

**République algérienne démocratique et populaire** **Ministère de**  
**l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Département de mécanique**  
**Université de BATNA 2**

# **Cours : Liants et bétons**

## **PARIE I**

**Présenté par:**  
**Brahim Boukhrouf**

**Année universitaire 2021/2022**

# CHAPITRE 1

## LES LIANTS MINÉRAUX

### Introduction

Les liants minéraux sont des matériaux moulus d'une façon très fine. Malaxés à l'eau, ils donnent une pâte collante qui durcit graduellement pour devenir une sorte de pierre artificielle.

Dans les travaux de construction, les liants minéraux sont mélangés avec l'eau et/ou les granulats (sable, gravillon, gravier), pour devenir une pâte de ciment ou mortier ou encore béton. Il est connu que certains liants durcissent à l'air seulement et d'autres dans des milieux humides ou dans l'eau. Cette propriété nous permet de classer les liants minéraux en :

**Liants aériens** qui ne durcissent et ne peuvent conserver leurs propriétés mécaniques qu'à l'air (ex.: chaux grasse, plâtre),

**Liants hydrauliques** qui durcissent et conservent leurs propriétés mécaniques non seulement à l'air mais aussi dans l'eau (ex.: chaux hydraulique, ciment Portland,...)

Le but des liants est d'assurer la liaison entre; les granulats (dans le béton) et les éléments d'une structure.

### Les liants minéraux aériens

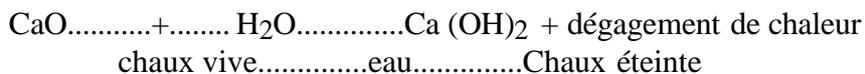
#### La chaux aérienne

Les **chaux aériennes** qui sont le produit de la calcination des pierres calcaires, constituées donc **presque exclusivement de carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>**.

Le plus ancien liant élaboré par l'homme est la chaux. Elle s'obtient en calcinant des calcaires à une température moyenne (vers 800°C) dans un four.

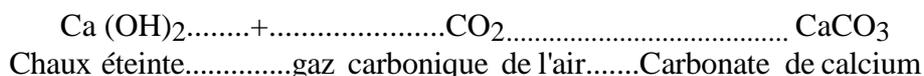


Par hydratation on obtient la chaux éteinte, moins dangereuse à manipuler que la chaux vive:



L'extinction de la chaux vive dégage beaucoup de chaleur et s'accompagne d'une grande augmentation de volume. Ceci explique la raison pour laquelle on ne doit pas utiliser de la chaux non complètement éteinte. La chaux vive est susceptible de gonfler avec l'eau.

C'est ce matériau qui, mélangé à du sable pour constituer un mortier, est utilisé comme liant. Le phénomène de prise résulte de **la carbonatation lente** du liant au contact du gaz carbonique de l'air, selon la réaction.



En cristallisant, le carbonate de calcium rigidifie le mortier, adhère aux granulats et blocs de la construction et confère à l'ensemble architectural la résistance recherchée.

La qualité des mortiers obtenus en mélangeant chaux et sable est restée dans la mémoire collective sous la forme de l'expression "être construit à chaux et à sable", synonyme de solidité.

**Le calcaire pur:** Il donne une chaux aérienne qui fera prise par réaction avec le gaz carbonique de l'air. Les coquillages, calcaire pur, donnent une très bonne chaux. Certaines chaux en pâte sont produites à partir de marbre.

**Le calcaire argileux:** Sa cuisson donne une chaux hydraulique qui fait prise par réaction à l'eau. La chaux sera plus hydraulique et plus résistante si le pourcentage d'argile est plus élevé.

### **La chaux vive**

Le feu transforme le calcaire pur en "chaux vive". C'est un matériau instable, une base forte avide d'eau, agressive pour la peau et les matières organiques qu'elle brûle.

### **Utilisation de la chaux vive**

**La protection des bois:** Les poutres en bois (non peintes) peuvent recevoir un lait de chaux vive. Si on incorpore de l'huile de lin chaude au moment de l'extinction on réalise une "huile chaulée", peinture adaptée à la protection et la décoration des bois.

**La désinfection:** Les étables étaient régulièrement désinfectées à la chaux vive. Fortement basique elle tue les micro-organismes.

**La stabilisation des terres:** 20 à 40 Kg de chaux vive mélangée à une tonne de terre argileuse provoque un accroissement très important de la résistance du sol par floculation des argiles.

**Pour absorber l'humidité:** Avide d'eau, la chaux vive capte l'humidité de l'air pour se transformer en chaux éteinte. 10 Kg de chaux vive exposés à l'air capteront 2 litres d'eau.

### **La chaux éteinte**

**En poudre:** L'extinction agit comme un broyage chimique. Elle donne une mouture dont la surface Blaine est de 2 à 4 fois plus importante que celle d'un ciment. Cette surface de contact plus grande induit une réactivité plus forte et une plasticité du mortier.

**En pâte:** Plongée dans l'eau la chaux vive fuse en dégageant de la chaleur avant de se déposer au fond du bac. Cette extinction par excès d'eau donne la chaux éteinte en pâte.

On fait un test pour voir si la réaction d'extinction est rapide. Si elle débute en moins de 5 mn on devra éteindre en jetant la chaux dans l'eau. On remue et on ajoute de l'eau dès que de la vapeur se dégage.

### **Utilisation de la chaux éteinte en pâte**

Après l'extinction on laisse refroidir. Pour préparer un enduit on mélangera directement cette pâte au sable.

Pour le mortier des joints on ajoute le sable et on laisse reposer 24h.

Pour les mortiers de finition on tamise la pâte au tamis de 10 (2 mm) et on la laisse reposer 2 semaines au moins.

### **Utilisation de la chaux en poudre :**

Les chaux éteintes en poudre résultent d'une extinction en usine. Sur la chaux vive on pulvérise l'eau juste nécessaire à la réaction chimique d'extinction.

Les chaux légères ont une masse volumique de 0,5 Kg / litre et parfois moins. Si la chaux en poudre est bien éteinte elle ne dégage pas de chaleur en présence d'eau.

Si l'on souhaite **préparer une chaux aérienne éteinte en pâte** à partir d'une **chaux aérienne éteinte en poudre**, on lui ajoutera son poids d'eau (par exemple 25 litres d'eau pour un sac de 25 Kg de chaux aérienne).

### **Liants magnésiens**

Parmi les variétés de liants magnésiens on connaît la **magnésite caustique** et la **dolomite caustique**.

**Magnésite caustique** est obtenue lors de la cuisson de la roche magnésite ( $MgCO_3$ ) dans un four sous une température de 650 à 850 C.

