

I.1. Le ciment :

I.1.1. Introduction :

Le ciment (du latin caementum , signifiant moellon, 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. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, pour produire du mortier, ou des graviers (granulats), pour produire du béton. Le mot « ciment » peut désigner différents matériaux comme :

Le plâtre,

La chaux commune,

La pouzzolane naturelle,

Le ciment Portland ou ciment artificiel,

Un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine, de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau n'a aucune action, ou qu'une action très lente avant la trituration, et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'action de l'eau, dans un délai qui varie selon leur proportion.[01]

I.1.2. Historique :

Le ciment aurait été inventé par les Égyptiens et a été amélioré par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, dans la région de Naples, en Italie) est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840. La recherche sur l'hydraulicité des chaux débuta à la fin du XVIIIe siècle pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concernait les chaux grasses, non hydrauliques, qui ne durcissent pas sous l'eau, les chaux hydrauliques qui durcissent même sous l'eau, les chaux éminemment hydrauliques (riches en argiles) qui se solidifient très rapidement, et les chaux limites (trop riches en argiles) qui se solidifient très rapidement puis se décomposent, si elles ne sont pas cuites au degré de fusion pâteuse. En 1796, James Parker découvrit sur l'Île de Sheppey, en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920

environ, une grande réputation. Il fut fabriqué dans toute l'Europe et servait à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé. Au début du XIX^e siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux Britanniques ni à la pouzzolane italienne. Et le Français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux - concernant la proportion d'argile et la température de cuisson - et publia ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemblait aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche. C'est un ciment similaire à ceux que décrit Vicat, encore que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1 450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé. La première usine de ciment a été créée par Dupont et Démarre en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement. [01]

I.1.3. Principe de fabrication ciment portland:

La fabrication de ciment se réduit schématiquement (figure I.1) aux trois opérations suivantes:

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

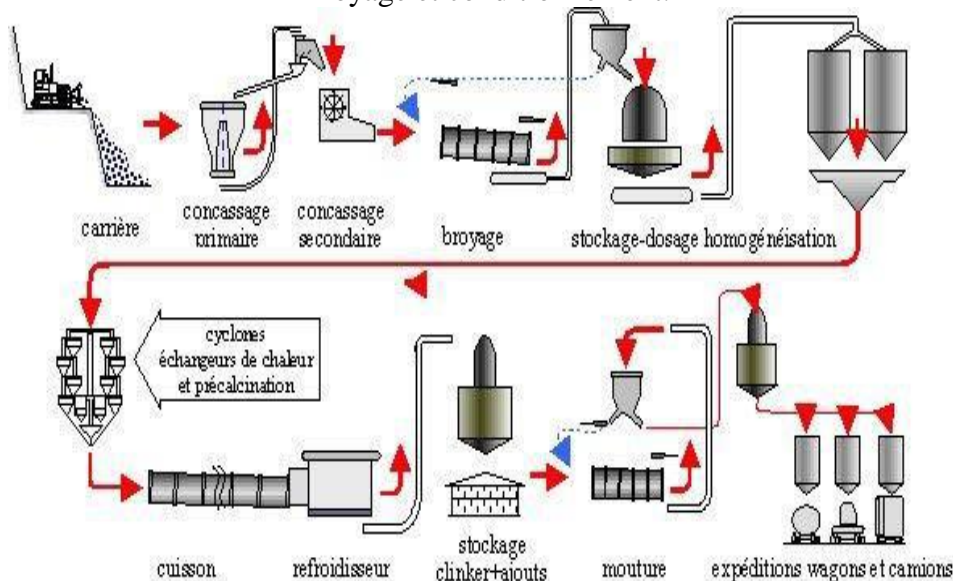


Figure I.1 : Fabrication du ciment.

