

Sommaire

Chapitre I : Les liants minéraux

I	Introduction :.....	3
II	Classification des liants.....	3
	II.1. Liants organiques.....	4
	Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;	4
	Les résines et surtout les polymères :	4
	Les huiles sont employées pour leur pouvoir siccatif : huile de lin, ...etc.....	4
	Les liants organiques feront l'objet d'un chapitre entier dans la deuxième partie du cours (MDC II)	4
	II.2. Les liants minéraux.....	4
III	Les Chaux :	5
	III.1. Chaux aérienne :.....	5
	III.1.1. Historique	5
	III.1.2. Réaction chimique.....	5
	III.1.3. Utilisation :	7
	III.2. Chaux Hydraulique :	7
	III.2.1. Historique de la chaux hydraulique.....	7
	III.2.2 Réactions chimiques.....	8
	III.2.3. Utilisation et stockage :	8
	III.3 Le plâtre :	9
	III.3.1. Historique du plâtre	9
	III.3.2. Réactions chimiques.....	9
	III.3.3. Procédé de fabrication :.....	10
	III.3.4. Propriétés importantes :.....	10
	III.3.5. Utilisation :	11
IV	Les ciments.....	12
	IV.1. Introduction	12
	IV.2. Principe de fabrication ciment portland	12
	IV.3. Fabrication par voie humide.....	13
	IV.4. Fabrication par voie sèche.....	14
	IV.5. Constituants principaux et additions	17
	IV.5.1. Constituants du clinker.....	17
	IV.5.2 Les autres constituants des ciments.....	18
	IV.5.2.1. Calcaires :	18
	IV.5.2.2. Laitier granulé de haut fourneau :	18

IV.5.2.3. Cendres volantes (V ou W) :.....	18
IV.5.2.4. Schistes calcinés :.....	19
IV.5.2.5. Fumée de silice :	19
IV.5.2.6. Fillers :	19
IV.6. Les principales catégories de ciment.....	19
IV.6.1 Classification des ciments en fonction de leur composition	19
IV.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	20

CHAPITRE Les Liants Minéraux

I Introduction :

Un liant est un produit qui sert à agglomérer une masse solide, des particules solides sous forme de poudre ou de granulats. Les liants rentrent dans la fabrication des bétons, des mortiers et même des peintures, des colles, des mastics...etc. Si l'on fournit à un liant la quantité d'eau voulue, on déclenche des réactions chimiques exothermiques (dégagement de chaleur) dénommées hydratation. Remarquons tout d'abord que ces phénomènes se produisent entre un liquide, l'eau et un solide, le grain du liant. On comprend facilement que l'hydratation est d'autant plus rapide et plus complète que la surface des grains solides est grande (l'importance de la finesse du liant). On peut admettre que le siège des différentes réactions se trouve aux surfaces de contact entre le liquide et le solide. L'hydratation ne gagne que très lentement l'intérieur des grains de liant. Extérieurement, l'hydratation se manifeste par deux phénomènes principaux : La prise et le durcissement.

La prise : Les molécules hydratées en surface forment un réseau suffisamment dense pour que le mélange perde sa plasticité et cesse d'être ouvrable.

Le durcissement : C'est le phénomène qui suit la prise. Après s'être figée, la pâte de ciment va se solidifier au fil du temps. Le durcissement intéresse le développement même de toutes les caractéristiques requises par le rôle final dévolu aux mortiers et bétons.

La durée de chacune de ces phases dépend de la nature du liant et de nombreux autres facteurs parmi lesquels on trouve toujours la finesse de mouture.

II Classification des liants

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles : les liants organiques et les liants minéraux ;

- Les liants minéraux sont généralement obtenus par traitement à haute température de matière minérale, et font prise en présence d'eau. Le carbone ne s'y rencontre que sous la forme oxydée de CO₂ (carbonate).

- Les liants organiques sont synthétisés par des organismes vivants, ou par la science de l'homme, au départ de matière minérale ou de matière organique préexistante. Leur mode de prise est complexe, et le carbone s'y rencontre principalement sous la liaison $\equiv\text{C}-\text{H}$.

II.1. Liants organiques

Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;

Les résines et surtout les polymères :

Les huiles sont employées pour leur pouvoir siccatif : huile de lin, ...etc.

