

**Republique algerienne democratique et populaire**  
**Ministere de l'enseignement superieur et de la recherche scientifique**  
**Université de Ahmed Zabana Relizene**

**Cours : Liants et bétons**  
**Chapitre III : Le ciment**

**3LMD**

**Présenté par:**  
**Dr : KERROUZ siham**

*Année universitaire 2022/2023*

## I – Introduction

### A - Définition

Le ciment (du latin *caementum*, signifiant pierre de construction) est une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées.

Le ciment est le liant le plus utilisé pour la fabrication du béton (il représente alors entre 8 et 18 % de la masse totale du béton). Il se présente sous forme de poudre très fine qui mélangée à de l'eau forme une pâte plastique qui durcit progressivement à la suite de réactions chimiques. On classe par conséquent le ciment dans la famille des liants hydrauliques puisqu'il fait prise en présence d'eau (par opposition aux liants hydrocarbonés comme le bitume). Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau mais il pas invulnérable.

## II – Fabrication du Ciment

### A – Extraction



Les deux principales matières premières nécessaires à la fabrication du ciment Portland sont le calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) et l'argile (composée principalement d'un mélange complexe et souvent hydraté de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )).

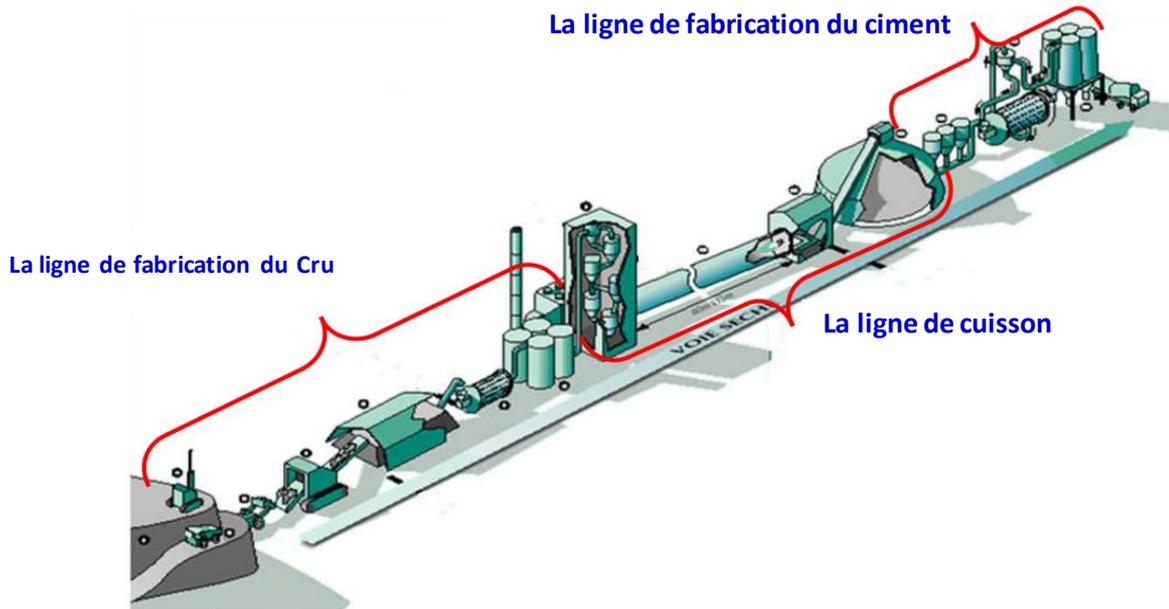
Elles

sont généralement extraites des carrières à ciel ouvert situées à proximité de la cimenterie puis fragmentés en très petites tailles.

Le mélange (environ 20% d'argile et 80% de calcaire) est ensuite pré-homogénéisé et nettoyé des impuretés contaminantes.

## B - Les lignes de fabrication de ciment

La fabrication du ciment se fait selon un procédé en continu, successivement et en parallèle les 3 lignes suivantes:

