

## CHAPITRE 3

### **DONNEES GENERALES SUR LES CIMENTS COURANTS**

#### **3.1 Introduction :**

Le ciment, matériau à la fois ancien et très largement utilisé, à l'image d'un produit banal et simple. Pourtant, derrière cette apparente banalité, se trouve un matériau très complexe, imparfaitement connu aussi bien du point de vue des réactions physico-chimiques à hautes températures qui se produisent lors de la fusion des matières premières au niveau du four, que lors des réactions d'hydratation pendant la prise ou plus tard lorsque le matériau acquiert des propriétés de résistances mécaniques énormes (de 30 à 50 MPa 28 jours après l'hydratation).

#### **3.2 Définition de ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un / ou de ajouts (s) minéraux actifs (ciment composé) , faite simultanément ou par malaxage minutieux des même matériaux broyé séparément.

#### **3.3 Constituants principaux**

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire,
- du laitier de haut fourneau,
- des cendres volantes,
- de la pouzzolane naturelle,
- des schistes calcinés,
- des fumées de silice,

dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produit capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des

conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.

### **3.4 Etape de fabrication du ciment :**

La fabrication de ciment comporte les étapes suivantes :

#### **3.4.1 Extraction**

L'extraction consiste en générale pour le calcaire , à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues-pelles avant d'être transportée par camion.

#### **3.4.2 Concassage**

Les matériaux extraits des carrières présentent des granulométries grossières allant jusqu'à  $m^3$ , le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes.

#### **3.4.3 Préparation du cru**

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proche du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile .peut se faire avant différents procédés. le résultats final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

- 65% de CaO      fourchette de 60 à 69 % ,
- 21 % de SiO<sub>2</sub>      fourchette de 18 à 24 % ,
- 6 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>      fourchette de 4 à 8 % ,
- 3 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>      fourchette de 1 à 8 % ,
- 2 % de MgO      fourchette de 0 à 5 % maximum ,
- 1% de d'alcalis      fourchette de 0 à 2 % maximum ,
- 1% de SO<sub>3</sub>      fourchette de 0 à 3 % maximum ,

### **3.4.4 Cuisson**

Réaliser dans des four rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche ( de 150 m dans le procédé par voie humide ), à une température comprise entre 1 400 et 1 500 ° C , la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comporte les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, La décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500° ;
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950 ° C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 ° et 1 000 ° C ;
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1 450 ° C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur.

### **3.4.5 Refroidissement**

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1 200 à 1 450 ° C à la sortie du four à environ 50/250 ° C suivant le type de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment , un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du  $C_3S$  en  $C_2S$  qui entraîne une baisse des résistances.

### **3.4.6 Broyage**

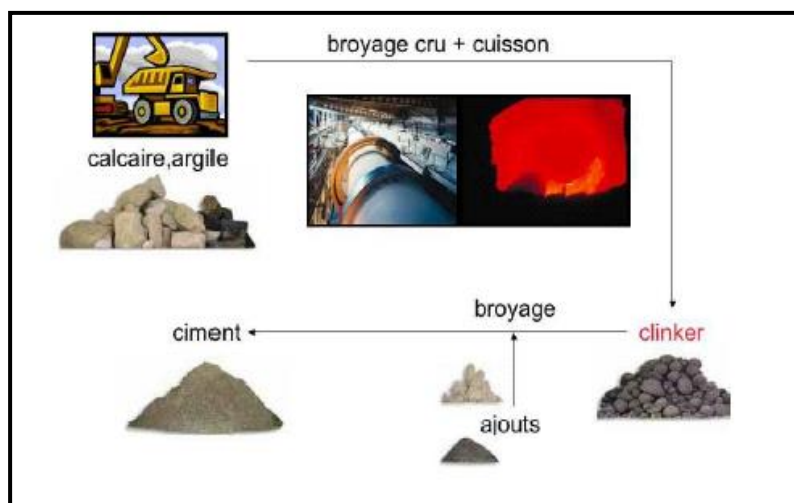
Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectifs, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants ( laitier, cendre... ), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

### **3.4.7 Stockage, Ensachage et Expédition**

À la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, peut être ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de production de ciment , s'effectue dans des sacs en

papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2 000 à 4 000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camion, wagons ou péniches.



