

Le ciment et les bétons.

1. Introduction:

Le béton est un composite particulière de grains et de sable maintenus ensemble par un adhésif.

Cet adhésif est généralement un ciment.

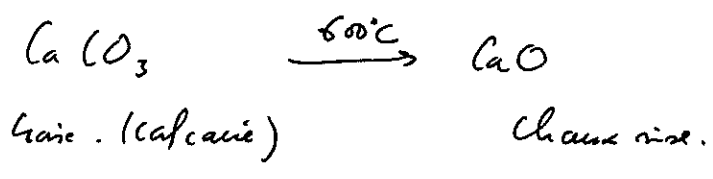
On distingue

- le ciment de pouzzolane (matériau le plus ancien)
- le ciment portland (matériau le plus répandu)
- les ciments à fort taux d'alumine (applications spéciales).

2. Principe de la prise des ciments:

Le plus ancien ciment, ou ciment de pouzzolane datent d'avant les romains. Ils consistent en un mélange de chaux et de cendre volcanique.

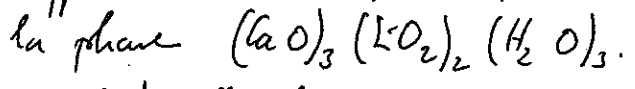
La chaux est obtenue par chauffage de marbre vers 900°C



La chaux est ajoutée à l'eau et à la cendre volcanique.

La chaux réagit avec H₂O pour former Ca(OH)₂.

En même ^{temps} une réaction avec la silice présente dans la cendre provoque l'apparition d'une phase particulière à la surface des grains de cendre:



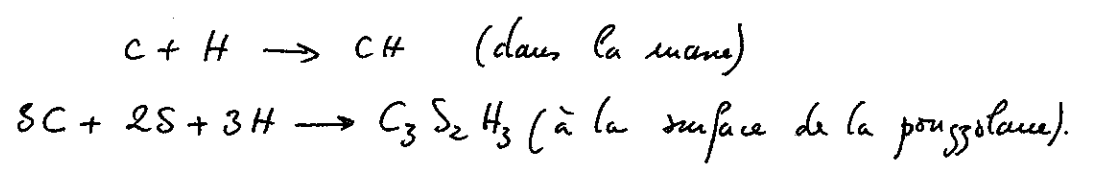
(c'est cette phase qui assure une liaison solide et définitive.)

nomenclature: On utilise 6 termes suivants pour définir les composés d'un ciment:

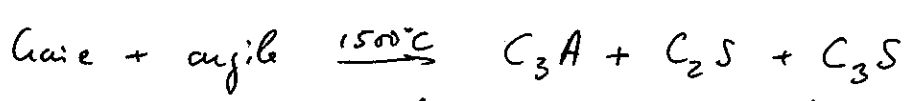
- chaux $CaO : C$
- alumine $Al_2O_3 : A$
- silice $SiO_2 : S$
- eau $H_2O : H$

tri-hydrate de silice tricalcique $C_3S_2H_3 : ((CaO)_3 (SiO_2)_2 (H_2O)_3$
ou gel de tobermorite.

la pierre de la pouzzolane peut donc se résumer ainsi:



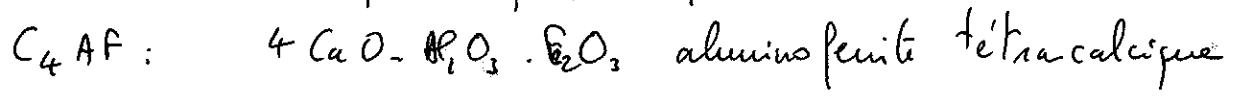
En 1824, JO ASPIN a pris un brevet pour "un ciment de qualité supérieure, ressemblant à la Pierre de Portland" (un calcaire blanc de l'île de Portland). Le ciment est préparé en cuisant un mélange de chaux ($CaCO_3$) et d'argile ($\approx S_2AH$) à $1500^\circ C$.



Le rapport de ces composés dépend du mélange et définit les propriétés du ciment.