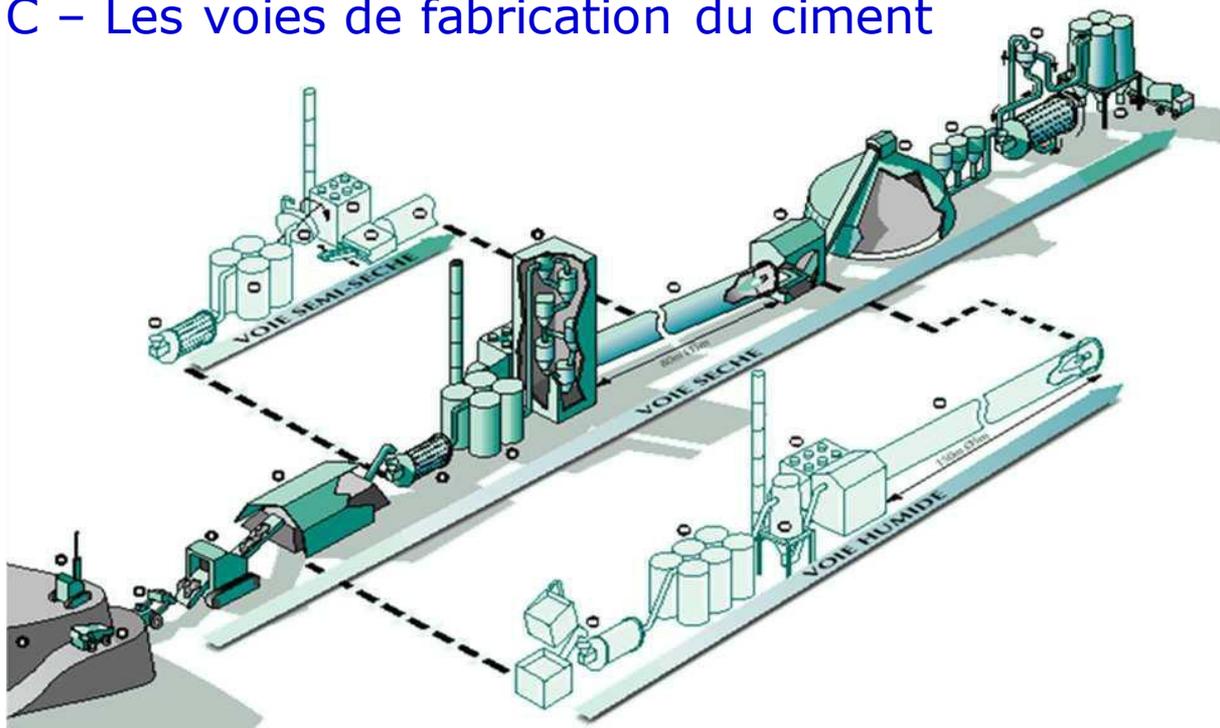


**La ligne de fabrication du cru** (depuis la carrière, la fragmentation, la pré-homogénéisation jusqu'au silo de stockage du cru)

**La ligne de cuisson** (commence par le préchauffage dans les échangeurs à cyclone, l'alimentation du four et se termine dans les silos de stockage du clinker)

**La ligne de fabrication du ciment** (le dosage, l'alimentation des broyeurs microniseurs, silotage et/ou conditionnement du ciment).

## C – Les voies de fabrication du ciment



### C-1 La voie Humide

Le cru est transformé en une pâte fluide par adjonction d'eau (entre 30 et 40% d'eau) avant d'entrer dans le four, il s'agit de la technique la plus simple mais aussi de la plus consommatrice en énergie puisqu'il faut évaporer l'eau lors de la cuisson.

### C-2 La voie Semi-Sèche

Le cru est aggloméré en granules par humidification avant la cuisson

### C-3 La voie Sèche

Le cru entre dans le four sous forme de poudre, cette technique est aujourd'hui utilisée quasiment tout le temps car plus économe.

Le processus de cuisson ne variant qu'assez peu selon la voie utilisée, on se concentrera sur la voie sèche qui est la plus utilisée.

Les fours utilisés pour l'obtention du clinker (en anglais : scories) sont de forme cylindrique, ils tournent lentement à 2 ou 3 tours par minute et sont longs d'environ 100 mètres (leur longueur est plus importante si la voie humide est utilisée) et de diamètre environ 5 mètres. Ils sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale de telle sorte que le cru entre par la partie la plus haute du four. Le brûleur est situé au fond du four et produit une flamme à environ 2000°C. Il s'établit un gradient thermique entre l'entrée du four et la sortie de celui-ci de 800°C à 1500°C environ. Avant d'entrer dans le four, le cru sous forme de poudre traverse un échangeur de chaleur dans lequel circulent en sens inverse les gaz très chauds qui s'échappent du four. Le cru est donc préchauffé à une température d'environ 800°C quand il atteint le début du four. La durée de séjour dans le four est d'environ une demi-heure.

## D - Fragmentation

Les opérations de fragmentation, conduisent à réduire les dimensions caractéristiques d'un matériau solide, elles peuvent avoir divers objectifs parmi lesquels on peut citer : faciliter le stockage, le transport, le triage, le mélange ou la dissolution, la réactivité chimique ...

Divers dénominations suivants la réduction de taille:

- **débitage**

La réduction des gros blocs issus de mine ou de carrière en éléments de dimensions supérieures à 250 mm

- **concassage**

La réduction des Roches et pierres de 250 mm environ à des granulats entre 50 et 7 mm

- **granulation**

La réduction des granulats de 150 à environ à des agrégats d'entre 12 et 6.3 mm

- **broyage**

La réduction des agrégats de 25 mm à des sables, tout venant, ou autres entre 6.3 et 0.2 mm

- **pulvérisation**

La production de particules inférieures à 0.2 mm

- **micronisation**

La réduction à des dimensions de l'ordre du micron

- **défilage**

La fragmentation des matières fibreuses (bois, végétaux, ...)