Cela provoque la décomposition de  $MgCO_3$  suivant la réaction  $MgCO_3 \longrightarrow MgO + CO_2$ .  
Le résidu solide (oxyde de magnésium) est broyé en poudre fine.

**La dolomite caustique**  $MgO$  et  $CaCO_3$  est obtenue par cuisson de la dolomite naturelle ( $CaCO_3.MgCO_3$ ) avec broyage ultérieur en poudre fine. Lors de la cuisson de la dolomite  $CaCO_3$  ne se décompose pas et reste inerte, formant ballast, ce qui diminue l'activité de la dolomite caustique en comparaison avec celle de la magnésite caustique.

Le gâchage des liants magnésiens se fait non pas à l'eau, mais avec des solutions aqueuse de sulfate ou de chlorure de magnésium. La solution de gâchage la plus utilisée est celle de chlorure de magnésium  $MgCl_2$ . La résistance du liant magnésien dont le gâchage est fait avec une solution de chlorure de magnésium est supérieure à celle du liant magnésien dont le gâchage est fait avec une solution de sulfate de magnésium.

La magnésite caustique durcit d'une manière relativement rapide. La prise ne doit pas commencer avant 20 mn et ne doit pas s'achever plus de 6 h après le gâchage

La dolomite caustique est un liant de qualité inférieure parce qu'il contient une quantité sensible de carbonate de calcium. La dolomite caustique doit contenir au moins 15 % d'oxyde de magnésium et pas plus de 2,5 % d'oxyde de calcium.

Les liants magnésiens sont aériens et, comme tels, résistent mal à l'action de l'eau. Ils ne peuvent être utilisés que pour un durcissement à l'air dont l'humidité relative ne dépasse pas 60 %.

La magnésite caustique absorbe facilement l'eau et l'acide carbonique de l'air formant l'hydrate d'oxyde de magnésium et le carbonate de magnésium. C'est pourquoi on conserve le magnésium caustique dans un récipient hermétique.

A la base des liants magnésiens on fabrique la xylolite (mélange d'un liant avec des sciures de bois) employé pour la confection des plancher d'isolation thermique.

## Le plâtre

### La provenance du plâtre

Le gypse,

L'anhydrite naturelle (roche de sédimentation) pierre de plâtre  $\text{CaSO}_4$

Dans la production de l'acide phosphorique  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Engrais). Le déchet de l'industrie chimique contenant du sulfate de calcium (le phosphogypse). L'industrie des engrais phosphatés produit du gypse (1,7 t/t de phosphate) lors de la fabrication de l'acide phosphorique à partir de phosphate naturel. C

### État naturel du gypse

**Le sulfate de calcium** se présente sous forme de gypse:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou d'anhydrite:  $\text{CaSO}_4$ . Ce sont les gisements de gypse qui sont principalement exploités. Ils sont nombreux dans le monde, particulièrement en France et aux Etats-Unis, mais absents des régions volcaniques comme le Japon.

### Quelques gypses naturels particuliers

Le gypse qui se présente généralement sous forme de roches, peut aussi se rencontrer dans la nature sous forme de roses des sables. Il forme également l'**albâtre (variété naturelle du gypse blanc à grains fins et peu coloré composé de sulfate de calcium hydraté)** qui lorsqu'il est pur est translucide et utilisé traditionnellement comme vitrage au Yémen. Impur, l'albâtre est veiné. Le Sphinx de Memphis, en Égypte, datant de 1 500 avant J.C. est en albâtre.

### Exploitation industrielle

Les exploitations, quelles soient souterraines ou à ciel ouvert, sont pour des raisons juridiques, liées à la propriété du sous-sol, dénommées carrières. Le gypse exploité en France qui a une pureté supérieure à 90 % (souvent 98 %) ne nécessite pas de traitement de purification. Exemple de composition de gypse :

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	91,5 %	$\text{CaCO}_3$	1 %
$\text{CaCO}_3$	7 %	Argile et silice	2 %

Les plâtres se subdivisent en deux groupes :

Plâtres cuits à basse température et plâtres cuits à hautes température.

Les premiers sont obtenus en chauffant du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) jusqu'à la température de 150 °C à 160°C ; ceci entraîne la déshydratation partielle du gypse et sa transformation en gypse semi-hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ). C'est le **plâtre de construction**.

Les plâtres cuits à haute température sont obtenus à partir du gypse porté à 400 à 600 °C. Il s'ensuit une déshydratation totale et formation de sulfate de calcium anhydre, (anhydrite,  $\text{CaSO}_4$ ). C'est le **plâtre de haute cuisson**.

### Etapes de fabrication du plâtre (à partir du gypse)

Extraction du gypse

- Concassage (diamètre 8 à 10 cm)
- Cuisson selon le produit désiré
- Broyage

### Etapes de fabrication du plâtre (à partir de l'anhydrite naturelle)

Extraction

Concassage (diametre 8 à 10 cm)

ajouter des réactifs ( $\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) pour accélérer la prise Broyage

**Fabrication industrielle:** une déshydratation partielle du gypse par chauffage, donne de **l'hémihydrate de calcium** selon la réaction, de 150 à 160 °C :



Un chauffage à plus haute température, 290°C, donne de l'anhydrite  $\text{CaSO}_4$ , sulfate complètement déshydraté, appelé "surcuit".

Un chauffage à plus de 700°C, donne une anhydrite très peu réactive à l'eau, appelée "plâtre cuit à mort".

**Procédés utilisés** : 2 types pour fabriquer l'hémihydrate  $\alpha$  (plâtre de haute résistance) et l'hémihydrate  $\beta$  (plâtre de construction)

- **Le procédé par voie sèche**, qui est le plus utilisé, est réalisé à la pression atmosphérique. Il donne, vers 150-160°C, de l'hémihydrate  $\beta$  (petit cristaux de sulfate de calcium semi hydraté). Un tel plâtre nécessite une grande quantité d'eau de 60 à 65 %. Le surplus d'eau cad celle qui dépasse la quantité nécessaire à l'hydratation (15%), s'évapore en formant des pores ; Le plâtre formé a donc une porosité allant jusqu'à 40% et par suite, une faible résistance.

- **Le procédé par voie humide** s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau, dans des autoclaves, sous 2 à 7 bar, pendant quelques heures. Il donne de l'hémihydrate  $\alpha$  ( les cristaux sont plus gros, ce qui nécessite moins d'eau (40 à 45 %) et permet d'obtenir un plâtre durci dont la résistance et la densité sont élevés. C'est le plâtre de haute résistance qui atteint en 7 jours 15 à 40 MPa. L'hémihydrate  $\alpha$  est utilisé pour des **plâtres spéciaux** et pour **les moulages dentaires**. La résistance mécanique de l'hémihydrate  $\alpha$  est nettement plus importante que celle de l'hémihydrate  $\beta$ . Les coûts de production par voie humide sont beaucoup plus élevés.

