



HAL
open science

Ciments et Bétons: principes, technologie et industrie

Sylvie Masse

► **To cite this version:**

Sylvie Masse. Ciments et Bétons: principes, technologie et industrie. Les Dossiers de la Galerie, 1993, 3, pp.2-6. hal-02321188

HAL Id: hal-02321188

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02321188>

Submitted on 24 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

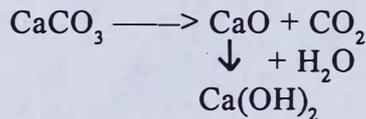
CIMENTS ET BETONS : PRINCIPES, TECHNOLOGIE ET INDUSTRIE

par Sylvie Masse

E.S.C.P., laboratoire de Physique thermique

Les origines historiques

L'un des premiers liants employé dans l'art de la construction a été la chaux grasse, utilisée sans doute depuis près de 10 000 ans. Les Etrusques, les Phéniciens puis les Grecs et les Romains s'en servirent pour leurs travaux de maçonnerie. Cette chaux, obtenue par cuisson de roches calcaires, puis extinction de la chaux vive avec de l'eau, donne l'hydroxyde de chaux, ou chaux grasse; son durcissement ne peut s'effectuer que par carbonatation à l'air, ce qui la transforme en calcite, ou chaux aérienne.



Les Romains mélangeaient cette chaux avec du sable ou des cendres volcaniques riches en silice. Ils obtenaient ainsi des liants capables de durcir sous l'eau. Ils furent donc les premiers, semble-t-il, à fabriquer des liants hydrauliques.

C'est au XVIII^e siècle que les premières recherches sur les chaux hydrauliques ont commencé. En 1793, SMEATON découvre que des calcaires impurs contenant quelques pourcents d'argile résistent mieux que la chaux pure et peuvent durcir lentement sous l'eau. Plus tard, en 1818, Louis VICAT met en évidence les propriétés hydrauliques de tels mélanges. En 1824, Joseph ASPDIN dépose en Grande-Bretagne le brevet de fabrication d'un matériau, obtenu à partir d'un mélange de chaux et d'argile, qu'il nomme "ciment Portland". C'est l'aspect présenté par ce liant durci, rappelant celui de la pierre calcaire de l'île de Portland, qui est à l'origine de cette appellation.

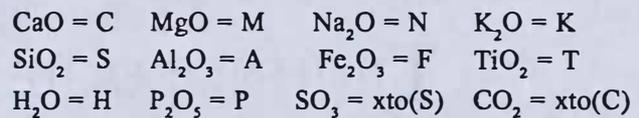
* * * *

Les liants hydrauliques

On appelle liant hydraulique un matériau, obtenu par mélange d'une poudre anhydre et

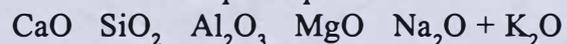
d'eau, qui manifeste des propriétés de cohésion mécanique et de résistance après passage par un phénomène dit de prise, et qui résiste alors à l'action de l'eau. Le plâtre et le ciment sont des exemples de liants hydrauliques. Le gâchage est le nom donné à l'opération de mélange de la poudre anhydre avec l'eau.

Dans ce qui suit, nous allons adopter la nomenclature des cimentiers. Nous donnons ci-dessous les équivalences concernant la formulation:

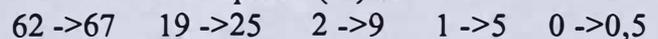


Le ciment Portland s'obtient par broyage de clinker et de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (3 à 6 %). Le clinker résulte de la cuisson à environ 1450°C de calcaire (80%) et d'argile (20%). Les constituants principaux sont les oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium et de fer. On donne à titre indicatif la composition chimique moyenne d'un clinker :

Éléments principaux :



Teneur en poids (%) :



L'observation d'un grain de clinker au microscope optique montre la présence de quatre phases .

- L'alite, qui représente 50 à 70% du clinker de ciment Portland ordinaire, renferme du silicate tricalcique Ca_3SiO_5 , encore noté C_3S selon la nomenclature des cimentiers, et des impuretés cationiques telles que Mg^{2+} , Al^{3+} ou Fe^{3+} . Cette phase réagit immédiatement au contact de l'eau, et c'est elle qui impose sa cinétique à la réaction d'hydratation du clinker.