- **déchiquetage**

La réduction par hachage des matières flexibles

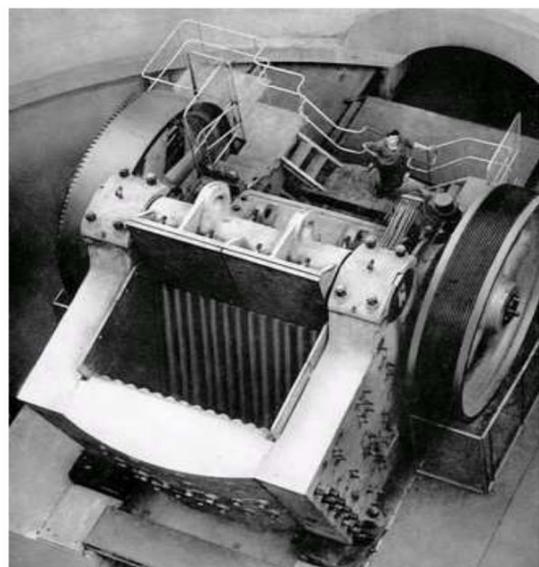
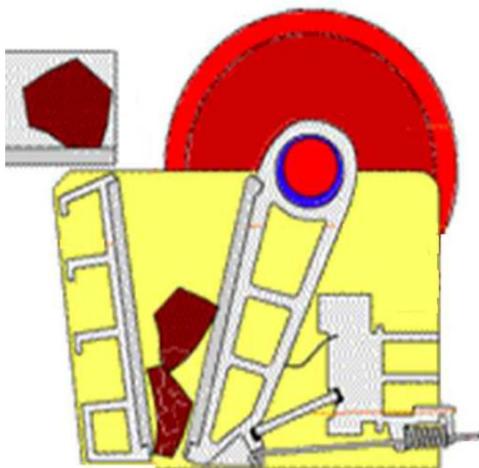
- **Découpage**

Le sciage ou cisaillement pour obtenir des fragments réguliers

## E - Types de concasseur

**Concasseur à mâchoire** : Il est constitué par une mâchoire fixe et une mâchoire mobile animée d'un mouvement de va-et-vient autour d'un axe horizontal. Le produit à traiter est introduit à la partie supérieure de l'appareil. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte ceux-ci descendent dans une partie plus étroite où ils sont à nouveau écrasés et ainsi de suite jusqu'à ce qu'ils atteignent l'orifice de sortie (*cet orifice est réglable*).

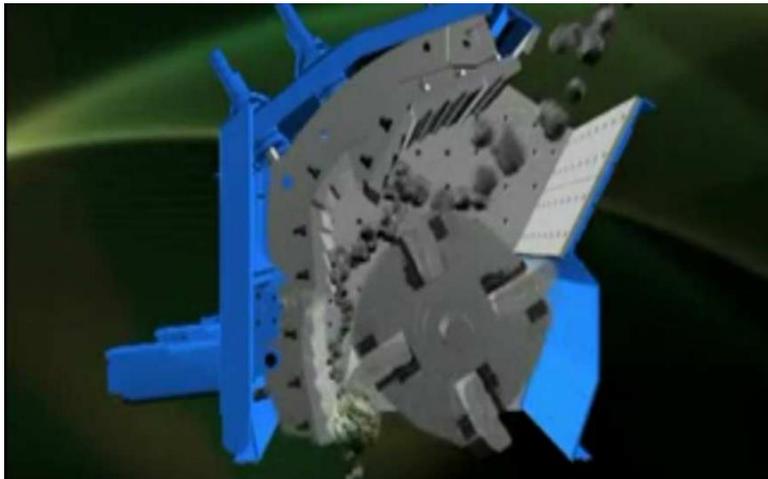
Un concasseur à mâchoire peut fournir entre 500 à 1000 tonnes de granulat par heure.