Produits fabriqués :

Le plâtre utilisé en construction est principalement constitué d'hémihydrate  $\beta$  ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ , de 60 à 80 %) et d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). Il est obtenu par le procédé par voie sèche. Les propriétés du plâtre (donc ses utilisations) dépendent, en grande partie, de sa composition en hémihydrate et en anhydrite. Exemple de composition de plâtre destiné à la réalisation d'enduits :

$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ (plâtre)	: 72 %	$\text{CaCO}_3$ (calcaire)	: 7 %	Argile et silice	: 2 %
$\text{CaSO}_4$ (anhydrite)	: 18 %	$\text{MgCO}_3$ (dolomite)	: 1 %		

Le plâtre utilisé pour élaborer **des produits préfabriqués (carreaux, plaques...)** est généralement de hémihydrate  $\beta$  pur.

### **La prise du plâtre**

Lors d'un ajout d'eau, l'hémihydrate et l'anhydrite se dissolvent, puis  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  précipite : c'est la prise du plâtre.



La prise du plâtre de construction doit commencer avant 4 mn et se terminer au plus tard que 30 mn après le gâchage à l'eau.

## **Liants Hydrauliques**

### **Les chaux hydrauliques**

Elles sont ainsi nommées parce qu'elles possèdent la propriété, très importante, de durcir non seulement à l'air et dans les lieux humides mais encore sous l'eau.

Les chaux hydrauliques s'obtiennent par cuisson entre 850 et 1000 °C de **calcaire avec impureté argileuse inférieure ou égale à 22 %**.

Les chaux obtenues sont d'autant plus hydrauliques que la proportion d'argile est plus élevée.

L'argile étant un mélange des corps suivants:

- Silicate d'alumine hydraté
- Silice
- Oxyde ferrique

<b>Chaux</b>	<b>Argile</b>
Faiblement hydraulique	5 à 8 %
Moyennement hydraulique	8 à 14 %
Hydraulique	14 à 19 %
Eminemment très hydraulique	19 à 22 %

Les chaux obtenues sont d'autant plus hydrauliques que la proportion d'argile est plus élevée.

### **L'indice d'hydraulicité**

La proportion d'argile dans la pierre avant calcination conditionne les caractéristiques de la chaux hydraulique. Plus d'argile = plus d'hydraulicité = plus de résistance. Cette règle exprimée par Vicat fut la première façon de prévoir l'hydraulicité de la chaux à partir des caractéristiques de la pierre.

On évalue aujourd'hui le % de silice combinable, mesure plus précise que le taux de silice totale de Vicat.

Calcul de l'indice d'hydraulicité "i" de Vicat :

$i = \text{Poids d'argile} / \text{Poids de calcaire}$ .

$i = (\text{silicium } \text{SiO}_2 + \text{Aluminium } \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{CaO} + \text{MgO}$

$i = \text{Poids des constituants acides} / \text{constituants basiques}$ .

Cet indice  $i$  permet de classer les chaux de la chaux aérienne (argile = 0 %) à la chaux la plus hydraulique contenant 20% d'argile.

- Chaux grasse : argile = 0%
- Chaux maigre : argile < 3%
- Chaux faiblement hydraulique : 8% < argile < 15% (prise en 2 à 4 semaines)
- Chaux moyennement hydraulique : 15% < argile < 19% (prise en 2 à 15 jours)
- Chaux éminemment hydraulique : 19% < argile < 22% (prise en - de 2 jours)

### **Etape de fabrication**

- Extraction
- Concassage
- Cuisson de  $\text{CaCO}_3$



850 T 1100 °C : Réactions entre CaO et les éléments d'argile  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

- Extinction (arrosage léger de manière que toute la masse soit humectée et on laisse ainsi la chaux jusqu'à l'extinction totale)
- Broyage (transformation du produit en poudre)

La chaux hydraulique en poudre est jaune claire avec des nuances grisâtres. Elle est plus claire que les ciments.

### Emploie de la chaux hydraulique

Les chaux sont utilisées pour les carrelages, les enduits, les ouvrages peu délicats pour lesquels ne sont pas recherchées de hautes résistances: murs de clôtures, habitations à un ou deux étages, etc...

Les chaux hydrauliques sont classées selon la masse volumique ou la densité.

On distingue :

#### 1) Chaux légère

- Densité apparente inférieure à  $600 \text{ kg/m}^3$  ;
- Indice d'hydraulicité inférieure à 0,3
- La résistance à la compression après 28 jours inférieure à 3 MPa

#### 2) Chaux lourde

Elle possède 3 classes suivant la résistance, la densité apparente.

Résistance a 28 jours	Densité apparente
3	600 a 750
6	sup ou = 750
10	sup ou = 900

## Le ciment portland artificiels

### Historique

La chaux est connue depuis l'antiquité. Elle ne prend pas sous l'eau.

**1756, Smeaton en Angleterre** découvre que les chaux qui présentent les meilleures propriétés « **hydrauliques** » sont celles contenant des matières argileuses.

**1796, Parker en Angleterre**, développe le ciment « Roman » en calcinant certains gisements naturels de calcaires argileux.

**1813, Vicat en France** met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.

**1824, Joseph Aspdin en Angleterre**, fabrique et brevète une chaux hydraulique à laquelle il donne le nom de ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.

**1835, Issac-Charles Johnson** qui travaille dans une usine de ciment, observe que les morceaux trop cuits donnent, après mouture, un meilleur ciment. Il augmente la température de cuisson et donne ainsi naissance au véritable ciment portland

**1838, William Aspdin** produit le ciment Portland à côté de la Tamise et convainc Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise (Thames Tunnel) – 1ère utilisation du ciment Portland dans le génie civil.

### Définition

Le ciment Portland est une poudre minérale, dont la propriété est de durcir sous l'eau. De ce fait le ciment Portland est appelé **liant hydraulique**. Le durcissement du ciment Portland dépend de sa réaction chimique avec l'eau.

### Du calcaire argileux au ciment



## Composition normalisée du cru

**Carbonates de calcium** ( $\text{CaCO}_3$ ): de 77 à 83%

### Les éléments provenant d'argile:

Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14 % ;

Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4% ;

Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3%

### Le gypse

Afin de retarder la prise du ciment, on broie avec le clinker, environ 5% de sulfate de calcium.