Les liants organiques feront l'objet d'un chapitre entier dans la deuxième partie du cours (MDC II)

II.2. Les liants minéraux

Les liants minéraux sont des poudres finement broyées résultant de transformation de roches. Mélangées à l'eau, ces poudres forment une pâte plastique qui durcit avec le temps suite à des réactions chimiques. L'argile ou la terre argileuse est disponible à l'état naturel et est employé dans des mortiers de terre ou des bétons de terre. D'autres sont obtenus par calcination. D'après Louis Vicat, la chaux, la silice, l'alumine, et la magnésie sont les principes essentiels dont se composent les gangues qui lient les matériaux employés dans les constructions. Ces principes élémentaires qui combinés en proportions diverses constituent les composés connus dans l'art de bâtir sous les noms de chaux hydrauliques, ciments, et pouzzolanes composées qui concourent à la formation par voie humide des gangues qui lient les agrégats appelés mortiers et bétons. Dans ces gangues la silice joue le rôle d'acide et engendre des silicates dont les autres principes ensemble ou séparément deviennent les bases. La chaux, la silice, l'alumine et la magnésie ne se présentent pas isolées et à l'état chimique dans la nature.

L'art consiste donc à tirer une partie des produits naturels entrent en proportions considérables pour arriver le plus économiquement possible au but recherché ; ces produits sont d'une part les pierres calcaires pures ou argileuses ou magnésiennes et de l'autre les argiles, les sables et les *substances plutoniques* ou *neptuniennes* résultant tantôt des déjections volcaniques tantôt de la décomposition spontanée et séculaire de certaines roches.

Selon leur mode de durcissement, les liants obtenus par calcination peuvent être classés en deux familles :

- les liants aériens : durcissement à l'air dû à une réaction de carbonatation : (Exemples : plâtre, chaux aérienne, liants magnésiens.) ;
- les liants hydrauliques : durcissement en milieux humides ou dans l'eau dû à une réaction d'hydratation de silicates ou d'aluminates : (Exemples : chaux hydraulique, ciment prompt, ciments Portland, laitiers...etc.)

III Les Chaux :

Elles résultent de la cuisson de roches calcaires à une température environ 1000°C.

Les roches calcaires naturelles contiennent souvent des impuretés en particulier argileuses, selon le degré de pureté des calcaires utilisés on peut avoir de la chaux aérienne ou hydraulique.

III.1. Chaux aérienne :

III.1.1. Historique

La chaux est apparue dans le courant du 2^{ème} millénaire avant notre ère. Elle est obtenue par la cuisson entre 850°C et 1000°C de roche calcaire pure ou de coquillages marins. Il est intéressant de noter que le verbe « calciner », qui signifie brûler à haute température a précisément pour origine étymologique le terme latin « calx, calcis » désignant la chaux.

La chaux « vive » obtenue par « calcination » est « éteinte » par adjonction d'eau, et fournit « La chaux hydratée » ou « La chaux aérienne ». La chaux hydratée ne peut faire prise qu'au contact de l'air, en réagissant avec le gaz carbonique ambiant (d'où son nom de « chaux aérienne »).

En un premier temps, la chaux sert surtout à la confection d'enduit. Elle entre avec le plâtre et la poudre de marbre, dans la composition des stucs, que les architectes grecs utilisaient dès le 7^e siècle avant J.-C. pour couvrir l'aspect rude des murs construits en pierre calcaire ou en tuf. Ces murs étaient montés en blocs de pierre ajustés sans mortier, ou en pierres ébauchées, liées par un mortier fait de terre et d'argile.

Ce sont les Romains qui, dès le 2^e siècle avant notre ère, vont développer l'usage du mortier de chaux et répandre la technique dans toutes les régions de l'empire. Ils ont systématisé l'usage du mortier pour assurer les joints des appareils de brique ou de pierre. La technique est toujours en usage aujourd'hui.

La porosité du mortier est donc un facteur essentiel, à contrôler lors de la mise en œuvre. Les praticiens insistent sur les justes proportions à respecter : trois volumes de sable fin pour un volume de chaux, ou cinq pour deux, selon la qualité du sable.