**FIG 3.1 :Stades de fabrication du ciment.**

### **3.5 Différentes voies de fabrication du ciment**

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

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

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en **chaux** (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions.

### **3.5.1-Fabrication par voie humide**

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru..

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse  $\text{CaSO}_4$  afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le **clinker** est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage. Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%)

pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C.

### **3.5.2-Fabrication par voie sèche**

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) environ de 80% et d'argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

1. La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même **densité** ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.
2. Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la

cimenterie. Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des panes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'un pré homogénéisation puis d'une homogénéisation

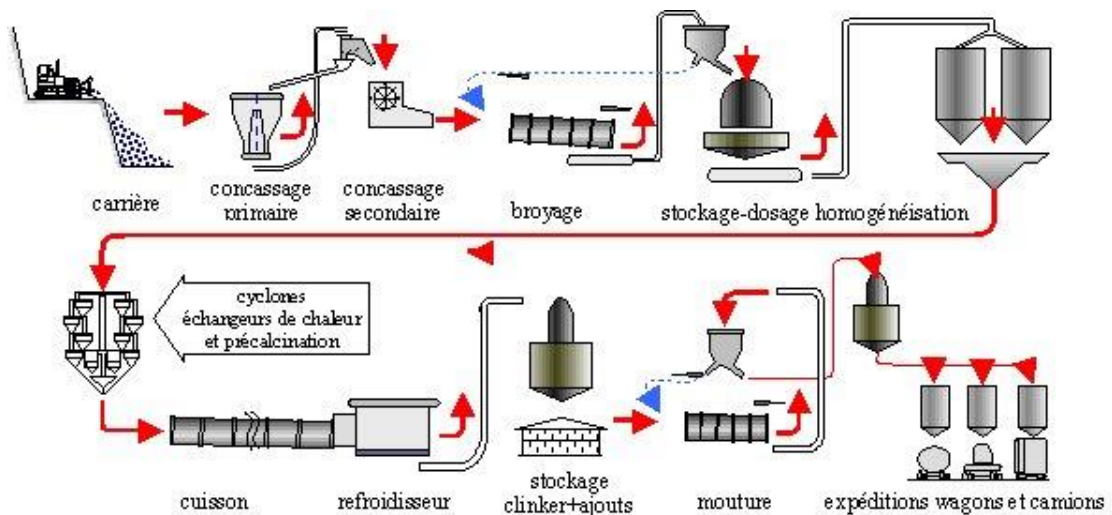
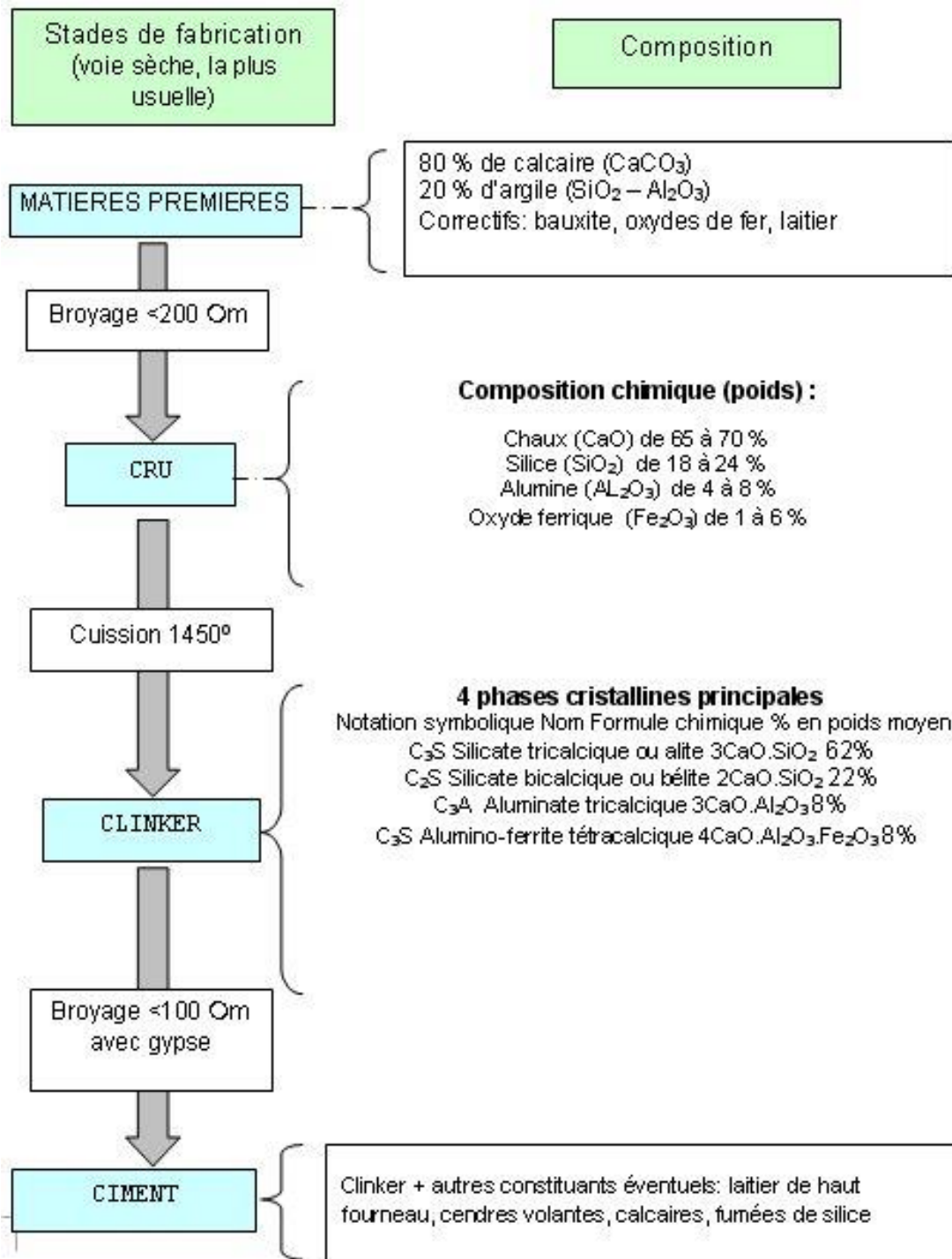