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment (voir figure) qui dépendent essentiellement du matériau:

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

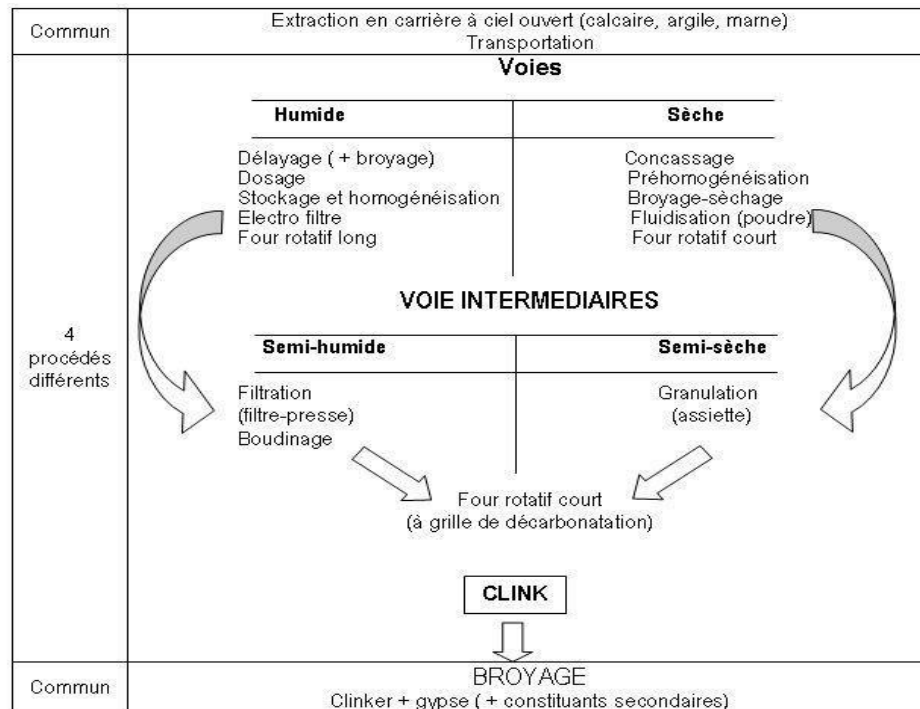


Figure I.2 : Schéma de la fabrication du ciment.

- On distingue deux types de fabrication :

I.1.3.1. 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'intérieur 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 calorifiques 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, 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 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 (20 t/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. [01]

I.1.3.2. 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.

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. [01]

