corps broyants et sur les parois du broyeur au cours du broyage est évitée [13]. Ceci est permis grâce au recyclage constant des matériaux broyés dans un circuit fermé, qui améliore ainsi le processus de fragmentation.

- Le taux de remplissage et l'échelonnement de la taille des boulets de broyage est aussi

Un moyen d'améliorer l'efficacité de l'installation. Dans la phase de broyage fin, les tailles de boulets plus petites utilisées permettent d'améliorer cette phase finale du broyage [13].

L'échauffement dû au chocs et aux frottements entre les corps broyants et la poudre au sein du broyeur est parfois diminué en utilisant un système de refroidissement par une circulation d'air [14].

- Tsimas et al, 1982 [15] ont révélé que la broyabilité du clinker diminue entre 200 et 400°C. Cette diminution est due au phénomène d'agglomération dépendant de la température. Il faut dire aussi que plus la température de broyage augmente, plus difficile sera le broyage (agglomération de particules, recouvrement des boulets, ...).

##### **II.4.2 Composition chimique et minéralogique du clinker**

Le clinker, avec sa microstructure et sa composition minéralogique et chimique, affecte l'opération de broyage. Les composants du clinker (C3S, C2S, C3A et C4AF) influencent le procédé de broyage par leur dureté, leur ténacité et leur fragilité.

- Le comportement du clinker à la rupture est déterminé par la taille des microfissures préexistantes dans les cristaux de C3S [16]. Ces microfissures sont dues principalement à la diminution de volume durant la cristallisation de la phase interstitielle et donc du taux de cristallisation durant le refroidissement.
- C2S, possède une ténacité beaucoup plus importante que l'alite et donc beaucoup plus difficile à broyer. Les nids de béliediminuent d'une façon dramatique la broyabilité du clinker et apparaissent dans le produit broyé laplupart du temps comme des fragments d'agglomérats [16].
- La broyabilité du C3A et du C4AF dépend du refroidissement du clinker; dans le cas du refroidissement lent, la phase liquide se solidifie en cristaux assez gros qui sont plus faciles à broyer comparés au "verre" plus dur issu d'unrefroidissement rapide.
- Il a été reconnu que le clinker possédant une haute teneur en SO<sub>3</sub>a une plus mauvaise

Broyabilité. En général, le S<sub>03</sub> a un impact négatif sur la broyabilité du clinker. En effet, lors de la cuisson, le soufre permet d'augmenter la taille descristaux d'alite [17].

- De manière générale, la porosité permet d'améliorer seulement le broyage des particules les plus grosses en créant des zones de faiblesse dans les particules de clinker. Au-delà, dans les composés les plus fins, on retrouve les composés minéraux qui influencent la broyabilité du clinker. Une porosité de l'ordre de 25 à 35 % peut être considérée comme satisfaisante et, à partir de 40%, la formation de poussières sera plus grande.

## II.5 Utilisations des agents de mouture et nature d'actions

Les agents de mouture sont des adjuvants généralement à base diamines modifiés et dialcools. Ces produits ont fait leur apparition en Europe dans les années 1930, et ne cessent de faire l'objet de recherches dans le monde entier.

Leurs molécules se fixent sur la surface du grain de ciment en empêchant toute force d'attraction grâce à leur effet séparateur et fluidifiant. Leur dosage très minime dans le produit à broyer (variant généralement de 0,3 à 0,4 pour mille) offre plusieurs avantages au procédé de broyage du clinker et du ciment :

- Réduction du temps de broyage (gain d'énergie)
- Augmentation de la capacité du broyeur
- Réduction des agglomérations et du colmatage du ciment à l'intérieur des broyeurs

-Augmentation de la Surface Spécifique Blaine (SSB)

-Meilleure qualité du produit fini .

### **II.5.1 Nature des agents de mouture :**

La base des produits testés comprend la plupart du temps des surfactants organiques. Les principaux produits utilisés sont les amines et leurs sels, les polyols, les alcools, les lignosulphonates, les acides gras et leurs sels.

D'autres produits ont été proposés d'après les différents brevets rapportés dans la littérature. Nous pouvons citer: les composés de lignâtes, les produits à base d'oxyde d'éthylène, de phénol et d'urée, des composés organosiliceux, des surfactants synthétiques, des sous-produits de manufacture et des glycols. Tous ces ajouts sont normalement utilisés dans des quantités très limitées, généralement entre 0,01 et 0,3 % de la masse du ciment.

### **II.5.2 Mécanisme global d'action des agents de mouture :**

Le mécanisme d'action des agents de mouture n'est pas connu avec précision et encore aujourd'hui, nous pouvons dire que ces produits sont utilisés de façon très empirique. Leur mécanisme d'action est essentiellement basé sur la diminution de la résistance au broyage de manière générale (effet Rehbinder) et sur la prévention de l'effet d'agglomération.

Suivant l'hypothèse de Rehbinder, les agents de mouture sont adsorbés sur les microfissures, éliminant ou réduisant ainsi leurs forces de valence et empêchant les microfissures de se refermer. Avec ce mécanisme, les grains montrent une diminution de la résistance et au broyage.

L'autre hypothèse est basée sur l'empêchement de l'agglomération. Quand les grains broyés ont atteint une certaine finesse, les forces de Van der Waals ou électrostatiques atteignent une telle valeur que les grains les plus fines sont forcés de s'adhérer entre eux. Comme conséquence, même si le broyage est prolongé, la surface spécifique n'augmente plus et commence à diminuer après un certain temps. Si des substances capables de neutraliser la valeur des charges de surface des grains sont ajoutées aux matériaux, la tendance à l'agglomération va diminuer.

En fait, la même molécule de la substance adsorbée peut agir en premier sur la résistance à la fracture en empêchant les microfissures de se rejoindre et ensuite sur l'agglomération après que le fragment de particule se soit détaché en empêchant celui-ci de s'agglomérer.

Ces théories sont prouvées par le fait que tous les composés capables d'affecter le broyage d'une manière favorable ont une polarité plus ou moins forte [18].L'efficacité des agents de

mouture serait donc limitée à la réduction des forces adhésives du matériau et ainsi à la limitation de la formation d'agglomération de particules.

Le tableau ci-dessous illustre les avantages pratiques d'utilisation d'un agent de mouture dans une cimenterie algérienne.

Paramètre	Unité	Sans adjuvant	Avec adjuvant
Débit	t/h	60	75
SS Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3250	3460
Puissance absorbée	KW	2603	2600
Température ciment	°C	126	113
Energie absorbé	Kwh	43.38	34.66

**Tableau II.6. Avantages pratiques d'un agent de mouture**

### **II.5.3 Analyse bibliographique sur la description du mode d'action des agents de mouture**

Le paragraphe ci-après fait un état des connaissances sur l'utilisation des agents de mouture et la description de leur mode d'action probable pour améliorer le rendement du broyage du clinker.

#### ***II.5.3.1 Action par réduction de l'énergie de surface :***

Les modes d'action des agents de mouture habituellement cités sont l'effet Rehbinder, et le mécanisme de Westwood. L'effet Rehbinder se fonde sur l'adsorption de l'agent de mouture sur les surfaces nouvellement créées au cours du broyage. Cela entraîne une diminution de l'énergie de surface du matériau broyé ce qui favorise la propagation des fissures, donc sa fragmentation est facilitée [19].

Le mécanisme de Westwood est aussi fondé sur l'adsorption de l'agent de mouture sur la surface du matériau. Celle-ci induit le blocage du mouvement des dislocations à la surface des grains qui les fragilise [20].

Un exemple montre l'amélioration de l'augmentation de la surface spécifique avec la durée de broyage, d'une poudre de verre sodique broyé avec 15% de nitrate de lithium [21]. Le mécanisme mis en jeu serait l'échange des ions sodium de la surface du verre avec les ions lithium du nitrate au cours du broyage. La présence de l'ion lithium en surface du verre, ion plus petit que le sodium, entraîne des contraintes de traction et favorise donc la formation de fissures.

### ***II.5.3.2 Modification de l'écoulement de la poudre dans le broyeur :***

L'utilisation de produits organiques tels que les glycols et la triéthanolamine (TEA) dans le broyage du clinker, diminue les forces d'adhésion entre les particules, ce qui contribue à augmenter la fluidité de la poudre dans le broyeur. Ainsi, lors du broyage à sec de calcaire, la TEA, l'acide oléique ou le glycérol, améliorent l'écoulement de la matière dans le broyeur [22]. Ce phénomène augmente la probabilité que des grains de poudre soient présents dans la zone effective de broyage, et favorise l'opération.

Dans une autre étude sur le broyage fin de calcaire avec du stéarate de calcium, des mesures de paramètres d'écoulement ont été effectuées, en utilisant une cellule de cisaillement de Jenike [23]. L'ajout de stéarate pendant le broyage agit entre autres en réduisant le coefficient de frottement interne et le coefficient de cohésion de la poudre.

### ***II.5.3.3 Agent de désagglomération dans l'enceinte du broyeur :***

D'autres mécanismes cités récemment se fondent sur la capacité des agents de mouture à diminuer les phénomènes d'agglomération des grains entre eux d'une part, et d'autre part, l'adhésion des grains sur les surfaces des corps broyant et du broyeur.

Le phénomène de réagglomération est dû à la présence de sites chargés électriquement sur les surfaces nouvellement créées lors du broyage. Les charges électriques peuvent être neutralisées par les ions présents dans le broyat ou par des électrons libres arrachés lors des frottements de corps broyant entre eux. Si elles restent non neutralisées, elles favorisent la réagglomération de grains entre eux. Des molécules polaires s'adsorbant sur les sites chargés électriquement éliminent les forces électriques de surface et favorisent la désagglomération des grains [24].

L'utilisation de TEA, d'acide oléique ou de glycérol diminue à la fois la tendance à l'agglomération des fines particules du calcaire, mais aussi l'adhésion des grains sur le milieu de broyage [22]. La diminution des forces d'agglomération est bénéfique car elle augmente l'énergie disponible pour la fragmentation des particules individuelles. En effet, en présence d'agglomérats, de l'énergie doit être utilisée pour broyer à la fois ces ensembles de particules liées et les grains individuels. L'énergie utilisée pour redissocier les agglomérats est employée en pure perte car elle ne sert pas au broyage effectif de la poudre.

## **Conclusion**

Dans cette partie, nous avons montré l'intérêt économique de l'utilisation des agents de mouture pour l'opération de broyage du clinker. De tels produits sont essentiels pour

pouvoir contrôler le rendement de broyage afin de contribuer à l'amélioration globale du processus de fabrication du ciment. Pour être capable d'optimiser l'activité de ces composés chimiques, il faut appréhender leur mécanisme d'action pendant le broyage. Il est couramment constaté lors des études réalisées sur les agents de mouture, que leur efficacité est liée à une action en surface des grains, qui diminue les forces d'agglomération de la poudre et améliore son écoulement, donc sa disponibilité dans la zone effective de broyage.

Par ailleurs, en dépit de son utilisation large et son intérêt pratique industriel dans le broyage du clinker à ciment, leurs effets sur la nocivité et les résistances mécaniques du béton et du mortier produits restent peu connues dans la littérature.

En conséquence et afin de répondre à cette insuffisance, l'étude expérimentale que nous effectuerons visera à analyser l'effet de différents agents de mouture utilisés par l'unité de Meftah sur la durabilité du mortier produit.

## **Chapitre III**

### **Matériels et Méthodes**

**Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une part des différents matériaux utilisés pour la préparation des éprouvettes de mortiers de ciment à l'ajout calcaire, et d'autre part aux techniques de leur caractérisation physique et mécanique. Le protocole expérimental sera décrit ensuite, pour mettre en évidence l'action de l'agent de mouture sur la durabilité de l'éprouvette de mortier.

**III.1 Matériaux utilisés :** Eau distillé, le ciment, et le sable normalisé.

Le ciment utilisé c'est le ciment d'expédition en absence d'adjuvant. Cette opération est effectuée sur le site industriel après l'arrêt de quelques heures de l'injection de l'adjuvant et le broyeur pour la préparation des éprouvettes de mortier est un ciment récupéré depuis la zone de l'récupération de la quantité désirée du ciment.

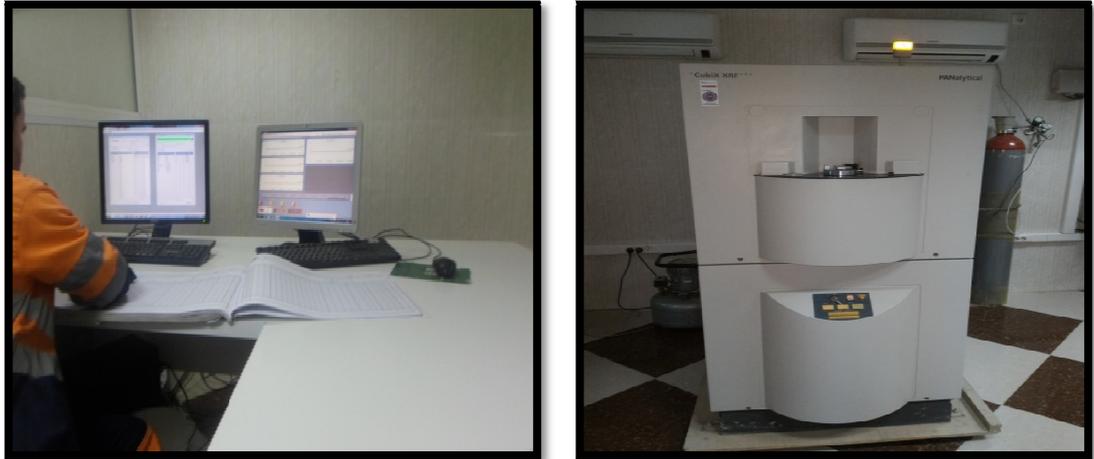
Le sable : normalisé CEN EN 196-1 Le sable utilisé est un sable normalisé CEN EN 196-1 , de nature siliceuse, à grains arrondis, dont la teneur en silice est égale à 98%. Il est délivré en fractions mélangées en sacs plastiques d'un contenu de  $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ .

**III.2 Caractérisation des matériaux utilisés :**

Notons, que la plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisés conformément aux normes Algérienne 442/2000[25] au sein du laboratoire contrôle qualité de la cimenterie de Meftah sous une température ambiante T, avoisinante 20 à 22°C et une humidité relative HR de 43% à 55%.

**III.2.1 Caractérisation Chimique**

La détermination de la composition des oxydes des différents matériaux utilisés dans nos expériences est effectuée par analyse fluorescence X (figure III.1) au laboratoire contrôle qualité de l'unité



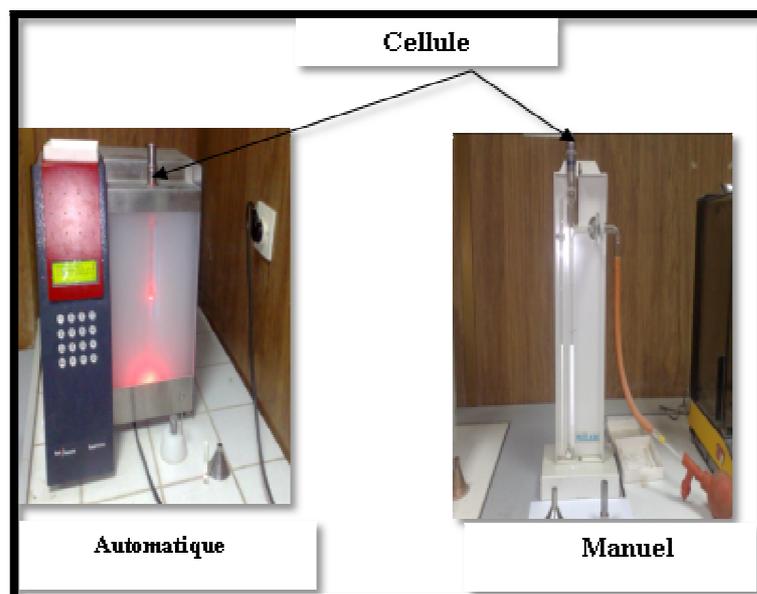
**Figure III.1 Analyse par Fluorescence X**

La détermination de la perte au feu et de la chaux libre du ciment utilisé au cours de nos essais sont déterminés au moyen de sa calcination dans un four à 950°C (mode opératoire est donné en annexe) au sein du laboratoire qualité de l'unité.

### **III.2.2 Caractérisation de la finesse du ciment**

Le pourcentage du refus cumulé sur les tamis de 45 et 90  $\mu\text{m}$  pour les différents échantillons de ciment est déterminé par tamisage durant 1 minute de tamisage.

La perméabilité des échantillons de ciment est caractérisée par la mesure de sa surface spécifique Blaine (Figure III.2). Le principe de mesure de la surface spécifique Blaine repose sur le fait que le temps, nécessaire pour faire traverser une couche de poudre du ciment par un volume d'air donné (détail de la procédure en annexe).



**Figure III.2. Le Perméabilimètre de Blaine**

### III.3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental suivi consiste à préparer des mortiers normalisés, constitué d'un mélange de ciment et de sable avec et sans l'incorporation de l'adjuvant de mouture. Ensuite on procède à la production de différentes éprouvettes de ce mortier. Dans le cas du dosage de ces éprouvettes avec adjuvant, quatre agents de mouture de noms commerciaux **MAPEI, CRYSO, BASF et TEKNACEM** (spécifications physico-chimiques sont données en annexe) sont utilisés en quantités variables.

Afin d'approcher la réalité industrielle, les quantités spécifiques de l'adjuvant additionné au mortier sont 250g/t, 350g/t, 500g/t et 700g/t. A titre d'exemple, le tableau III.1 donne les quantités ajoutées de chaque adjuvant :

<i>Quantité spécifique</i>	<i>250g/t</i>	<i>350g/t</i>	<i>500g/t</i>	<i>700g/t</i>
<i>Quantité d'agent de mouture ajouté</i>	<i>0.11 g</i>	<i>0.15g</i>	<i>0.22g</i>	<i>0.31g</i>

**Tableau III.1. Quantités additionnées de chaque adjuvant .**

Après conservation des essais mécaniques sont effectués sur les éprouvettes de mortier à des échéances déterminées de 1, 2, 7, et 28 jours, pour la détermination des résistances à la compression et à la flexion.

#### III.3.1 Préparation des éprouvettes de mortiers à ciment

On met le malaxeur (figure III.3) en marche à une vitesse lente et on verse l'eau distillé tout en introduisant soigneusement le ciment. Après 30 secondes de malaxage, le sable est alors introduit régulièrement durant les 30 secondes qui suivent, et on continue à malaxer pendant 30 autres secondes. Ensuite, le malaxeur est mis en arrêt pendant 1min 30s pour permettre d'enlever à l'aide d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond. Enfin, le malaxage est repris à grande vitesse pendant 1 minute.

Pour la préparation d'un moule de trois éprouvettes 4\*4\*16 cm (Figure III.4) le dosage est le suivant :

- Sable normalisé = 1350 g  $\pm$ 5 grammes
- Ciment = 450  $\pm$  2 grammes.
- eau de gâchage = 225g $\pm$ 1 g



**Figure III.3: le malaxeur**



**Figure III.4: le moule des éprouvettes et table à choc de moulage**

Le malaxage du mélange – mortier - étant terminé, disposer celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante; former une galette approximativement rectangulaire, la partager en 6 fractions sensiblement égales.

Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs; introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette; Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse et mettre la machine en marche pour 60 chocs.

Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, araser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes suivi par inscription les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.

Le moule rempli de mortier marqué et recouvert d'un couvercle (qui doit laisser un vide de l'ordre de 2 mm au-dessus de la surface des éprouvettes) est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dont l'humidité relative aussi voisine que possible de la saturation est d'au moins 90%.

Le démoulage qui intervient entre les deux périodes de conservation (avant démoulage, d'une part et conservation dans l'eau, d'autre part) est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule. Toutefois, si au bout de 24 heures, le mortier n'a pas acquis une résistance suffisante pour qu'on puisse le manipuler sans danger de détérioration, le temps de démoulage est augmenté de 24 heures, mais le compte-rendu doit le mentionner. Quand il s'agit d'éprouvettes à rompre à 24 heures d'âge, si le démoulage a lieu plus de 20 minutes avant l'essai, les éprouvettes doivent être remises dans l'armoire humide jusqu'au moment de l'essai.

Le démoulage doit être effectué avec précaution. Nous pesons les éprouvettes préparées et on les numérote selon les échéances choisies.

Une fois démoulées et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement dans l'eau (figure III.5) à une température de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ . Les concentrations des matières en suspension, des sels dissous et des sulfates et sulfures exprimés en  $\text{SO}_3$  dans l'eau servant à la conservation des éprouvettes avoisineront 0.5%, 2.0 g/l et 1.0 g/l.



**Figure III.5. Bains de conservation des éprouvettes.**

### III.3.2 Caractérisation mécanique des mortiers

Après l'échéance choisie, l'éprouvette de mortier est mise en essai mécanique pour la mesure de ses résistances à la flexion et à la compression. La figure III.6 donne les compartiments d'essai des résistances à la compression et à la flexion.

Afin de limiter la marge d'erreur et l'incertitude de la mesure d'une part et pour une meilleure interprétation des résultats, la valeur d'une résistance est déterminée sur la base de 10 tests mécaniques effectués.



**Figure III.6 Essais mécaniques de flexion et de compression**

### **III.3.3 Les tests de répétabilité / reproductibilité.**

#### **III.3.3.1 Définition :**

La répétabilité et reproductibilité sont deux caractéristiques de la fidélité d'une méthode d'analyse. Les conditions de répétabilité sont réunies lorsque les mesures sont faites par un même opérateur, en utilisant la même technique d'analyse (méthode et instrumentation), dans un délai relativement court.

#### **III.3.3.2 But de la manipulation :**

Est déterminer la variation d'un système/équipement de mesure, Capacité d'un opérateur à répéter de façon cohérente la même mesure de la même pièce, à l'aide de la même instrumentation, dans les mêmes conditions, qui permet de limiter la marge d'erreur et l'incertitude de la mesure.

Dans notre projet, nous avons mené plusieurs opérations de gâchage pour la préparation des éprouvettes sans adjuvant avec les composants de 450g de ciment, 1350 de sable, 225 g de l'eau distillée.

Après l'échéance choisie, l'éprouvette de mortier est mise en essai mécanique pour la mesure de ses résistances à la flexion et à la compression.

10 teste effectuer comme un test de durabilité pour une meilleure interprétation des résultats.

#### **III.3.4 : les tableaux de performance :**

Nous permis de sélectionner les agents de mouture, on fonction de leur cout et leur performance, Da par tonne, et la quantité de résistance donnée par 1 gramme d'additif, l'agent de mouture qui donne la plus grande valeur: nous dire qu'il a une meilleure performance.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit la méthodologie expérimentale et le matériel utilisé pour la préparation des éprouvettes de mortier à ciment avec et sans adjuvants et la détermination de leurs résistances mécaniques à la compression et à la flexion, ainsi que les tests de performances et les tests de reproductibilité, Les résultats de notre étude seront présentés et interprétés dans le chapitre suivant.

## **Chapitre IV**

### **Résultats et Interprétations**

## **Chapitre IV**

### **Résultats et Interprétations**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats et leur interprétation.

### IV.1 Caractérisation chimique du ciment :

Les résultats d'analyse de la fluorescence X, de la perte au feu et de la chaux libre de ciment utilisés sont donnés aux tableaux IV.1. La perte au feu du ciment sans adjuvant « témoin » atteint 7.44% et le pourcentage de CaO est de 61.49%. Cette dernière valeur reste légèrement supérieure par rapport à la valeur de CaO du ciment utilisée actuellement au niveau de l'usine, sa valeur est de : 60.25%

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Chaux libre
Fraction (%) massique	18.96	4.62	3.10	61.49	2.23	0.67	0.85

**Tableau IV.1 Analyse chimique du ciment sans adjuvant.**

### IV.2 Caractérisation de la finesse des ciments

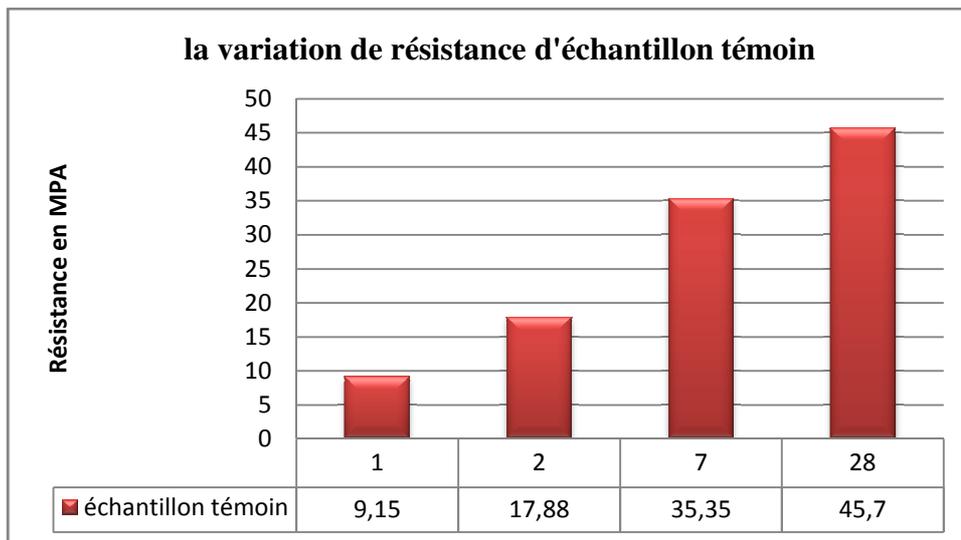
La finesse du ciment utilisé au cours de nos essais est caractérisée surface spécifique Blaine et le refus cumulé sur le tamis 45 µm et 90µm (tableau IV.2) sont données au tableau IV.3.