III.1.2. Réaction chimique

La chaux aérienne s'obtient à partir de roches calcaires contenant au plus 10% d'impuretés argileuses.

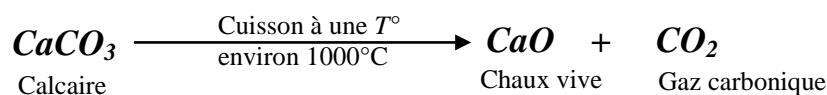




Figure I.1 : Pierres de calcaires et Morceaux de la chaux vive

La **chaux vive** (Oxyde de Calcium) est avide d'humidité. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en une poudre blanche appelée **chaux éteinte**.

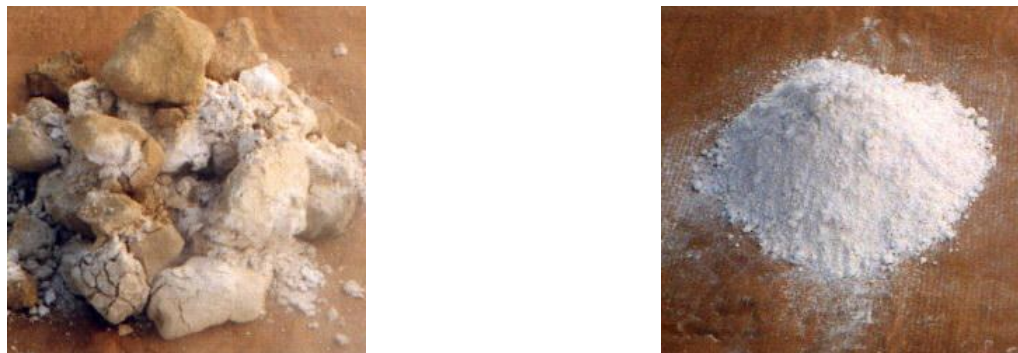
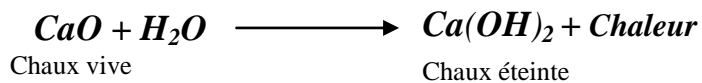
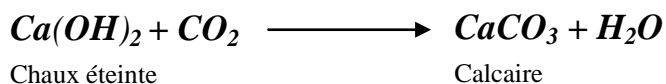


Figure I.2 : Morceaux de chaux vive aspergés à l'eau et Poudre de la chaux éteinte

Chaux éteinte

En présence du gaz carbonique, la chaux éteinte peut faire une carbonatation et redevenir un calcaire, voir la réaction chimique suivante :



Ainsi la chaux ne peut durcir qu'en contact avec l'air (gaz carbonique).

Conclusion : Cycle de la chaux

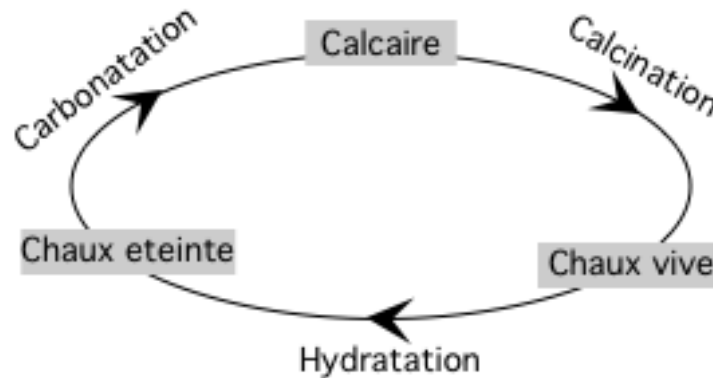


Figure I.3 : Cycle de la chaux

III.1.3. Utilisation :

La chaux aérienne n'est ainsi pas utilisée comme liant. Cependant elle peut être utilisée comme composant additif à certains matériaux de construction (mortiers, bétons, enduits, peintures...etc.), afin d'améliorer certaines de leurs propriétés. Dans la construction routière, on utilise parfois la chaux vive moulue pour :

Assèchement : La chaux vive est épanchée sur les sols humides afin de diminuer leur teneur en eau et faciliter ainsi le travail des engins de terrassement.