- $C_3S : 3CaO - SiO_2$ silicate tricalcique
- $C_2S : 2CaO - SiO_2$ silicate dicalcique
- $C_3A : 3CaO - Al_2O_3$ aluminat tricalcique

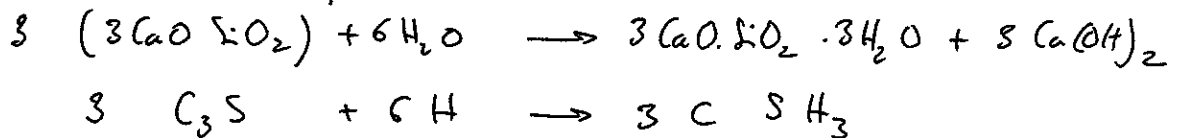
si l'argile contient de l'oxyde de fer, on trouve aussi



Type de ciment	Composition nominale (%)				Résistance minimale à la compression (MPa)	
	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	au bout de 3 jours	au bout de 28 jours
10 - Normal	25	49	11	8	12,5	26,5
20 - Modifié	31	44	5	13	10	26,5
30 - Durcissement rapide	14	58	11	8	22	—
40 - Faible dégagement de chaleur	46	28	5	13	8,5	25,5
50 - Résistant aux sulfates	38	41	4	10	10,5	26,5

Le ciment est un liant hydraulique. Pendant la prise, le durcissement est dû au seul effet de l'eau par réaction avec le produit de base et formation d'hydrate stable.

Une des réactions qui se produit est la suivante :



L'évolution de la prise d'un ciment Portland est la suivante :

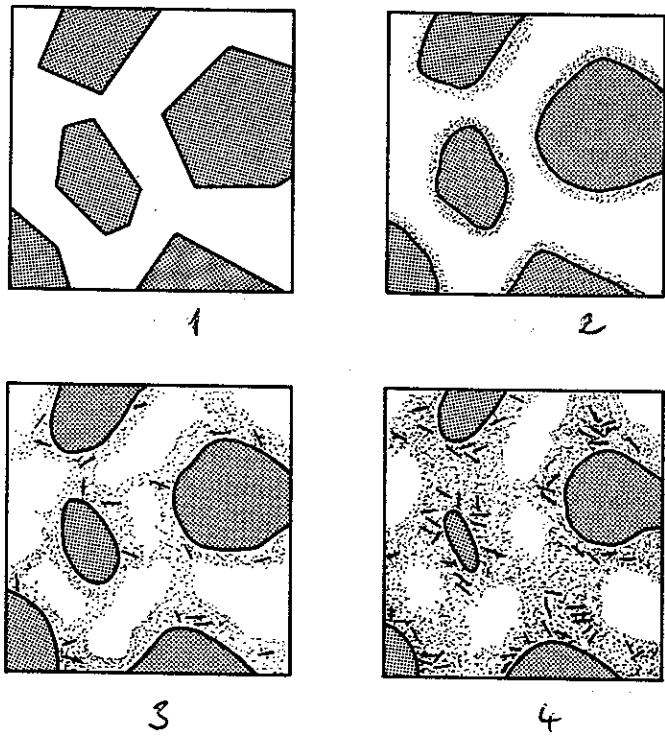
1) Au moment du mélange (le gâchage), les grains de ciment sont mouillés et dispersés dans l'eau. Des forces de répulsion s'exercent entre les grains, la pâte est visqueuse et peut se mettre en place.

2) À la périphérie des grains et grâce à la réaction avec l'eau un gel colloïdal formé d'hydrate apparaît.

3) Ce gel s'épaissit et finit par assurer une liaison continue entre tous les grains, c'est le début de la prise.

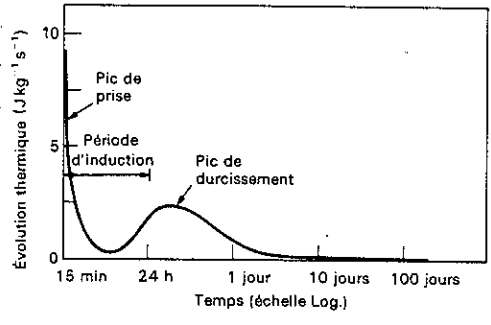
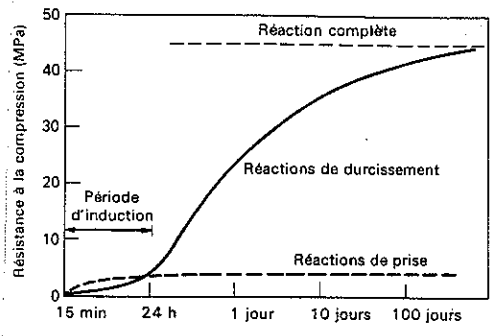
4) En même temps, le développement du gel se ralentit (il faut que l'eau de gélification diffuse à travers le gel déjà formé). Il y a formation de cristaux de composés hydratés.

