



Chapitre I

Le ciment et les ajouts minéraux

1^{ère} partie: le ciment

I-1 Introduction

De durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

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

La composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température ($1450\text{ }^\circ\text{C}$) 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 $100\text{ }^\circ\text{C}$, le départ d'eau d'avantage liée.

A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO_3).

Le mélange est porté à $1450\text{-}1550\text{ }^\circ\text{C}$, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de CaO est retenue par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. SiO_2 et CaO restant réagissent pour donner le silicate bi-calcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.



I-2 Principe de fabrication ciment portland:

La fabrication de ciment se réduit schématiquement (voir figure 1.1) aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru.
- cuisson.
- broyage et conditionnement.

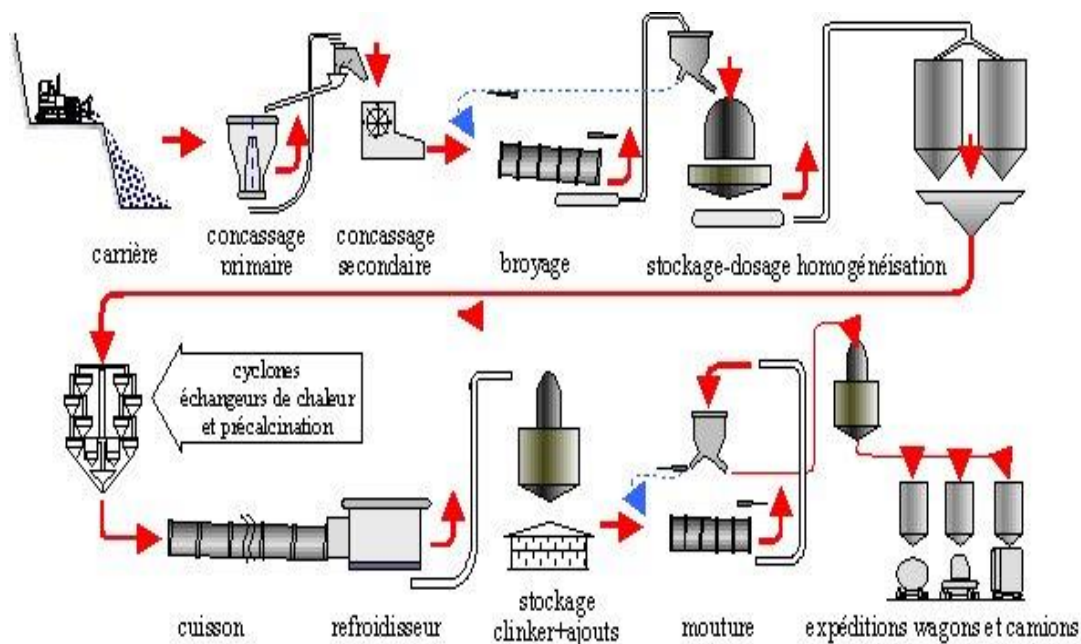


Figure 1-1 Fabrication du ciment.

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment (voir figure 1.1) 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 demi-sèche (en partant de la voie sèche).