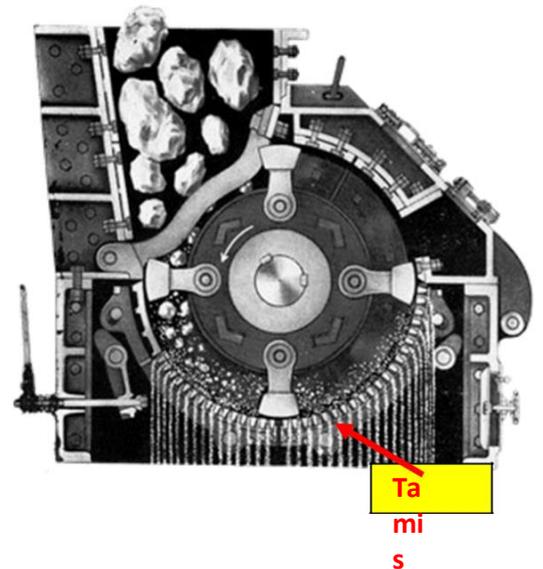
**Le concasseur à percussion ou à marteaux** est constitué d'une cuve dont la paroi est épaisse et résistante. Dans cette paroi sont pratiquées des ouvertures à travers lesquelles passe le produit à concasser.

A l'intérieur de la cuve tourne un rotor muni de marteaux. La vitesse de rotation est élevée pour assurer une vitesse périphérique des marteaux allant de 20 à 100 m/s.

Ce type de concasseur n'est pas utilisé pour des matériaux durs et abrasifs, qui provoqueraient des usures très importantes.



Concasseur à percussion

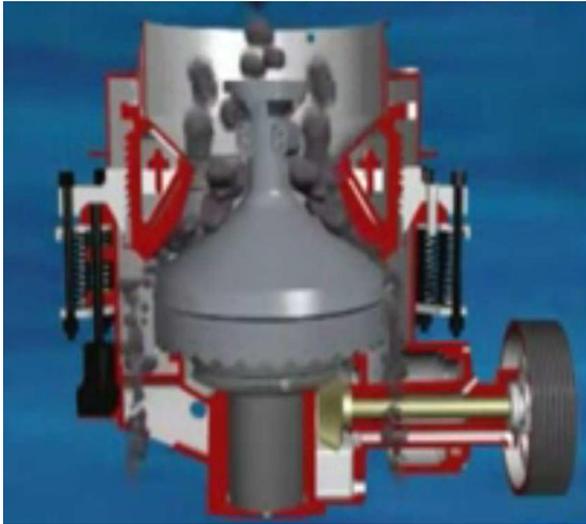


Concasseur à marteaux

**Le gravillonneur giratoire** casse les pierres ou minerais par pression entre une cuve annulaire fixe dénommée anneau concave et un rouleau conique appelé cône d'usure, animé d'un mouvement excentrique à l'intérieur de l'espace limité par la cuve.

Le cône d'usure est fixé sur un arbre pendulaire très robuste en acier forgé, formant levier. Cet arbre a pour point fixe une rotule de suspension supportée par un étrier placé à la partie supérieure et en travers de l'ouverture du concasseur.

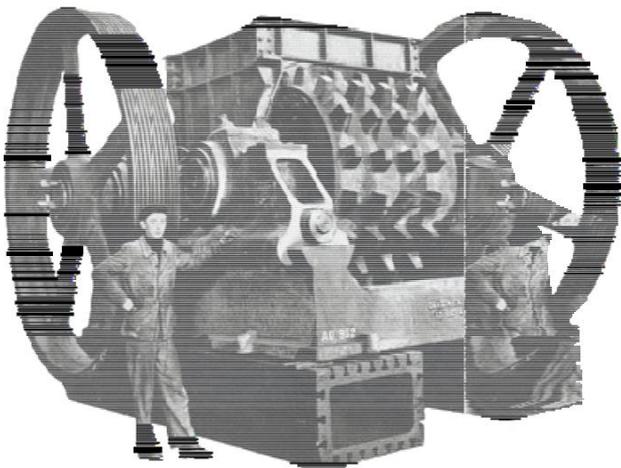
La partie inférieure de l'arbre pendulaire plonge librement dans un manchon excentré dont le mouvement de rotation est commandé par l'intermédiaire d'un couple d'engrenages coniques. Ces engrenages, ainsi que tout le mécanisme de commande, sont enfermés dans une partie du bâti formant le carter étanche.



La rotation du manchon excentrique communique à l'arbre pendulaire, et par conséquent au cône d'usure qui est fixé dessus, un mouvement qui rapproche celui-ci successivement de chacun des points de l'anneau concave. Au cours de ce mouvement, les blocs à concasser se trouvent fragmentés par la pression développée, et les morceaux réduits sont évacués sur le côté de la machine par un couloir logé à l'intérieur du bâti.

**Concasseur à cylindre** : Il est constitué par un tambour cylindrique ou cylindro-conique à axe horizontal. Le tambour est environ rempli au tiers de son volume par la charge broyante qui est constituée de boulets d'acier ou de fonte, de galets de silex, de bâtonnets, tétraèdres ou cylindres en acier dur.

Le tambour tourne autour de son axe à une vitesse de rotation précise. Si elle est trop lente, les boulets roulent les uns sur les autres en fond de l'appareil. Si elle est trop rapide, les boulets restent collés à la paroi sous l'action de la force centrifuge.