Ce sulfate de calcium peut se présenter sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), d'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) ou de mélange des deux.

Le gypse est souvent associé à l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).

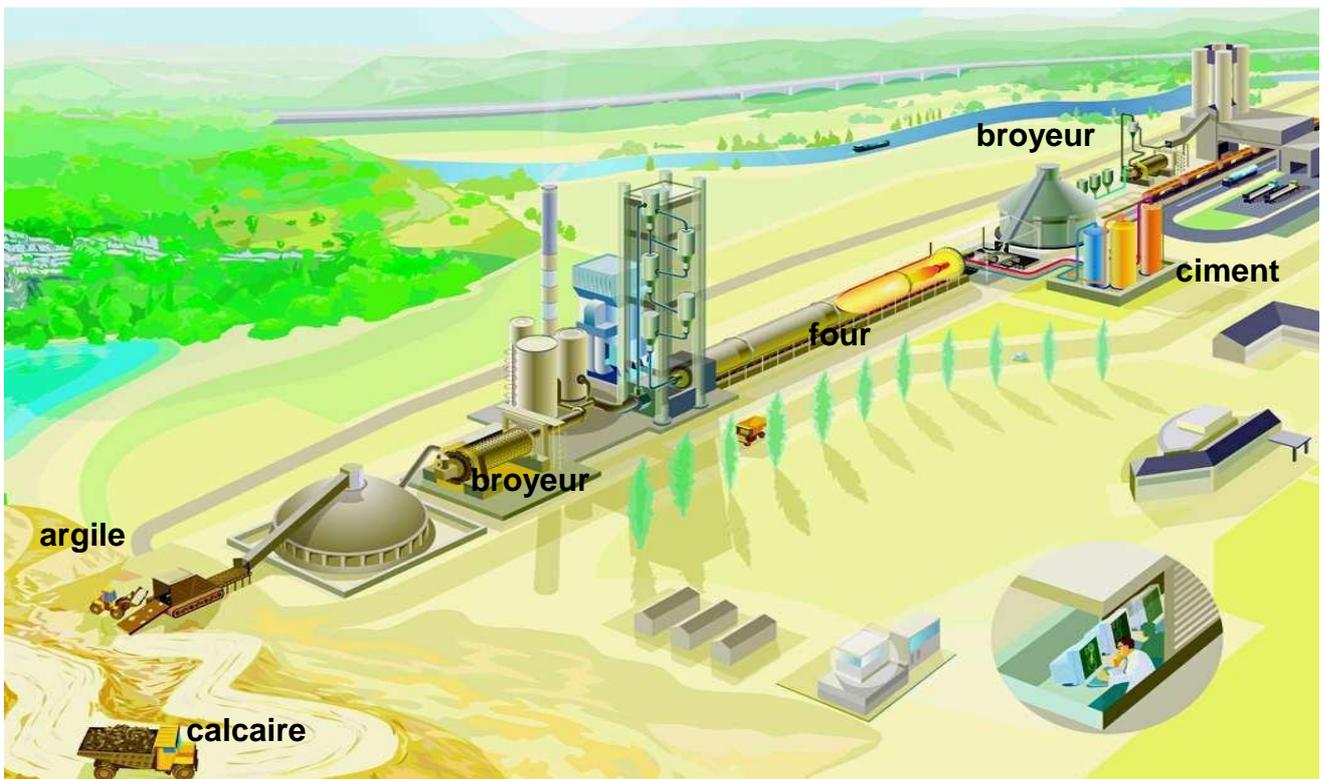
La matière première (calcaire + Argile) est broyée à une finesse bien définie (**refus de ~ 1.5 % à 160 micromètres**) pour la rendre plus réactive et homogénéisée.

### Fabrication du ciment

La matière première (Calcaire + argile)

Broyage  $\longrightarrow$  farine

Cuisson  $\blacksquare$  clinker + Gypse + (ajouts) et broyage  $\blacksquare$  ciment souhaité selon l'ajout additionné



### Ciment portland:

Notations cimentières pour les 4 éléments majeurs constitutifs :

Nom	Symbole chimique	Notation cimentière
Oxyde de calcium ou Chaux vive	CaO	C
Oxyde de silice ou Silice	SiO <sub>2</sub>	S
Oxyde d'aluminium ou Aluminate	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Oxyde de fer ou Ferrite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F

### Composition du clinker

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et (ferro) aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux vive (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et la ferrite par les argiles.

Calcaire et argiles sont extraits des carrières (**Extraction**), puis **concassés, homogénéisés** (même quantité de composition de calcaire), portés à haute température (**Cuisson**) (1450 °C) dans un four.

Le produit obtenu après **refroidissement** rapide (la trempe) est le clinker portland.

Cette dénomination rappelle l'origine anglaise de la redécouverte du ciment à la fin XVIII<sup>em</sup> siècle (Les romains savaient déjà fabriquer des liants hydrauliques); l'appellation anglaise de clinker évoque le mode d'obtention du matériau.

Les oxydes se combinent en début de fusion (Température de 1450 °C) pour former des silicates et aluminates hydrauliques:

- Le silicate tricalcique: **3CaO SiO<sub>2</sub>**, que l'on écrit **C<sub>3</sub>S** et qui représente 50 à 70 % du clinker. -

Le silicate bicalcique: **2CaO SiO<sub>2</sub>**, que l'on écrit **C<sub>2</sub>S** et qui représente 10 à 30 % du clinker.

- L'aluminate tricalcique: **3CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, que l'on écrit **C<sub>3</sub>A** et qui représente 2 à 15 % du clinker.

- L'alumino-ferrite tétracalcique: **4CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** que l'on écrit **C<sub>4</sub>AF** et qui représente 5 à 15 % du clinker.