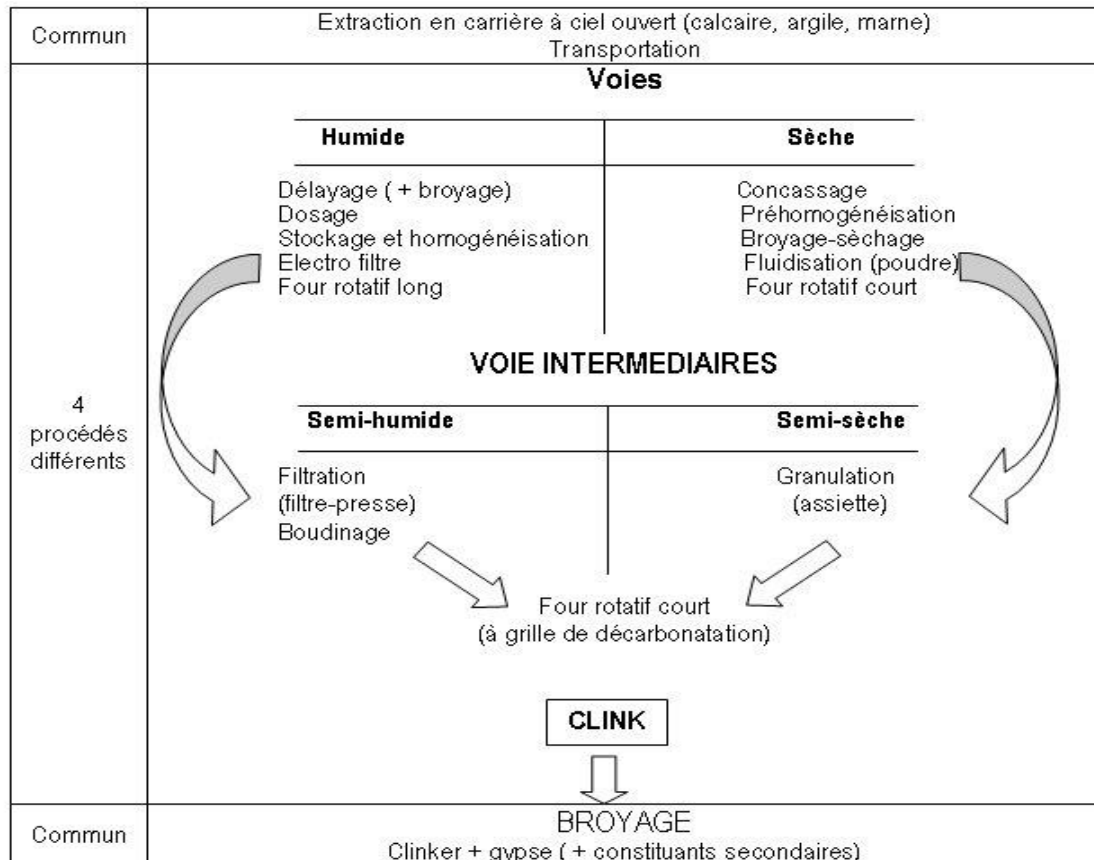


Figure 1-2 Le schéma de la fabrication du ciment.

On distingue deux types du fabrication :

I-2-1 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 herse.

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 Les analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

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.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quel que 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 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.



I-2-2 Fabrication par Voie sèche :

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (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 (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). 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 pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

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

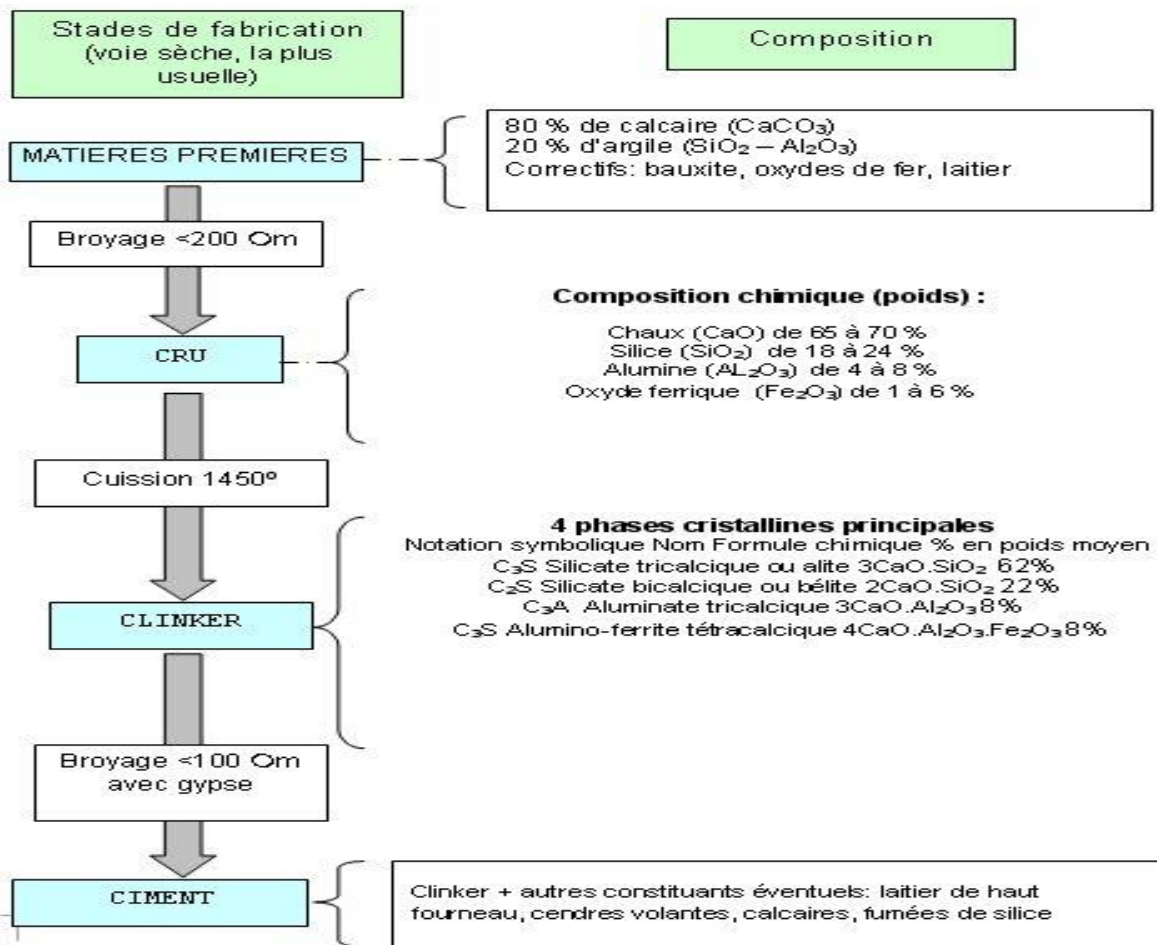


Figure 1-3 Fabrication du ciment par voie sèche [1].