Figure 3.2 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche





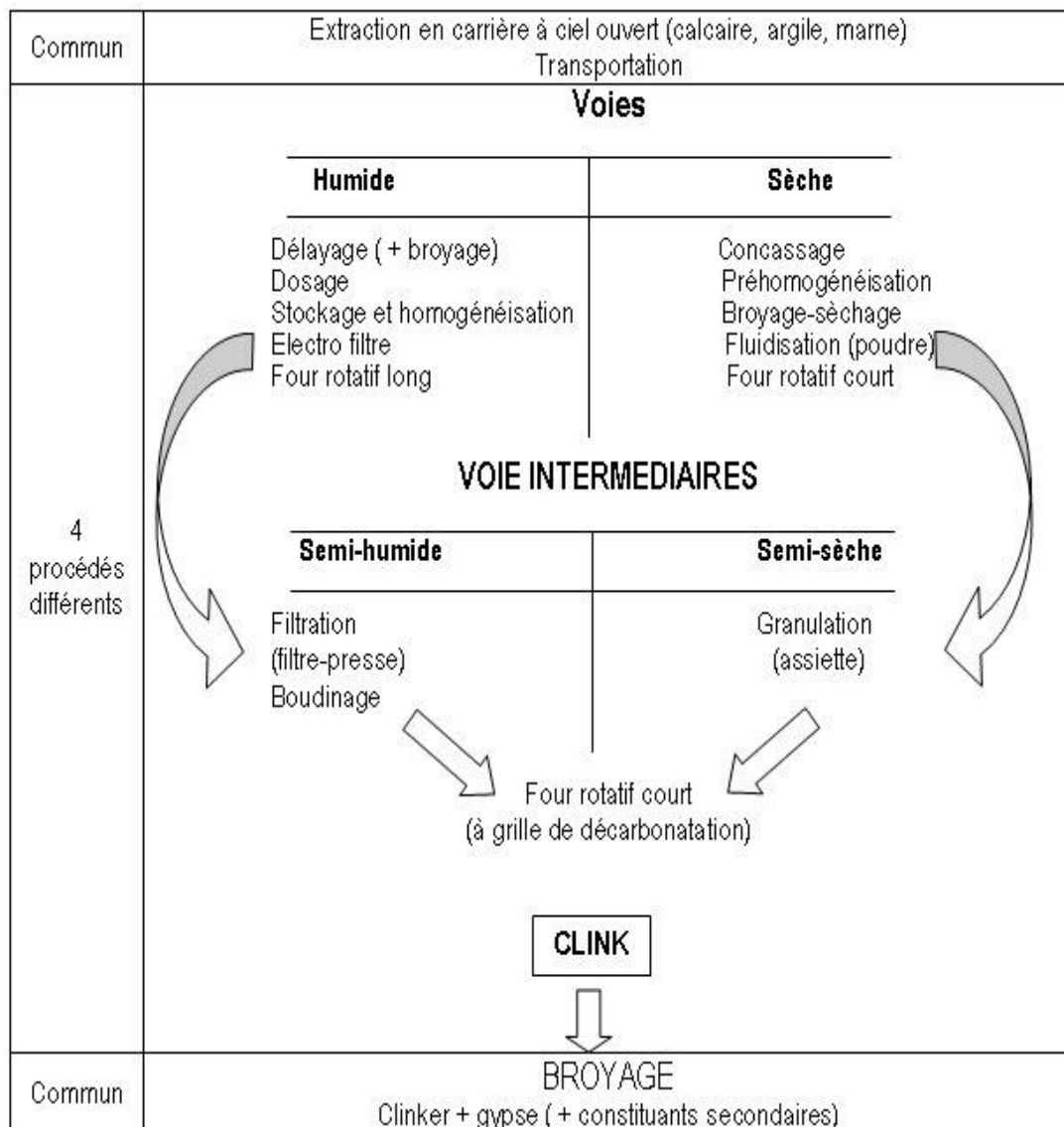


Figure 4.3 : Schéma de la fabrication du ciment

### 3.6 Les principales catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

#### 3.6.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon les normes NFP 15-301 et ENV 197-1 [5]:

- **CPA-CEM I** : ciment Portland artificiel (CPA dans la notation française);
- **CPJ-CEM II** : ciment Portland composé;
- **CHF-CEM III** : ciment de haut fourneau;
- **CPZ-CEM VI** : ciment pouzzolanique;
- **CLC-CEM V** : ciment au laitier et aux cendres.

En plus des ciments courants cités précédemment, il existe des ciments courants à caractéristiques complémentaires comme le cas des ciments résistant aux sulfates (**CRS**), ciments pour travaux à la mer, ciments pour travaux au contact d'eaux très pures.....

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 1.2

**Tableau 3.1 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition**

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
<b>Clinker (K)</b>	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
<b>Laitier (S)</b>	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
<b>Pouzzolanes (Z)</b>	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
<b>Cendre siliceuses (V)</b>	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
<b>Fumée de silice (D)</b>	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
<b>Cendres calcaïques (W)</b>	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
<b>Schistes (T)</b>	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