Stabilisation : La chaux vive, mélangée aux sols argileux, se combine chimiquement avec ces derniers. L'argile passe alors d'une consistance plastique à une consistance grenue, stable et très peu sensible à l'eau.

Stockage : La chaux vive doit être stockée dans des dépôts ou sacs hermétiques. La chaux éteinte est moins sensible mais elle doit être stockée dans des dépôts ou sacs fermés.

III.2. Chaux Hydraulique :

III.2.1. Historique de la chaux hydraulique

Il est apparu très tôt que des adjonctions permettaient d'améliorer la prise et la stabilité du mortier de chaux, en particulier de la rendre insensible à l'action de l'eau. L'enduit, assurant l'étanchéité des citernes construites à Jérusalem au 10^e siècle avant notre ère, est fait de la chaux hydraulique.

Dans l'île grecque de Santorin, on ajoutait au mélange chaux-sable une quantité de poudre volcanique qui conférait au mortier la propriété d'être stable à l'eau, et de durcir partiellement sans apport de gaz carbonique. Cette caractéristique appelée « hydraulicité », peut être obtenue au départ d'autres matériaux, notamment la brique ou la tuile pilée.

Les Romains ont pratiqué à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane. La plus grande stabilité à l'eau des matières ainsi obtenues est due à une réaction plus ou moins lente entre la chaux et la silice colloïdale et l'alumine contenues dans les produits mentionnés, avec formation d'hydrosilicates et d'hydroaluminates dont la nature est comparable à celle des produits qu'on obtient par hydratation des liants hydrauliques modernes.

La chaux hydraulique s'obtient à partir de roches calcaires contenant 10% à 20% d'impuretés argileuses (calcaires marneux).

III.2.2 Réactions chimiques

Au cours de la cuisson du calcaire marneux certaines molécules CaO s'allie avec les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , contenus dans les minéraux d'argiles en formant les silicates $CaO.SiO_2$, les aluminates $CaO.Al_2O_3$ et les ferrites $CaO.Fe_2O_3$ de calcium, qui durcissent à l'air comme dans l'eau. Le reste de molécules CaO s'éteint comme pour la chaux aérienne. En conséquence plus la quantité de CaO est grande la chaux est moins apte de durcir sous l'eau. Pour caractériser la capacité du durcissement hydraulique (sous l'eau) du liant on utilise habituellement le module hydraulique :

$$m = \frac{\%CaO}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

Selon la valeur de m les liants sont classés comme suit :

$1,7 \leq m \leq 9$: Chaux hydraulique.

$1,1 \leq m \leq 1,7$: Ciment romain.

$m \geq 9$: Chaux aérienne.

La chaux hydraulique gâchée à l'eau, après durcissement à l'eau continue à durcir à l'air par carbonatation des molécules $Ca(OH)_2$ sous l'action du CO_2 qui s'infiltré dans la masse après évaporation de l'eau de gâchage.

Plus la chaux hydraulique est fine plus la prise et le durcissement sont accélérés et plus la résistance est élevée.

III.2.3. Utilisation et stockage :

La chaux hydraulique est utilisée comme un liant dans la construction à la place ou avec du ciment. Comme pour la chaux aérienne la chaux hydraulique doit être stockée dans des endroits secs en dépôts ou sacs fermés.

III.3 Le plâtre :

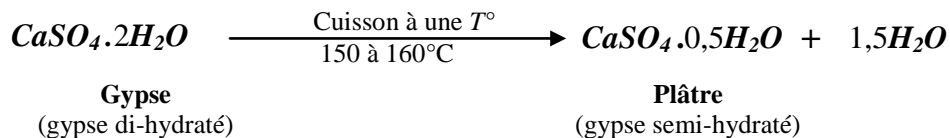
III.3.1. Historique du plâtre

Les Égyptiens ont probablement été les premiers à utiliser le plâtre, obtenu par la cuisson du gypse à 120°C. Ils s'en sont notamment servi pour le jointement des blocs de parement en marbre de la pyramide de Chéops (2600 av. J.-C.).