## F - Pré-Homogénéisation

La Pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du Ciment « le calcaire et l'argile » et de d'enlever toute imputée susceptible de contaminer le ciment.



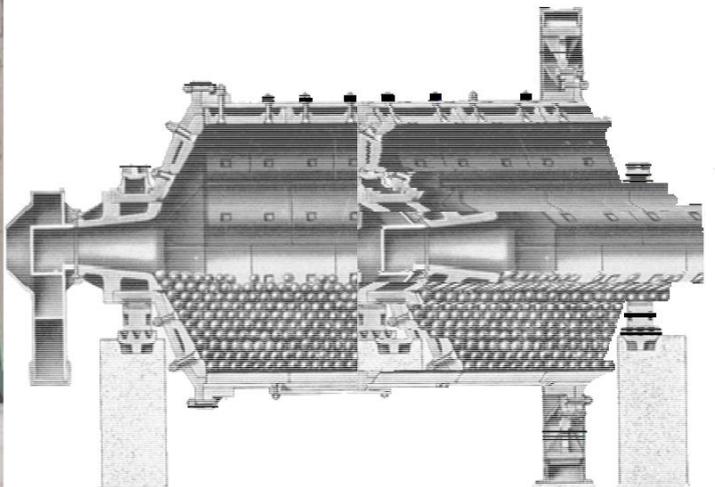
### F-1 Contamination du ciment

La présence de chlore (**chlorures**) et de soufre (**sulfates, sulfure**) lors du chauffage, le chlore et le soufre se volatilisent et réagissent avec les composés alcalins (**comme le potassium et le sodium ( $K_2O$  &  $Na_2O$ )**) pour former des chlorures alcalins et sulfures alcalins. En l'absence d'alcalin Le ciment perd de ces qualités et de ces caractéristiques.

## F-2 Composition du mélange donnant le cru

Le cru obtenu après une pré-homogénéisation est généralement composé de 80% de calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) et 20% d'argile (l'argile gris, composée principalement d'un mélange complexe et souvent hydraté de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )), ce mélange doit passer dans un broyeur pour donner la farine destinée à la cuisson.

## G - Broyeur



Il est constitué par un tambour cylindrique ou cylindro-conique à axe horizontal. Le tambour est environ rempli au tiers de son volume par la charge broyante qui est constituée de boulets d'acier extra-dur ou de fonte, de galets de silex, de bâtonnets, tétraèdres ou des barres cylindriques en acier extra-dur.

Le tambour tourne autour de son axe à une vitesse de rotation précise. Si elle est trop lente, les boulets roulent les uns sur les autres en fond de l'appareil. Si elle est trop rapide, les boulets restent collés à la paroi sous l'action de la force centrifuge.

Les boulets ont une taille variant de 2 à 20 cm, fonction de la finesse de broyage désirée.

Il existe trois principaux types de broyeurs à boulets:

**broyeur cylindrique:** le tambour est constitué par un seul cylindre en rotation

**broyeur compound:** le tambour est séparé en 3 à 4 compartiments séparés par un grillage et comprenant chacun des boulets de taille différentes. Il est légèrement incliné sur l'horizontale. Le produit à broyer est introduit à une extrémité. Lorsqu'il est suffisamment broyé dans le premier compartiment, il passe au travers du grillage dans le deuxième compartiment, et ainsi de suite jusqu'à sa sortie.

**broyeur cylindro-conique:** le tambour contient des boulets de différents diamètres. Sous l'effet de la rotation des boulets se rassemblent par leur taille, les plus gros dans la partie cylindrique et les plus petits dans la partie conique. Cet appareil se comporte ainsi comme un broyeur compound.

Un broyeur produit de 200 à 400 tonnes de mélange à l'heure.

## H - Résultat

Grasse au broyeur, le cru homogénéisé et réduit en «farine» (< 200 microns) de composition :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de **77 à 83 %**
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de **13 à 14%**
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de **2 à 4%**
- Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de **1,5 à 3 %**.

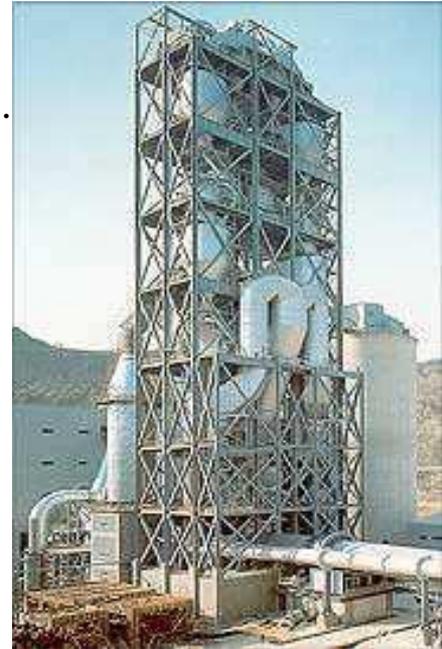
## I – Pré-calcination

Pré-Calcination ou préchauffage est la première étape de la phase ou la ligne de cuisson.

