

SOMMAIRE

- ▲ Généralités
- ▲ La ligne de fabrication
- ▲ Le cru
- ▲ La cuisson
- ▲ La fabrication du ciment
- ▲ Les ciments courants
- ▲ Composition + finesse = performances
- ▲ L 'hydratation + la Structuration

DEFINITIONS (Norme NF P 15-301)

- Le **ciment** est un liant **hydraulique**, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une **pâte** qui fait prise et durcit

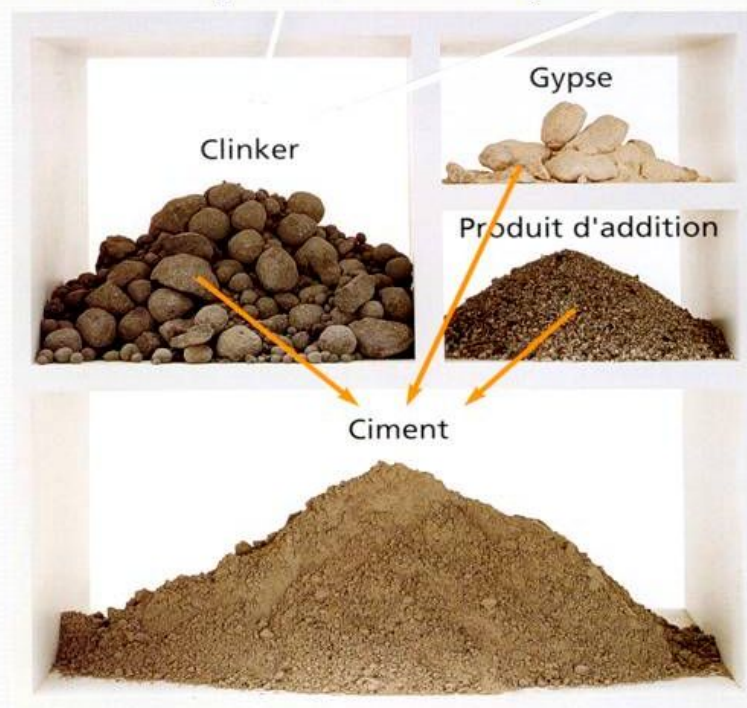
...



Le matériau formé est ensuite insoluble dans l'eau

DEFINITIONS (suite)

Le ciment anhydre est constitué de clinker additionné de gypse ($\approx 5\%$), et éventuellement pour les ciments composés, d'autres constituants minéraux : laitiers, cendres volantes, fillers calcaires, ...



NOTATION CHIMIQUE CIMENTIERE

La chimie du ciment se construit essentiellement à partir des 4 oxydes majeurs suivants :

- $\text{CaO} = \text{C}$
- $\text{SiO}_2 = \text{S}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$

- $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$
- $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$
- $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$
- $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$

présents dans les matières premières,
et qui vont former **les silicates** et
les aluminates de calcium du clinker :

ou C_3S (silicate tricalcique) ou (alite)
ou C_2S (silicate bicalcique) ou (bélite)
ou C_3A (aluminat tricalcique)
ou C_4AF (alumino-ferrite tetracalc.)

AJOUTS CIMENTAIRES

- **Fumée de silice (SF) :**
résidu provenant de la production de silicium
 - **Cendres volantes (F) :**
sous-produit recyclé des
centrales thermiques provenant de la combustion
du charbon
 - **Laitier de haut fourneau (S) :**
produit non
métallique composé de silicates et d'autres
éléments basiques qui se forment en fusion avec le
fer dans un haut fourneau
- Ajouts

Ciment Portland (1)

Ciment + 1 ajout : Ciment Binaire (2)

Ciment + 2 ajouts : Ciment Ternaire (3)

Ciment + 3 ajouts : Ciment Quaternaire (4)

Ciment hydraulique composé :

Matériau composé de ciment Portland et d'une combinaison d'ajout cimentaire :

- Fumée de silice (*silica fume*)
- Cendres volantes (*fly ash*)
- Laitier de haut fourneau (*slag*)

UN PEU D'HISTOIRE

- **LES EGYPTIENS** découvrent **la chaux grasse**, obtenue par cuisson de roches calcaires à une température proche de 1000°C, suivie d'une extinction avec de l'eau.
- **LES ROMAINS** ont fait véritablement du **ciment** en ajoutant à la chaux de la pouzzolane.
- **LOUIS VICAT en 1817** élabore la théorie de l'hydraulicité, propriété jusque-là inexplicquée.
- **En 1824**, l'écossais ASPDIN donne le nom de **PORTLAND** au ciment qu'il fabrique dans cette région.
- **LA PREMIERE USINE DE CIMENT** a été créée par Dupont et Demarle **en 1846** à Boulogne-sur-Mer.