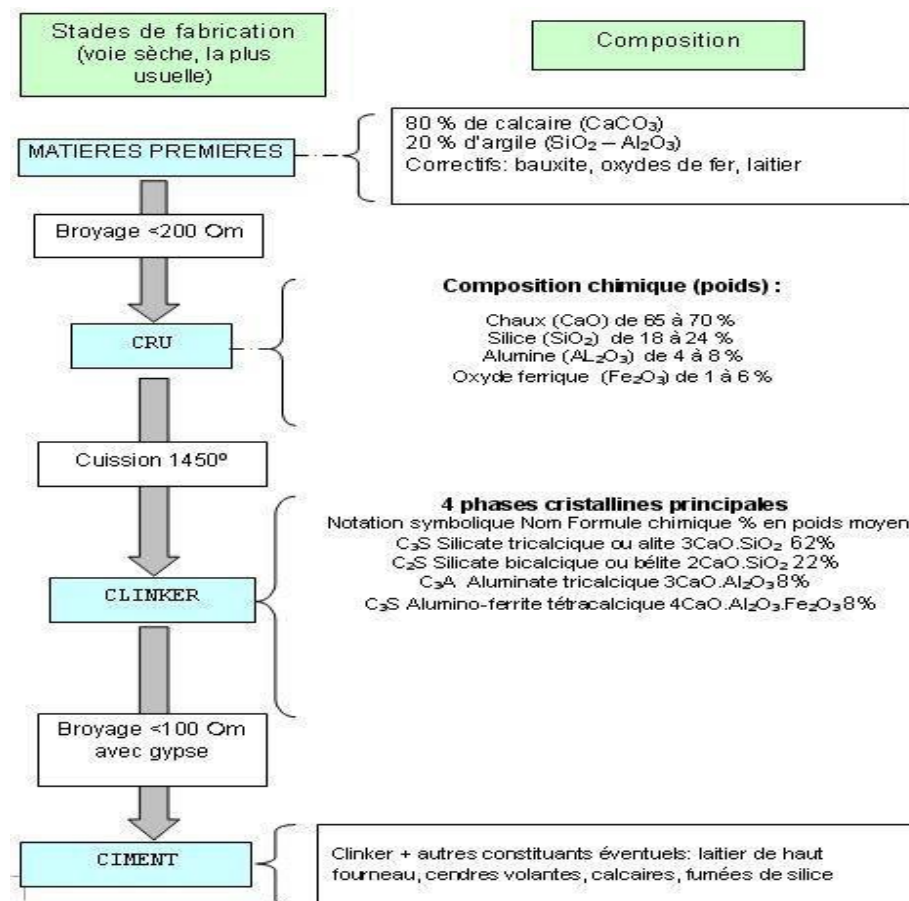


Figure I.3 : Fabrication du ciment par voie sèche. .

I.1.4. Principales catégories des ciments :

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme

Tableau I-1 Principales catégories de ciment . [01]

Désignation	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CPA-CEM I	95-100	----	0.5
Ciment Portland compose	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	--- ---
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0.5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0.5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	0.5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35	0.5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	36-55	0.5
Ciment composé	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	0.5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	0.5

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit : CEM pour indiquer que le produit est un ciment. Un chiffre romain 1, 2, 3, 4 ou 5 pour indiquer le type de ciment Pour le ciment 2 ; 3 ; 4 et 5 une lettre A, B, C pour indiquer la proportion des constituants Le nombre indiquant la classe de résistance 32.5, 42.5, 52.5 suivi le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours) .[01]

I.1.5. Constituants anhydres du ciment (CPA) :

I.1.5.1. Composition chimique:

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée .Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) destinés à régulariser la prise.

Les principaux oxydes (Tableau I.2) sont en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland. qui consiste à exciter l'échantillon à l'aide d'un tube à RX et d'analyser le spectre (en longueurs d'onde ou en énergie) de rayons X émis.Ce spectre est représentatif de la composition élémentaire de l'échantillon. [02]

Tableau I.2 : Composition chimique du clinker .[02]

Elément	Fourchette(%)	Moyenne (%)
CaO	62 à 68	66.6
SiO ₂	18 à 24	21.9
Al ₂ O ₃	4 à 8	6.8
Fe ₂ O ₃	2 à 5	2.5
MgO	0 à 5	1
SO ₃	0 à 5	0.8
K ₂ O	0 à 2	0.2
Na ₂ O	0 à 2	0.2
TiO ₂	0 à 2	0.2

I.1.5.2. composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange (clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [01]. Il contient quatre principaux composants:

- Le silicate tricalcique (alite) : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$
- Le silicate bicalcique (bélite) : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$
- L'aluminate tricalcique (célite) : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$
- L'alumino-ferrite tétracalcique (céfite) : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{C}_4\text{AF}$

I.2. Le mortier :

On appelle mortier les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau et de sable avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants. C'est la dimension D du plus gros granulat qui détermine l'appellation : mortier pour $D \leq 4\text{mm}$.

Le sable constitue le squelette granulaire du mortier par contre le ciment, l'eau et l'adjuvant forment la partie liante. Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle de coulis de ciment.[03]

I.2.1. Composition de mortier :

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- Liant (ciment ou chaux)
- Eau
- Sable
- Adjuvants

I.2.1.1. Les liants :

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes

I.2.1.2. Les sables :

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu’en volume comme c’est souvent le cas, afin d’éviter les erreurs de dosage, par suite de l’augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - sable de laitier;
 - sable d’oxydes de fer, de chromite;
 - corindon;
 - sable de briques concassés;
 - liège torréfié;
 - polystyrène expansé;
 - vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- Extra-fins: jusqu’à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- Fins: jusqu’à 1,6 mm;
- Moyens: jusqu’à 3,15 mm;
- Gros: jusqu’à 5 mm.

I.2.1.3. Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l’on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d’adjuvants:

- Les plastifiants (réducteurs d’eau);
- Les entraîneurs d’air;
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d’obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d’une gâchée à l’autre

I.2.1.4. Les ajouts :

Les ajouts que l’on utilise dans les mortiers sont:

- Poudres fines pouzzolanique (cendres, fumée de silice..);
- Fibres de différentes natures;

- Colorants (naturels ou synthétiques);
- Polymères.