Ceci est résumé sur la figure ci-après :



le ciment Portland est plus résistant que le ciment de pouzzolane parce que le gel se forme dans la masse du matériau et pas seulement à la surface des grains de cendre.

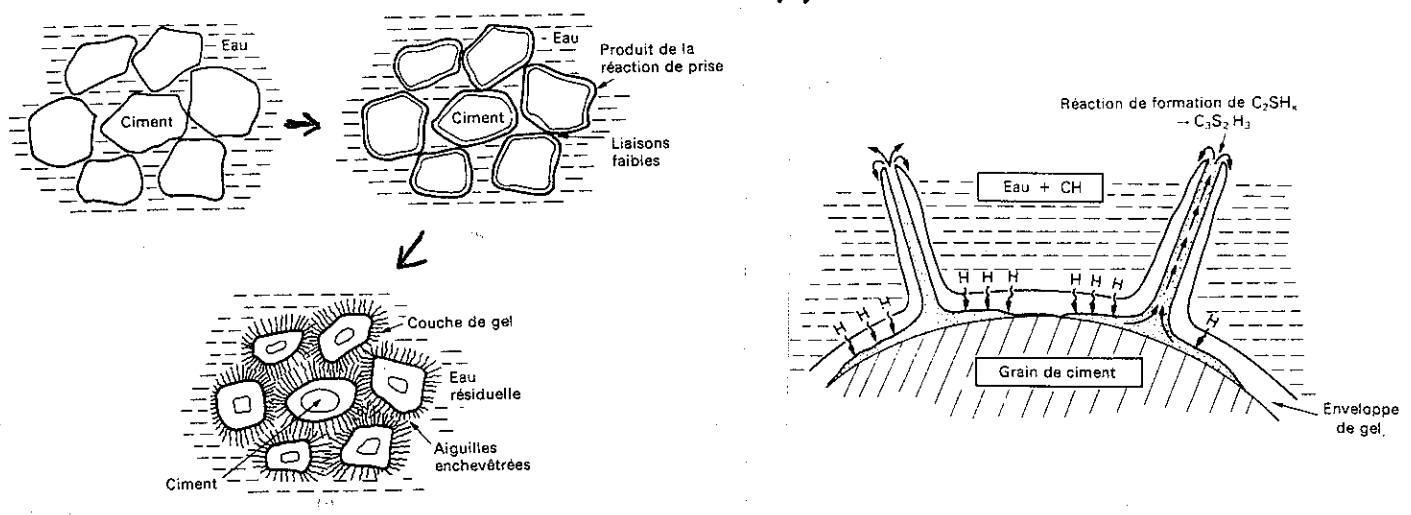
l'évolution de la résistance au cours de la prise est présentée ci-après



la réaction libère une quantité de chaleur notable qui doit être contrôlée.

la cristallisation des hydrates cristallins s'effectue en aiguille qui rayonnent autour du grain de ciment.

Cette cristallisation est présentée sur la figure ci-dessous:



la première enveloppe d'hydrate autour des grains de ciment, qui produit la prise, agit également comme une membrane semi perméable à l'eau. Cette eau pénètre dans l'enveloppe en raison de la forte concentration en calcium à l'intérieur (osmose) et la pression monte dans l'enveloppe (c'est la période d'induction de la figure précédente).

Il y a formation de l'enveloppe et formation de petits jets d'une solution très concentrée en C_3S et C_2S . En périphérie du jet, un tube d'hydrate $C_3S_2H_3$ se forme peu à peu. Le liquide monte à l'intérieur sous l'effet de la pression osmotique et réagit enfin avec l'eau environnante à l'extrémité du tube.

Le tube agit jusqu'à épuisement de l'eau de gâchage.

La vitesse de cette réaction est contrôlée par la diffusion de l'eau à travers la couche de gel. Elle est donc thermiquement selon une loi d'Arrhenius.

→ Augmenter la température permet d'accroître la vitesse de prise.

$$N = N_0 e^{\frac{-E}{RT}}$$

Ciments à haute teneur en alumine:

Il est constitué essentiellement de C_3A et très peu de C_2S et de C_3S .
 Son intérêt réside dans sa vitesse de durcissement: il fait en un jour
 ce que fait en un mois un ciment Portland.