LIGNE DE FABRICATION DU CIMENT

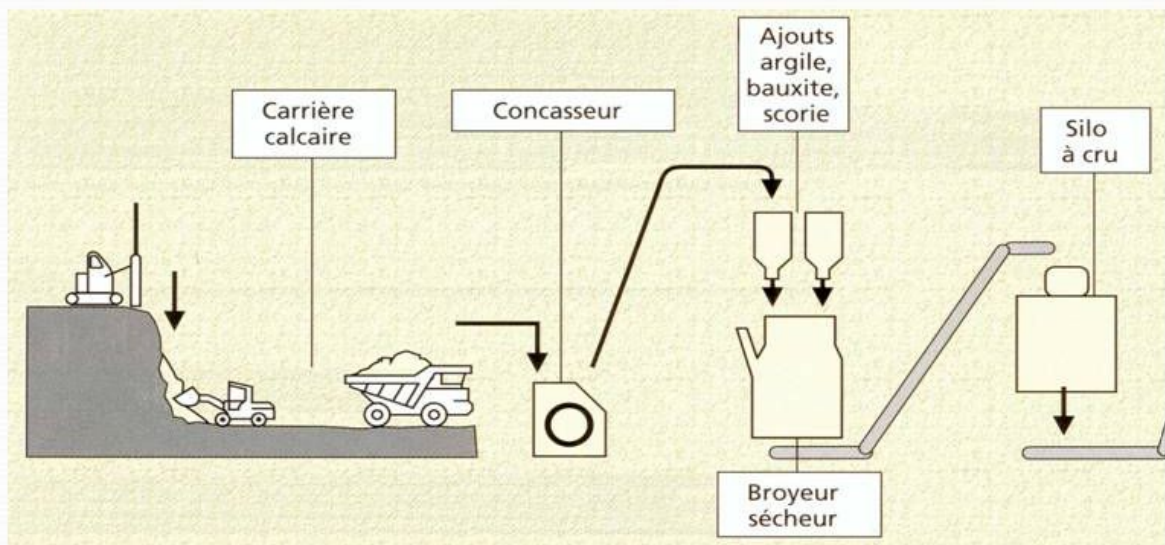
La fabrication du ciment se fait selon un procédé en continu (personnel en 3x8), en suivant 3 lignes successives :

- **La ligne de fabrication du cru** (de la carrière au silo de stock cru)
- **La ligne de cuisson** (de l'alimentation du four au silo de stock clinker)
- **La ligne de fabrication du ciment** (de l'alimentation des broyeurs aux silos d'expédition ciments)

LIGNE DE FABRICATION DU CIMENT

La ligne de fabrication du cru (de la carrière au silo de stock cru)

La fabrication du cru commence à la carrière et se termine au silo de stockage avant le four. Pour obtenir dans ce silo une farine crue (procédé voie sèche) homogène et « au titre », les fonctions à assurer sont le **broyage**, le **séchage**, l'**homogénéisation** et le **dosage**.



COMPOSITION D'UN CRU (suite)

- Pour des raisons économiques, la cimenterie est (presque) toujours installée sur un **gisement de calcaire** (source de Ca), qui constitue environ 80 % de la matière crue, et dispose également d'une **carrière d'argile** (source de Si, Al, Fe) à proximité.
- Quelques cimenteries, dépourvues de carrière d'argile, utilisent en substitution, des **cendres volantes de centrales thermiques** ou du **laitier de haut-fourneau**, qui doivent être achetées à l'extérieur, comme les matières de correction.

COMPOSITION D'UN CRU (suite)

- La **composition élémentaire** typique d'un cru est la suivante : **C** \approx 43 %, **S** \approx 14 %, **A** \approx 3 %, **F** \approx 2 %, le complément à 100 étant la perte au feu (\approx 35 % de CO₂ et de H₂O) et des oxydes mineurs: MgO, K₂O, ...
- La **composition minéralogique potentielle** du clinker peut être calculée à partir de la composition élémentaire du cru par les **formules de Bogue** :