Ciment témoin		
Refus cumulé	20.71 (90µm)	4.31 (45 µm)
Surface spécifique Blaine	4108 cm <sup>2</sup> /g	

**Tableau IV.2 Refus cumulé et Surface spécifique de Blaine**

### IV.3 Résistances mécaniques du mortier de ciment sans adjuvant

La figure IV.1 représente l'évolution de la résistance à la compression (MPa) du mortier de ciment sans adjuvant à différents âges. Ces valeurs seront prises comme référence (témoin) pour la comparaison et l'interprétation



**Figure IV.1: Evolution de la résistance à la compression du mortier à ciment sans adjuvant**

### **IV.3 Résistances mécaniques du mortier de ciment avec adjuvant**

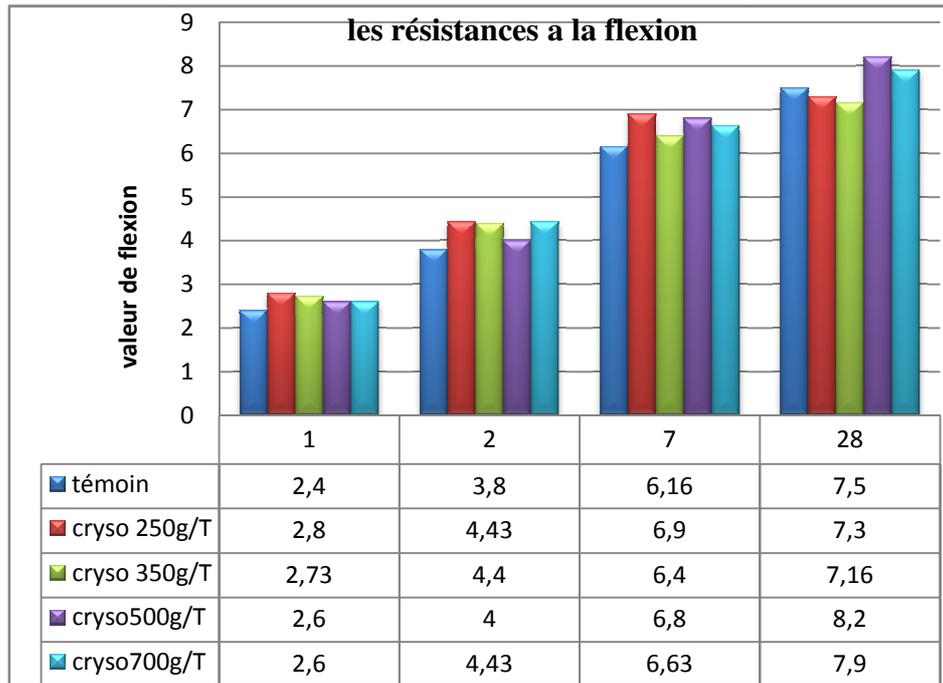
#### **IV.3.1 Effet de l'addition des agents de mouture à différents dosages**

##### **IV.3.1.1 Agent de mouture CRYSO**

La figure IV.2 illustre la résistance à la flexion des mortiers avec l'adjuvant CRYSO aux différents âges et dosages. On observe des augmentations de résistance par rapport à l'échantillon témoin pour tous les âges. En effet, à 1 jour la résistance à la flexion augmente par rapport au mortier témoin de 16% (de 2.4 à 2.8 MPa) pour un dosage de 250g/t et de 13% et 8% respectivement pour 350g/t, 500g/t et 700g/t.

A 2 jours, on constate une amélioration de résistance à la flexion jusqu'à 15% pour les dosages de 250g/t, 350g/t et 700g/t, par contre elle atteint 5% seulement de (3.8 à 4 Mpa) pour 500g/t.

Après une durée de 7 jours, on remarque une évolution variable de la résistance du mortier adjuvant par rapport au mortier témoin. A 28 jours on assiste à une augmentation jusqu'à 12% et 5% dans le cas d'utilisation des dosages de CRYSO 500g/t et 700g/t et une réduction au cas des mortiers avec dosage équivalent de 250g/t et 350g/t.



**Figure IV.2: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant CRYSO**

La figure IV.3 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers de ciment contenant l'agent de mouture CRYSO à différents dosages. On constate que quel que soit l'âge, les résistances de ces mortiers augmentent par rapport à la résistance du mortier témoin. On remarque au jeune âge (02 jours), la résistance du mortier avec additif est très comparable à celle du mortier témoin. Par exemple on constate une augmentation à la résistance jusqu'à de 2% par rapport au mortier contrôle pour le dosage de 500g/t. A 7 et 28 jours, la résistance augmente d'une manière variable, elle atteint 20% pour le dosage de 250g/t et un peu moins pour les autres dosages à l'échéance de 07 jour. En se basant sur la résistance après 28 jours, on observe une augmentation de 29% pour le CRYSO au dosage de 500g/t par rapport à l'échantillon témoin et de 17% par rapport à la résistance à 07 jours. Pour les autres dosages on constate une augmentation de 8%, 11%, 15% respectivement pour 250g/t, 350g/t et 700g/t.

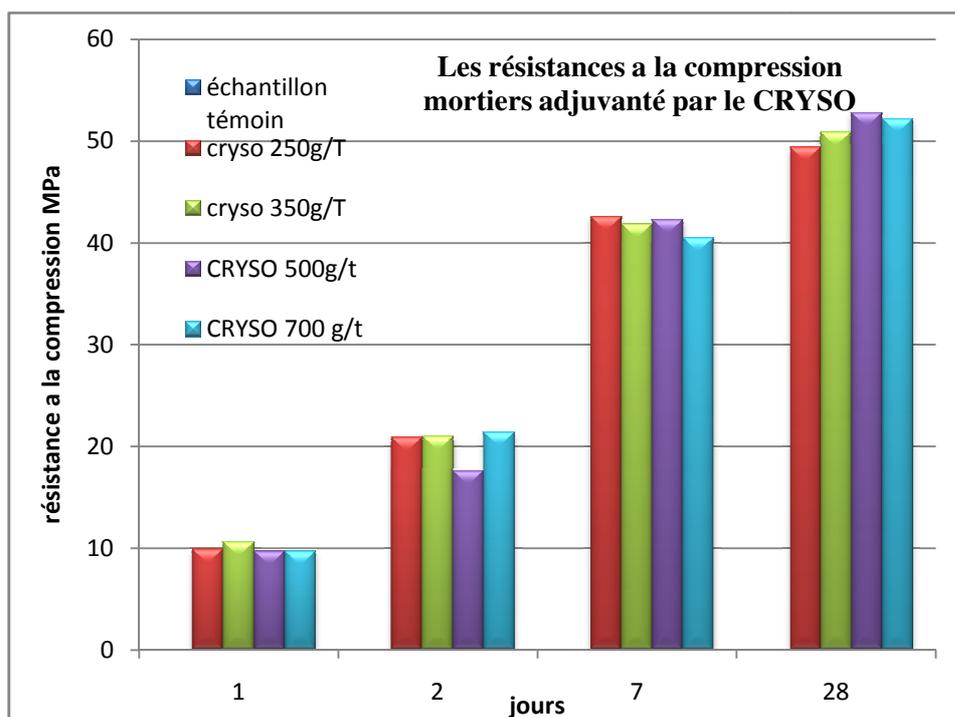


Figure IV.3: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant CRYSO.

#### IV.3.1.2 Agent de mouture BASF

La figure IV.4 illustre la résistance à la flexion des mortiers avec l'adjuvant BASF. On voit clairement l'augmentation de la valeur de la résistance dans le cas de l'utilisation des concentrations de 250 g /t, 350g/t et 500g/t aux échéances de 7 et 28 jours. A 28 jours cette augmentation atteint 10% au dosage de 250g/t.

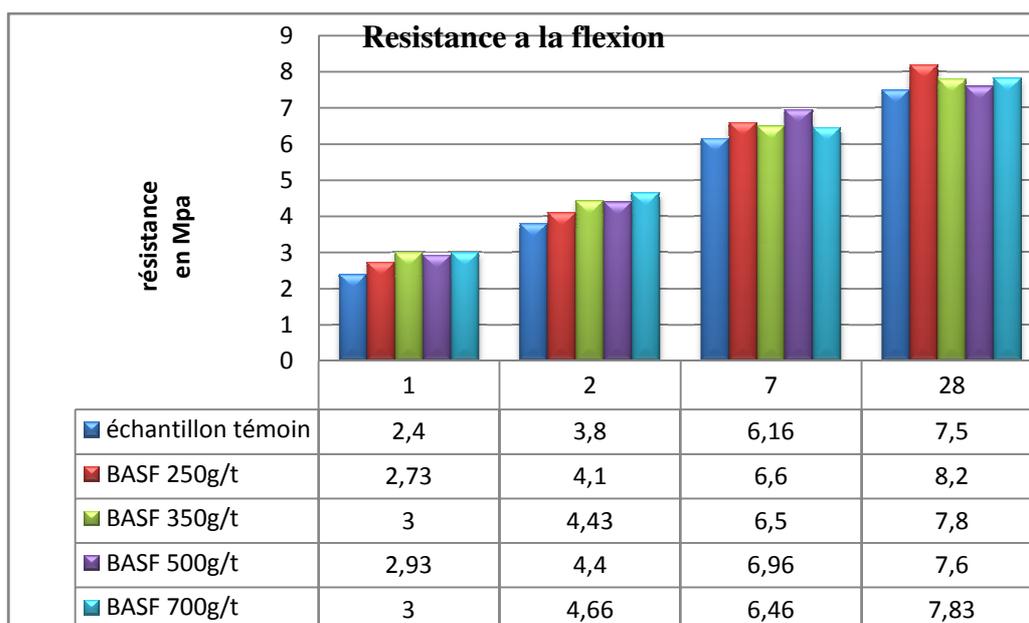
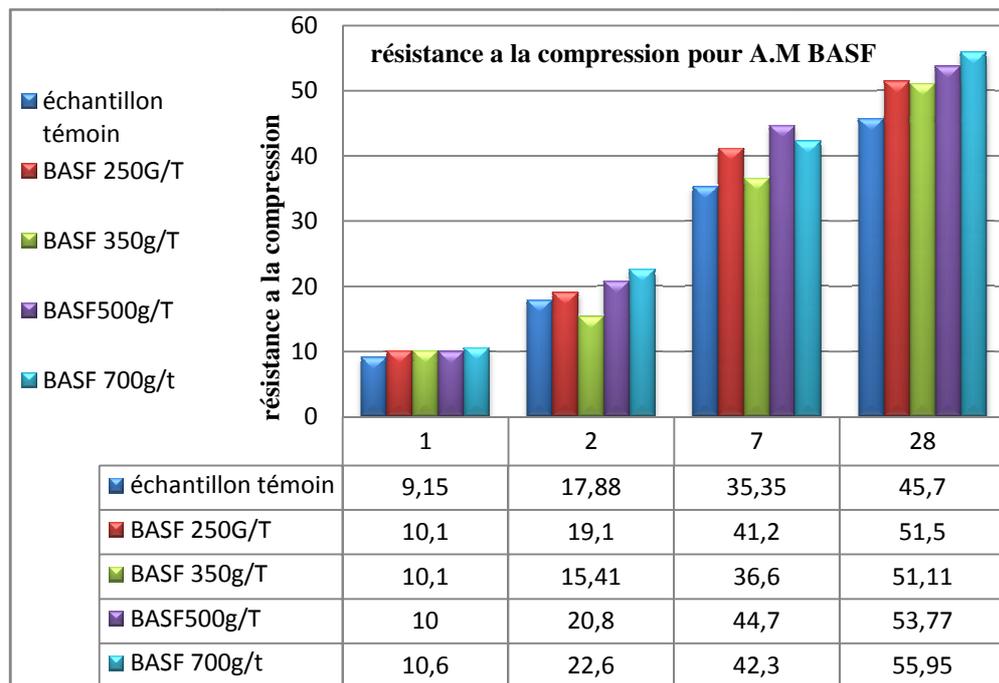


Figure IV.4: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant BASF.

La figure IV.5 représente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers adjuvantes par le BASF. A 1 jour on remarque une faible amélioration pour tous les dosages d'adjuvant.

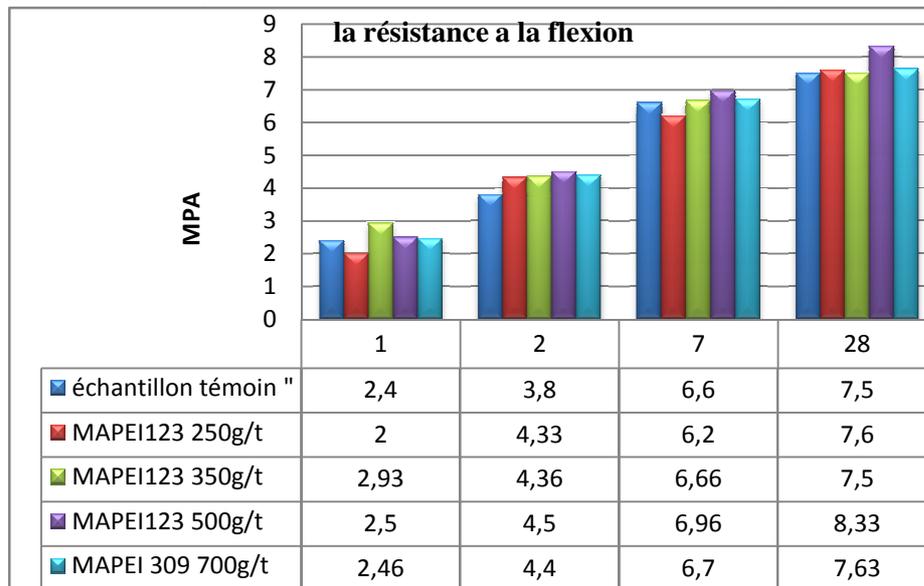
A 02 jours, les mortiers à 700 g/t de dosage atteint 26% d'augmentation en résistance par rapport au mortier témoin. A 7 et 28 jours les dosages de 500 et 700 g/t donnent un meilleur résultat par rapport aux autres essais, soient 26% d'augmentation à 7journs pour le dosage de 500g/t et 23% à 700g/t. Ainsi, on peut conclure que l'agent de mouture BASF est très favorable pour une utilisation de dosage de 500 g/t.