La température de cuisson exceptionnellement basse explique sans doute la découverte du plâtre comme liant. Le plâtre a été mis en œuvre sans discontinuer de l'antiquité à nos jours, essentiellement comme enduit intérieur ou extérieur (plâtre-chaux), mais aussi, en France, à partir du 17ème siècle, comme mortier pour monter les maçonneries de pierre où les voûtes de briques. Le marbre artificiel développé au 18ème siècle en Allemagne (stucmarmor) et en Italie (scagliola) est fait de plâtre, de colorants et de colle animale.

On appelle plâtre de construction un liant hydraulique composé principalement de gypse semi-hydraté ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) qui s'obtient en chauffant le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) à une température de 150 à 160°. La réaction chimique qui se produit est ainsi

III.3.2. Réactions chimiques



Le **gypse** naturel est habituellement appelé *Pierre à plâtre* .



Figure I.4 : Gypse & plâtre

Gâchée à l'eau, la poudre de plâtre ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) s'hydrate par adjonction de 1,5 molécule d'eau pour redevenir gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Les particules de gypse s'accroissent et adhèrent les unes aux autres en provoquant un épaississement et une prise de la pâte, ce qui donne à la

fin un bloc solide. Laissée à l'air libre, un durcissement supplémentaire s'effectue par dessèchement et une cristallisation plus complète ce qui conduit à la formation d'une pierre à plâtre.

Le durcissement du plâtre peut être accéléré par séchage mais à une température 65° pour éviter le retour à la déshydratation du plâtre.

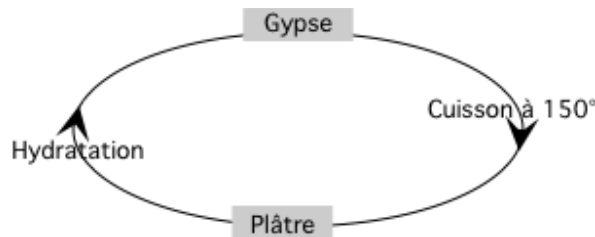


Figure I.5 : Cycle du plâtre

III.3.3. Procédé de fabrication :

La fabrication du plâtre à partir de la pierre à plâtre comprend 3 étapes essentielles: le broyage, la mouture et le traitement thermique (déshydratation). Il existe plusieurs procédés pour la fabrication du plâtre de construction ; dans lesquels la mouture se fait soit avant la cuisson, après la cuisson ou en même temps que la cuisson. Cependant l'étape broyage doit être faite en premier afin d'accélérer la déshydratation. Les dimensions des grains de gypse préparé pour la cuisson doivent être au plus 40mm.

Le broyage est souvent effectué dans un broyeur à boulets ; c'est un cylindre horizontal rotatif contenant des boulets en acier. L'étape de broyage est précédée par un concassage pour réduire les dimensions des gros morceaux de gypse afin qu'ils puissent être introduits dans le broyeur. La qualité du plâtre de construction est particulièrement liée à la finesse de mouture qui est caractérisée par le refus du tamis de maille 0,2mm.

III.3.4. Propriétés importantes :

- Le plâtre de construction est un liant de prise et de durcissement rapides. Il est courant que la prise commence à partir d'environ 4mn et se termine à environ 30mn. Les temps de début de et de fin de prise peuvent être modifiés en ajoutant des adjuvants retardateurs de prise.
- Le plâtre durci est un bon isolant thermique ; il est poreux et légers (la porosité du plâtre durci peut atteindre jusqu'à 40%).
- Le plâtre se dégrade rapidement en endroits trop humides.
- Le plâtre oxyde fortement les métaux ferreux.

- Le plâtre résiste bien au feu s'il est utilisé avec ajouts qui maintiennent sa forme une fois déshydraté sous l'effet du feu, les ajouts couramment utilisés dans ce cas sont l'amidon et la silicone.

III.3.5. Utilisation :

Le plâtre est essentiellement employé comme revêtement intérieur des murs ou pour la fabrication d'éléments préfabriqués en y ajoutant des fibres végétales, de verre ou d'autres matériaux. Des exemples courants d'éléments préfabriqués sont: les plaques de cloisons (séparation à l'intérieur de maisons), de plaques de faux plafonds et les éléments décoratifs; rosaces, baguette...etc.