I-3-Les Constituants du ciment:

I-3-1-Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clin irisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [1]

Les éléments simples (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants (Figure (I.2)).

- Silicate tricalcique (C_3S) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Alite).
- Silicate bicalcique (C_2S) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C_3A) : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.
- Ferro alum innate cacique (C_4AF) : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Célite).

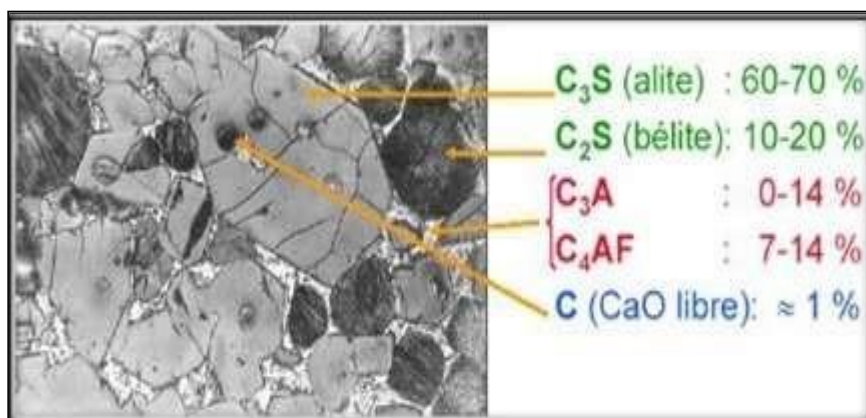


Figure (1.4) : Microphotographie d'un clinker. [1].

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par Le tableau (1.1) ci –dessous :

Composants	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne(%)
Minéralogiques		
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08
Oxydes	-	-
CaO	60-69	65
SiO_2	18-24	21
Al_2O_3	04-08	06
Fe_2O_3	01-08	03
MgO	< 05	02
K_2O, Na_2O_3	< 02	01
SO_3	< 03	01

Le Tableau (1.1): Composition chimique et minéralogique du clinker [2]

I.3.2-Le gypse ($CaSO_4$) :

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.



1.4. -Classification des ciments courants :

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme NF EN 197-1. Le tableau (I.2) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils comportent.

désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l’un de constituants suivant : laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
C P A- CEM I	Ciment portland	95à100%		0 à 5%
C PJ-CEM II/A CPJ-CEMII/B	Ciment portland Composé	80à 94% 65 à79%	--de 6à20% de l’un quelconque des constituants, sauf dans les cas ou les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% -de 21à35%avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0à5% 0à5%
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEMIII/C	Ciment de haut- fourneau	35à64% 20à34% 5à19%	-35à65% de laitier de haute-fourneau -66à80% de laitier de haut fourneau -81 à95% de laitier de haut fourneau	0à5% 0 à5% 0à5%
CPZ-CEMIV/A CPZ-CEMIV/B	ciment pouzzolanique	65 à90% 45à64%	-10à35% d pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%. -36à55%comme ci-dessus	0à5% 0à5%
CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	Ciment au laitier et aux cendres	40à64% 20à39%	-18à30% de laitier de haut fourneau et 18 à30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. -31 à50%de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0à5% 0à5%

Tableau (1.2): les différents types de ciment courants [3].



I.5.- Propriétés des Ciments :

I.5.1-Caractéristique physiques :

I.5.1.1-Comportement physico –chimique de la pâte :

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C_3S
- Silicate bi calcique : C_2S
- Aluminate tricalcique- : C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique: C_4AF

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

I.5.1.2-Prise :

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R.

1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20°C.

I.5.1.3-Durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevé et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ».il est



également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistances [3]

I.5.1.4 Fausse prise

Dans la composition des ciments la présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est indispensable. Si le clinker est trop chaud ou s'échauffe trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de Plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise.

Dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de Malaxage.

I.5.1.5 Chaleur d'hydratation (EN 196-9 - NF P15-436)

-Domaine d'application

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

-Principe

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée.

À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence. L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

-la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.

-la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.



-la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte la température extérieure (voir tableau 1-3).