**Figure IV.5: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant BASF.**

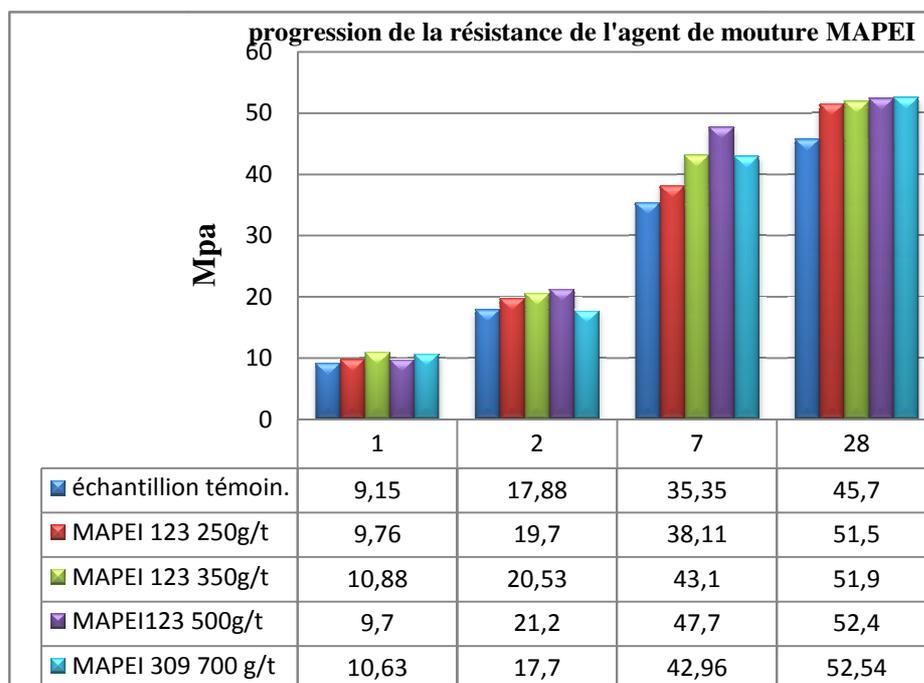
### IV.3.1.3 Agent de mouture MAPEI

La figure IV.6 représente les valeurs de la résistance en flexion au cas de l'usage d'agent de mouture MAPEI. Après le premier jour de démoulage on constate une diminution de 20% de la résistance dans le cas du dosage de 250g/t. A 2 jours, la résistance augmente pour tous les dosages et atteint jusqu'à 18% par apport à l'échantillon témoin. A 7 jours, on constate une forte augmentation de la résistance au MAPEI pour un dosage de 500 g/t. A 28 jours, on remarque aussi une bonne efficacité de l'agent de mouture à 500g/t avec une augmentation de de 11% par rapport à notre échantillon témoin.



**Figure IV.6: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant MAPEI.**

La figure IV.7 représente les résultats de l'évolution de la résistance à la compression pour l'adjuvant MAPEI. A 2 jours on observe une meilleure résistance pour un dosage de 350 g/t, soit une augmentation de 19%, bien que l'utilisation d'un dosage élevé 700 g/t conduit à une diminution de la résistance. A 07 jours on aura une amélioration de 38.11 MPA à 42.96, soit une amélioration de 13% de résistance. A 28 jours, tout en augmentant le dosage on aura plus de résistance, la plus grande valeur atteint 15 % par rapport à l'échantillon témoin. On note comme conclusion que le dosage recommandé pour l'utilisation d'agent de mouture MAPEI est de 500g/t.

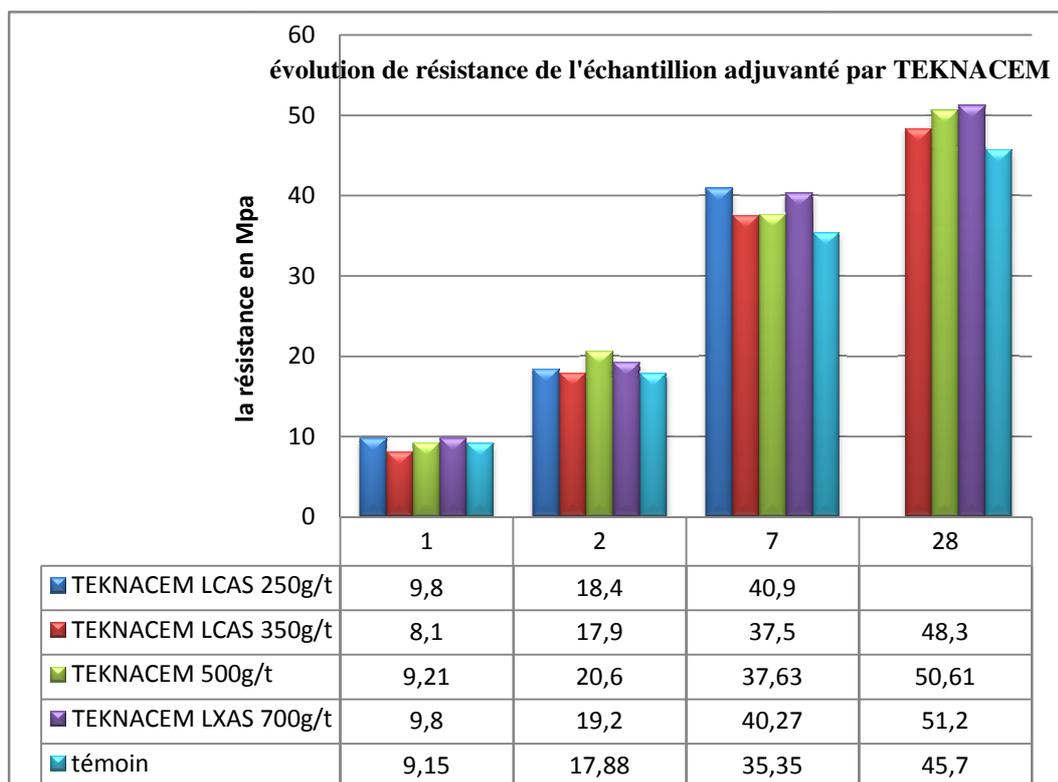


**Figure IV.7: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant MAPEI.**

#### IV.3.1.4 Agent de mouture TEKNACEM

La figure IV.8 représente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers de ciment contenant des taux de substitution d'agent de mouture TEKNACEM LCAS avec des dosages de 500g/t et le TEKNACEM LCAX 100S avec des dosages de 700g/t.

En 01 jour on observe la chute de résistance à l'utilisation de 350g/t d'agent de mouture, par contre on observe une légère augmentation de l'utilisation des quantités de 250g/t et 700 g/t. Cette légère augmentation continue après 02 jours avec l'émergence de l'augmentation de dosage à 500g/t. A partir de 07 jours, une petite augmentation à la valeur des résistances correspond à l'usage de 350 et 500 g/t, par contre augmentation remarquable pour un usage de 250 et 700g/t. A 28 jours, la résistance pour l'échantillon témoin, s'avère très comparable à celle de 700 et 500g/t et de manière moindre à celle de 350g/t.

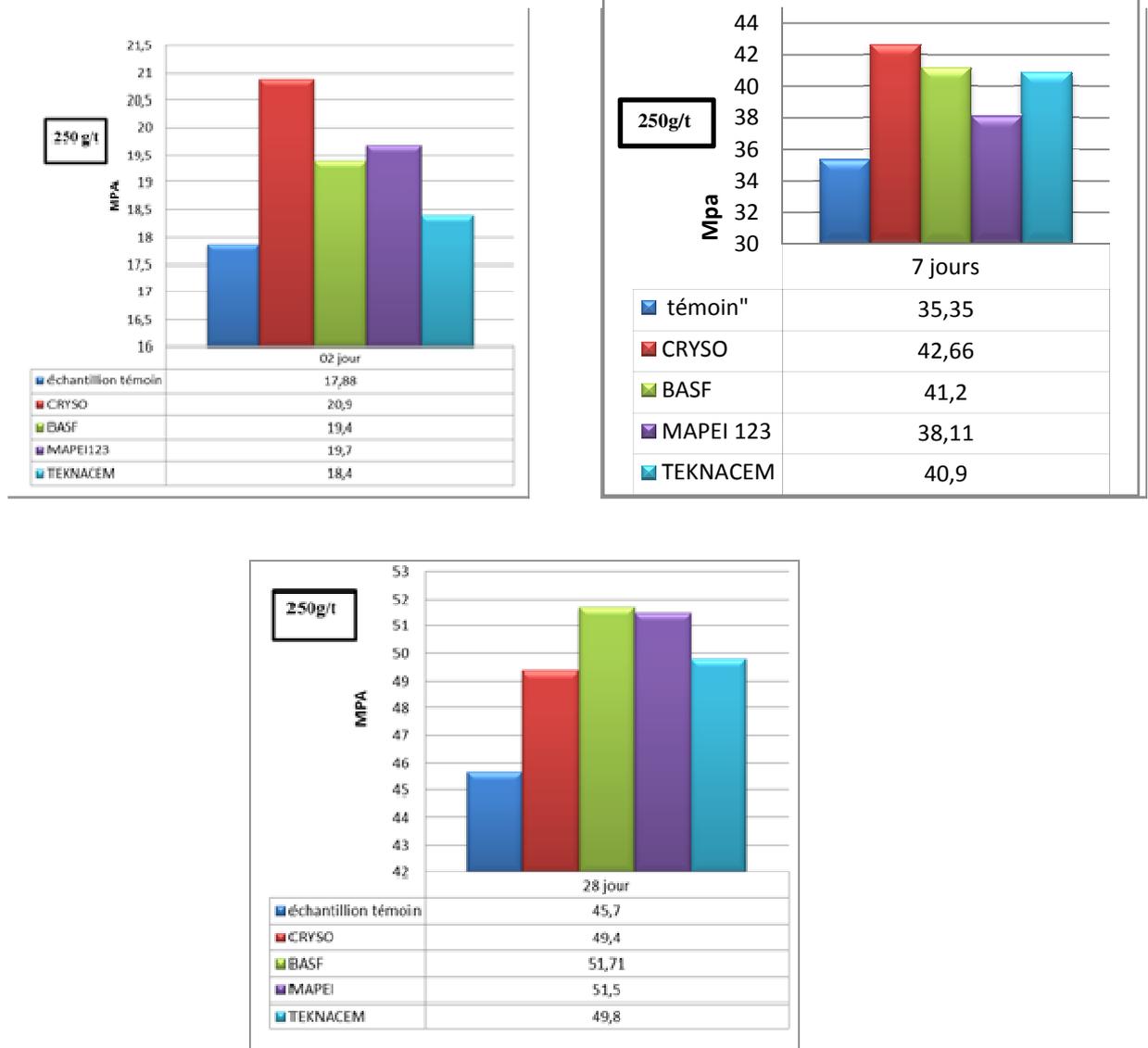


**Figure IV.8. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec l'adjuvant TEKNACEM.**

#### IV.4. Comparaison de l'effet des agents de mouture sur les résistances du mortier

Nous dégageons ci-après une comparaison de l'effet des agents de mouture à différents dosages sur les résistances. Ceci nous permettra de sélectionner l'adjuvant le plus favorable à utiliser dans le broyeur industriel.