La farine passe dans un échangeur appelé échangeur à cyclone avant le passage au four.

En 5 secondes la farine atteint plus de 880°C.

La chaleur de cet échangeur provient de l'évacuation de la chaleur du four de cuisson qui sera alimenté de farine depuis le bout de sortie du cyclone.



## J - Four



Le processus de cuisson ne variant qu'assez peu selon la voie utilisée.

Les fours utilisés pour l'obtention du clinker sont de forme cylindrique, ils tournent lentement de 2 à 3 tours par minute et sont longs d'environ 100 mètres (leur longueur est plus

importante, voire le double, si la voie humide est utilisée) et de diamètre environ 5 mètres. Ils sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale de telle sorte que le cru entre par la partie la plus haute du four. Le brûleur est situé au fond du four et produit une flamme à environ 2000°C. Il s'établit un gradient thermique entre l'entrée du four et la sortie de celui-ci de 1400°C environ.



Avant d'entrer dans le four, le cru sous forme de poudre traverse un échangeur de chaleur dans lequel circulent en sens inverse les gaz très chauds qui s'échappent du four.

Le cru est donc préchauffé à une température d'environ 880°C quand il atteint le début du four. La durée de séjour dans le four est d'environ une **demi-heure**.

A partir de 650°C environ, la première réaction de transformation de clinkérisation commence à se produire. Le carbonate de calcium issu du calcaire subit une réaction de décarbonatation selon la formule suivante :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux de CO<sub>2</sub>.

Sous l'effet de la chaleur, on observe une scission de l'argile en silice (SiO<sub>2</sub>), en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et en oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A partir d'environ 1300°C les réactions de clinkérisation se poursuivent.

Oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + oxyde de calcium (CaO) → aluminoferrite tétracalcique (Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>).

Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + chaux vive (CaO) → aluminat tricalcique (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>).

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange qui continue de progresser vers la partie la plus chaude du four. La silice (SiO<sub>2</sub>) et la chaux vive (CaO) restant se dissolvent dans cette phase et réagissent entre-elles selon la réaction suivante :

Silice (SiO<sub>2</sub>) + chaux vive (CaO) → silicate bicalcique (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)

La réaction peut se poursuivre éventuellement s'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi :

Silicate bicalcique (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) + chaux vive (CaO) → silicate tricalcique (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>)

Si la phase liquide n'existait pas, il faudrait chauffer d'avantage le four afin d'atteindre la température de fusion de la silice qui est d'environ 1900°C pour que ces deux réactions aient lieu.

A la sortie du four, les nodules incandescents sont brusquement refroidis à 100°C. La composition minéralogique du clinker est alors la suivante :

Nom	Formule	Minimum	Maximum
Alite (silicate tricalcique)	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétracalcique	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	$\text{CaO}$	0.6 %	2.8 %

## K – Clinker

Après cuisson, on obtient le **clinker** composé de :

- Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) fourni par le **Calcaire**
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ), Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) fournis par l'**Argile**

*1,52 tonne de cru pr oduit d'une tonne de clinker, les pertes s'exp liquent sous la forme d'émissions de  $\text{CO}_2$  lors de la réaction de calcination ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ).*



## L – Dosage

Après refroidissement et Stockage du Clinker, Commence la ligne de fabrication du Ciment par le dosage.

Le ciment se fabrique en passant dans un broyeur microniseur le mélange suivant :

*5 à 95 % du clinker*

*+ <5% du gypse*

*+ de 0 à 95% d'éventuels ajouts*

On appel ajout tout corps autre que le clinker et gypse entrant en composition avec ses derniers pour augmenter les caractéristiques de résistance au liant, ses ajouts sont :

- Les laitiers granulés des hauts fourneaux (**S**)
- Les cendres volantes siliceuses (**V**)
- Les cendres volantes calciques (**W**)
- Les pouzzolanes (**Z, P, Q**)
- Schiste calciné (**T**)
- La fumée de silice (**D**)
- Les dérivés du calcaire (en fonction du taux de carbone Organique) (**L, LL**)

## M - La Chimie des Cimentiers

La chimie du ciment se construit essentiellement à partir des 4 oxydes majeurs présents dans les matières premières, et qui vont former **les silicates** et **les aluminates** de calcium du clinker :

- $\text{CaO} = \text{C}$
- $\text{SiO}_2 = \text{S}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$

C'est-à-dire que si on a

$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	sera noté	<b>C<sub>3</sub>S</b>	(silicate tricalcique) ou (alite)
$(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	sera noté	<b>C<sub>2</sub>S</b>	(silicate bicalcique) ou (bélite)
$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	sera noté	<b>C<sub>3</sub>A</b>	(aluminat tricalcique)
$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	sera noté	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	(alumino-ferrite tetracalc.)