Sa teneur à long terme est problématique. Il peut se décomposer en
 C_3AH_6 plus stable. Cette décomposition est favorisée dans des conditions chaudes
 et humides. Elle s'accompagne d'un retrait volumique qui crée des porosités
 et provoque une chute drastique de résistance mécanique.

3. Structure du ciment et adjuvants:

La structure d'un ciment Portland est poreuse. Les pores sont de
 tailles variables: ~~de~~ 100 nm entre les particules de gel et plus gros (100 à 1000 nm)
 entre les anciens grains de ciment. Les pores sont remplis d'eau.

Il existe aussi d'autres pores exempts d'eau qui sont des bulles d'air
 emprisonnées pendant le gâchage.

Des adjuvants sont utilisés pour modifier la cinétique de prise et faciliter
 l'incorporation de petites bulles d'air.

Accélérateur de durcissement: $CaCl_2$

Il augmente la vitesse d'hydratation de C_3A et C_3S . Son effet dépend de sa
 concentration et de la température.

15% de $CaCl_2$ permet d'augmenter la vitesse de prise de 50%.

Cependant la présence de $CaCl_2$ augmente la vitesse de corrosion de l'acier
 d'armatures noyé dans le béton.

Retardateurs de prise: acide hydroxycarboxylique:

Ils retardent la précipitation de composés hydratés et par conséquent la formation de gel autour des particules de ciment.

L'action de ces retardateurs est fonction de la température de la masse et de la granulométrie du ciment.

Réducteurs d'eau (plastifiant)

Ces adjuvants sont adsorbés à la surface des grains de ciment et augmentent les forces de répulsion entre eux. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser autant d'eau pour les gâcher ce qui permet d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques.

Entraîneurs d'air:

L'air entraîné intentionnellement au moment du gâchage se retrouve sous forme de très petits bulles ($\phi < 100 \mu\text{m}$).

Contrairement aux gros bulles ($\phi > 300 \mu\text{m}$) qui doivent être éliminées par vibration, ces petits pores ont de rose d'expansion lorsque l'eau contenue dans les capillaires du béton gèle.

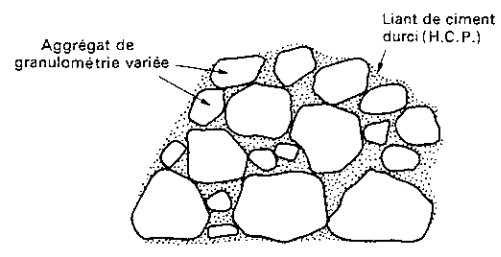
Cependant la présence de ces petits pores diminue sensiblement la résistance du béton.

Ces entraîneurs d'air sont des agents mouillants.

On obtient la meilleure protection contre le gel avec des concentrations d'air d'environ 5% en volume.

4. le béton :

Le béton est un mélange de gravier et de sable lié par du ciment. Par comparaison avec d'autres matériaux, le ciment est peu coûteux, mais l'agrégat est encore meilleur marché.



Il est ainsi tentant d'augmenter au mieux la quantité d'agrégat. Expérimentalement le meilleur compromis consiste à utiliser un mélange 60% - 40% de sable et de gravier.

La résistance mécanique du ciment Portland dépend de son âge et de sa masse volumique. La résistance mécanique augmente au cours de l'année mais c'est encore (lentement) au bout d'un an.

Trop d'eau dans le ciment donne une masse volumique faible et des propriétés médiocres. Un rapport eau / ciment de 0,5 constitue un bon compromis bien que 0,38 soit suffisant au niveau de réactions chimiques.