##### IV.4.1 Dosage de 250g/t



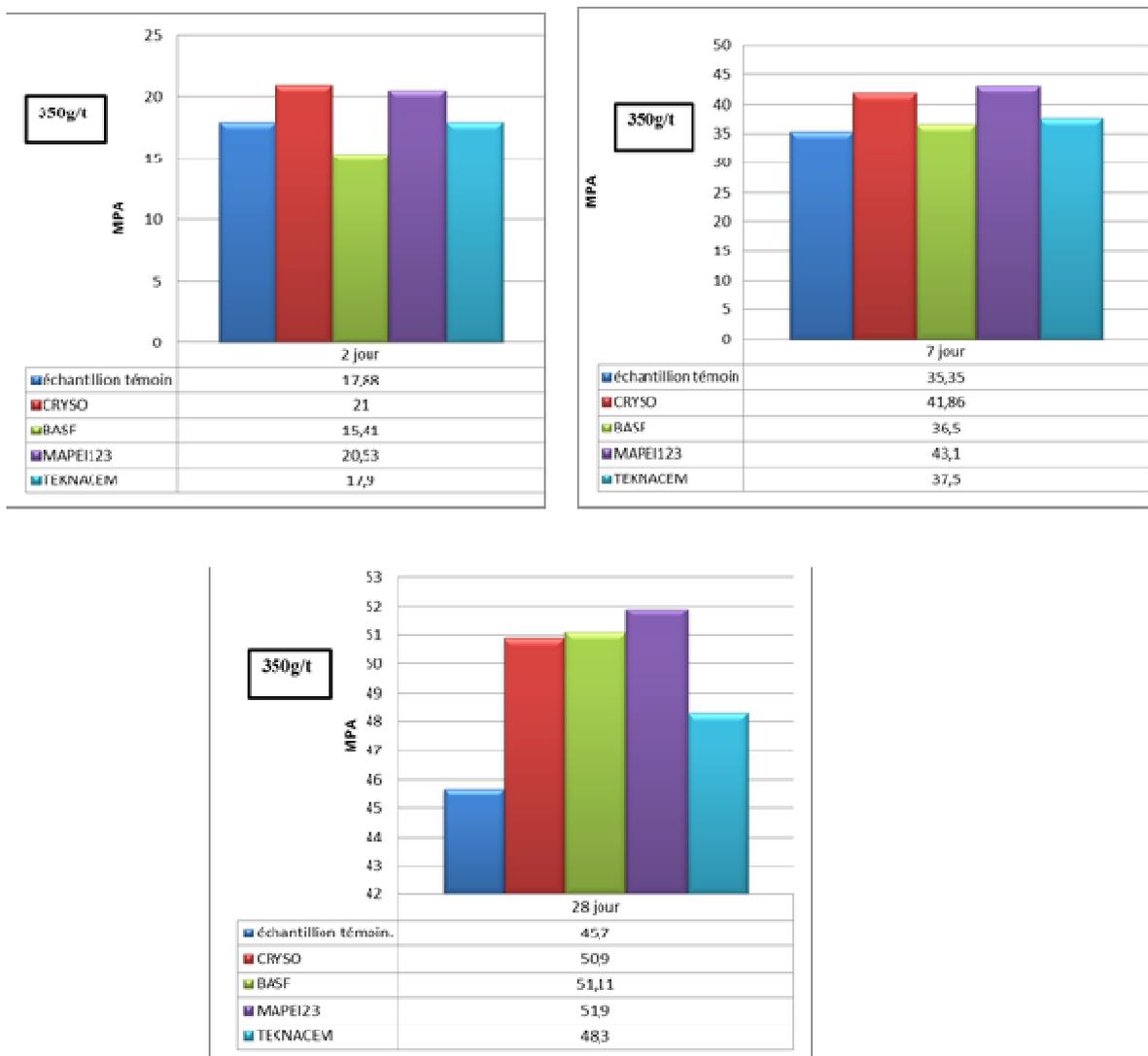
**Figure IV.9. Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 250g/t sur les résistances à la compression.**

La figure IV. 9 illustre l'effet de chaque agent de mouture sur la résistance après 02, 07 et 28 jours. On observe des augmentations systématiques de résistance à 02 jours et cela pour tous les types d'agent. Pour l'âge de 07 jours, une augmentation est atteinte jusqu'à 20% avec l'agent de mouture CRYSO et 17% avec l'agent BASF. Quant à l'âge de

28 jours, la résistance à la compression varie d'agent à un autre, elle atteint 8% pour l'agent CRYSO, 9% pour TEKNACEM, 13% pour MAPEI, et 14% pour BASF.

#### IV.4.2 Dosage de 350g/t

Après 02 jours, on note une réduction de résistance par l'usage des agents de mouture tels que BASF, MAPEI et TEKNACEM, par rapport au dosage de 350g/t (figure IV.10). A titre d'exemple, 27 % de réduction est atteinte pour BASF. Aussi, on constate des augmentations significatives de 18 % et 22 % pour les agents de mouture CRYSO et le MAPEI 123, après 07 jours. À 28 jours on remarque une augmentation importante de la résistance pour tous les agents de mouture, en particulier pour l'agent BASF.

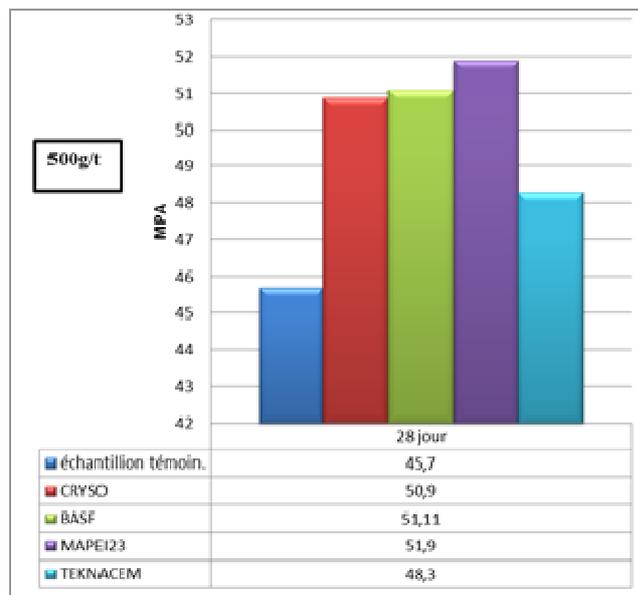
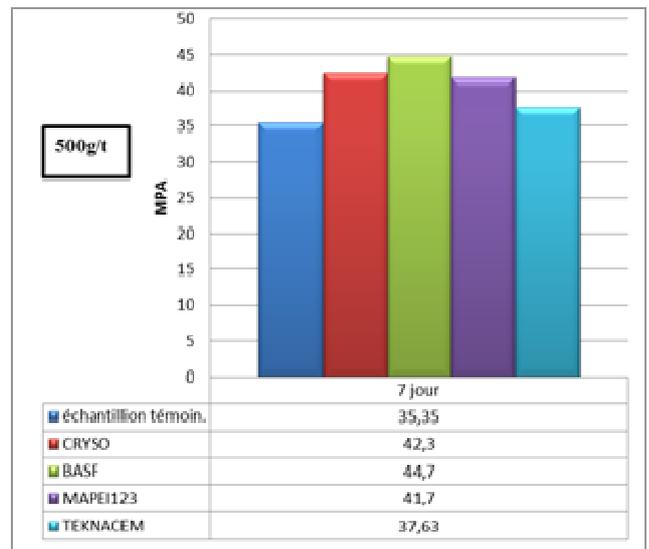
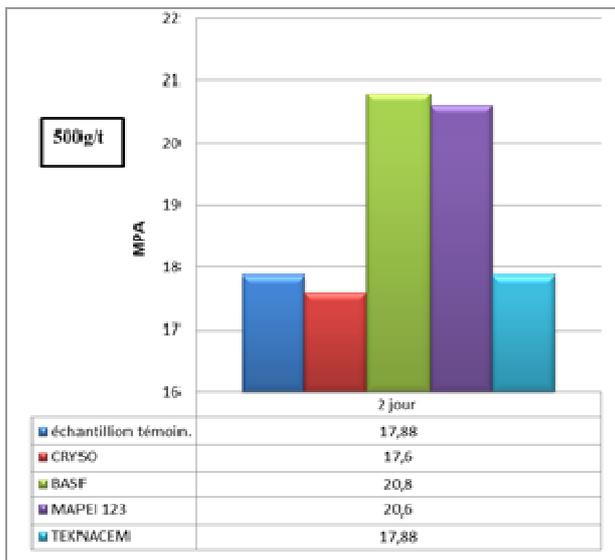


**Figure IV.10. Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 350g/t sur les résistances à la compression.**

#### IV.4.3 Dosage de 500g/t

Après 2 jours on remarque une augmentation importante de la résistance pour les agents BASF et MAPEI, une valeur moindre de celle d'échantillon témoin (17,6) pour l'agent CRYSO et une valeur presque égale à celle du témoin pour l'agent TEKNACEM (figure IV.11). A 7 jours le TEKNACEM n'as aucun effet par rapport à l'échantillon témoin par contre, l'agent CRYSO a récupéré la résistance.

D'autre part, à 28 jours on constate une augmentation très importante de la résistance pour tous les agents de mouture, en particulier des augmentations respectives de 14% et

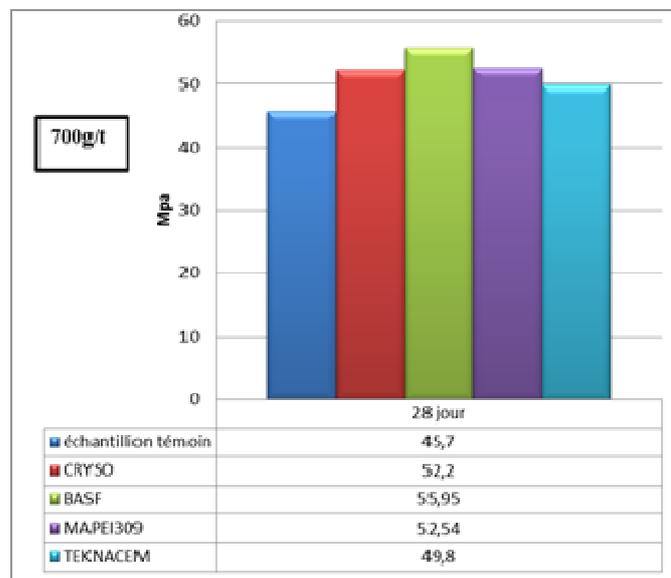
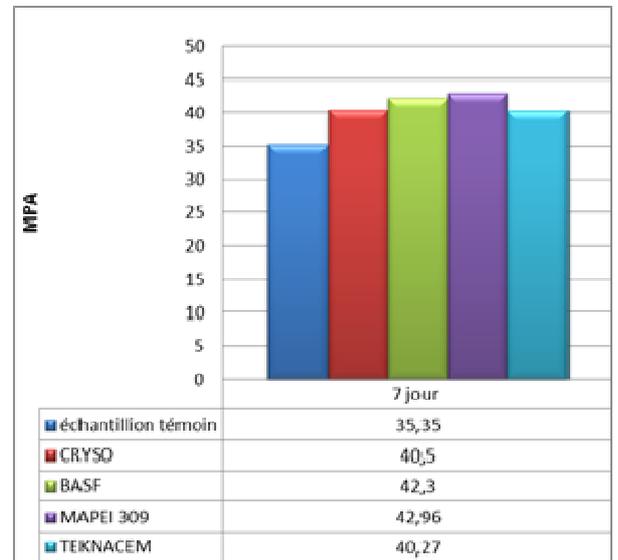
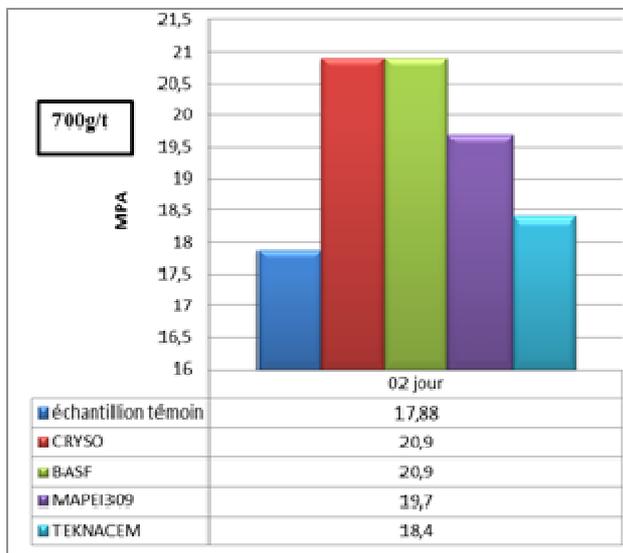


12% pour les agents BASF et MAPEI.

**Figure IV.11. Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 500g/t sur les résistances à la compression**

**IV.4.4 Dosage 700g/t :**

D'après la Figure IV.12, à 2 jours on remarque une augmentation de la résistance pour les agents BASF et MAPEI à une valeur de 21, et une valeur proche de celle du témoin pour l'agent TEKNACEM. A 07 jours, une augmentation très importante de la résistance est constatée pour tous les agents. Après 28 jours, on constate d'après ces résultats d'importantes augmentations manifestées par l'agent de mouture BASF (23%) et 15% pour MAPEI 309 et CRYSO. Tandis que pour TEKNACEM, on constate une faible augmentation de 8% seulement.



**Figure IV.12. Comparaison de l'effet des adjuvants au dosage 700g/t sur les résistances à la compression**

**Conclusion:**

A travers ces résultats, nous pouvons conclure que :

**Au jeune âge :**

- Le meilleur agent de mouture est le CRYSO qui présente une augmentation dans la résistance de compression 17% par rapport à l'échantillon du mortier témoin avec un dosage économique de 250g/t.
- L'agent de mouture BASF est déconseillé à l'usage en court terme, il présente une réduction de 14 % de résistance à la compression par rapport au mortier sans adjuvant avec l'usage d'un dosage de (250g/t).

**A long terme :**

- L'agent BASF est le meilleur adjuvant dans le cas du dosage recommandé de 500 g/t et d'un degré moindre l'agent de mouture MAPEI 123.
- Les agents CRYSO et le TEKNACEM ne sont pas efficaces car ils diminuent la résistance avec l'augmentation du dosage utilisé.