$$C_3S = 4.07 C - 7.60 S - 6.72 A - 1.43 F$$

$$C_2S = -3.07 C + 8.60 S + 5.07 A + 1.08 F$$

$$C_3A = 2.65 A - 1.69 F$$

$$C_4AF = 3.04 F$$

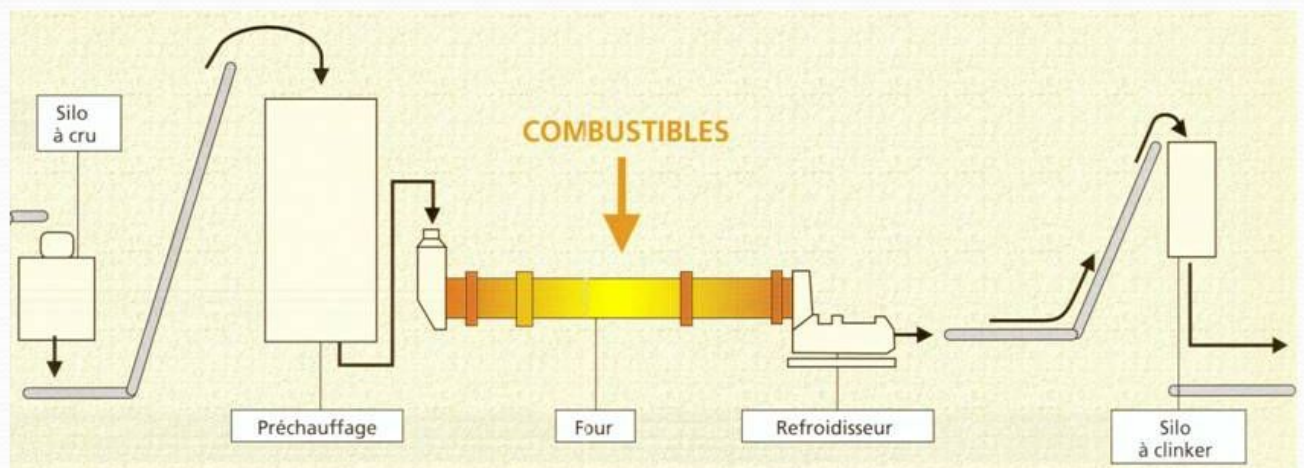
CALCUL DE CRU

Le principe du calcul de cru est de **déterminer les % des matières premières dans le cru** qui vont permettre de former, après cuisson, les % souhaités de C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF dans le clinker. La démarche est la suivante :

- **on fait l'analyse** élémentaire des matières susceptibles de rentrer dans la constitution du cru: calcaire, argile, ...
- **on écrit les équations** relatives aux modules fixés
- **on résout le système d'équations** (logiciel de calcul)

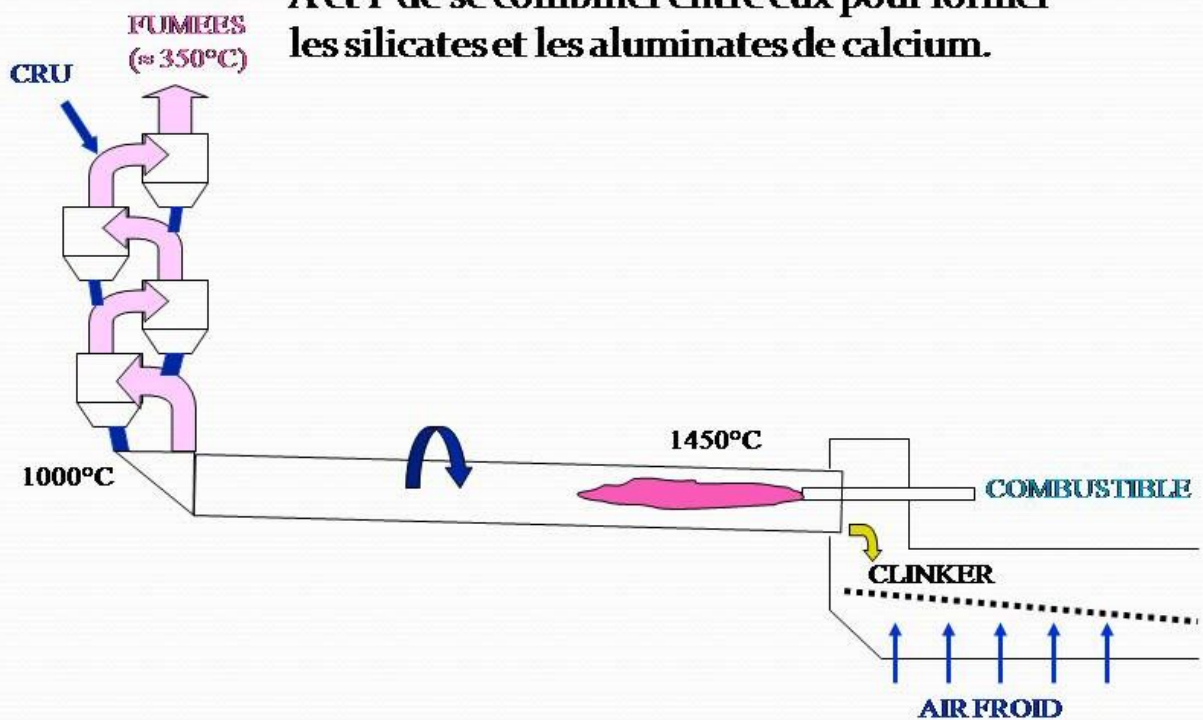
LIGNE DE CUISSON

- La ligne de cuisson (de l'alimentation du four au silo de stock clinker)



LA CUISSON

La cuisson du cru va permettre aux différents oxydes C, S, A et F de se combiner entre eux pour former les silicates et les aluminates de calcium.