<b>Calcaires (L)</b>	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
<b>Fillers (F)</b>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

### **3.6.2 : Classification des ciments en fonction de leur résistance normale**

Les ciments courants sont classés aussi en fonction de leur résistances mécaniques à la compression exprimé en Mpa à 28 jours : **32.5, 32.5 R, 42.5, 42.5 R, 52.5 et 52.5 R**. Elles doivent être respecté les spécifications et valeurs garanties des tableaux 1.2 et 1.3

Les classes « **R** », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées [1].

**Tableau 3.2 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe**

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	( $\mu\text{m/m}$ )	(min)	(min)
<b>32,5</b>		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 800$	/90	$\leq 10$
<b>32,5 R</b>	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	$\leq 10$
<b>42,5</b>	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	$\leq 10$
<b>42,5 R</b>	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	$\leq 10$
<b>52,5</b>	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	$\leq 10$
<b>52,5 R</b>	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	$\leq 10$

### **Ciment pour travaux en eau à haute teneur en sulfates (caractéristique ES)**

Les ciments destinés aux travaux en eau à haute teneur en sulfates, c'est à dire dans le cas de solutions pour lesquelles la concentration en ions  $\text{SO}_4^-$  est  $\geq 1500\text{mg/l}$ , doivent respecter les teneurs en  $\text{SO}_3$ , MgO et insolubles spécifiées dans la norme NF P 15-319[1].