Figure I.6 : quelques éléments fabriqués du plâtre

Dans le bâtiment : matériau de finition des parois intérieures et des plafonds. Montage des galandages en briques de terre cuite (parois minces non porteuses)

Plaques au plâtre : Les plaques de plâtre sont constituées de deux plaques de carton qui prennent en sandwich du plâtre. Finition des parois intérieures, plafond, hourdage des cloisons. Préfabrication de panneaux, moins sensibles à l'action de l'eau Protection contre le feu : 6 cm = entrave la propagation du feu ; 8 et 10 cm = résistant au feu

Carreaux de plâtre. Attention : * ne pas utiliser pour des murs portants * si les blocs sont susceptibles d'entrer à de multiples reprises en contact avec l'humidité : prendre des précautions (utiliser des blocs appropriés)

Chape liquide à l'anhydrite (anhydrite + sable 0-3mm + adjuvant et fluidifiants)

- Pose sans joints de dilatation,
- Surface lisse et horizontale destinée à recevoir tous les revêtements de sol usuels.

IV Les ciments

IV.1. Introduction

Le terme « ciment » est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; « Portland » nom donné par le détenteur du brevet d'invention du ciment Joseph Aspdin en 1824. Parmi tous les liants minéraux, le ciment portland est le liant qui occupe la première place par sa production et son utilisation.

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et 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.

IV.2. Principe de fabrication ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru
- Caisson
- Broyage et conditionnement

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 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 (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). 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 Fe₂O₃, 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 °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 (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).

Le mélange est porté à 1450-1550 °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 Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

IV.3. 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. Des 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 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 (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.

IV.4. 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 aéroglisseur.

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 (CO₂) 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 g/cm³). 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 préhomogénéisation puis d'une homogénéisation.