**IV.5 : les tests de reproductibilité est de répétabilité :**

L'écart \_ type des testes :

**Test 01 :**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	<b>0.838</b>	<b>0.167</b>	<b>0.175</b>	<b>0.599</b>

**Tableau IV.3 La reproductibilité de test n° :01**

**Test 02 :**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	0.343	0.632	0.599	0.564

**Tableau IV.4 La reproductibilité de test n° :02**

**Test 03 :**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	0.194	0.568	0.660	0.900

**Tableau IV.5 La reproductibilité de test n° :03**

**Test 04 :**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	0.200	0.951	0.634	1.102

**Tableau IV.6 La reproductibilité de test n° :04**

**Test 05+06**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	0.512	0.573	0.356	0.993

**Tableau IV.6 La reproductibilité de test n° : 5+6**

**Test 07 :**

<b>Echéance</b>	<b>01 jour</b>	<b>02 jour</b>	<b>07 jour</b>	<b>28 jour</b>
Valeur de test	0.882	0.308	0.743	0.412

**Tableau IV.7 La reproductibilité de test n° :07**

Nous remarquons un écart type des testes assez bien des valeurs de reproductibilités qu'est a été conclue d'après ces échantillons sauf quelque valeur qui sont pas identique ( T°, humidité , ect ... ) .

Sur cette base nous pouvons compter sur les résultats obtenus dans les testes réalisé avec les différents agents de mouture, sachant que la reproductibilité a été faites sur un échantillon témoin (sans adjuvant).

La cause : de l'usage de ciment témoin : pour puisse calculer et comparer avec les autres agents de mouture.

#### IV.6 : Les tableaux de performance :

##### A 02 jours :

	Dosage	CRYSO	BASF	MAPEI	TEKNACEM
La performance En Pa/[g/t]	250g/t	12.08	6.08	7.56	2.36
	350g/t	8.91	-7.06	7.77	2.87
	500g/t	-0.56	5.98	6.78	5.58
	700g/t	5.03	6.84	0.16	1.99

Tableau IV.7 : la performance des agents de mouture sur le 02 jours.

##### A 07 jours :

	Dosage	CRYSO	BASF	MAPEI	TEKNACEM
La performance En Pa/[g/t]	250g/t	29.24	23.4	11.04	22.2
	350g/t	18.6	17.89	22.14	6.14
	500g/t	13.9	18.7	12.7	4.56
	700g/t	7.36	9.93	10.87	7.03

Tableau IV.8 : la performance des agents de mouture sur le 07 jours.

**A 28 jours :**

	<b>Dosage</b>	<b>CRYSO</b>	<b>BASF</b>	<b>MAPEI</b>	<b>TEKNACEM</b>
La performance En Pa/[g/t]	<b>250g/t</b>	14.8	24	23.2	-
	<b>350g/t</b>	14.86	15.46	17.71	7.43
	<b>500g/t</b>	15.8	16.06	13.4	9.82
	<b>700g/t</b>	9.29	14.64	9.77	4.94

**Tableau IV.9 : la performance des agents de mouture sur le 28 jours.**

## **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE :

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent mener aux conclusions générales suivantes :  
D'un point de vue comparaison entre l'effet des agents de mouture sur la durabilité du mortier à ciment composé au calcaire, on peut résumer les résultats comme suit :

### **Au jeune âge :**

- Le meilleur agent de mouture est le CRYSO qui présente une augmentation dans la résistance de compression 17% par rapport à l'échantillon du mortier témoin avec un dosage économique de 250g/t, et un très grand performance a cette âge attint jusqu'a :12.08 Pa par g d'agent .
- L'agent de mouture BASF est déconseiller à l'usage en court terme, il présente une réduction de14 % de résistance à la compression par rapport au mortier sans adjuvant avec l'usage d'un dosage de (250g/t).

### **A longue terme :**

- L'agent BASF est le meilleur adjuvant dans le cas du dosage recommandé de 500 g/t et d'un degré moindre l'agent de mouture MAPEI 123, avec une performance élevé par apport autre agent de mouture de:24 Pa et 23.2 Pa/g respectivement.
- Les agents CRYSO est le TEKNACEM ne sont pas efficaces car ils diminuent la résistance avec l'augmentation du dosage utilisé.

Par ailleurs, si l'ensemble des résultats de cette étude a identifié les agents de mouture les plus performants et leurs effets sur la durabilité du mortier à ciment composé au calcaire, la nature et l'identification de leur la structure moléculaire d'une part et la compréhension des mécanismes de leurs actions et des causes qui président à leur utilisation restent inconnues. Ainsi, nous préconisons en perspectives une autre étude qui permettra de caractériser ces agents de moutures employées et de les classifier par rapport à ceux usuellement utilisés par la littérature.

## Perspectives

Si cette étude est poursuivie, un ensemble de mesures devrait être suivi, de manière à Optimiser les résultats de broyage :

- Afin de mieux appréhender le mode d'action d'agent de mouture', il faut déterminer la molécule la plus importante dans les additifs « la recette magique », et qui est responsable sur l'augmentation de résistance, et pourquoi pas: on atteindrait même à synthèse de cette molécule.

Ainsi on s'intéresse aussi si elle reste stable au cours de son stockage. Pour cela, il faudrait déterminer si chacune de ses molécules A', B' et C reste identique dans la formulation au cours du temps, et examiner l'homogénéité du mélange.

- Etude de nocivité de ciment avec adjuvant : pour savoir influence des agents et leurs dosages sur la santé humaine.
- L'objectif reste: meilleure résistance ; moins de coût ; et moins de nocivité de ciment.

## La Bibliographie

- [1] [Seidel G., Huckauf H., Jochen S.], Technologie des ciments, chaux, plâtre : Processus et installations de cuisson, Septima, Paris (1980).
- [2] [Papadakis M et Venuat M.]. Industrie de la chaux du ciment et du plâtre, Dunod, Paris (1970)
- [3] [Pliskin L.]. la fabrication du ciment, ciment français, Edition Eyrolis, paris (1993).
- [4] [Morsli Y.]. Influence des ajouts minéraux actifs sur les propriétés des CPJ, mémoire de fin d'études, Institut des matériaux de construction, Boumerdès, (1988).
- [5] [Delubac G.]. (Coordonnateur). Aspects théoriques du broyage, Mines et Carrières les Techniques, III-IV, (1996) 15-33.
- [6] [Tokyay [1999].: strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing , cement and concrete research 29,1737,1774.
- [7] [Opoczky, 1996]. Grinding technical question of producing composite cement, international journal of mineral processing.1996
- [8] [Erdogdu *et al.*, 1999]: the grinding of clinker at elevated temperature and the agglomeration of particule , world ciment. Zurich, p. 1- 10
- [9] [Sohoni et coll (1991)] the effect of grinding aids on the fine grinding of limestone , quartz and Portland cement, powder technology vol. 31, n. 3-4, p. 208-210
- [10] [Opoczky L.]. Fine grinding and agglomeration of silicates, Powder Technology, 17, (1977)1-7.
- [11] [Herbst J.A. et Fuerstenau D.W]..,Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models, Int. Journal. Min. Processing, 7, (1980) 1-31.
- [12] [HENRY, 1977] Grinding aids , row and finish milles , shorte course on mill grinding , Portland cement association. , NewDehü, vol. 6, p. 182-8.
- [13] [Beke, 1973] grinding body size and hardening of cement –cement technology 45-50
- [14] [Opoczky, 1979] advance in cement technologie , critical reviews and case studies on manufacturing qualite control –optimization and use – India 1979

- [15] [Tsimas et al, 1982] : the grinding of clinker at elevated temperature and the agglomeration of particule , world ciment.
- [16] [BORNAIN et REGOURD, 1980] ciment, betons , platre , chaux ,1980
- [17] [MERCIER, 1977]: finish grinding , short course on mill grinding , Portland cement association.
- [18] [MSSAZZA et TESTOLIN, 1980] latest developments ine the use of admixture for cement and concret to cement.
- [19] [Rehbinder et Shchukin, 1972] surface phenomina in solide during deformation and fracture processes 1972.
- [20] [Westwoodet al., 1981] Developments in the theory and applications of chemomechanical effects, Colloids and Surfaces, 2 (1981), 1-35
- [21] [Ikazakiet al.,1996] R.chem.lett (1996) 265
- [22] [Moothedath et Ahluwalia, 1992], Mechanism of action of grinding aids in comminution, Powder technology, 71 (1992), 229-237
- [23] [Nair et Paramasivam, 1999] Original Research Article in Powder Technology | Vol 101, Iss 1, Pgs 1-106, (4 January 1999 ...)
- [24] [Rao et Forssberg, 1997] Effect of fatty acid additives on the material flow propertiesof dry grinding
- [25] [NA 442/2000.] norme Algérienne par les membres de comité technique national n°37 « **Liants - bétons – granulats** » conformément a la résolution du procès verbal de réunion n°03 de : 19/04/2004

# **Annexes**

## 1- La spécification des agents de mouture :

- 04 agents de mouture sont essayés :
- Le premier est : **MA.G.A/ C123** : C'est un liquide à haut efficacité, brun, fabriqué par la société MAPEI/TACHIMCO destiné pour l'usage sur ciments portland à haut finesse (3200-4600  $cm^2$ ) à 200 à 500 g/T
  - **MAPEI S309** : c'est un liquide brunâtre fabriqué par la même société destiné pour les dosages de 700-900 g/T .
- Le deuxième est le **CRYSO AMA 36L** : est un liquide brun, fabriqué par la société CRYSO S.A.S , Densité (20°C) en  $kg/dm^3$  :  $1,060 \pm 0,015$ : un additif pour ciment à hautes performances, formulé pour activer les résistances à l'échéance de 01 , 07, 28 jours du ciment. Il permet également de réduire le facteur clinker du ciment en conservant les mêmes niveaux de résistances à la compression.
  - **CRYSO AMA 37L** : liquide stable Couleur : Brun fabriqué par la société précédente. Densité (20°C) en  $kg/dm^3$  :  $1,040 \pm 0,02$  pH (20°C) :  $9,5 \pm 1,5$  Teneur en  $Na_2O$  équivalent :  $\leq 1,00$  % en teneur. est un additif pour ciment à hautes performances, formulé pour activer les résistances à 28 jours du ciment.
- Le troisième agent de mouture est le **BASF : MasterCem ES 2121** Anciennement désigné: CEMENTIUM 2121 est un agent de mouture à haut performance – Activateur de résistances à 2 et 28 jours Liquide Brunâtre Densité à 20°C: 1.200 - 1.260  $g/cm^3$  , pH à 20°C: 6.5 – 8.5.7
- le quatrième agent de mouture est le **TEKNACEM LCAS** et le **TEKNACEM LCAX 100S** :  
se sont des adjuvants liquide en solution aqueuse à base d'aminés modifiés qui permet d'améliorer la capacité de mouture des broyeurs sont des liquides avec une couleur brun et densité à 20°C:  $1,04 \pm 0,01$  Ph à 20 °C :  $11 \pm 1$ .



(Figure ) : les produits utilisés au cours de nos expériences

## 2. Les éprouvettes adjuvantes

### 2.1 Résultats d'essai physico-mécanique :

#### 2.1.1 Résistances à la flexion /compression de l'échantillon témoin :

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
	<b>Témoin</b>	586.10	585.20	588.31	<b>586.31</b>	<b>Rc</b>	9.20	9.20	9.20	9.30	9.10	8.90
<b>Rf</b>						2.40		2.30		2.50		<b>2.40</b>
586.87		585.67	585.04	<b>585.86</b>	<b>Rc</b>	18.0	18.4	17.90	17.90	17.9	17.2	<b>17.88</b>
					<b>Rf</b>	3.60		4.0		3.80		<b>3.80</b>
587.31		587.4	586.92	<b>587.21</b>	<b>Rc</b>	36.3	36.1	35.3	34.3	35.2	34.9	<b>35.35</b>
					<b>Rf</b>	6.2		6.1		6.2		<b>6.16</b>
584.86		583.94	585.35	<b>584.71</b>	<b>Rc</b>	45.9	46.1	45.6	46.2	45.8	45.1	<b>45.7</b>
					<b>Rf</b>	7.4		8.00		7.10		<b>7.5</b>

**Tableau 1** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes de mortiers témoin.

#### 2.1.2 Résistances à la flexion /compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M CRYSO de dosage équivalent de 250g/t

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
	<b>CRYSO 250g/t</b>	582.04	582.96	580.00	<b>581.66</b>	<b>Rc</b>	9.9	9.6	9.90	10.00	10.10	9.9
<b>Rf</b>						2.80		2.90		2.70		<b>2.80</b>
582.98		583.15	582.36	<b>582.83</b>	<b>Rc</b>	21.20	21.2	21.6	20.9	19.6	20.9	<b>20.9</b>
					<b>Rf</b>	4.5		4.6		4.2		<b>4.43</b>
582.04		583.29	580.76	<b>582.03</b>	<b>Rc</b>	42.9	42.5	42.4	43.8	41.6	42.2	<b>42.56</b>
					<b>Rf</b>	7.10		7.10		6.70		<b>6.96</b>
582.94		580.76	582.70	<b>582.13</b>	<b>Rc</b>	49.00	49.5	50.4	49.30	48.6	50.7	<b>49.40</b>
					<b>Rf</b>	7.30		7.50		7.10		<b>7.30</b>

**Tableau 2** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvante en utilisant le CRYSO A 250g/T

**2.1.3 Résistances à la flexion /compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M CRYSO de dosage équivalent de 350g/t**