- La bélite, qui représente 15 à 30% du clinker de ciment Portland ordinaire, se compose majoritairement de silicate dicalcique Ca_2SiO_4 , ou C_2S , et renferme également une certaine quantité d'ions étrangers. La cinétique d'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente

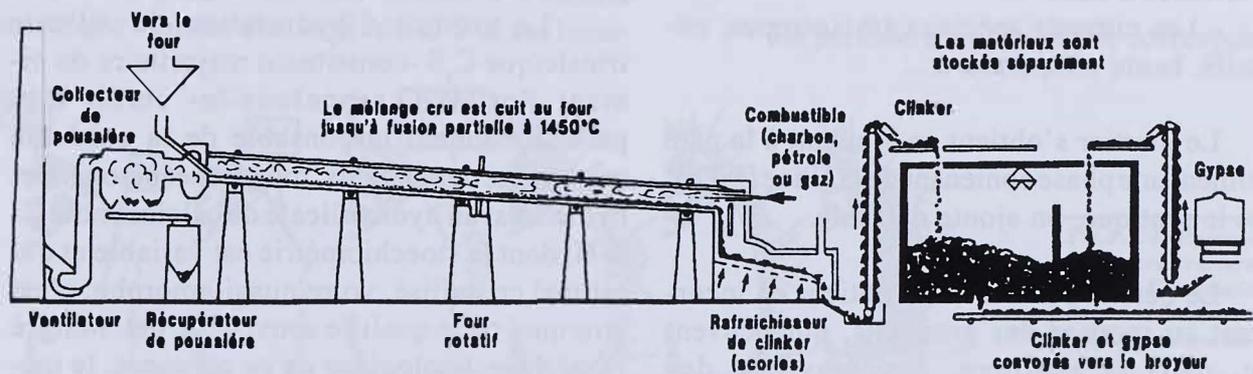


Fig. 1.- Schéma du procédé de cuisson du clinker. (d'après Portland Association, 1969)

que celle du C_3S .

- La phase aluminat, qui représente 5 à 10% du clinker de ciment Portland ordinaire, est constituée d'aluminat tricalcique $Ca_3Al_2O_6$, ou C_3A , et d'ions étrangers comme Si^{4+} , Fe^{3+} , Na^+ ou K^+ . Cette phase réagit assez rapidement avec l'eau ; elle peut être responsable d'une prise précoce du ciment, malgré l'adjonction d'un agent régulateur comme le gypse.

- Enfin, la phase ferrite, qui représente 5 à 15% du clinker de ciment Portland ordinaire, est constituée d'aluminoferrite tétracalcique Ca_2AlFeO_3 , ou encore C_4AF , dont la composition est modifiée par la variation du rapport Al/Fe et par l'incorporation d'ions étrangers. Sa vitesse de réaction avec l'eau est variable; elle dépend en particulier de la composition. Généralement élevée au début de l'hydratation, elle est ensuite intermédiaire entre celle de l'alite et celle de la bélite.

La fabrication du clinker passe par plusieurs étapes :

- L'extraction de la matière première en carrière (argile et chaux).
- La préparation.
- La cuisson à $1450^{\circ}C$.
- Le broyage.
- Le conditionnement.
- Le transport.

Plusieurs procédés de fabrication sont possibles :

- Par voie humide : le matériau se présente, avant cuisson, sous forme d'une pâte liquide.
- Par voie semi-humide : la pâte liquide est

essorée.

- Par voie semi-sèche : la poudre est au préalable humidifiée afin de former des granulés.

- Par voie sèche : le matériau est sous forme de farine crue.

De nos jours, on apporte deux modifications essentielles au procédé de fabrication :

- Pendant le broyage du clinker, introduction du gypse qui joue le rôle de régulateur de prise.

- Cuisson à plus haute température afin d'obtenir un matériau plus résistant à long terme.

D'autres améliorations ont été apportées grâce à l'apparition de nouveaux matériels comme les fours rotatifs et les broyeurs à boulets.