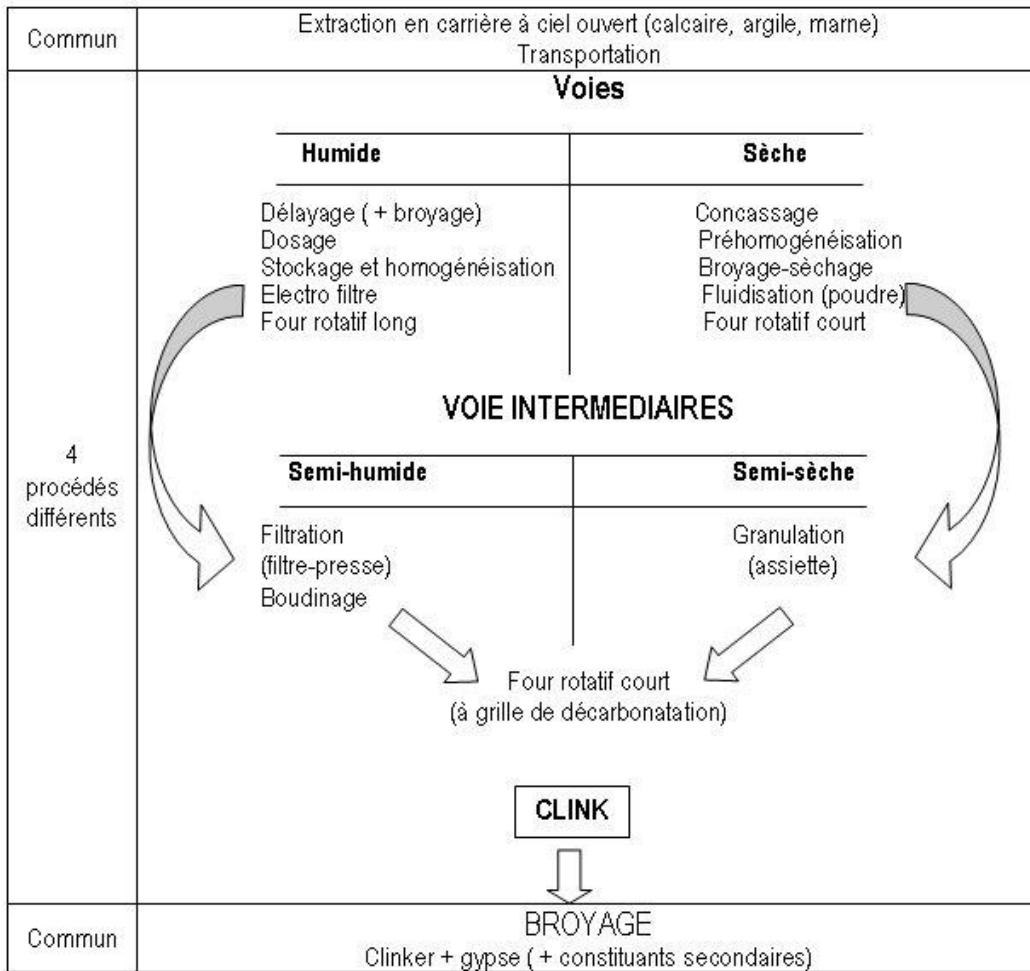


Figure I.7 : schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment

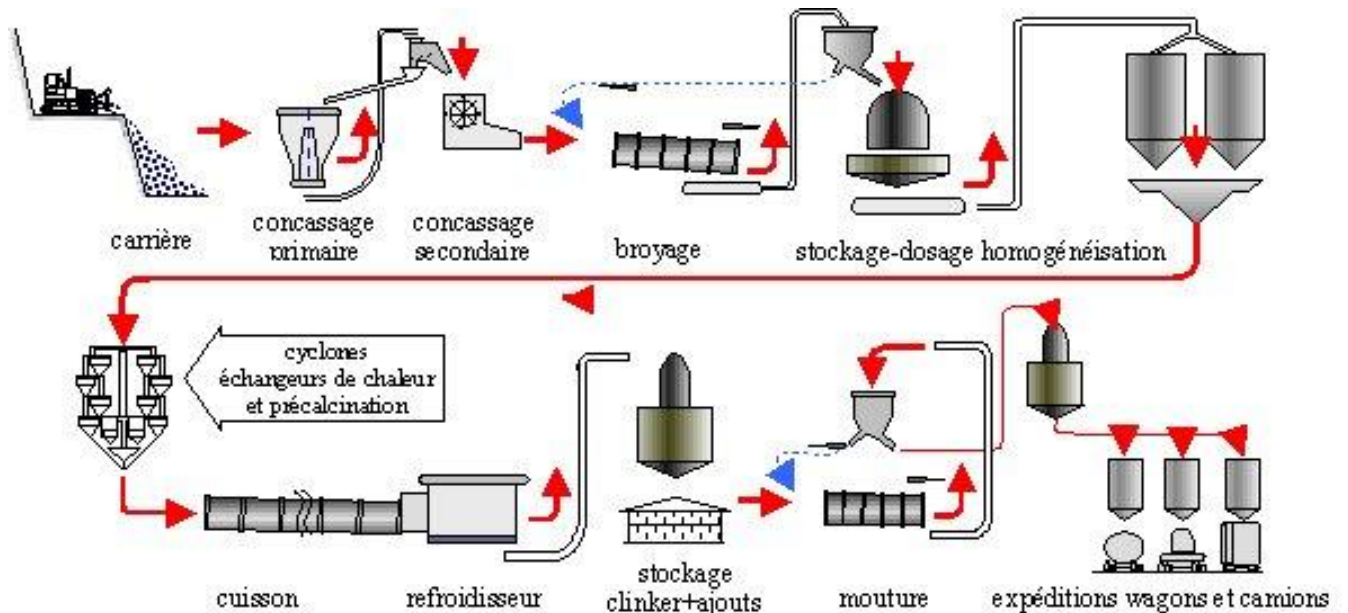


Figure I.8 : schéma de fabrication du ciment par voie sèche

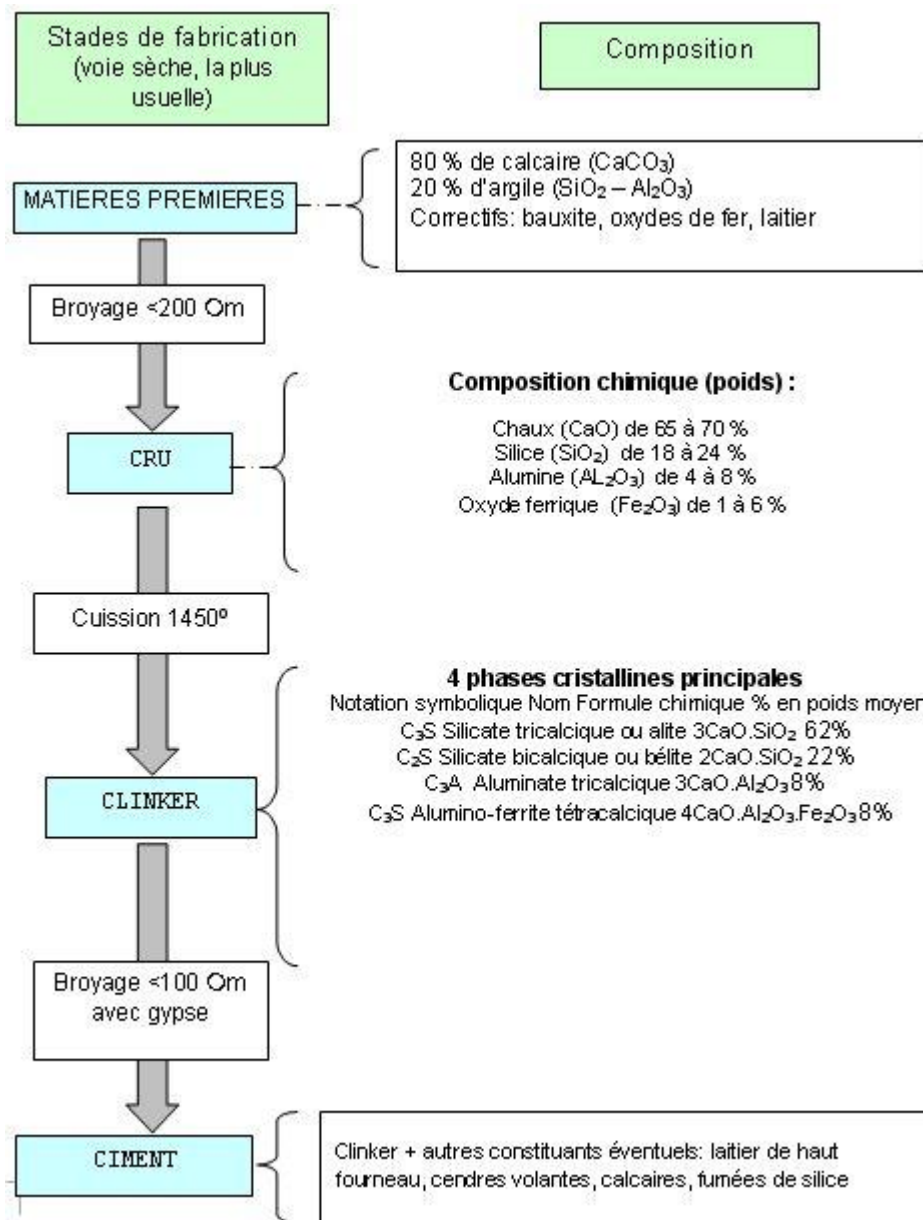


Figure I.9 : Organigramme de fabrication du ciment

IV.5. Constituants principaux et additions

IV.5.1. Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).

- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tetracalique)
 $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnèrent les noms suivants :

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ .
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

IV.5.2 Les autres constituants des ciments

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont:

IV.5.2.1. Calcaires :

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

IV.5.2.2. Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

IV.5.2.3. Cendres volantes (V ou W) :

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue :

Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques;
Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

IV.5.2.4. Schistes calcinés :

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

IV.5.2.5. Fumée de silice :

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

IV.5.2.6. Fillers :

Ce sont des "constituants secondaires" des ciments, dont ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau)

IV.6. Les principales catégories de ciment.

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

IV.6.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau I.2. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires).

IV.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau I.1 : Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelle norme AFNOR)

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours minimales	à 28 jours maximales
350	-	-	250	450
450	- R (rapide)	- 150	350 350	550 550
550	- R (rapide)	- 225	450 450	650 650
THR Très hautes performances	-	300	550	-

Tableau I.2 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		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
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau I.3 : 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				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	($\mu\text{m/m}$)	(min)	(min)
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/ \leq	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10