Le module d'Young de la pâte de ciment varie avec la masse volumique selon :

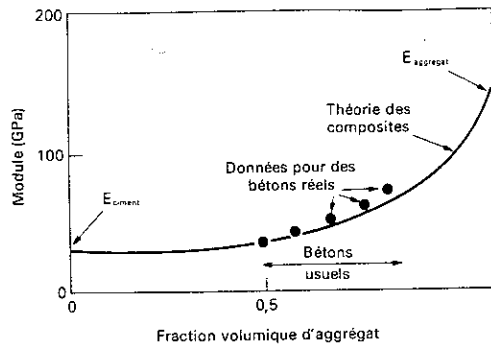
$$E/E_s = (P/P_s)^3$$

E_s, P_s : caractéristiques du gel de tobermorite (32 GPa et 2,5 Mg m⁻³)

Pour le béton qui contient des graviers dont le module d'Young est 3 à 4 fois plus élevé que celui de la pâte, son module d'Young s'estime par :

$$E_{\text{béton}} = \left(\frac{V_A}{E_A} + \frac{V_P}{E_P} \right)^{-1}$$

V_A, V_P fraction volumique de l'agrégat et de la pâte.



la tenacité d'un béton est faible $0,5 \text{ MPa m}^{1/2}$. la résistance à la traction est très faible (pour le gel de cohésion elle est de 4 MPa , pour le béton elle peut être encore plus faible).

le béton est donc toujours sollicité en compression.

le module de Weibull est de l'ordre de 12 et peut descendre à 8 si la mise en forme n'est pas exactement réalisée.

la résistance à la compression est donc sujette à une grande variabilité. En moyenne cette résistance tourne autour de 30 MPa .

le comportement à la compression d'un béton suit les étapes suivantes :

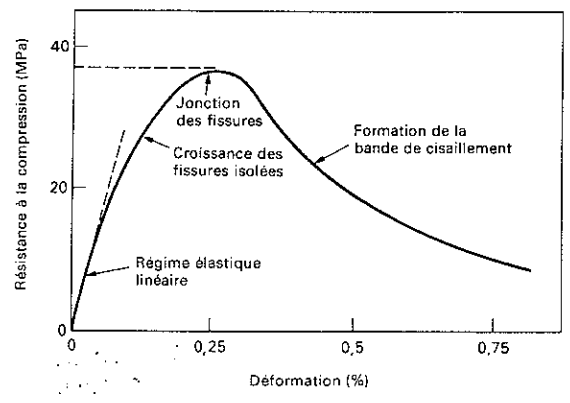
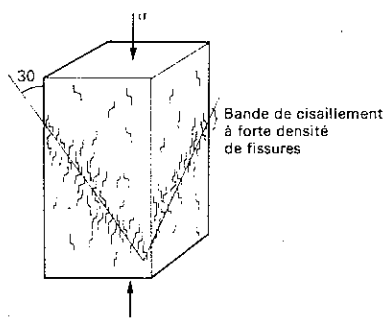
1) avant tout chargement, le ciment ou le béton contient des fissures dues à la porosité, la consolidation incomplète ou le retrait.

2) sous faible contrainte, le matériau est élastique linéaire, avec un module de l'ordre de $30 \sim 50 \text{ GPa}$. Même sous ces faibles contraintes, de nouvelles petites fissures germent aux interfaces entre agrégat et ciment.

3) À partir de 50% de la contrainte maximum d'écrasement, les fissures se propagent de manière stable, conduisant à une courbe contrainte - déformation qui continue de monter.

4) À partir de 90% de la contrainte maximum, certains fissures deviennent instables et continuent à croître sous charge constante, rejoignant leur voisine.

Une surface de fracture se développe faisant un angle de 30° avec l'axe de compression. la contrainte passe par son maximum puis recroissent, parfois mentalement, le plus souvent en progressivement.



Vieillessement.

Le béton présente un pH naturel voisin de 13.

Les valeurs techniques dépendent étroitement de la teneur en alcalin du ciment.

lorsque le béton est armé par de l'acier, des précautions doivent être prises pour éviter toute corrosion des armatures. Uniquement cela est réalisé en voyant les armatures métalliques à plus de 2 à 3 cm de la surface.

D'autre part lorsque les sables et les graviers présentent des traces de silice libre aux impuretés, il y a risque de réaction acido-basique entre cette silice et les alcalins basiques. C'est l'alcali-silice réaction.

Elle se produit lentement. Il y a précipitation de composés de silicium, de calcium et d'alcalin et d'eau. Cela provoque le gonflement du béton ce qui peut être dommageable pour la construction.

Depuis que cette réaction a été mise en évidence des précautions ont été prises notamment sur le choix des aggrégats.

Actuellement en France on estime qu'un parc de bâtiment d'une valeur de plus de 2 milliards de francs est menacé par cette réaction.

Bien en savoir plus: "La Recherche" N° 319 Août 1999 - pages 43-47.