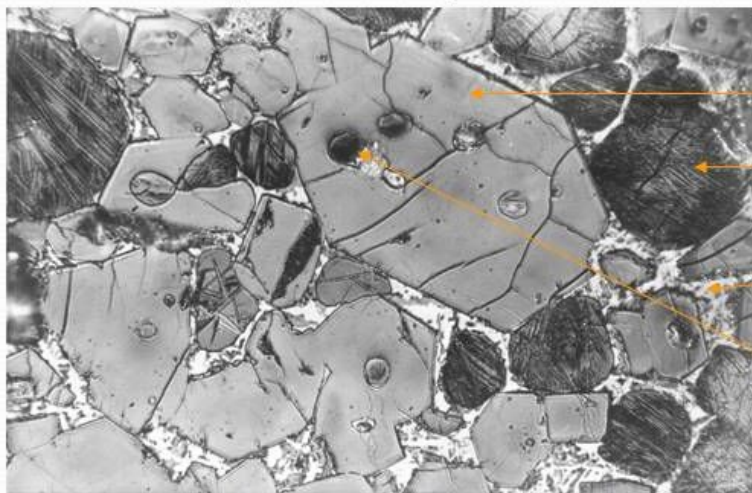


LA CUISSON (suite)

- **La trempe** du clinker va permettre de **stabiliser l'alite** (d'éviter sa rétrogradation en bélite et chaux libre secondaire: $C_3S \rightarrow C_2S + C$)
- elle va aussi influencer le mode de **crystallisation de C_3A et C_4AF** , composants principaux de la phase liquide.

COMPOSITION D'UN CLINKER PORTLAND

La composition moyenne d'un clinker gris est la suivante :



C_3S (alite) : 60-70 %
 C_2S (bélite) : 10-20 %

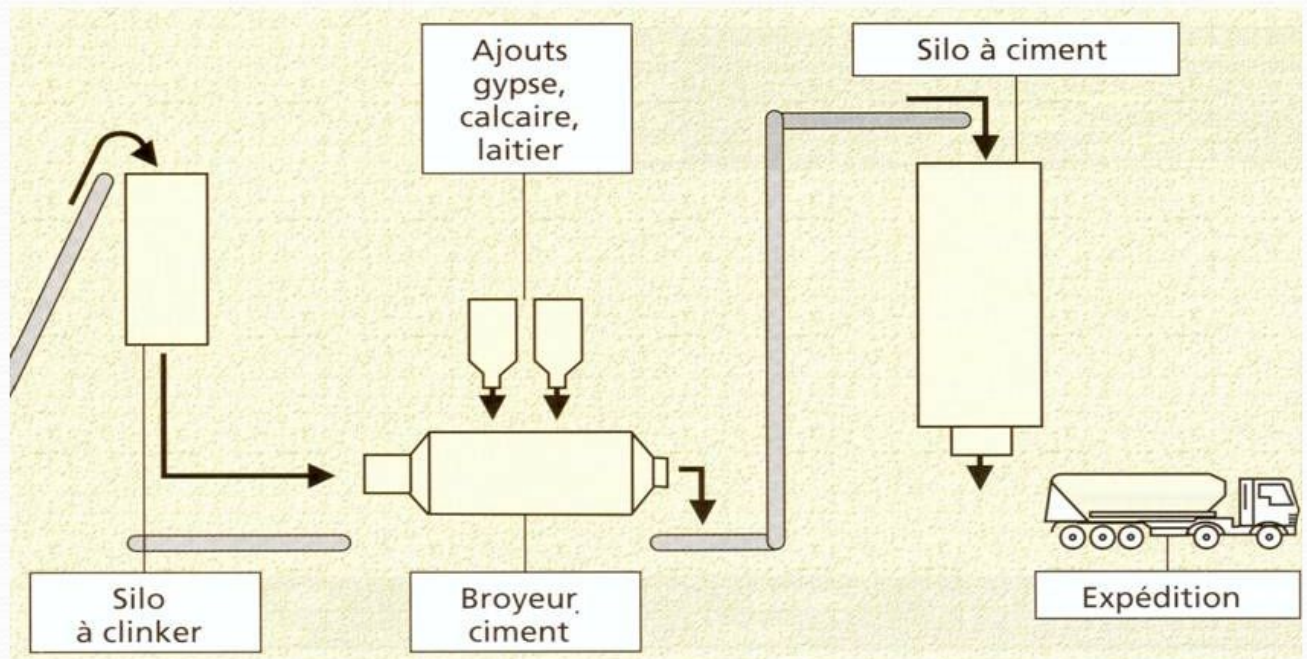
C_3A : 0-14 %
 C_4AF : 7-14 %

C (CaO libre) : \approx 1 %

Les aluminates (C_3A, C_4AF) constituent la phase interstitielle entourant les cristaux hexagonaux d'alite (C_3S) et les grains bistriés de bélite (C_2S).