N°	Constituants	Comportement des constituants purs	Chaleur dégagée
1	C_3S	- Fait prise et durcit rapidement. - Haute résistance atteinte à court terme	502.415 j / gr
2	C_2S	- Réagit lentement. - Haute résistance atteinte à long terme	259.581 j / gr
3	C_3A	- Prise de façon très désordonnée et rapide. - Faible résistance. (pour régulariser la prise du C_3A , il faut ajouter du gypse)	866.667 j / gr
4	C_4AF	- Faible résistance.	418.679 j / gr

Tableau 1.3 : Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.

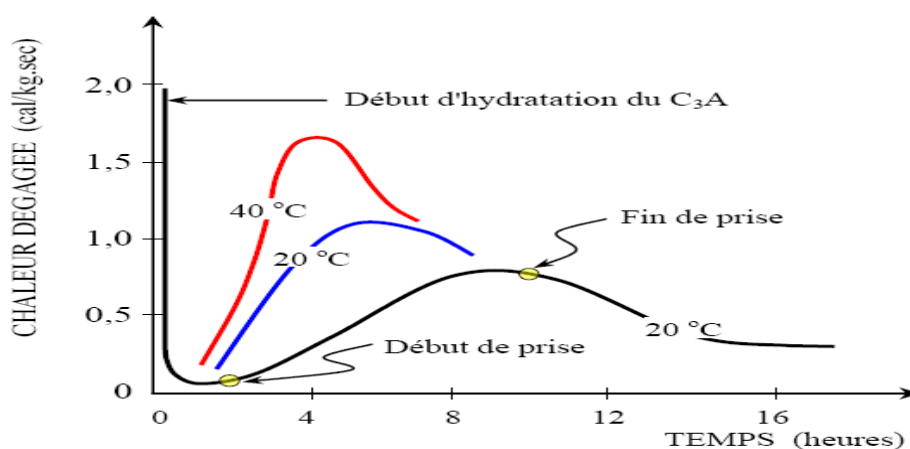


Figure 1-5 Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.

I .5.1.6 La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NF EN 196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g)

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g .

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1-6), par contre plus le



Ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait n'est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue.

Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue, Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à $\sqrt{t}$.

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur figure (1. 7).

Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère.