## N – Dénominations du Ciment

### N – 1 Généralité

Les Cimentiers proposent toute une panoplie de liant, les deux types les plus fréquents sont le ciment CPJ 35 appelé ciment 35 et le ciment CPJ 45 appelé ciment 45.

Les deux ciments sont des ciments Portland (**se sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques**) avec des teneurs en

Clinker de 65% pour le CPJ 35 et 70% pour le CPJ 45.

Le complément du 100% pour les deux est <5% du gypse + pouzzolane ou cendres (- **Pouzzolane** : Matière silico-alumineuse naturelle ou artificielle dans laquelle la silice et l'alumine peuvent se combiner à la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, pour former des composés stables. Vient de "Pozzoles", ville proche de Naples, riche en roche siliceuse naturelle éruptive, - **Cendres** de centrale thermique : Résidu de la combustion des charbons dans les centrales thermiques (EDF) recueilli dans les filtres. A l'état vitreux, elles peuvent devenir actives et leur silice se combine à la chaux dégagée par l'hydratation du clinker)

*Aucun sel soluble tel que les chlorures en vue d'accélérer la prise ou le durcissement dans ces deux types de ciment.*

## N-2 Caractéristiques

Les caractéristiques mesurées des ciments CPJ 45 et CPJ 35 concernent leurs résistances à la compression à 28 jours du collage.

	<b>CPJ 45</b>	<b>CPJ 35</b>
Résistance moyenne minimale	42 MPa	32 MPa
L'expansion à chaud	< 10 mm	< 10 mm
Le retrait mesuré sur mortier normal	< 800 µm/m	<800µm/m
La teneur en SO <sub>3</sub>	< 4%	< 4%
La teneur en CL	< 0,05%	----- ----

## N-3 Utilisations

Il est recommandé de n'utiliser le ciment CPJ 35 que dans :

- Le mortier
- Le béton non armé ou faiblement armé
- Le Béton de résistance mécanique moyenne ou peu élevée.

Et le ciment CPJ 45 dans :

- Béton armé courant.
- Éléments préfabriqués en béton armé ou non

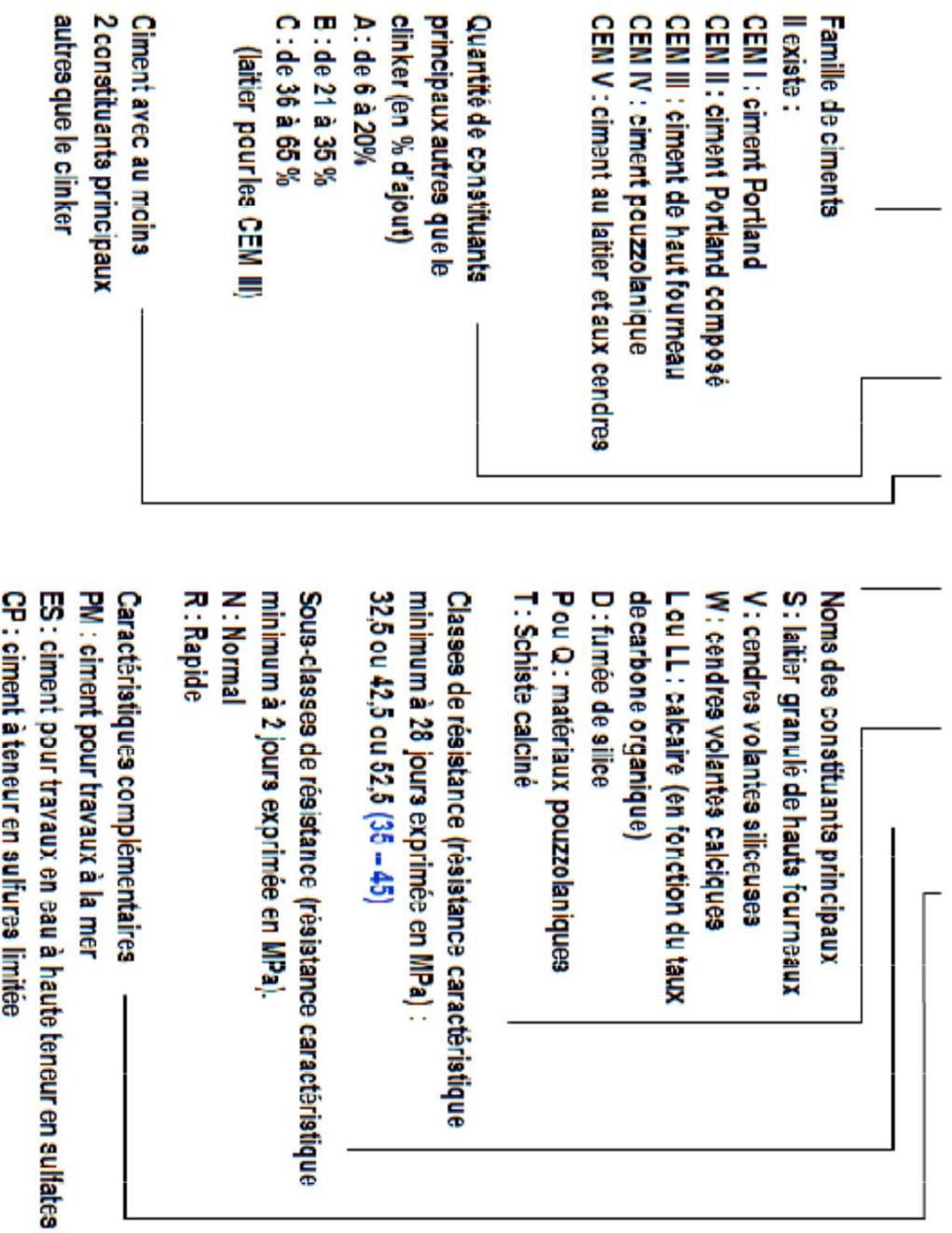
- Béton fortement sollicité :  
Structures porteuses,  
fondations...
- Travaux spéciaux :  
Barrages,  
Génie civil industriel,  
Centrales thermiques. ...