I.2.2. Caractéristique physique et mécanique des mortiers :

Les caractéristiques principales du mortier sont :

- Consistance ;
- Résistances mécaniques ;
- Retrait et gonflement ;
- Ouvrabilité ;
- Prise , etc

I.2.2.1. Mesure de la consistance des mortiers (NF P 18-452 et NF P15-437) :

➤ **Objectif de l'essai :**

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou super plastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance ; c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 et NF P 15 -437.[04]

➤ **Principe de l'essai :**

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

➤ **Equipement nécessaire :**

L'appareil utilisé est appelé manéabilimètre B" .Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60 cm x 30 cm x 30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier.

➤ **Conduite de l'essai :**

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 4 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide (ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil).

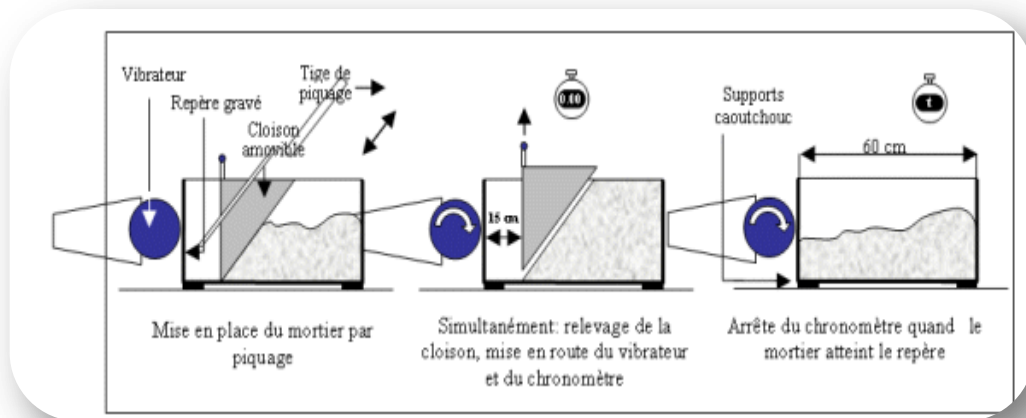


Figure. I.4 : Principe de fonctionnement du manéabilimètre B .

I.2.2.2. Mesure des résistances à la compression et à la traction (EN 196-1) :

➤ Objectif de l'essai :

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

➤ Principe de l'essai :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

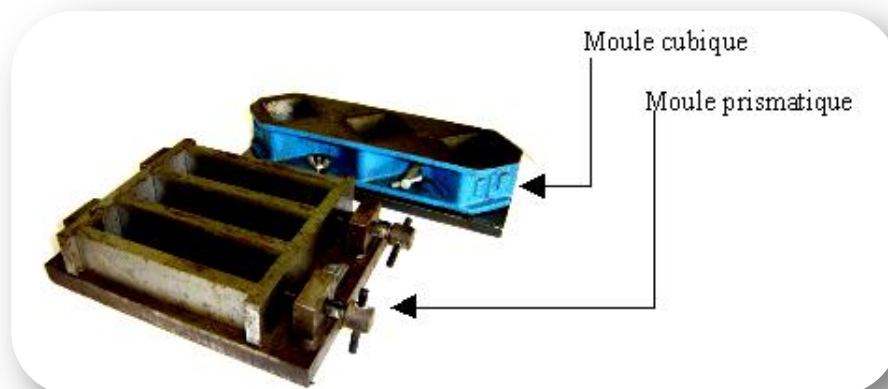


Figure. I.5 : Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.