La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

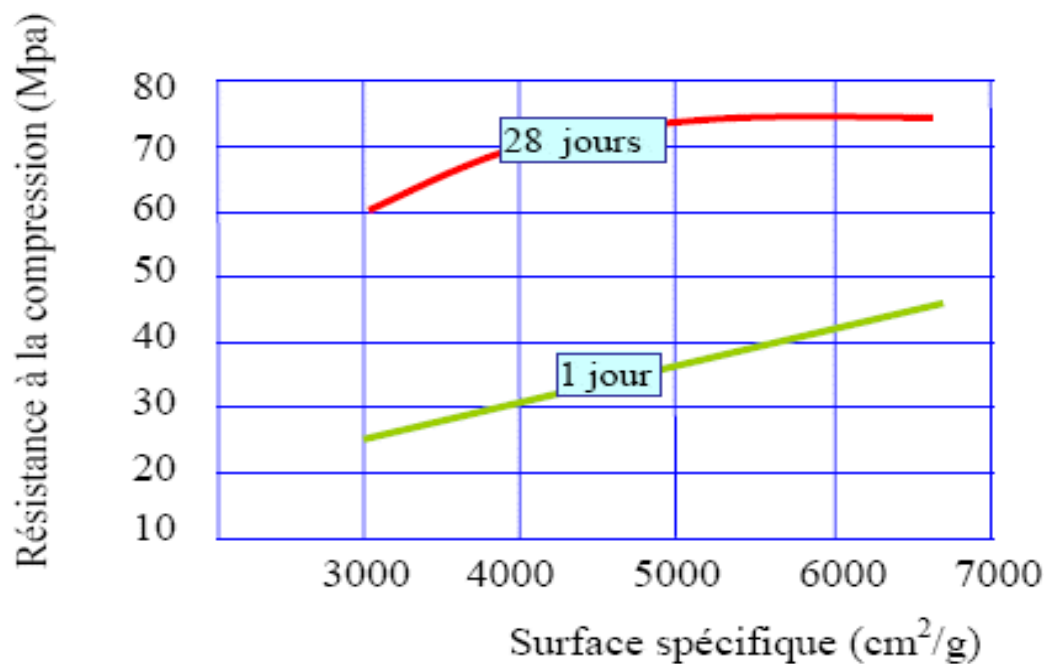


Figure 1-6 Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

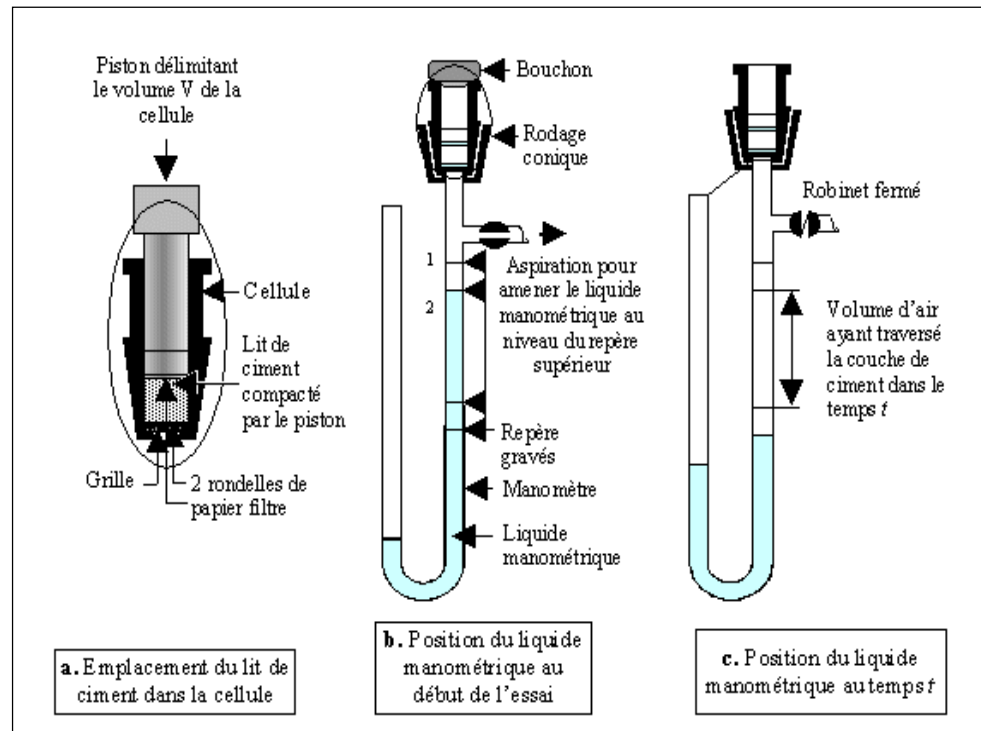


Figure 1-7 Principe de fonctionnement de Perméabilimètre de Blaine.

I.5.1.7 Retrait

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent, c'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% [3].

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- $\leq 800\mu\text{m/m}$ pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32,5R.
- $\leq 1000\mu\text{m/m}$ pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture ;
- le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;



La propreté et nature des granulats ;

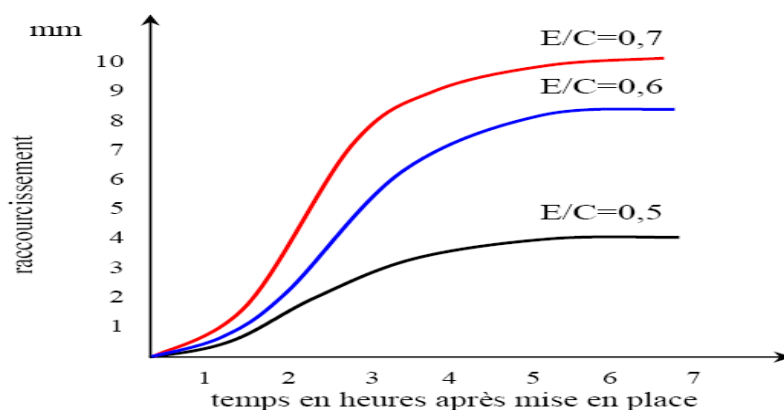


Figure 1.8- Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers.

I.5.1.8-Gonflement

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes.

I.5.2 - Caractéristiques chimiques du ciment

I-5.2.1 Ciments courants

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau (I.4) .ci-après, quant à leur composition chimique.

Propriété	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en% de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤ 5
Oxyde de magnésium	CPA-CEM I	toutes classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤ 5
Sulfates SO_3 limite supérieure	CPA-CEM I	32,5	$\leq 3,5$
	et CPJ-CEM II (A et B)	32,5 R 42,5	
	CPZ – CEM IV et CLC – CEM V CHF-CEM III	42,5 52,5 52,5 R toutes classes	
Chlorures	tous types de ciment (CHF-CEM III/A et B et les CLK-CEM III/C)	52.5 R toutes les autres classes	$\leq 0,05$ $\leq 0,10$

Tableau (1.4) : Caractéristique chimique de ciment courant[3]



I-5.2.2 - Caractéristiques mécaniques des ciments courants

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPA à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes:

Classe de résistance	Résistance à la compression				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	MPa					
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours		min	mm
32,5 N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	—				
52,5 N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	—				

Tableau (1.5): Caractéristique mécanique des ciments courants [3].

Classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage trouvant par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment par la norme (tableau précédent), la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90% pour les résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % et qui sont indiquées dans le tableau (1.6) ci-dessous :

Propriété		Valeurs limites applicables à chacun des résultats					
		Classe de résistance					
		32,5 N	32,5R	42,5 N	42,5R	52,5 N	52,5R
Résistance à court terme (MPa) valeur limite inférieure	2 jours	—	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
	7 jours	14,0	—	—	—	—	—
Résistance courante (MPa) valeur limite inférieure	28 jours	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0
Temps de début de prise (min) valeur limite inférieure		60		50		40	

Tableau (1.6) : résistances garanties des ciments courants [3].



I.5.3 L'hydratation du ciment

I.5.3. 1 -Introduction

L'hydratation du ciment fait intervenir les réactions de ses constituants avec l'eau de gâchage. Les anhydres du ciment vont réagir avec l'eau du gâchage pour former des hydrates. Ces anhydres se sont principaux minéraux de clinker purs cités auparavant. Les anhydres et les hydrates cités dans ce paragraphe sont résumés dans le tableau (1.7)et (I.8) ci-dessous :

Nom	Composition	Formule
Silicate tricalcique	$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	C3S
Silicate bicalcique	$(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcique	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferrite tétracalcique	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF
Gypse	$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	CS H ₂

Tableaux 1.7 : phases du ciment anhydres [4].

Nom	Composition	Formule
Portlandite ou hydroxyde de calcium	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CH
Silicate de calcium hydraté	$(\text{CaO})_x\text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})_y$	CSH
TSA ou ettringite	$[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2, 3\text{SO}_4, 26\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}(\text{CS})_3\text{H}_{32}$
MSA	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]_2, \text{SO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{ACS H}_{12}$
Aluinmate bicalcique hydraté	$(\text{CaO})_2\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_8$	C_2AH_8
Hydrogrenat	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_6$	C_3AH_6
Aluminae tétracalcique hydraté	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_{13}$	C_4AH_{13}

Tableaux 1.8: phases du cimentaire hydratées [4].



I.5.3.2- Hydratation des composants du ciment portland

I.5.3.2.1 - Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalcique (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+} , OH^- et $H_2SiO_4^{2-}$.

Qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la Portlandite ($Ca(OH)_2$) ou (CH). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [5].

À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

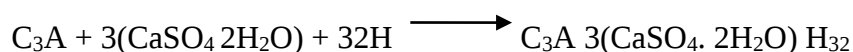


I.5.3.2.2 - Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [5].

I.5.3.2.3 -Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

La réaction est donnée par:



I.5.3.2.4 -Hydratation de L'aluminoferrite tétracalcique C_4AF :

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

I.5.3.2.5 Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux Composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.



2^{ème} partie: les ajouts minéraux

I.6 – Contexte

Les ajouts pouzzolaniques de remplacement d'origine minérale sont largement exploités pour la fabrication des ciments aux additions minérales dans le monde.

Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

La réduction de la proportion du clinker dans la fabrication du ciment avec ajout minérale présente les avantages suivants :

- élimination et valorisation d'un déchet industriel (sous-produit)
- réduction de la consommation thermique.
- réduction des émissions de CO₂. Les émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment proviennent de différentes sources :
 - CO₂ matière provenant de la décarbonatation (52%) du calcaire (CaCO₃).
 - CO₂ thermique (48%) provenant de la combustion lors de la cuisson.

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les principales pouzzolanes sont : les matériaux volcaniques (cendre, scorie . . .), les cendres des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux et les déchets de briques et tuiles cuites (argile calcinée).

La chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker réagit avec le matériau pouzzolanique à l'intérieur du matériau cimentaire pour former des nouveaux composés qui participent aux résistances mécaniques du mortier ou du béton. L'utilisation des sous-produits comme matériau de substitution (remplacement partiel de ciment) a les avantages économiques, environnementaux et techniques importants tels que : la réduction de la quantité de déchets, rendre l'environnement plus propre, réduire le besoin en énergie et amélioration des propriétés des matériaux cimentaires (mortier).

I.7 – Objectifs

L'objectif principal de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence de l'ajout pouzzolanique (déchets de brique cuite) sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments confectionnés ainsi que la résistance mécanique et la microstructure du mortier testé.



Cette recherche consiste à faire varier le pourcentage de l'ajout pouzzolanique dans le ciment (effet chimique) par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par l'ajout pouzzolanique d'origine minérale).

Cette étude comporte deux grandes parties : Une étude physico-chimique de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) et des ciments préparés à leurs bases (Fluorescence aux rayons X «F.R.X», Perméabilimètre de Blaine «P.B», Granulométrie à laser «G.L», Diffraction aux rayons X «D.R.X»).