LIGNE DE FABRICATION DU CIMENT

- **La ligne de fabrication du ciment** (de l'alimentation des broyeurs aux silos d'expédition ciments)



LE CIMENT

Normalisation

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciments

■ existe :

CEM I : ciment Portland

CEM II : ciment Portland composé

CEM III : ciment de haut fourneau

CEM IV : ciment pozzolanique

CEM V : ciment au laitier et aux cendres

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciment

Il existe :

CEM I : ciment Portland

CEM II : ciment Portland composé

CEM III : ciment de haut fourneau

CEM IV : ciment pouzzolanique

CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants
principaux autres que le
clinker (en % d'ajout)

A : de 6 à 20%

B : de 21 à 35 %

C : de 36 à 65 %

(laitier pour les CEM III)

**Ciment avec au moins
2 constituants principaux
autres que le clinker**

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciment

Il existe :

CEM I : ciment Portland

CEM II : ciment Portland composé

CEM III : ciment de haut fourneau

CEM IV : ciment pouzzolanique

CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants
principaux autres que le
clinker (en % d'ajout)

A : de 6 à 20%

B : de 21 à 35 %

C : de 36 à 65 %

(laitier pour les CEM III)

Ciment avec au moins

2 constituants principaux
autres que le clinker

Noms des constituants principaux

S : laitier granulé de hauts fourneaux

V : cendres volantes siliceuses

W : cendres volantes calciques

L ou **LL** : calcaire (en fonction du taux
de carbone organique)

D : fumée de silice

P ou **Q** : matériaux pouzzolaniques

T : Schiste calciné

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciment

Il existe :

- CEM I : ciment Portland
- CEM II : ciment Portland composé
- CEM III : ciment de haut fourneau
- CEM IV : ciment pouzzolanique
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants principaux autres que le clinker (en % d'ajout)

- A : de 6 à 20%
- B : de 21 à 35 %
- C : de 36 à 65 %
(laitier pour les CEM III)

Ciment avec au moins 2 constituants principaux autres que le clinker

Noms des constituants principaux

- S : laitier granulé de haut fourneau
- V : cendres volantes siliceuses
- W : cendres volantes calciques
- L ou LL : calcaire (en fonction du taux de carbone organique)
- D : fumée de silice
- P ou Q : matériaux pouzzolaniques
- T : Schiste calciné

Classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa) :
32,5 ou 42,5 ou 52,5

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciment

Il existe :

- CEM I : ciment Portland
- CEM II : ciment Portland composé
- CEM III : ciment de haut fourneau
- CEM IV : ciment pouzzolanique
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants principaux autres que le clinker (en % d'ajout)

- A : de 6 à 20%
- B : de 21 à 35 %
- C : de 36 à 65 %
(laitier pour les CEM III)

Ciment avec au moins 2 constituants principaux autres que le clinker

Noms des constituants principaux

- S : laitier granulé de haut fourneau
- V : cendres volantes siliceuses
- W : cendres volantes calciques
- L ou LL : calcaire (en fonction du taux de carbone organique)
- D : fumée de silice
- P ou Q : matériaux pouzzolaniques
- T : Schiste calciné

Classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa) :
32,5 ou 42,5 ou 52,5

Sous-classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 2 jours exprimée en MPa).

- N : Normal**
- R : Rapide**

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

LES CIMENTS COURANTS (suite)

- Les ciments sont caractérisés en outre par une des **classes de résistance** suivantes :

	R ₂ (MPa)		-	R ₇ (MPa)		-	R ₂₈ (MPa)		
	garantie	Li		garantie	garantie		Li	Li	Li
32.5	-	-	-	17.5	-	-	30	≥ 32.5	< 52.5
32.5 R	12	≥ 13.5	-	30	-	-	≥ 32.5	< 52.5	-
42.5	10	≥ 12.5	-	40	-	-	≥ 42.5	< 62.5	-
42.5 R	18	≥ 20	-	40	-	40	≥ 42.5	< 62.5	-
52.5	18	≥ 20	-	50	-	-	≥ 52.5	-	-
52.5 R	28	≥ 30	-	50	-	-	≥ 52.5	-	-
R₂, R₇ et R₂₈ sont les résistances à la compression (en MPa), mesurées sur des barrettes de mortier standard de format 4x4x16 cm, à 2j, 7j et 28j.									

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciment

Il existe :

- CEM I : ciment Portland
- CEM II : ciment Portland composé
- CEM III : ciment de haut fourneau
- CEM IV : ciment pouzzolanique
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants principaux autres que le clinker (en % d'ajout)

- A : de 6 à 20%
- B : de 21 à 35 %
- C : de 36 à 65 %
(laitier pour les CEM III)

Ciment avec au moins 2 constituants principaux autres que le clinker

Noms des constituants principaux

- S : laitier granulé de haut fourneau
- V : cendres volantes siliceuses
- W : cendres volantes calciques
- L ou LL : calcaire (en fonction du taux de carbone organique)
- D : fumée de silice
- P ou Q : matériaux pouzzolaniques
- T : Schiste calciné

Classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa) :

32,5 ou 42,5 ou 52,5

Seuls classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 2 jours exprimée en MPa).