I.2.2.2.1. Résistance à la flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure I.6 [04]

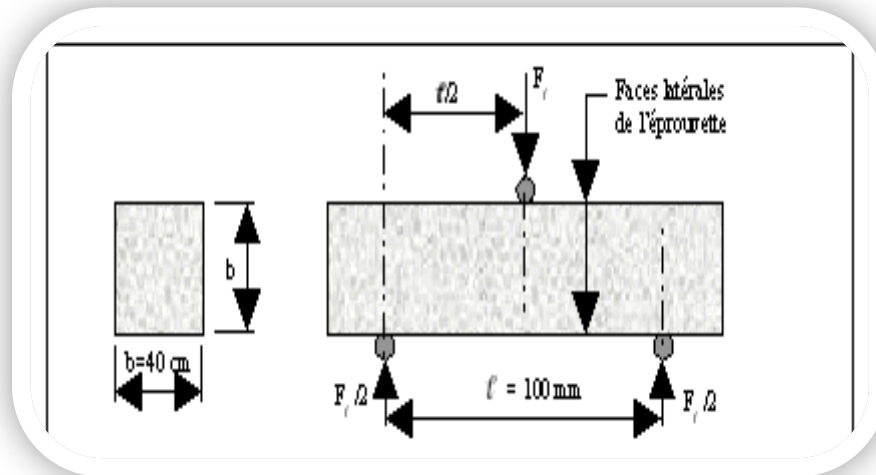


Figure. I.6 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation (I.1)

$$Rf = \frac{1.5 \times Ff \times L}{b^3} \dots\dots\dots (I.1)$$

Rf : Résistance à la flexion en (MPa)

Ff : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N)

L : Longueur qui sépare les deux appuis (mm)

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm

I.2.2.2.2. Résistance à la compression :

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. Compression comme indiqué sur la figure (I.7) Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra [04] :

$$Rc = \frac{F_c}{b^2} \dots\dots\dots (I.2)$$

Rc : Résistance à la compression en (MPa);

F_c : Charge de rupture en (N);

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

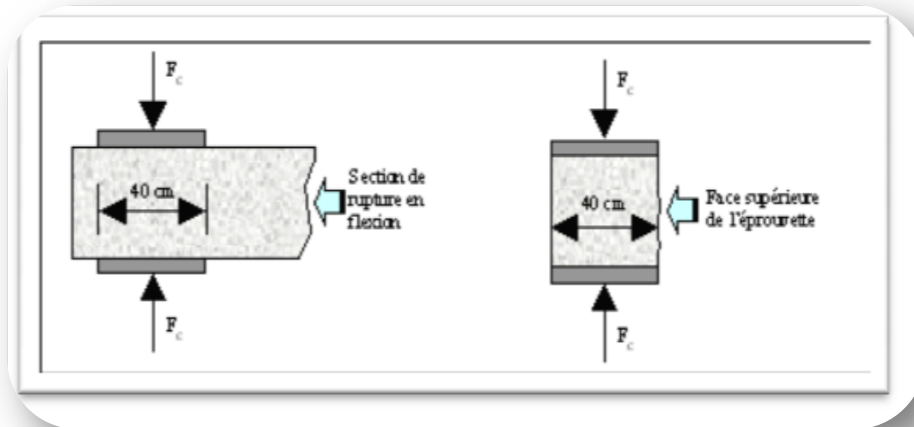


Figure. I.7: Dispositif de rupture en compression .

➤ Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;
- granulométrie et nature du sable;
- énergie de malaxage et mise en œuvre;
- protection les tous premiers jours

I.2.2.3. Mesure du retrait sur éprouvettes de mortier (NF P 15-433) :

➤ **Objectif de l'essai :**

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes de mortier normal.

➤ **Principe de l'essai :**

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16$ cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

➤ **Equipement nécessaire :**

Il est décrit dans la norme NF P 15-433.[04]

Une salle maintenue à une température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à $50 \% \pm 5 \%$.

Eventuellement deux bains d'eau dont la température est maintenue à $20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ et $5 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$. Un malaxeur normalisé (figure I.8)

Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ sont donc munies à leurs deux extrémités de plots comme indiqué sur la figure (I.8)