	Masse 0	Masse 0	Masse 0	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	10.4	10.1	11	10.6	10.70		10.70
<b>CRYSO 350g/t</b>	589.66	586.86	585.5	<b>587.34</b>	Rc	10.4	10.1	11	10.6	10.70	10.70	<b>10.6</b>
					Rf	2.5		2.60		3.10		<b>2.73</b>
	582.54	586.65	584.5	<b>584.56</b>	Rc	21.9	21.3	21.2	20.7	20.8	20.8	<b>21.00</b>
					Rf	4.5		4.1		4.60		<b>4.4</b>
	575.87	577.33	578.35	<b>577.18</b>	Rc	41.5	43.2	41.5	42.40	40.3	42.3	<b>41.86</b>
					Rf	6.7		6.7		5.80		<b>6.4</b>
	582.33	583.19	582.56	<b>582.69</b>	Rc	52.7	51.9	52.3	49.3	50.9	50.0	<b>50.9</b>
					Rf	7.10		8.30		7.6		<b>7.66</b>

**Tableau 3 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvante en utilisant le CRYSO A 350g/T

**2.1.4 Résistances à la flexion compression des éprouvettes adjuvante avec A.M CRYSO de dosage équivalent de 500g/**

	Masse 0	Masse 0	Masse 0	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	9.20	9.8	9.9	9.9	9.8		9.6
<b>CRYSO 500g/t</b>	585.81	589.27	586.89	<b>587.32</b>	Rc	9.20	9.8	9.9	9.9	9.8	9.6	<b>9.7</b>
					Rf	2.6		2.6		2.6		<b>2.6</b>
	583.17	576.22	580.43	<b>579.94</b>	Rc	17.9	17.4	17.3	17.4	17.6	18.1	<b>17.6</b>
					Rf	4.10		4		3.9		<b>4.00</b>
	583.32	582.73	581.44	<b>582.49</b>	Rc	44	43.3	40.00	43.4	41.9	42.9	<b>42.3</b>
					Rf	7.10		6.7		6.6		<b>6.8</b>
	579.86	582.98	581.33	<b>581.39</b>	Rc	50.5	54.6	53.00	52.6	54.8	53.1	<b>52.8</b>
					Rf	8.10		8.1		8.40		<b>8.20</b>

**Tableau 4 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvante en utilisant le CRYSO A 500g/T

**2.1.5 Résistances à la flexion compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M CRYSO de dosage équivalent de 700g/t**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a la flexion						Moy	
					Rc							
<b>CRYSO 700g/t</b>	584.77	578.9	580.11	<b>581.26</b>	Rc	9.5	9.70	9.6	9.20	10.1	10.1	<b>9.70</b>
					Rf	2.5		2.5		2.8		<b>2.60</b>
	582.44	583.45	583.44	<b>583.11</b>	Rc	21.1	21.1	21.6	21.6	21.4	21.5	<b>21.4</b>
					Rf	4.3		4.50		4.50		<b>4.43</b>
	587.23	582.23	576.17	<b>581.87</b>	Rc	40.2	40.3	40.6	41.4	40.7	40.7	<b>40.5</b>
					Rf	6.7		6.5		6.7		<b>6.63</b>
	587.00	579.68	573.87	<b>580.18</b>	Rc	53.6	53.5	53.2	53.1	50.8	52.4	<b>52.2</b>
					Rf	8.10		7.90		7.80		<b>7.93</b>

**Tableau 5 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvante en utilisant le CRYSO A 700g/T

**2.1.6 Résistances à la flexion/ compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M BASF de dosage équivalent de 250g/t**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a la flexion						Moy	
					Rc							
<b>BASF 250g/t</b>	585.24	584.75	585.24	<b>585.07</b>	Rc	10.2	10.2	10.1	9.9	10.1	10.2	<b>10.1</b>
					Rf	2.7		2.8		2.7		<b>2.73</b>
	588.23	588.23	587.67	<b>588.04</b>	Rc	19.9	19.5	19.10	20.0	19.4	19.9	<b>19.4</b>
					Rf	3.9		4.3		4.1		<b>4.1</b>
	586.82	586.93	585.42	<b>586.39</b>	Rc	41.2	41.4	40.4	41.4	40.9	41.8	<b>41.2</b>
					Rf	6.9		6.4		6.5		<b>6.6</b>
	587.31	587.79	588.28	<b>587.79</b>	Rc	52.6	53.3	52.2	51.30	51.3	50.7	<b>51.5</b>
					Rf	8.30		8.0		8.3		<b>8.23</b>

**Tableau 6 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvante en utilisant le BASF 250g/T.

**2.1.7 Résistances à la flexion/ compression des éprouvettes adjuvante avec A.M BASF de dosage équivalent de 350g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a la flexion						Moy	
					Rc	10	10.1	10.2	10.4	9.8		10.1
<b>BASF 350g/t</b>	586.52	585.71	585.683	<b>585.971</b>	Rc	10	10.1	10.2	10.4	9.8	10.1	<b>10.1</b>
					Rf	3.1		2.6		<b>3.0</b>		
	592.17	591.60	591.17	<b>591.64</b>	Rc	15.1	14.6	16.3	14.5	16.2	15.8	<b>15.41</b>
					Rf	4.1		4.5		4.7		<b>4.43</b>
	593.27	593.46	593.17	<b>593.3</b>	Rc	41.9	42.1	40.8	41.3	42.6	41.0	<b>41.6</b>
					Rf	68		6.3		6.4		<b>6.5</b>
	590.73	591.14	593.82	<b>591.89</b>	Rc	51.0	49.8	51.4	51.5	51.5	51.4	<b>51.11</b>
					Rf	7.8		7.8		7.8		<b>7.8</b>

**Tableau 7 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le BASF a 350 g/T

**2.1.8 Résistances à la flexion /compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M BASF de dosage équivalent de 500g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a la flexion						Moy	
					Rc	10.1	10.0	9.8	9.8	10.2		10
<b>BASF 500g/T</b>	586.61	586.70	586.27	<b>586.52</b>	Rc	10.1	10.0	9.8	9.8	10.2	10	<b>10</b>
					Rf	2.9		2.7		3.2		<b>2.93</b>
	587.40	586.28	586.67	<b>586.78</b>	Rc	21.2	21.0	20.8	20.20	20.5	20.9	<b>20.8</b>
					Rf	4.6		4.20		4.40		<b>4.40</b>
	596.05	596.86	598.13	<b>597.01</b>	Rc	43.2	45.1	41.1	45.8	45.2	43.8	<b>44.03</b>
					Rf	6.8		7.4		6.7		<b>6.96</b>
	589.34	590.03	588.52	<b>589.29</b>	Rc	53.4	54.9	54.2	53.10	54.3	52.5	<b>53.73</b>
					Rf	7.9		7.6		7.20		<b>7.6</b>

**Tableau 8 :** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le BASF a 500 g/T

**2.1.9 Résistances à la flexion /compression des éprouvettes adjuvanté avec A.M BASF de dosage équivalent de 700g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	9.6	10.0	9.8	10.1	9.7		9.4
<b>BASF 700g/T</b>	591.74	592.20	590.42	<b>591.45</b>	Rc	9.6	10.0	9.8	10.1	9.7	9.4	<b>9.76</b>
					Rf	2.5		3.20		3.00		<b>2.9</b>
	589.97	591.19	587.16	<b>589.044</b>	Rc	19.4	19.5	19.3	19.7	20.3	20	<b>19.7</b>
					Rf	3.8		4.3		4.6		<b>4.23</b>
	581.51	582.30	578.61	<b>580.8</b>	Rc	37.2	37.7	39.3	38.1	37.6	39.0	<b>38.15</b>
					Rf	5.9		6.5		6.20		<b>6.2</b>
	584.58	586.28	586.46	<b>585.77</b>	Rc	54.0	54.1	52.7	50.0	49.9	51.0	<b>51.5</b>
					Rf	7.7		6.8		8.30		<b>7.6</b>

**Tableau 9** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le BASF a 700 g/T

**2.1.10 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M : MAPEI 123 de dosage équivalent de 250g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	9.60	10.0	9.8	10.1	9.7		9.4
<b>MAPEI 123 250g/T</b>	591.74	592.20	590.42	<b>591.45</b>	Rc	9.60	10.0	9.8	10.1	9.7	9.4	<b>9.76</b>
					Rf	2.50		3.20		3.0		<b>2.9</b>
	589.98	588.97	587.16	<b>588.70</b>	Rc	19.4	19.5	19.3	19.7	20.3	20	<b>19.7</b>
					Rf	3.8		4.3		4.6		<b>4.23</b>
	581.51	582.30	578.61	<b>580.8</b>	Rc	37.2	37.7	39.30	38.10	37.6	39.0	<b>38.15</b>
					Rf	6.90		6.50		6.20		<b>6.53</b>
	584.83	586.28	586.46	<b>585.85</b>	Rc	54.0	54.1	52.7	50	49.9	51.0	<b>51.5</b>
					Rf	7.7		6.8		8.30		<b>7.6</b>

**Tableau 11** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le MAPEI 123 a 250g/T

**2.1.12 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M : MAPEI 123 de dosage équivalent de 350g/T**

	Masse 0	Masse 0	Masse 0	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc							
<b>MAPEI 123 350g/T</b>	581.36	587.25	580.28	<b>582.96</b>	Rc	10.6	10.6	10.9	10.8	11.2	11.2	<b>10.88</b>
					Rf	3.1		2.7		3		<b>2.93</b>
	579.98	580.99	574.28	<b>578.41</b>	Rc	20.2	20.5	20.5	20.3	20.7	21	<b>20.53</b>
					Rf	4.3		4.5		4.3		<b>4.36</b>
	581.36	582.39	577.58	<b>580.44</b>	Rc	43.1	43.7	43.6	43.0	42.9	42.9	<b>43.2</b>
					Rf	6.6		6.7		6.7		<b>6.66</b>
586.02	587.82	589.86	<b>587.9</b>	Rc	50.9	53.1	53.3	52.1	50.9	52.7	<b>52.16</b>	
				Rf	7.4		7.7		7.6		<b>7.56</b>	

**Tableau 12** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le MAPEI 123 a 350g/T

**2.1.13 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M : MAPEI 123 de dosage équivalent de 500g/T**

	Masse 0	Masse 0	Masse 0	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc							
<b>MAPEI 123 500g/T</b>	571.69	575.17	573.58	<b>573.48</b>	Rc	9.6	10	9.4	9.8	9.7	9.8	<b>9.7</b>
					Rf	2.4		2.6		2.5		<b>2.5</b>
	583.95	589.98	586.64	<b>586.85</b>	Rc	21.9	21.2	21.2	21.1	22.7	21.0	<b>21.2</b>
					Rf	4.5		4.4		4.6		<b>4.5</b>
	588.68	589.28	586.71	<b>588.22</b>	Rc	42.3	41.0	43.1	41.6	41.7	41.8	<b>41.7</b>
					Rf	6.4		7.3		7.2		<b>6.96</b>
582.47	583.16	585.16	<b>583.59</b>	Rc	52.7	51.9	52.8	52.1	53	51.9	<b>52.4</b>	
				Rf	8.30		8.4		8.30		<b>8.33</b>	

**Tableau 13** : Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le MAPEI 123 a 500g/T

**2.1.14 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M : MAPEI  
123 de dosage équivalent de 700g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc							
<b>MAPEI 309 700g/T</b>	584.85	582.41	581.6	<b>582.95</b>	Rc	10.7	10.4	10.1	10.47	10.9	11.6	<b>10.63</b>
					Rf	2.7		1.7		3.0		<b>2.46</b>
	590.17	588.99	589.73	<b>589.63</b>	Rc	15.7	18.8	16.2	17.2	21.4	21.0	<b>17.7</b>
					Rf	4.3		4.3		4.60		<b>4.4</b>
	590.17	581.03	579.16	<b>583.45</b>	Rc	41.10	43.6	41.6	41.9	41.7	41.8	<b>41.95</b>
					Rf	7.00		6.40		-		<b>6.7</b>
	589.15	589.15	590.9	<b>589.73</b>	Rc		52.5	52	52.6	52.5	53.1	<b>52.4</b>
					Rf	8.4		7.3		7.2		<b>7.63</b>

**Tableau 14:** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le MAPEI 309 a 700g/T

**2.1.15 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M : de  
TEKNACEM LCAS dosage équivalent de 250g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc							
TEKNACEM LCAS 250g/T	578.67	582.05	581.16	<b>580.62</b>	Rc	9.7	9.6	10.2	10.2	10.2	9.8	<b>9.8</b>
					Rf	2.6		2.96		2.7		<b>2.75</b>
	576.37	576.37	576.51	<b>576.41</b>	Rc	18.7	18.7	18.3	18.4	18.9	18.5	<b>18.4</b>
					Rf	4.0		4.0		4.0		<b>4.0</b>
	588.30	588.30	585.51	<b>587.37</b>	Rc	39.6	42.20	41.2	37.7	41.8	39.7	<b>40.9</b>
					Rf	5.90		7.20		6.70		<b>6.6</b>
	577.75	581.55	580.11	<b>579.88</b>	Rc	-	-	-	-	-	-	-
					Rf	-		-		-		-