Il existe plusieurs sortes de ciments :

- Le Ciment Portland Ordinaire (CPO), qui a été décrit plus haut, est de teinte grise.

- Le ciment blanc est obtenu à partir d'un clinker qui ne contient pas d'oxydes métalliques (Fer,...etc) responsables de la classique coloration grise du CPO. Le ciment blanc possède les mêmes propriétés que le ciment gris ; il n'en diffère que par la couleur.

- les ciments alumineux sont essentiellement constitués d'aluminat monocalcique CA. Ils manifestent des propriétés remarquables : la prise est toujours lente, mais le durcissement est très rapide. De plus, l'alumine Al_2O_3 qu'ils contiennent s'allie à certains agrégats judicieusement choisis pour conduire à des bétons réfractaires pouvant supporter des températures

supérieures à 1200°C.

- Les ciments spéciaux (thixotropes, expansifs, haute température....

Le mortier s'obtient en ajoutant à la pâte de ciment une phase contenant de la silice (SiO₂); dans la pratique, on ajoute du sable.

Le béton, quant à lui, s'obtient en incorporant au mortier des granulats, qui peuvent être, dans la pratique, des graviers, des cailloux....

Le plâtre est un semi-hydrate de sulfate de calcium: CaSO₄.1/2 H₂O. On l'obtient en chauffant le gypse CaSO₄.2 H₂O, qui perd alors une partie de son eau de cristallisation. Gâché avec de l'eau, il durcit et devient un liant hydraulique qui présente cependant de faibles résistances mécaniques.

* * * *

L'hydratation du ciment

Les réactions du ciment et de l'eau sont nombreuses et complexes. En effet, les quatre phases constitutives du clinker ont chacune leur propre mécanisme et leur propre cinétique d'hydratation. Certaines de ces phases, ayant des réactivités voisines vis-à-vis de l'eau, vont entrer en compétition. D'autre part, les impuretés, les adjuvants et les ajouts contenus dans le ciment "prêt à l'emploi" donnent naissance à des réactions parallèles, voire parasites, qui compliquent encore le processus d'hydratation. Le ciment hydraté est un matériau vivant, qui évolue très rapidement dans les premiers instants de l'hydratation, puis de plus en plus lentement...mais sans fin.

Aujourd'hui, nous sommes en mesure de dire que, lors de l'hydratation du ciment, il y a formation d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ parfaitement cristallisé que l'on appelle "portlandite", d'un gel quasi-amorphe de silicate de calcium hydraté et d'un hydrate d'aluminate de calcium plus ou moins bien cristallisé; ces deux dernières espèces étant pratiquement insolubles dans l'eau, les phénomènes de prise et de bonne résistance des ciments en

présence d'eau se voient donc justifiés.

Le produit d'hydratation du silicate tricalcique C₃S -constituant majoritaire du ciment Portland, rappelons-le- serait tout particulièrement responsable de la cohésion mécanique des ciments, mortiers et bétons. Cet hydrate est un hydrosilicate de calcium noté C-S-H, dont la stoechiométrie est variable et qui est mal cristallisé, voire quasi-amorphe; c'est pourquoi on le qualifie souvent de gel. Malgré l'intérêt technologique de ce composé, le mécanisme et la cinétique de sa formation, ainsi que sa structure sont encore sujets à réflexion.

La réaction d'hydratation du C₃S se déroule en cinq étapes :

- 1) Une période de pré-induction.
- 3) Une période d'accélération.
- 4) Une période de décélération.
- 5) Une période de diffusion.