. En ce qui concerne les autres caractéristiques, ce ciment est identique au ciment Portland ordinaire [8].

### 3.7 Résistance

La résistance d'un mortier de ciment ou d'un béton dépend de la résistance de la pâte du ciment de même celle de granulats. Le ciment hydraté, obtenu après les réactions chimiques, et les éléments responsable du développement de la résistance des bétons ou du mortier. La contribution du ciment dans la résistance du béton dépend de la participation de chacun de ses différents composants.

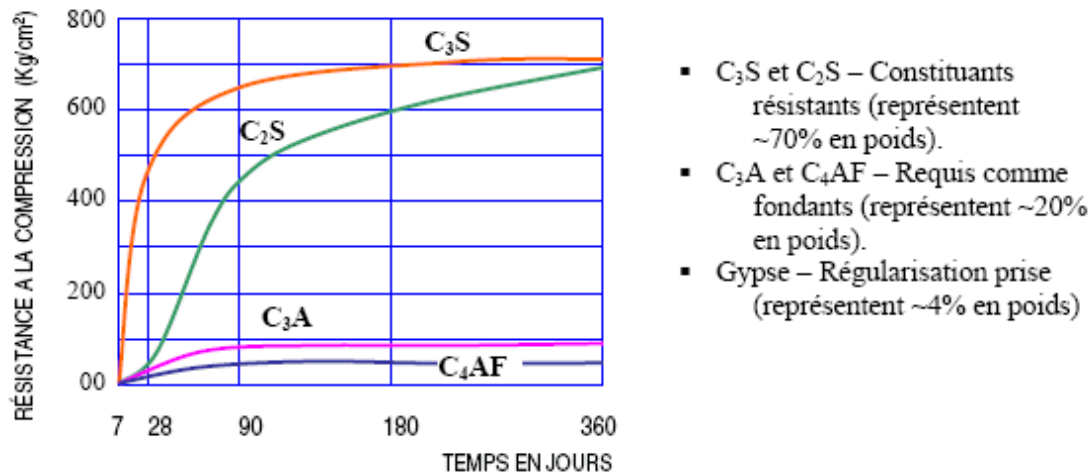
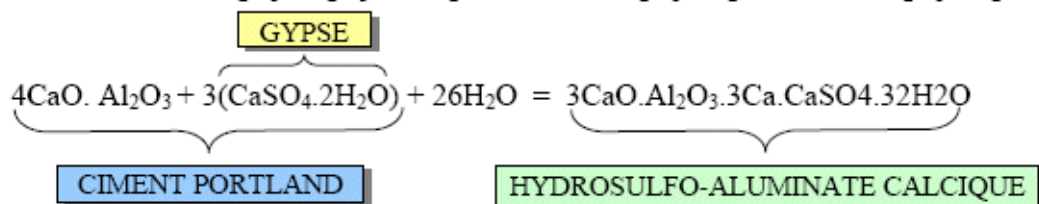
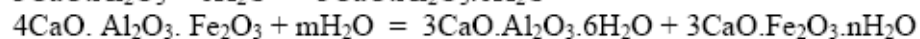
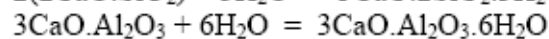
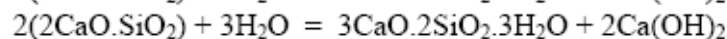
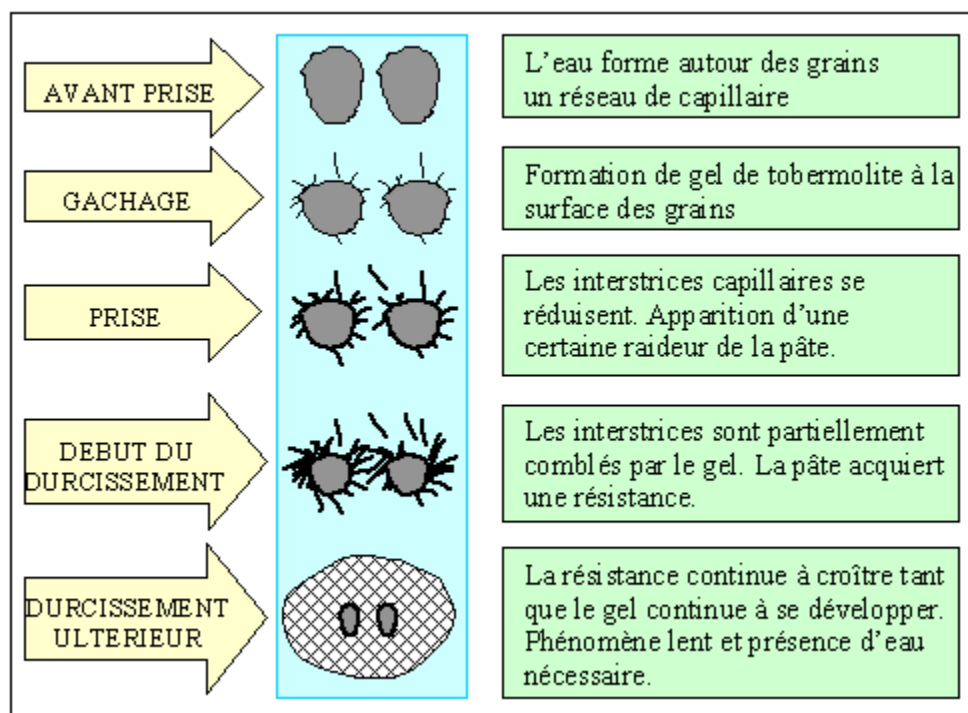