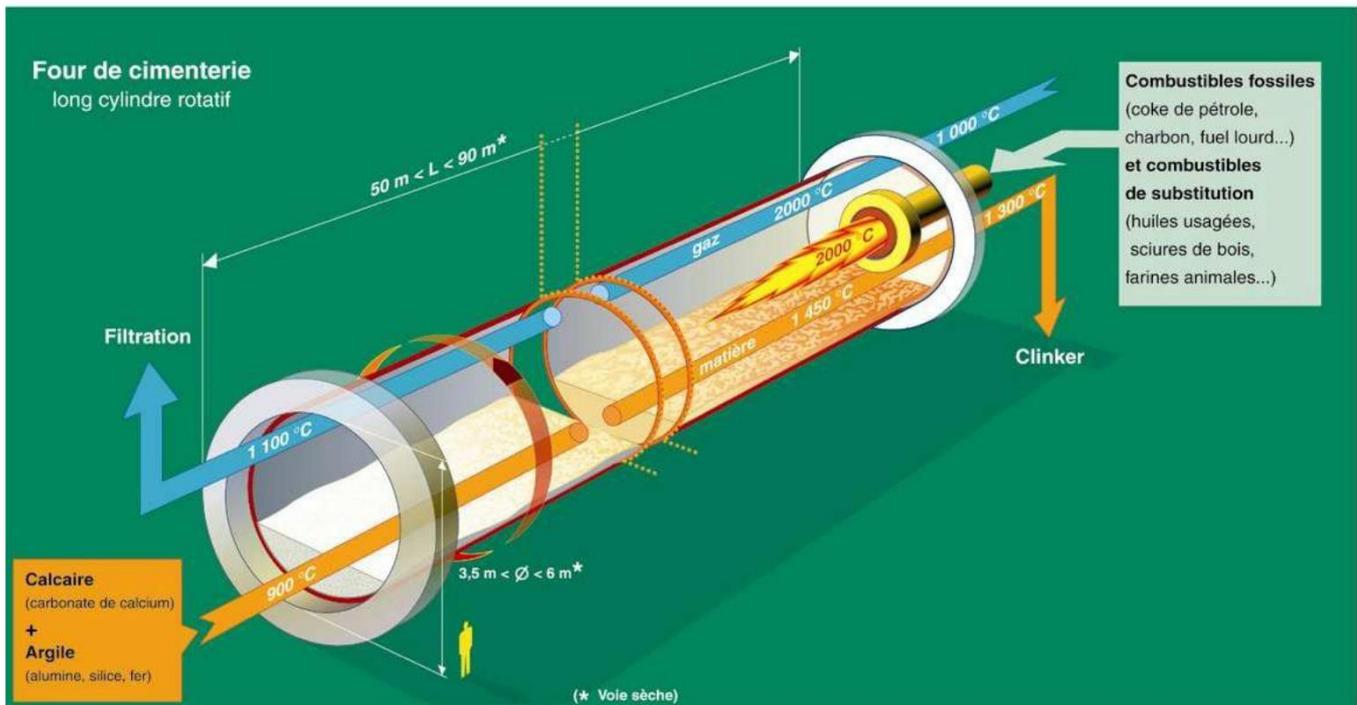
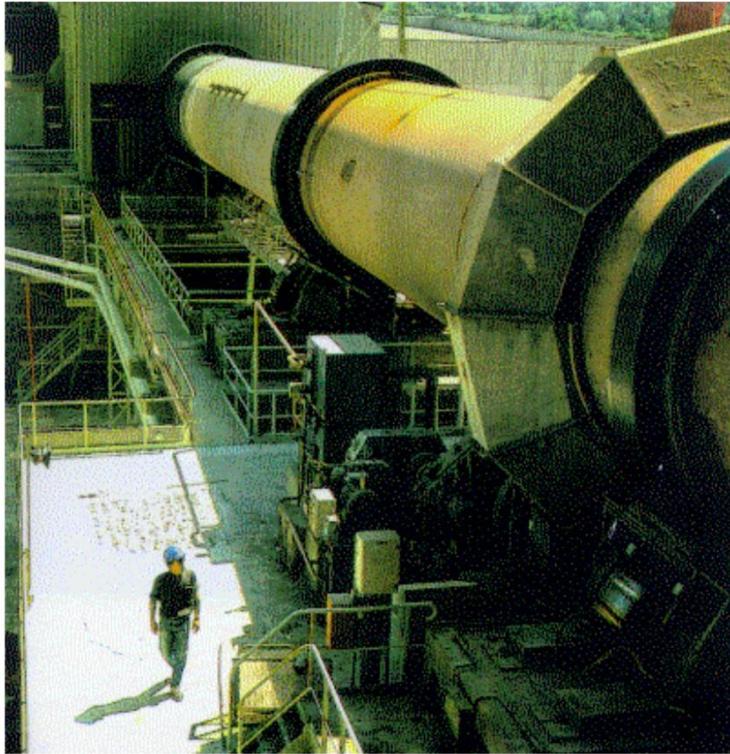
Le clinker, auquel on ajoute (**Ajout**) quelques pourcentage de gypse est ensuite finement broyé (moins de 1/10<sup>e</sup> de mm) de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

### Le four rotatif de cuisson

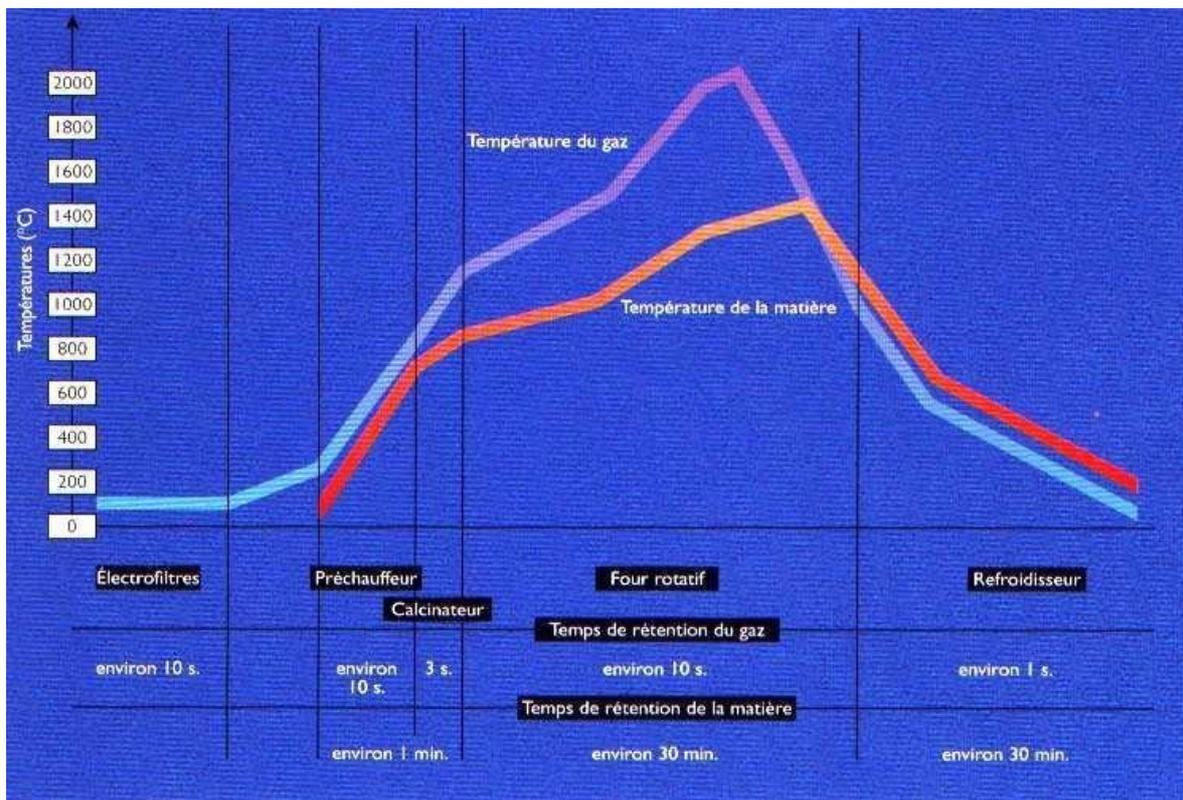
Le four est constitué d'un tube de plusieurs mètres de diamètre, dont l'axe est légèrement incliné et qui tourne sur lui-même (2 à 3 t/min).