- N : Normal
- R : Rapide

Caractéristiques complémentaires

- PM : ciment pour travaux à la mer
- ES : ciment pour travaux en eau à haute teneur en sulfates
- CP : ciment à teneur en sulfates limitée

* Voir la norme française du ciment NF EN 197-1

LES LABELS COMPLEMENTAIRES (NF)

LABEL CP : ciments à teneur en sulfure limitée pour béton précontraint (NF P 15-318)

- **CP₁** : $S^= < 0.7$ % post-tension
- **CP₂** : $S^= < 0.2$ % pré-tension

Domaine d'application : ouvrages d'art (en particulier)

Principe : limiter les risques de corrosion liés aux sulfures

LES LABELS COMPLEMENTAIRES (NF)

LABEL PM : ciments pour travaux à la mer (NF P 15-317)

- **CEM I** :
 $C_3A \leq 10 \%$
 $C_3A + 0.27 C_3S \leq 23.5 \%$
 $SO_3 \leq 2.5 \%$ (3.0 % si $C_3A \leq 8 \%$)
- **CEM II** : limitation de SO_3 , C_3A , % ajouts
- **CEM III** : sont PM d'office si % laitier ≥ 60
- **CEM V** : sont PM d'office si $CaO \leq 50 \%$

Principe : limiter le C_3A pour éviter la formation de sels chlorés ou sulfatés donnant de l'expansion

LES LABELS COMPLEMENTAIRES (NF)

LABEL ES : ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (XP P 15-319)

- **CEM I** : $C_3A \leq 5 \%$
 $C_4AF + 2 C_3A \leq 20 \%$
 $SO_3 \leq 2.5 \%$ (3.5 % si $C_3A \leq 3 \%$)
- **CEM III** : limitation de SO_3 , C_3A , % ajouts
- **CEM IIII** : sont ES d'office si % laitier ≥ 60
- **CEM V** : sont ES d'office si $CaO \leq 50 \%$

Principe : limiter le C_3A pour éviter la formation de sels sulfatiques faisant gonfler le béton

Utilisations

CIMENT	Usages
CEM I	Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué. Béton précontraint. Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R). Bétonnage jusqu'à une température extérieure entre 5 et 10° C. Béton étuvé ou auto-étuvé.
CEM II / A ou B	Ces ciments sont les plus couramment utilisés CEM II/A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple). Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants. Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs. Dallages, sols industriels. Maçonneries. Stabilisation des sols.

COMPOSITION + FINESSE = PERFORMANCES

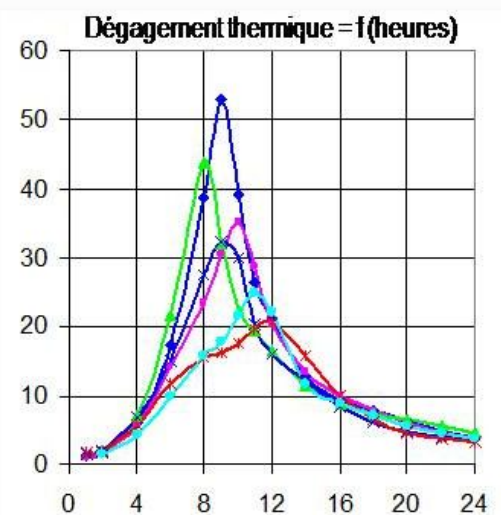
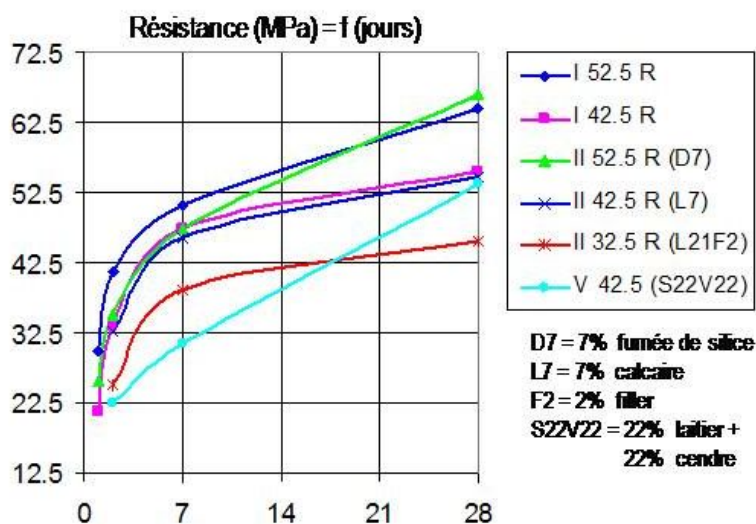
Le ciment va jouer un rôle très important dans l'obtention des caractéristiques d'un béton dans les domaines de :

- **la rhéologie** (béton frais)
temps: 0 (gâchage) à qqs heures (mise en place)
- **la résistance mécanique** (béton durci):
temps: qqs heures (décoffrage) à 28 j ($R_{\text{caractéristique}}$)
- **la durabilité** (béton durci)
temps: >> 10 ans (durée de vie de l'ouvrage)

Les exemples qui suivent montrent dans quelle mesure ces caractéristiques sont influencées par le type de ciment.