- La période de pré-induction débute pendant le mélange et ne dure que quelques minutes. Du point de vue structural, elle correspond à la formation d'une première couche de gel de C-S-H qui enveloppe les grains de C₃S anhydre. Les concentrations en ions Ca²⁺

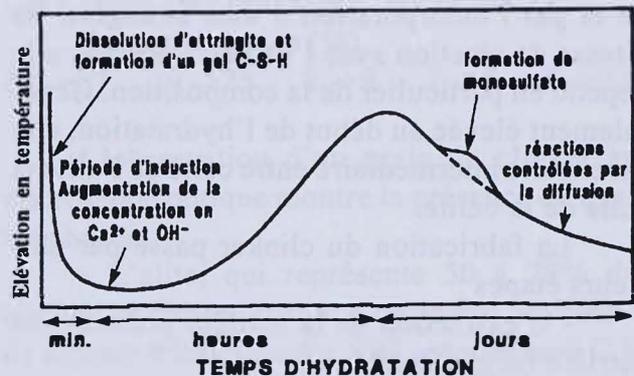


Fig. 2. - Diagramme schématique de l'hydratation du ciment Portland.

et OH⁻ passés en solution augmentent mais n'atteignent pas encore la sursaturation.

- La période d'induction, appelée encore "période dormante" (car macroscopiquement, il ne semble rien se passer), peut durer plusieurs heures à la température ambiante. En réalité, quoiqu'elle soit caractérisée par une faible acti-

vité, il se passe bien des choses à l'échelle atomique : tandis que le gel de C-S-H est lente-

- La période d'accélération correspond à

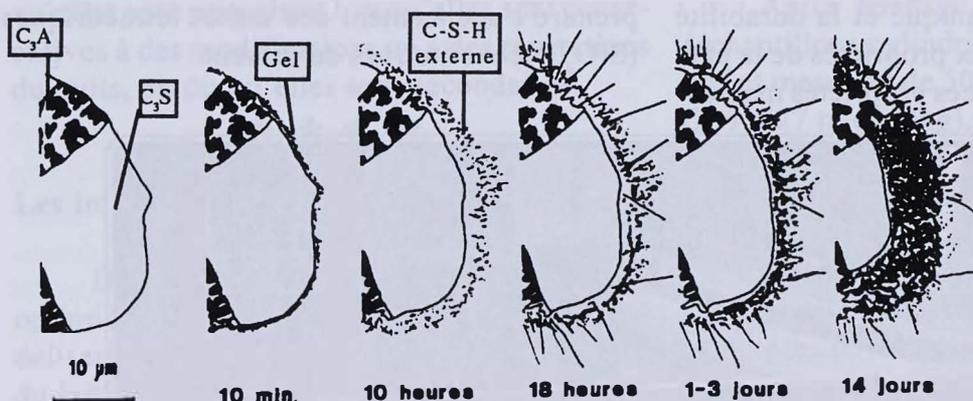


Fig. 3.- Développement de microstructures pendant l'hydratation du ciment Portland. (Cf. explications dans le texte).

ment précipité, les concentrations en ions Ca^{2+} et OH^- continuent d'augmenter, jusqu'à une valeur critique de sursaturation, à partir de laquelle la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ commence à précipiter. On observe alors un redémarrage de la vitesse, marquant la fin de la période d'induction. A ce stade, peu de C_3S est hydraté.

la période d'hydratation la plus rapide. De la portlandite solide cristallise à partir de la solution, tandis que le gel de C-S-H se dépose dans l'espace intergrain disponible. Les hydrates s'enchevêtrent. Le réseau devient plus cohésif. C'est à ce moment seulement que le matériau commence à manifester des propriétés de résistance.

Du fait du dépôt des hydrates dans l'espace libre, la porosité du matériau chute, ce qui s'ajoute à l'effet d'enchevêtrement des C-S-H pour augmenter la résistance. La membrane gélatineuse formée par les C-S-H fait obstacle au passage des espèces ioniques et de l'eau, bloquant ainsi le processus d'hydratation : on entre dans la phase de décélération.

- Les périodes d'accélération et de décélération sont regroupées sous le terme de prise, laquelle prise peut durer plusieurs jours dans des conditions normales.

- Enfin, surviennent les phénomènes diffusionnels. Alors que l'hydratation se poursuit à une allure modérée, la résistance du matériau augmente. Aucun changement structural majeur ne semble se produire, mais on observe la polymérisation des anions silicates. Le ciment étant un matériau qui évolue indéfiniment dans le temps, la durée de cette période n'est pas délimitée. Cette période correspond au stade du durcissement.