Fig3.3 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP

### 3.8.1 Quelques réactions chimiques importantes :





**Fig. 3.4 : L'évolution physico-chimique de la pate de ciment**

### **3.9 Les autres ciments :**

**Ciment de laitier à la chaux :** CLX (NF P 15-306)

Ce ciment est un mélange de chaux hydrauliques et de laitier granulé de haut fourneau.

**Ciment à maçonner :** CM (NF P 15-307) : Ce ciment contient les mêmes éléments actifs que le CPA mais ses résistances sont moins élevées.

**Ciment naturel :** CN (NF P 15-308) : Ce ciment résulte de la mouture de roches clinkérisées, obtenues par la cuisson de calcaires marneux de composition très régulière et voisine de celle des mélanges d'argile et de calcaire servant à la fabrication du ciment Portland artificiel.

**Ciment prompt naturel :** CNP (NF P 15-314) : Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivi d'un broyage fin.

**Ciment alumineux fondu :** CA (NF P 15-315) : Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des

proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30 % de sa masse d'alumine. Il est réfractaire

**Ciment pour travaux à la mer : PM (NF P 15-317) :** Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence des d'ions chlorure

### **3.10 Utilisation et domaines d'emploi des Ciments :**

Tout en respectant les spécifications des normes qui fixent les conditions d'emplois d'emploi de chaque liant, il faut retenir que :

Les CPJ-CEM II 32.5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie et les bétons peu sollicités.

**En fondation**, si le milieu est agressif il faudra utiliser des ciments à forte teneur en laitier (CHF, CLK et CLC). (Les eaux agressives attaquent les ciments à base principale de clinker).

En élévation, il faut au contraire éviter l'emploi des ciments riches en laitier parce qu'ils sont sensibles à la dessiccation, qui durcissent moins vite que les portland et qui peuvent provoquer des efflorescences.

Pour réaliser des bétons de masse il est préférable d'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation (*ex.*: CPJ).

Pour les travaux de béton armé on peut utiliser tous les ciments portland (CPA et CPJ)

Pour les travaux de béton précontraint on utilise tous le ciment portland artificiel (CPA)

Pour le traitement des sols, la réalisation d'assise de chaussée ou de chaussée béton on utilise les CPJ.

Les classes R seront préférées pour les travaux exigeant des hautes résistances initiales pour permettre un décoffrage rapide par exemple).