Ce travail vise à examiner l'influence de l'ajout argile cuite sur la réactivité (cinétique d'hydratation) des ciments préparés à leurs bases ainsi que la réponse mécanique et la microstructure des mortiers confectionnés à base des ciments aux ajouts minéraux. Ceci dans le but d'améliorer la degré d'hydratation (prise et le durcissement) des ciments aux ajouts minéraux et d'augmenter le taux d'incorporation de l'ajout pouzzolanique dans le ciment pour une meilleure utilisation des additions pouzzolaniques dans l'industrie cimentière.

Cette recherche a pour but d'analyser des propriétés physiques et chimiques de l'ajout pouzzolanique et des ciments préparés à l'état anhydre et à l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, distribution des particules, finesse, consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques des mortiers confectionnés à base de ciments aux ajouts minéraux, telles que, le retrait, le gonflement, la microstructure et les réponses mécaniques (R_f et R_c) des mortiers testés.

I.8 - Les Argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis la plus haute antiquité. Le mot argile vient du grec "argiles" dérivé de "argos" qui veut dire blanc, ou du latin "argila"; c'est la couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom [6].

Les argiles sont donc des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des matériaux argileux appartiennent au groupe des silico -aluminates phylliteux. Ils sont organisés en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets.

Ce type de structure à très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface.

A l'état de fines particules, les minéraux argileux sont les constituants de nombreuses formations géologiques et des sols particulièrement recherchés pour certains types de cultures. En outre, les argiles ont un rôle dans le domaine des pesticides.



De nos jours, l'utilisation des argiles, notamment celles qui sont riches en SiO_2 (de 45 à 60%) et Al_2O_3 grâce à sa plasticité, elle connaît un nouvel essor dans la construction, la céramique industrielle et artisanale, l'industrie pharmaceutique et la poterie.

Les briques d'aluminosilicates servent au revêtement des hauts fourneaux, des four d'affinage et de nombreux fours de laboratoire.

On élabore aussi, des matériaux céramiques plus durs que la porcelaine et la faïence traditionnelle, ainsi que des couronnes dentaires à base de quartz -alumine.

De nombreux travaux réalisés ou en cours, sont relatifs à l'utilisation des minéraux argileux comme la montmorillonite ou les inters -stratifiés riches en smectites, pour la fonderie.

De même, les argiles comme la kaolinite et certains mélanges de minéraux argileux, ayant une activité catalytique, favorisent la polymérisation du styrène.

La majorité des céramiques sont issues de matières premières minérales silico - alumineuses compactées et consolidées par frittage. Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physicochimiques sont très variables. Les critères de choix des utilisateurs sont moins liés à la composition chimique globale des matériaux argileux qu'à leur comportement pendant les différentes étapes de la fabrication des produits céramiques.

I.9. Les Marnes

C'est une roche sédimentaire formée d'un mélange de carbonate de calcium (le calcaire) et d'argile comptant pour 35 à 65%. Les marnes ont une composition chimique intermédiaire entre les calcaires marneux d'argile (5 à 35%) et les argiles calcareuses ou marnes argileuse (65 à 90%).

Les marnes sont très répandues dans la nature, elles contiennent les éléments Principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des rapports de calcaires ou d'argiles afin de parfaire leur dosage, les calcaires argileux sont préférés pour la fabrication des ciments puisqu'ils se présentent comme mélange naturel de calcaire et de substance argileuse

I.10. Ajouts cimentaires

L'utilisation accrue des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer la qualité de l'air. Les ajouts cimentaires sont ajoutés au mélange de béton comme agent complémentaire.

I.10.1. Définition des ajouts cimentaires

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie



suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs.

On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [07].