**Tableau 15:** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvant en utilisant le TEKNACEM LCAS 350g/T

**Remarque :** à 28jour : la casse n'a pas été effectuée par l'opérateur.

**2.1.16 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M :  
TEKNACEM LCAS dosage équivalent de 350g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	8.3	7.6	7.9	7.7	8.70		8.70
TEKNACEM LCAS 350/T	571.25	575.77	587.21	<b>578.07</b>	Rf	2.40		2.50		2.40		<b>2.43</b>
					Rc	19.5	19.2	14.6	15.1	19.4	19.6	<b>17.9</b>
	578.32	572.23	579.63	<b>576.72</b>	Rf	4.2		4.00		4.3		<b>4.16</b>
					Rc	37.1	36.4	36.4	37.80	37.40	37.6	<b>37.50</b>
	581.23	578.66	579.88	<b>579.92</b>	Rf	5.6		5.8		6.8		<b>6.06</b>
					Rc	47.7	48.0	45.9	45.7	49.0	49.5	<b>48.3</b>
580.20	579.84	579.10	<b>579.71</b>	Rf	7.20		8.10		7.10		<b>7.46</b>	
				Rc								

**Tableau 16:** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le TEKNACEM LCAS a 250g/T

**2.1.17 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M :  
TEKNACEM LCAS dosage équivalent de 500g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
					Rc	9.30	9.30	9.30	9.20	9.20		9.0
TEKNACEM LCAS 500/T	571.96	570.32	571.28	<b>571.18</b>	Rf	2.7		2.00		2.70		<b>2.46</b>
					Rc	20.7	20.0	21.20	20.30	21.7	21.0	<b>20.6</b>
	578.30	577.21	578.30	<b>577.93</b>	Rf	4.4		4.30		4.30		<b>4.33</b>
					Rc	37.7	37.6	38.6	37.3	39.3	35.3	<b>37.63</b>
	578.69	577.6	580.1	<b>578.66</b>	Rf	6.3		6.3		6.5		<b>6.36</b>
					Rc	51.1	50.4	52.0	52.0	49.5	48.7	<b>50.61</b>
585.04	584.92	584.19	<b>584.71</b>	Rf	7.50		7.40		7.70		<b>7.4</b>	
				Rc								

**Tableau 17:** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le TEKNACEM LCAS a 500g/T

**2.1.16 Résistances à la flexion /compression de l'éprouvettes adjuvante avec A.M :  
TEKNACEM LCAS dosage équivalent de 700g/T**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
TEKNACEM LCAS 700/T	587.32	587.02	571.20	<b>581.84</b>	Rc	9.6	9.5	10	9.8	9.9	9.8	9.8
					Rf	2.7		2.6		2.6		2.66
	578.85	579.99	570.85	<b>576.56</b>	Rc	18.9	19.6	19.0	19.3	24.1	31.3	22.03
					Rf	3.9		4		6.8		4.9
	574.10	584.20	579.29	<b>579.19</b>	Rc	39.7	40.0	40	41.4	-	-	40.27
					Rf	6.4		6.7		-		6.55
589.10	578.42	574.25	<b>580.59</b>	Rc	49.6	49.7	50.2	46.0	48.5	51.0	49.16	
				Rf	7.8		7.2		7.5		7.5	

**Tableau 16:** Résultats des résistances à la flexion et a la compression des éprouvettes adjuvantes en utilisant le TEKNACEM LCAS a 700g/T

**3.2 Les teste de reproductibilités :**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
Test 01	586.67	587.73	583.81	<b>586.07</b>	Rc	10.1	10.2	10.20	9.9	10.9	10.4	<b>10.26</b>
					Rf	2.6		2.6		2.9		<b>2.7</b>
	589.37	589.25	590.29	<b>589.63</b>	Rc	18.3	18.4	16.9	18.3	18.7	18.3	<b>18.15</b>
					Rf	4.30		4.10		4.20		<b>4.2</b>
	594.99	588.48	594.49	<b>592.65</b>	Rc	37.4	36.5	38.2	37.5	37.9	37.9	<b>37.0</b>
					Rf	6.20		6.60		5.70		<b>6.16</b>
594.99	588.48	594.49	<b>592.65</b>	Rc	47.7	46.7	47.5	46.1	46.9	47.4	<b>47.05</b>	
				Rf	7.5.		7.0		7.0		<b>7.16</b>	

**Tableau 16 : les valeurs de test n ° : 01 de productibilité**

	Masse 01	Masse 02	Masse 03	Moy	Résistance a la compression / Résistance a flexion						Moy	
<b>Test 02</b>	593.55	591.78	594.47	<b>593.26</b>	Rc	10.1	10.2	10.2	9.9	10.9	10.4	<b>10.26</b>
					Rf	2.6		2.6		2.9		<b>2.7</b>
	590.55	593.98	592.44	<b>592.32</b>	Rc	18.3	18.4	16.9	18.3	18.7	18.3	<b>18.15</b>
					Rf	4.30		4.1		4.2		<b>4.20</b>
	586.72	590.58	584.52	<b>587.27</b>	Rc	37.4	36.5	38.1	37.5	37.9	37.9	<b>37.00</b>
					Rf	6.1		6.6		5.7		<b>6.33</b>
590.8	589.6	587.10	<b>589.16</b>	Rc	47.7	46.7	47.5	46.1	46.9	47.4	<b>47.05</b>	
				Rf	7.50		7.00		7.00		<b>7.16</b>	
<b>test 03</b>	587.00	586.5	587.18	<b>586.89</b>	Rc	10.8	10.6	10.3	10.4	10.4	10.7	<b>9.6</b>
					Rf	2.6		2.8		2.6		<b>2.66</b>
	576.23	570.05	573.7	<b>573.32</b>	Rc	16.8	17.0	16.50	16.5	15	14.8	<b>16.1</b>
					Rf	3.60		3.7		3.7		<b>3.66</b>
	581.08	584.38	588.57	<b>584.67</b>	Rc	37.4	36.8	36.4	37.4	37.4	37.4	<b>35.9</b>
					Rf	6.8		6.3		6.20		<b>6.33</b>
588.20	588.60	588.99	<b>588.59</b>	Rc	46.5	45.9	47.7	47.1	48.1	48.10	<b>47.2</b>	
				Rf	7.10		7.50		7.70		<b>7.43</b>	
<b>test 04</b>	590.11	588.84	589.36	<b>589.43</b>	Rc	9.60	9.50	9.90	10.0	9.60	9.60	<b>9.70</b>
					Rf	2.60		2.80		2.60		<b>2.66</b>
	581.74	580.94	582.78	<b>581.82</b>	Rc	16.8	17.0	16.5	16.5	15.0	14.8	<b>16.1</b>
					Rf	3.60		3.7		3.70		<b>3.66</b>
	585.84	585.25	585.11	<b>585.4</b>	Rc	37.4	36.8	36.4	37.4	37.4	35.9	<b>36.88</b>
					Rf	6.80		6.30		6.20		<b>6.43</b>
594.33	593.45	593.45	<b>593.74</b>	Rc	48.2	47.7	47.2	47.8	50.20	47.5	<b>48.0</b>	
				Rf	7.20		7.00		7.80		<b>7.33</b>	
<b>test 05</b>	587.86	589.37	592.44	<b>589.89</b>	Rc	18.8	19.9	19.6	19.4	18.6	19.2	<b>19.25</b>
					Rf	4.60		4.60		4.40		<b>4.53</b>
	583.94	584.64	581.64	<b>583.40</b>	Rc	23.7	23.6	24.5	25.0	24.4	24.8	<b>24.5</b>
					Rf	5.0		5.1		4.95		<b>5.01</b>
	594.68	593.74	593.84	<b>594.08</b>	Rc	38.2	39.1	37.9	38.7	38.3	38.1	<b>38.38</b>
					Rf	6.60		6.60		6.90		<b>6.70</b>
593.8	595.11	594.81	<b>594.57</b>	Rc	49.1	51.10	48.7	50.0	49.4	49.6	<b>49.3</b>	
				Rf	8.4		7.9		8.3		<b>8.2</b>	

	Masse	Masse	Masse	Moy	Résistance a la compression / Résistance flexion						Moy	
<b>test 06</b>	584.23	589.52	571.20	<b>581.65</b>	<b>Rc</b>	18.5	19.1	18.0	18.8	18.9	19.1	<b>18.73</b>
					<b>Rf</b>	4.40		4.20		4.50		<b>4.36</b>
	576.89	581.25	571.23	<b>576.44</b>	<b>Rc</b>	23.7	24.3	24.5	24.4	24.3	25.2	<b>24.4</b>
					<b>Rf</b>	5.10		5.0		4.9		<b>5.0</b>
	578.98	579.33	587.72	<b>582.00</b>	<b>Rc</b>	40.8	41.7	40.8	41.10	38.0	40.3	<b>40.45</b>
					<b>Rf</b>	7.50		7.20		6.9		<b>7.2</b>
	574.10	587.24	590.01	<b>583.78</b>	<b>Rc</b>	46.8	48.0	47.5	48.3	47.4	47.5	<b>47.58</b>
					<b>Rf</b>	7.90		8.50		7.6		<b>8.0</b>
<b>test 07</b>	579.25	581.67	581.67	<b>580.86</b>	<b>Rc</b>	13.90	13.9	12.1	12.2	13.5	14.0	<b>13.26</b>
					<b>Rf</b>	3.2		3.4		2.8		<b>3.13</b>
	580.01	581.58	579.68	<b>580.42</b>	<b>Rc</b>	19.7	19.9	19.5	20.1	20.0	19.3	<b>19.8</b>
					<b>Rf</b>	4.10		4.70		4.40		<b>4.40</b>
	578.96	580.10	578.18	<b>573.08</b>	<b>Rc</b>	35.90	37.60	36.4	37.1	35.6	36.4	<b>36.5</b>
					<b>Rf</b>	6.6		6.6		6.3		<b>6.5</b>
	589.78	590.2	588.9	<b>589.62</b>	<b>Rc</b>	46.7	48.0	47.2	48.1	46.9	47.7	<b>47.43</b>
					<b>Rf</b>	7.9		7.2		7.5		<b>7.53</b>

**Tableau 17 : les valeurs des tests de productibilité restant**

**4.1 : les écartype des tests :**

<b>test 01 "01"</b>	<b>test1 "2jr"</b>	<b>test1 "7jr"</b>	<b>test1 "28jr"</b>	<b>test2 "1jr"</b>	<b>test2 "2jr"</b>	<b>test2 "7jr"</b>	<b>test2 "28jr"</b>
10,200	20,130	37.4	47,700	10,100	18,300	37,400	45,800
10,600	20,200	36.5	46,700	10,200	18,400	36,500	46,100
8,500	19,900	38.2	47,500	10,200	16,900	38,200	45,800
9,300	19,800	37.5	46,100	9,900	18,300	37,500	45,800
10,500	20,100	37.9	46,900	10,900	18,700	37,900	44,500
10,400	20,200	37.9	47,400	10,400	18,300	37,900	45,700
<b>0,838</b>	<b>0,167</b>	<b>0,358</b>	<b>0,599</b>	<b>0,343</b>	<b>0,632</b>	<b>0,599</b>	<b>0,564</b>

test3 "1jr"	test3 "2jr"	test3 "7jr"	test3 "28jr"	test 4 "1jr"	test 4 "2jr"	test 4 "7jr"	test 4 "28jr"
10,800	19,600	36,900	46,500	9,600	16,800	37,400	48,200
10,500	19,900	37,100	45,900	9,500	17,000	36,800	47,700
10,300	20,700	37,600	47,700	9,900	16,500	36,400	47,200
10,400	19,200	37,800	47,100	10,000	16,500	37,400	47,800
10,400	20,400	36,600	48,100	9,600	15,000	37,400	47,200
10,700	20,400	36,000	48,100	9,600	14,800	35,900	50,200
<b>0,194</b>	<b>0,568</b>	<b>0,660</b>	<b>0,900</b>	<b>0,200</b>	<b>0,951</b>	<b>0,634</b>	<b>1,120</b>

test 5+6 "1jr"	test 5+6 "2jr"	test 5+6 "7jr"	test 5+6 "28jr"	test7 "1jr"	test7 "2jr"	test7 "07jr"	test7 "28jr"
18,800	23,700	38,200	49,100	13,900	19,700	35,900	46.70
19,900	23,600	39,100	51,100	13,900	19,900	37,600	48.00
19,600	24,300	37,900	48,700	12,100	19,500	37,100	47.2
19,400	25,000	38,700	50,000	12,200	20,100	36,400	48.1
18,600	24,400	38,300	49,400	13,500	20,000	35,600	46.9
19,200	24,800	38,100	49,600	14,000	19,300	36,400	47.1
18,500	23,700	40,800	49,800	<b>0,882</b>	<b>0,308</b>	<b>0,743</b>	<b>0.687</b>
19,100	24,300	41,700	48,000				
18,000	24,500	40,800	49,500				
18,800	23,400	41,100	48,300				
18,900	24,300	38,900	48,400				
19,100	25,200	40,300	47,500				
<b>0,512</b>	<b>0,573</b>	<b>1,356</b>	<b>0,993</b>				

Not : Afin de tenir compte l'écartype de chaque échéance : Nous avons utilisé la fonction ECARTYPE de l'Excel.

Pour les testes n° : 05 et 06 : Nous avons effectué ces deux essais en une seule journée. Je dirais que la calcule de l'écartype à la fois parce que les conditions préparatoires sont réservés.