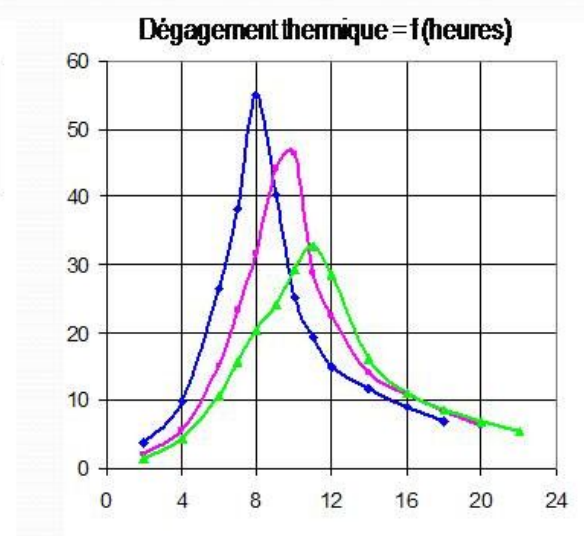
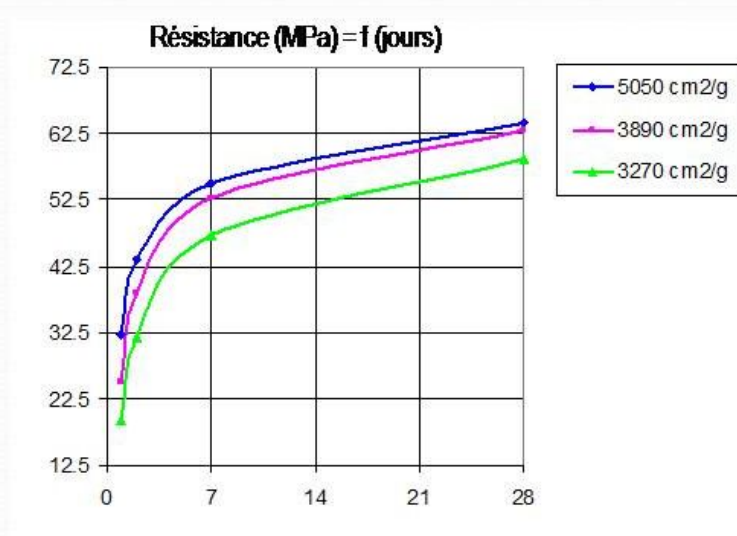
COMPOSITION + FINESSE = PERFORMANCES

- Dans l'exemple qui suit, on peut juger de **l'influence de la composition-finesse** sur les résistances et sur le dégagement de chaleur, pour 6 ciments de la même usine :



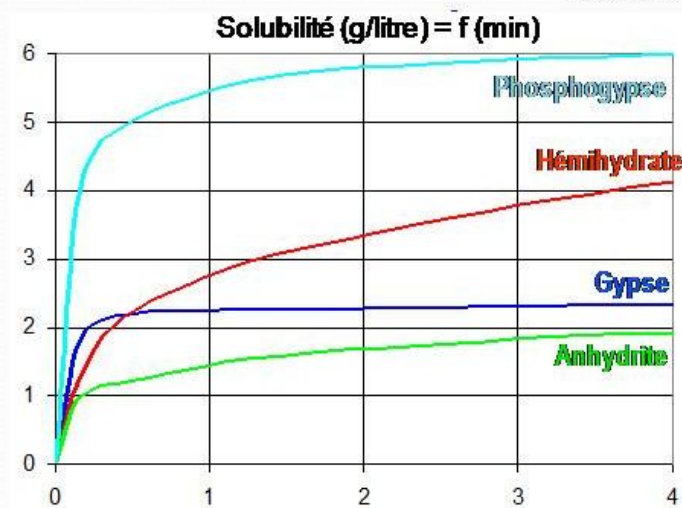
COMPOSITION + FINESSE = PERFORMANCES

- Dans l'exemple suivant, on peut juger de **l'influence de la surface spécifique Blaine (SSB)** sur les résistances et sur le dégagement de chaleur, pour 3 ciments de type CEM I à base du même clinker et de SSB différentes :



COMPOSITION + FINESSE = PERFORMANCES

- L'influence du gypsage sur les caractéristiques du ciment, s'exerce à la fois qualitativement (forme du sulfate) et quantitativement (« optimum de gypsage »).
- Les différentes formes de sulfate de calcium se distinguent par la solubilité:



$\frac{1}{2} \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
(e):

des

LE CIMENT

Hydratation



DU CLINKER AUX HYDRATES

Les anhydres du clinker au contact de l'eau vont se transformer en **silicates et aluminates de calcium hydratés** qui vont constituer la phase liante des granulats au sein du béton.

HYDRATATION DU CIMENT

- L'hydratation d'un ciment portland peut se décrire comme la résultante de :
 - l'hydratation des silicates, qui ne met en jeu que C_3S , C_2S et l'eau (H),
 - et l'hydratation des aluminates, qui met en jeu C_3A , C_4AF , l'eau (H) et le gypse (CSH_2).

Ces 2 hydratations se déroulent simultanément mais pas indépendamment l'une de l'autre, du fait de couplages chimiques et thermiques.