#### N- 4 Compositions des cinq principaux ciment

TYPES DE CIMENT	CLINKER K %	Gypse %	S	D	P Q	Z	V	W	T	L LL
<b>CEMI</b> PORTLAND	95	5	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CEMII</b> PORTLAND COMPOSE	80 à 94	0 à 5			6 à 20					
<b>CEMIII</b> HAUT FOURNEAU	35 à 64	0 à 5	36 à 65	0	21 à 35					
<b>CEMIV</b> POZZOLANIQUE	65 à 90	0 à 5	0		10 à 35					
<b>CEMV</b> Au laitier et aux cendres	40 à 64	0 à 5	18 à 30	0	36 à 55					
	20 à 38		31 à 40	0		18 à 30	31 à 40	0	0	0

## Composition des 5 principaux types de ciment

# CEM II / B - M (S-V) 42,5N CP



## N- 5 Norme Européenne

## O – Lexique

**Broyeur à boulets** : Grand cylindre métallique horizontal mis en rotation et rempli au 1/3 de boulets d'aciers qui broient la matière en se heurtant et en se frottant dans un mouvement de cascade.

**Cendres de centrale thermique** : Résidu de la combustion des charbons dans les centrales thermiques et recueilli dans les filtres.

A l'état vitreux, elles peuvent devenir actives et leur silice se combine à la chaux dégagée par l'hydratation du clinker.

**Clinker** : Produit de la cuisson des constituants du ciment, à la sortie du four et avant broyage. Le clinker se présente sous forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

**Clinkérisation** : Passage de la matière de l'état de farine crue à l'état de clinker (cuisson).

**Dumper** : Camion benne de fort tonnage (30 tonnes et plus) qui transporte les roches abattues du front de carrière au concasseur.

**Echangeur à cyclone** : Tour de préchauffage de la farine où les particules sont chauffées en suspension dans un flux de gaz chaud.

**Echangeur à grille** : Système utilisé pour préchauffer le cru sous forme de granules (voie semi-sèche).

La grille supporte une couche de granules qui est traversée par un flux de gaz chaud.

**Farine** : Ou mouture ; état du cru après broyage et avant cuisson.

**Hydraulicité** : Faculté de former, par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau.

**Laitiers de hauts fourneaux** : Résidu de la fabrication de la fonte provenant de la gangue des minerais de fer et des fondants que l'on ajoute au minerai. Sa composition est d'environ 1 partie d'alumine pour 2 parties de silice et 3 parties de chaux. Pour être actif, le laitier doit être granulé (projeté à l'état fondu dans un courant d'eau froide).

C'est dans cet état vitreux qu'il peut être mélangé au clinker pour former un des éléments résistants des ciments hydratés.

**Pouzzolane** : Matière rougeâtre silico-alumineuse naturelle (roche poreuse volcanique) ou artificielle dans laquelle la silice et l'alumine peuvent se combiner à la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, pour former des composés stables. Vient de "Pozzoles", ville proche de Naples, riche en roche siliceuse naturelle éruptive.

**Pouzzolanique** : Qui possède les propriétés des pouzzolanes.

**Les Ciments Portland** : sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques.

## **Bibliographie**

**Y. OUHAMI** Licence professionnelle - option Génie Civil université hassan 1er – settat.  
Faculté des Sciences et techniques