* * * *

Durcissement du ciment

Les liants hydrauliques tels que les mor-

Réactivité du clinker	Disponibilité des sulfates en solution	Temps d'hydratation		
		10 mn	1 h	3 h
		Recristallisation d'ettringite		
Faible	Faible	Malléable	Malléable	Durci
Forte	Forte	Malléable	Durci	Durci
Forte	Faible	Monosulfate dans les pores Durci	Durci	Durci
Faible	Forte	Gypse dans les pores Durci	Durci	Durci

Fig. 4.- Diagramme montrant schématiquement le développement de structures pendant le durcissement du ciment Portland, en fonction de la réactivité du clinker et de la disponibilité des sulfates.

tiers et les bétons sont largement utilisés dans la construction des ouvrages du Génie civil (ponts, bâtiments, barrages, Travaux publics, etc).

La résistance mécanique et la durabilité de ces liants sont liées aux propriétés de la pâte de ciment originelle. Or, ces propriétés macros-

copiques sont elles-mêmes liées à la microstructure des hydrates formés lors de la réaction d'hydratation. Il importe donc de mieux comprendre l'agencement des unités tétraédriques $(SiO_4)^{4-}$ constitutives du ciment.

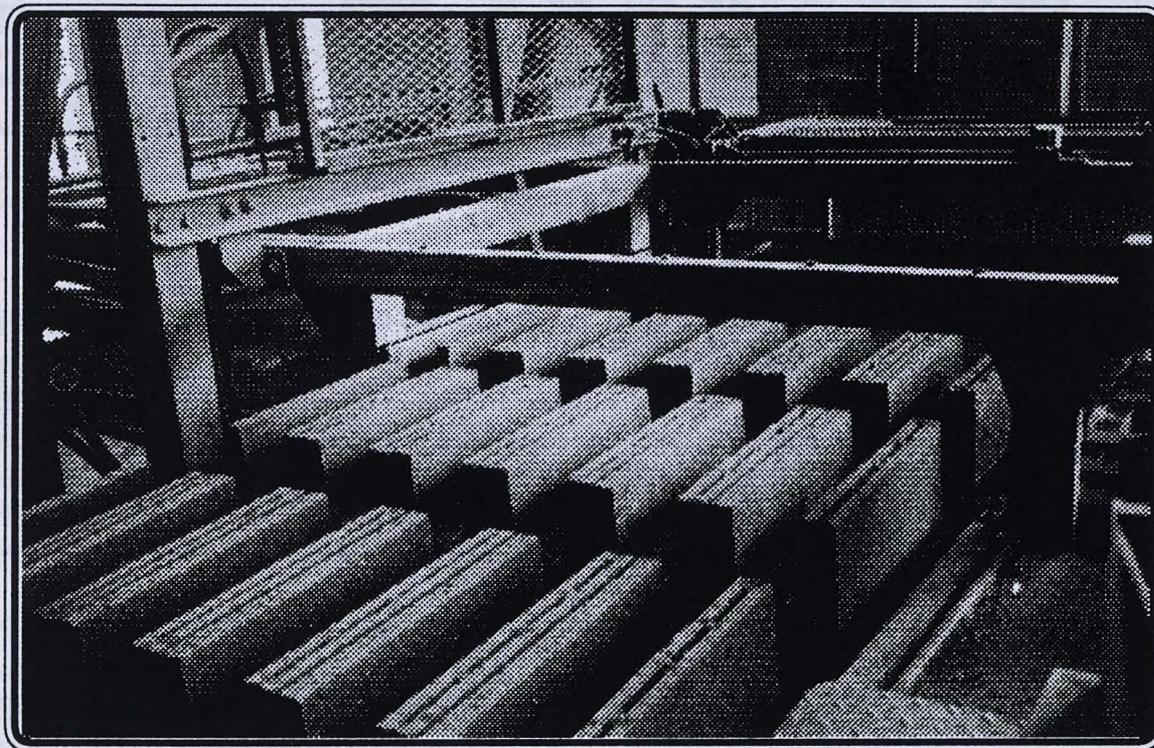


Fig. 5 - Le béton dans l'une de ses applications qui a révolutionné la construction : le parpaing. Fournée de parpaings sur la chaîne de production.