Un déformètre (tel que celui schématisé sur la figure I.8) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005

mm. Une tige de 160 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

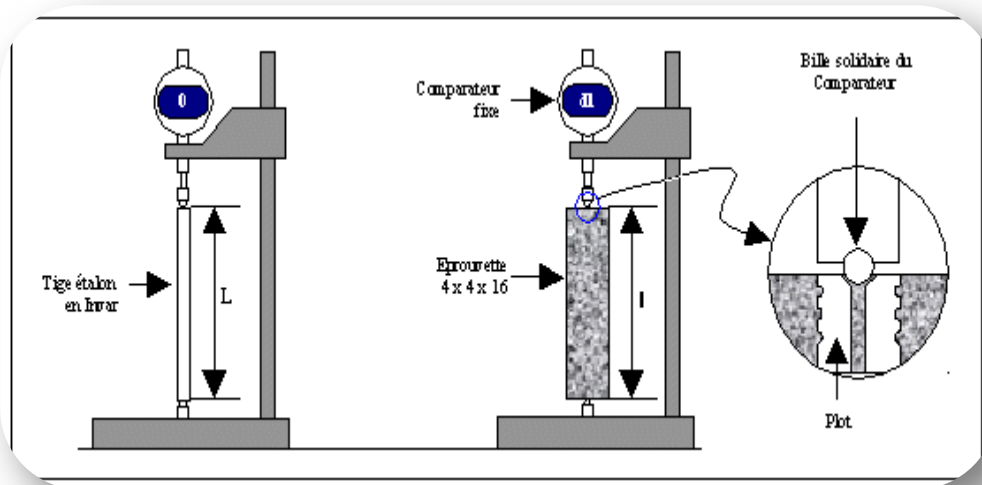


Figure I.8 : Appareillage pour la mesure du retrait .

➤ Conduite de l'essai :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t) \dots\dots\dots (I.3)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \dots\dots\dots (I.4)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \dots\dots\dots (I.5)$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.

I.2.2.4. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

- La table à secousses: le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue[04]. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E (\%) = \frac{D_r - D_i}{D_i} \times 100 \dots\dots\dots (I.6)$$

D_r = diameter final.

D_i = diamètre initial.

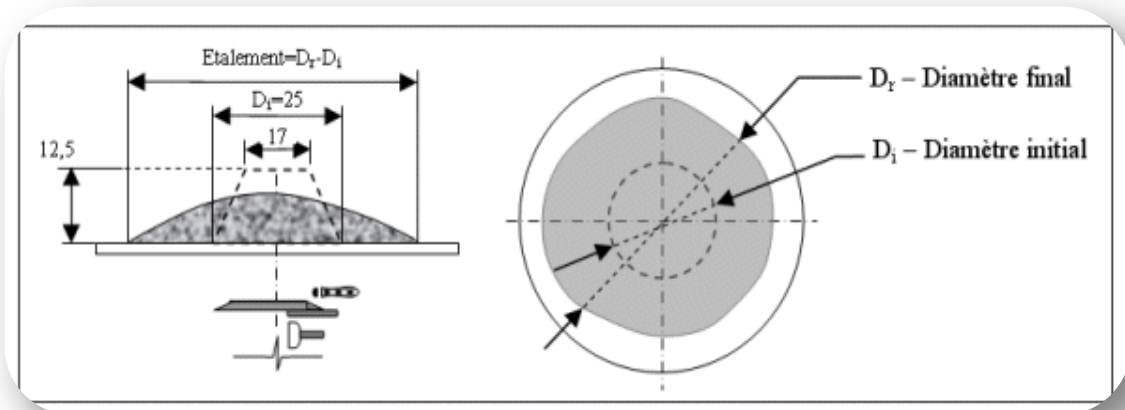


Figure I.9 : Table à secousses .

- Le manéabilimètre du LCPC: il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.
- Le cône: dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

I.2.2.5. Prise :

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supère. [04]