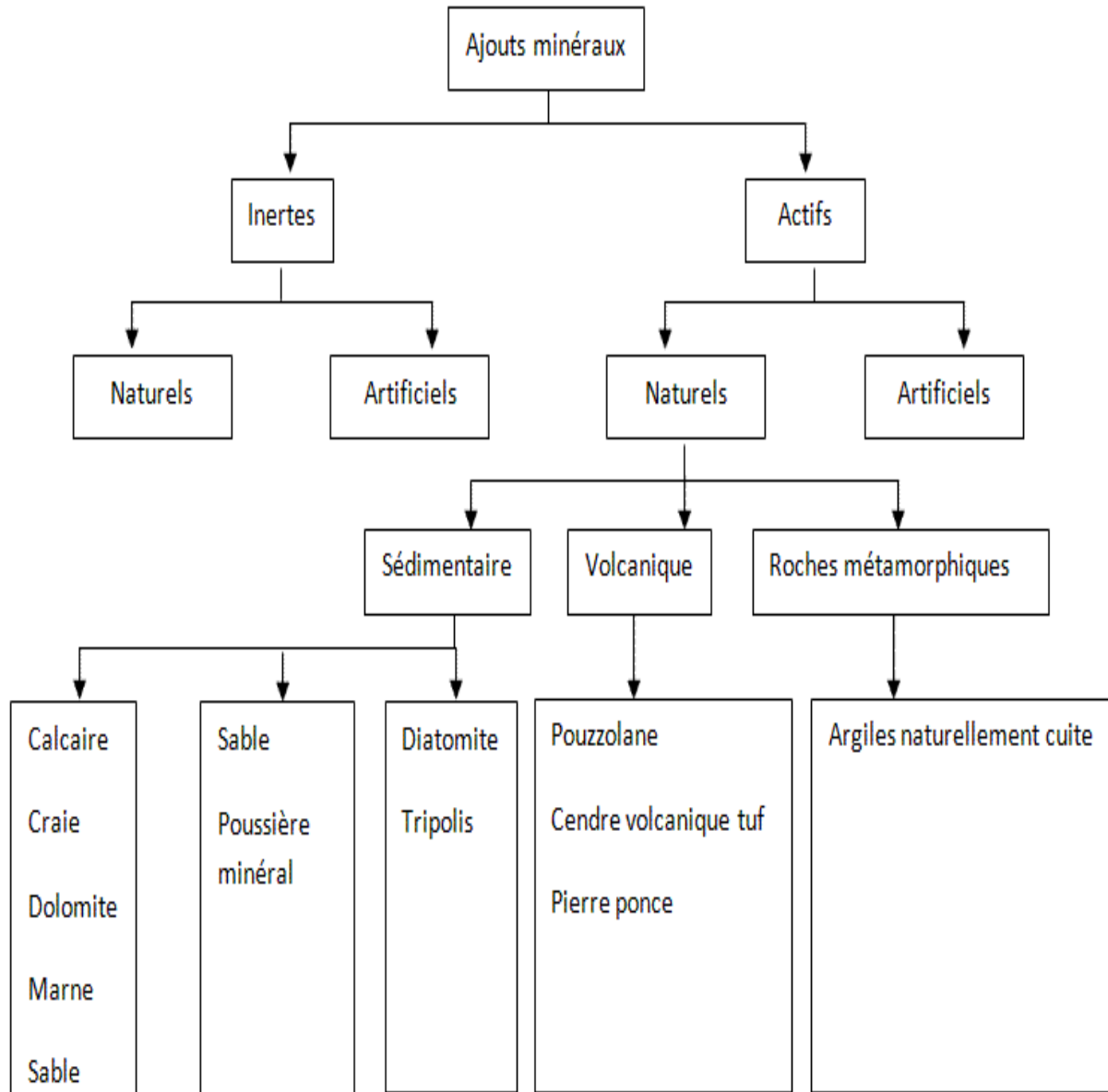


Figure 1.9: Différents types d'ajouts cimentaires

I.11-Classification des ajouts minéraux

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie Métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la Norme NF EN 197 -1 en ajouts minéraux inertes et actifs [08]. Ils se divisent selon leur Réactivité comme le montre le tableau (1.9) ci-dessous



Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, , terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

Tableau (1.9) : Classification des ajouts selon leur réactivité.

I.11.1-Principaux ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques Du ciment Portland ; ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés.

I.11.1.1-Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (Calcaires, basalte, bentonite, etc.) Présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 Supérieure à 75%.

Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans l'autre cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.



I.11.1.2-Sable de dune

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions Sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers. Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en Sable de dune.

I.11.2- Les ajouts minéraux actifs

A) La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, Stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [09].

Les normes françaises Donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

- Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origineVolcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire:

terre à diatomées, diatomites.



Figure (1.10): pouzzolane naturelle[09].

**- Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer Ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

B) La fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2

Tableau (1.10) : Composition chimiques de la fumée de silice.

C) Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique tableau (1.11), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparés.



OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%		0.15

Tableau (1.11) : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [10].

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment. Portante craint donc d'avantage la dessiccation.

Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ❖ Broyage poussé.
- ❖ Chaleur (étuvage, autoclavage)
- ❖ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude

I.12-Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

- ❖ Retard de prise.
- ❖ Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- ❖ Mûrissement plus long.
- ❖ Résistance à Lecaillle controversée.
- ❖ Le broyage et le transport plus cher.

I.13-Effets des ajouts sur les propriétés des bétons

I.13.1- Amélioration de l'ouvrabilité

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules > 45 µm à un maximum de 34 % [11].

**I.13.2-Chaleur d'hydratation**

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

I.13.3-Durabilité

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

I.13.4-Développement des résistances

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

I.13.5-Développement des bétons à haute résistance

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [12].

I.14 - L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en



grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf. Le tableau (I.12) (donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes).

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghoulane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane

Tableau (I.12) : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [12].

I.15-Conclusion

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle [07, 13] riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheur, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue deux catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se base essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuie sur les méthodes physiques et mécaniques.