La farine avance à l'intérieur du four en glissant et roulant le long des parois internes recouvertes de briques réfractaires. Elle s'agglomère aux environs de 1300 °C pour former des nodules, suite à la fusion partielle de ses constituants.

La température maximum atteinte: environ 1450 °C. Coûts de cuisson : environ 1/4 du coût industriel du clinker.



## Profils de température et temps de séjours



### Etapes de cuisson pour obtenir le clinker

La cuisson se fait dans des fours rotatifs de 70 à 120 mètres de long et de 5 mètres de diamètre. Ces fours sont inclinés de 3 à 4 degré par rapport à l'horizontale.

$T = 100$  C: Evaporation de l'eau libre

$T = 500$  C: Départ de l'eau liée chimiquement

$T = 800$  à  $1000$  C : Décarbonatation du calcaire  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

$T = 1000$  à  $1450$  C : Commencent les réactions entre CaO et les éléments d'argile ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , et  $Fe_2O_3$ ); i.e. Formation des phases du clinker.  $C_3A$ ;  $C_4AF$ ;  $C_2S$ ;  $C_3S$ .

Ces ciments sont tous à prise lente. Ils sont appelés ainsi parce qu'en durcissant, ils prennent l'aspect d'une roche naturelle existant dans l'île de Portland (Angleterre) (**Ciment Portland Artificiel**)

Les ciments Portland se présentent sous la forme d'une poudre grise de densité apparente allant de 0,950 à 1,200 et de masse volumique comprise entre 3,050 et 3,200 kg/dm<sup>3</sup>.

Le début de la prise et la durée dépendent de la qualité et de la provenance des produits servant à la fabrication. Le début de la prise ne se manifeste jamais avant 30 minutes (généralement 2 heures après le gâchage et la fin de prise a lieu entre 5 et 6 heures après le début de prise.

### Composition de la matière première pour la fabrication de ciment

#### Provenant de l'argile

- Silice ou oxide de silicium  $SiO_2$

- Alumine ou oxide d'aluminium  $Al_2O_3$
- Ferrite ou oxide de fer  $Fe_2O_3$

### Provenat du calcaire

CaO, MgO

$SO_3$  est un ajout (gypse) pour régulariser la prise. Il est ajouté au clinker comme régulateur de prise lors de l'hydratation de ciment. On peut dire qu'il empêche la prise rapide du ciment.

### Composition chimique du ciment portland artificiel en pourcentage

Le ciment est composé d'un mélange de matière première. Ce mélange contient:

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Algerie	22	4,9	3,85	62,3	1,48	2,5
France	22	5,5	3	64,5	1,5	2
Allemagne	20	5	2,5	64	1,5	2,5

Lors du séchage de ces éléments à des températures élevées, il y'a ce qu'on appelle les phases de clinker.

### Les différents types de ciment

Type de ciment	Notation	% clinker	Autres composants (Ajouts)	Principales utilisations
Ciment Portland	CPA – CEM I	Min. 95%	Max. 5% de filler	Bétons armés
Ciment Portland composé	CPJ – CEM II / A	80 à 94%	Max. 35% de cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice, laitiers	Travaux de dallage, routes
	Ou CPJ – CEM II / B	65 à 79%		
Ciment de haut fourneau	CHF – CEM III / A	35 à 64%	De 35 à 80% de laitier de haut fourneau	Convient aux travaux peu soumis à une trop grande augmentation de chaleur:
	Ou CHF – CEM III / B	20 à 34%		
Ciment de haut fourneau	CLK – CEM IV / C	5 à 19%	81 à 95% de laitier de haut fourneau	Travaux hydrauliques souterrains, ouvrages massifs, travaux en eaux agressives. A éviter par temps froid.
Ciment aux laitiers et aux cendres	CLC – CEM V / A	40 à 64%	18 à 30% laitier et 18 à 30% pouzzolanes ou cendres volantes	
	Ou CLC – CEM V / B	20 à 39%	31 à 50% laitier et 31 à 50% de cendres volantes ou pouzzolanes	

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

- PM = prise mer (ciment pour travaux à la mer)
- ES = eaux à haute teneur en sulfates

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

Le choix du ciment est essentiel pour conférer au béton les qualités recherchées, il permet d'obtenir les résistances à court et long terme. Il apporte également la compacité qui conditionne la durabilité du béton.

## **Autres constituants des ciments**

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Dans la mesure où ils sont des sous produits d'autres industries, ils contribuent aussi à en amoindrir le prix de revient.

On appelle constituant principal un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5 % en masse.

Ils sont indiqués ci-dessous.

### **Laitier granulé de haut fourneau**

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

### **Pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont:

- Des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée;
- Des argiles et des schistes activés thermiquement.

Les pouzzolanes doivent leurs noms aux cendres volcaniques de la région de pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les romains pour la confection du ciment.

Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydraulique intrinsèques; mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker.

### **Cendres volantes**

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. On distingue:

- Les cendres volantes siliceuses qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- Les cendres volantes calciques qui ont des propriétés hydrauliques et, parfois, pouzzolaniques.

### **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.

### **Calcaires**

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du ciment les calcaires doivent être composés de 75 % au moins de CaCO<sub>3</sub>.

### **Fumées 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 constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice

amorphe. Les fumées de silice ont des propriétés pouzzolaniques.

## Les caractéristiques du ciment portland

### La prise

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée.

Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat).