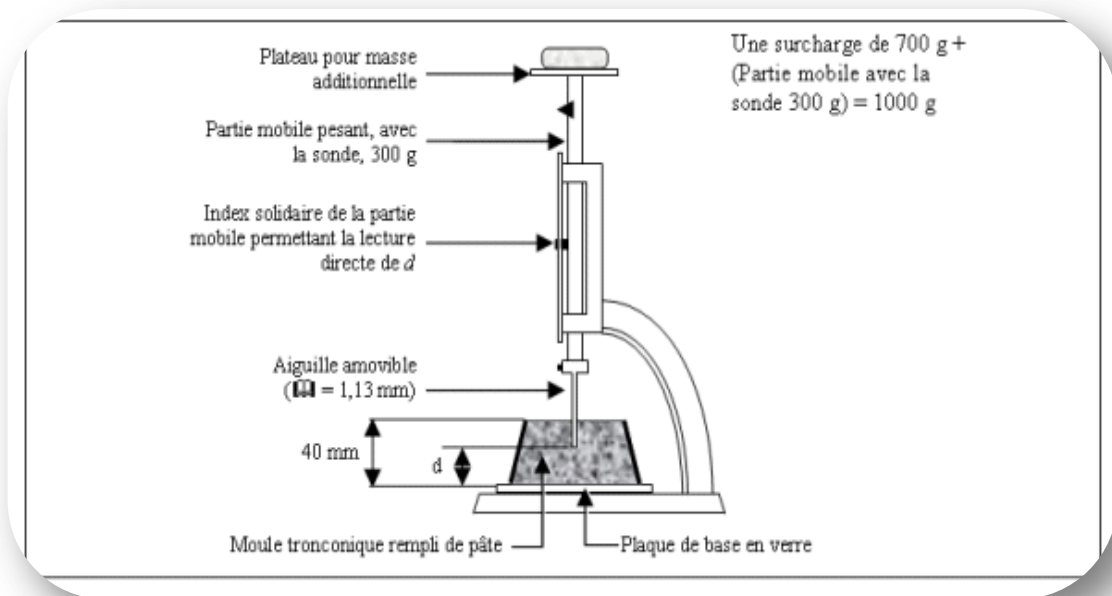


Figure I.10 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.

I.3. Ajouts minéraux :

I.3.1. Généralités :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique. L'utilisation d'ajout cimentaire (calcaire) dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.[01]

I.3.1.1. Avantages techniques :

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée .

L'ajout cimentaire (calcaire) améliore généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, l'ajout cimentaire (calcaire) améliore la résistance à la fissuration.

I.3.1.2. Avantages économiques :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport

qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

I.3.1.3. Avantages écologiques :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de calcaire comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.

Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques de l'ajout cimentaire calcaire sur le ciment.[01]

I.3.2. Classification des ajouts minéraux :

Selon la norme [EN 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

I.3.2.1. Les ajouts minéraux actifs :

I.3.2.1.1. 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 .[05]

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 pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

- 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 et moler .

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus ou moins altérée , opale , terre de diatomées , zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes .

Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.[06] [07]

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique .

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [06].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas , activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique .

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

a- Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane réagit avec l'eau , en présence d'une quantité suffisante de chaux , pour former des hydrates stables , peu solubles et résistants à long terme .

b- Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique , elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires , ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité .

I.3.2.1.2. Fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone . Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrossilicium).

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.

I.3.2.1.3. Le laitier de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempé dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 µm pour former du laitier

granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolanique qu'hydrauliques [01].

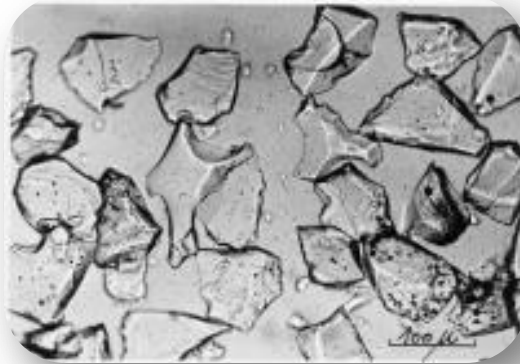


Figure I-11 : Laitier.

I.3.2.1.4. Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.[01]

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton.

I.3.2.2 . Principaux ajouts minéraux inertes :

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à $60\ \mu\text{m}$ ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les

propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue la poussière et les fillers calcaires.[01]

I.3.2.2.1. La poussière :

La poussière est une matière à particules fines , récupérée à la sortie du four , lors de son passage avec la fumée , sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/ g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

I.3.2.2.2. Fillers calcaires :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée , dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes).

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 les autres cas le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C₃S et du C₃A et à la formation de carboaluminates , germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.