HYDRATATION DES SILICATES

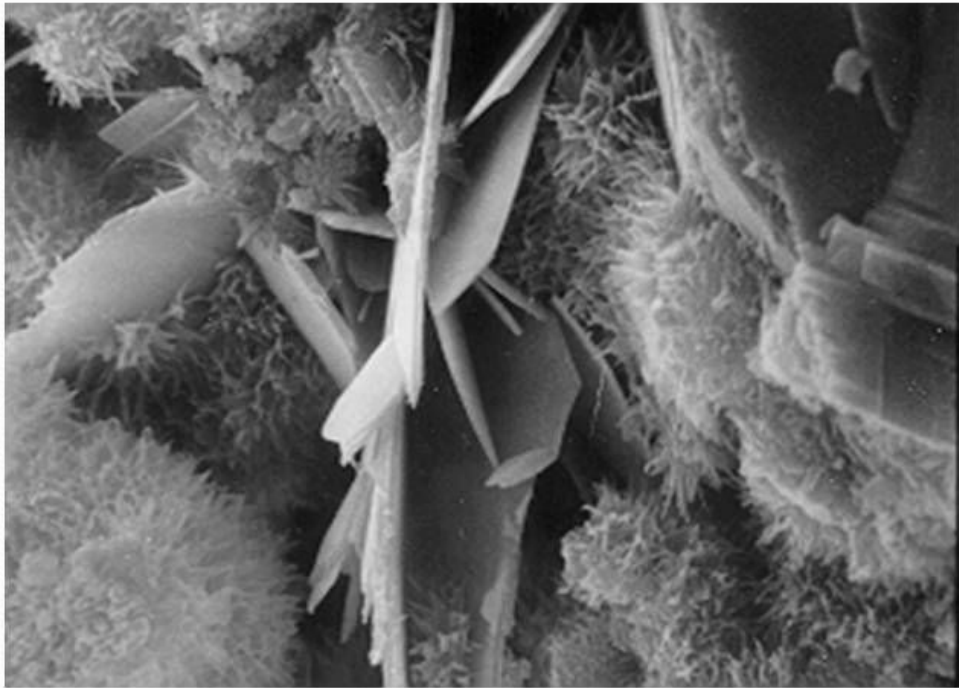
L'hydratation des silicates conduit à 2 types d'hydrates :



La portlandite
(cristal non-liant)

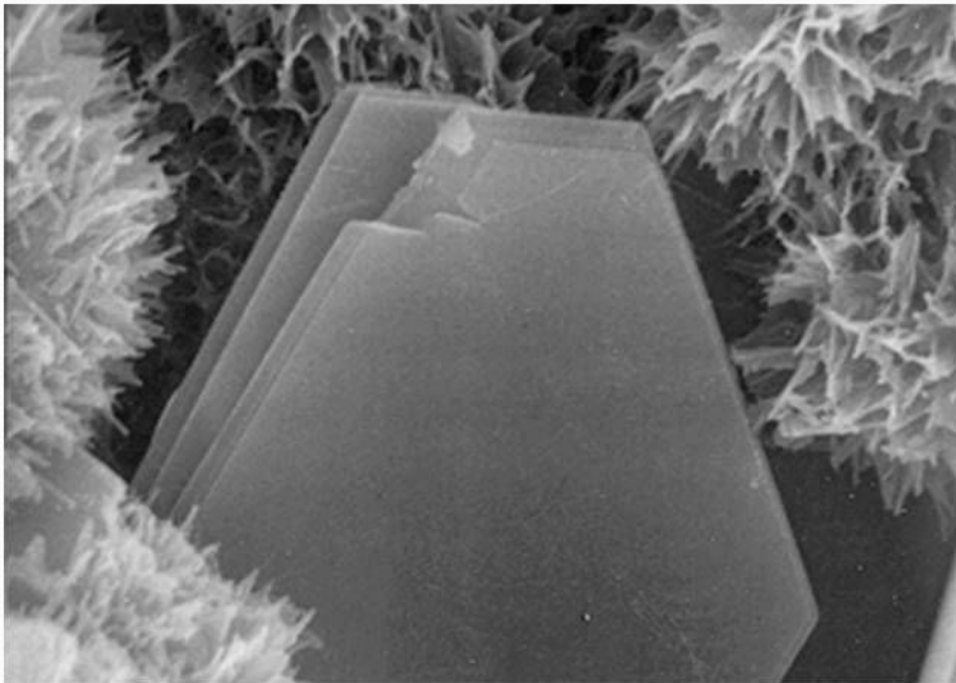
Les C-S-H : peu cristallisés ("gel") et liants, ce sont les hydrates les plus importants. Le rapport C/S dans ces CSH est typiquement compris entre 1,6 à 1,8.

HYDRATATION DES SILICATES (suite)



Pâte de ciment à 7 j : Fibres de CSH (MEB 1100 x)

HYDRATATION DES SILICATES (suite)



Pâte de ciment à 7 j : cristaux de portlandite (MEB 7000 x)

Université de M'sila
Faculté de Technologie
Département de Génie civil

Cours :

Hydratation et structuration de la pâte de ciment «H.S.P.C »

Enseignant :

Pr. Dr. NACERI Abdelghani