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels (fig 1, 2 et 3):

la nature du ciment,

la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,

la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C,

la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,

l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (fig 3)

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise dont l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

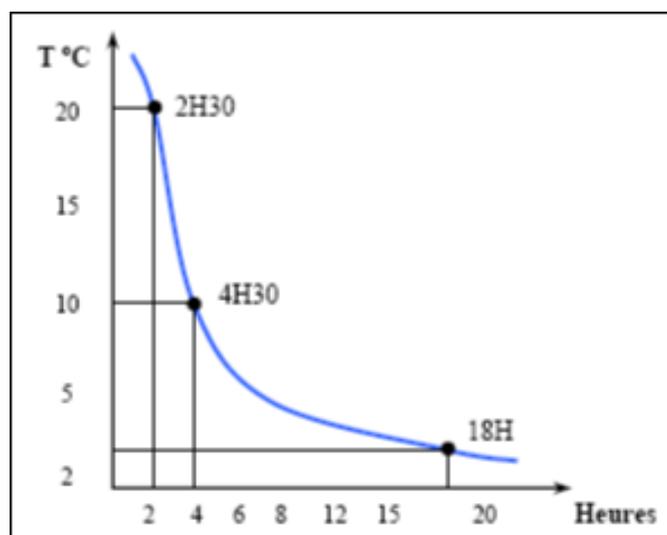


fig 1: Evolution du temps de prise en fonction de la température

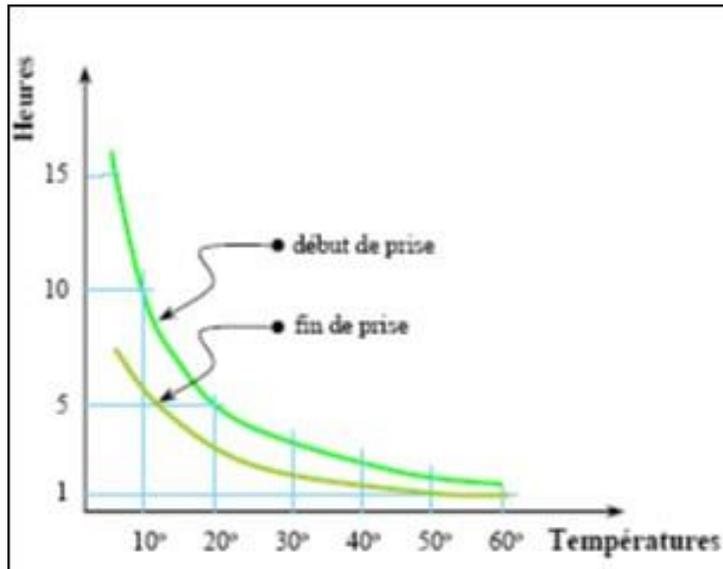


fig 2: Influence de la température sur la prise des ciments

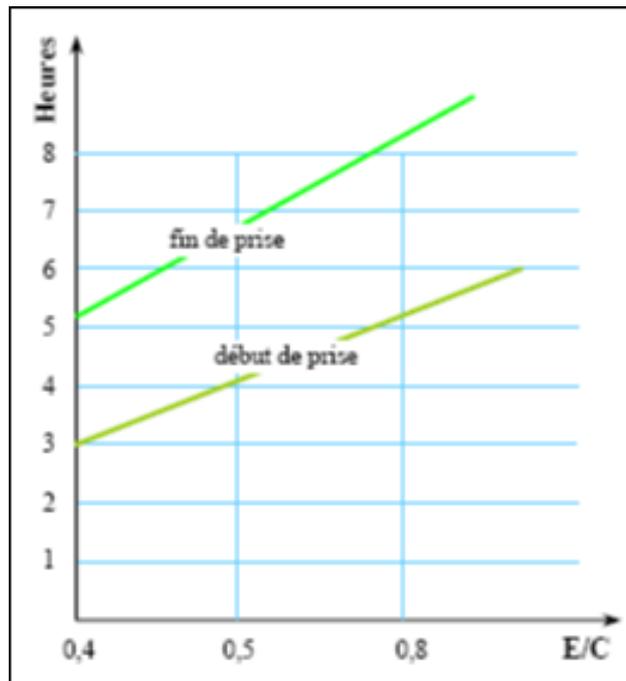


fig 3: Influence du E/C sur le temps de prise

### Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

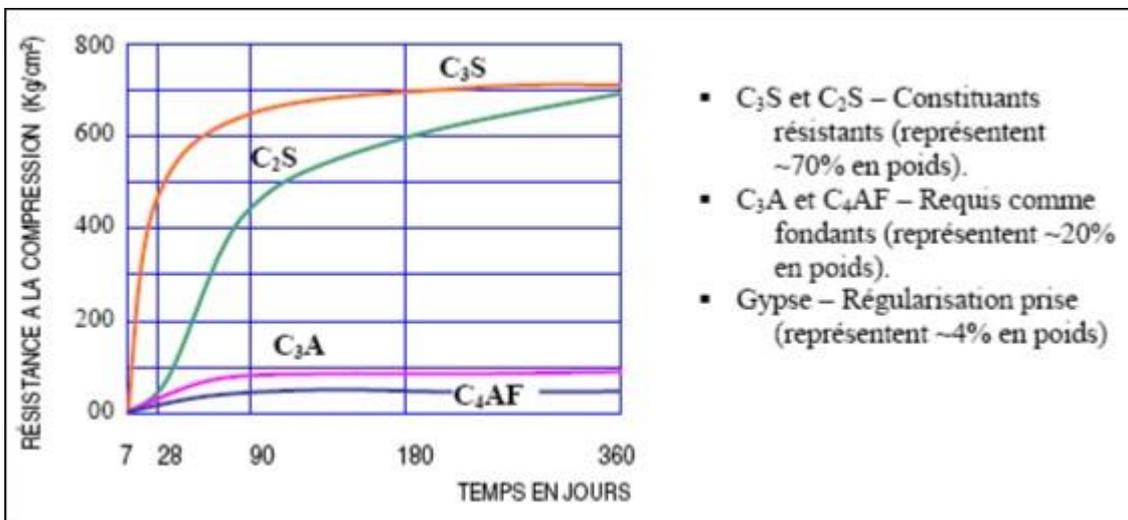
### Prise et durcissement des constituants du clinker (fig 4)

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

**Tableau 1: Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker**

Caractéristiques	Les constituants du clinker			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Vitesse d'hydratation	élevée	moyenne	élevée	faible
Résistance	élevée atteinte à court terme	élevée Atteinte à long terme	faible	très faible
Chaleur d'hydratation (hydratation complète)	500 Joule/g	250 Joule/g	1340 Joule/g	420 Joule/g
Prise	Fait prise et durcit rapidement	Réagit lentement	Prise très rapide Pour régulariser la prise, il faut ajouter du gypse	

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.



**fig 4: Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP.**

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) réagit en premier, se dissout et se recristallise.

Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S et le C<sub>2</sub>S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca<sup>2+</sup> en solution.

L'hydrolyse et la recristallisation de (C<sub>3</sub>A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder en ajoutant du gypse car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur chantier.

### Evolution physico-chimique de la pâte de ciment

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

Dans le cas des silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de Ca(OH)<sub>2</sub> en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés (CSH) forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés. L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

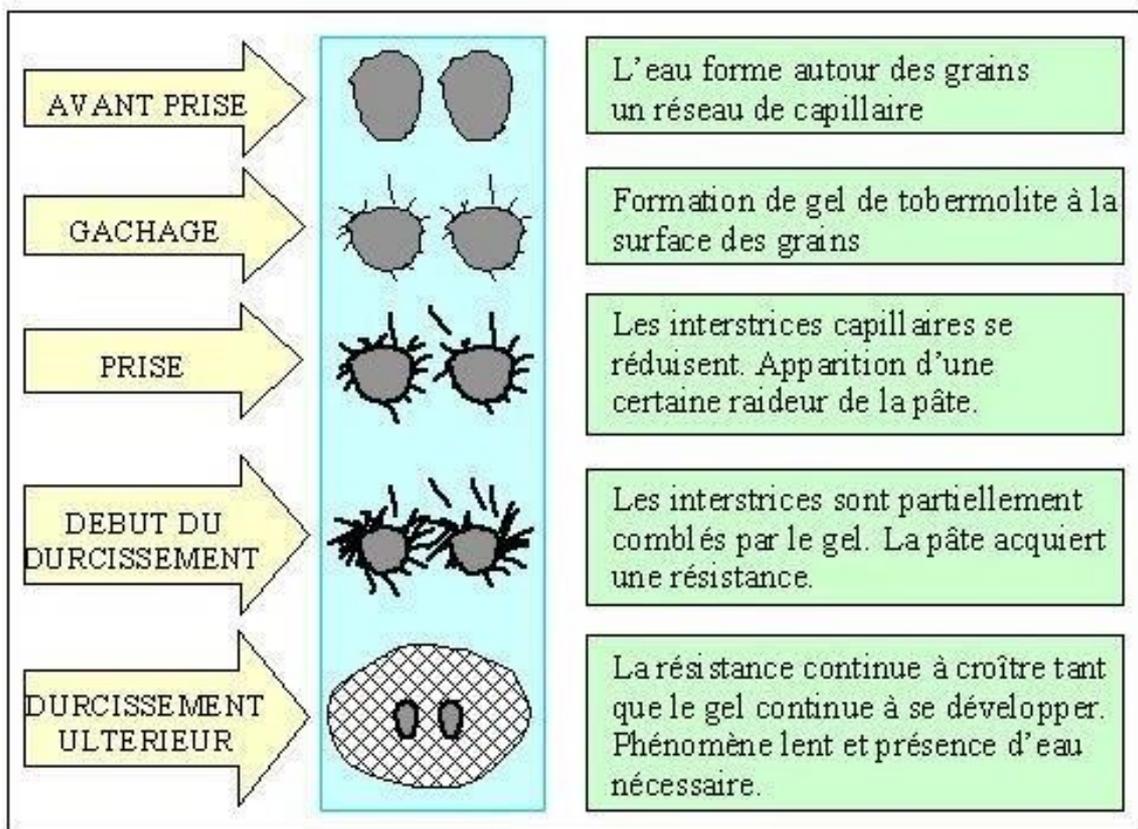


fig 5: L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment

## La finesse de mouture (finesse de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

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, par contre plus le retrait 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 réretention d'eau et la ressuée.

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine».

### Chaleur d'hydratation

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 finement broyé, plus la chaleur d'hydratation est élevée

la nature des constituants: les ciments CPA (CEM I) 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 ( $\text{C}_3\text{A}$ ) et silicate tricalcique ( $\text{C}_2\text{S}$  et  $\text{C}_3\text{S}$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte

la température extérieure

### Stabilité de volume

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps. Pour mesurer l'expansion, on utilise les aiguilles de Le Châtelier.

### Le retrait

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton. En fait il existe plusieurs types de retrait:

**Le retrait avant prise** dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes.

**le retrait hydraulique**, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe,

**le retrait thermique**, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres :

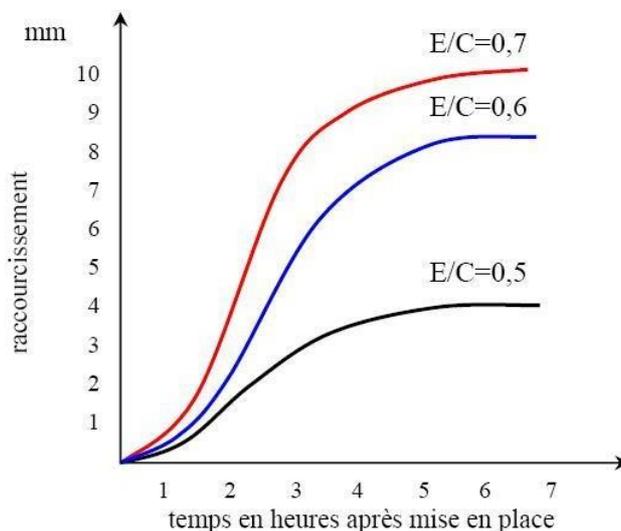
la nature du ciment

le dosage en eau (fig. 6 ci

dessous) la propreté des

sables

la forme et la dimension des granulats

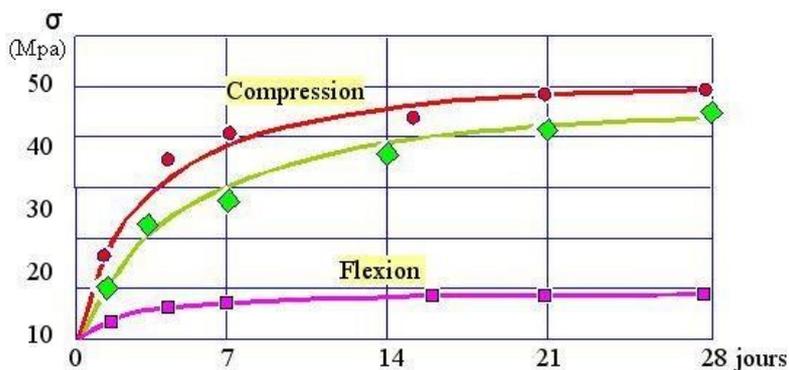


**fig. 6: Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers.**

### Résistance à la compression

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.



**Résistance du mortier normal**

