

# Dix milliards de tonnes par an de béton

## De la chimie à l'ouvrage

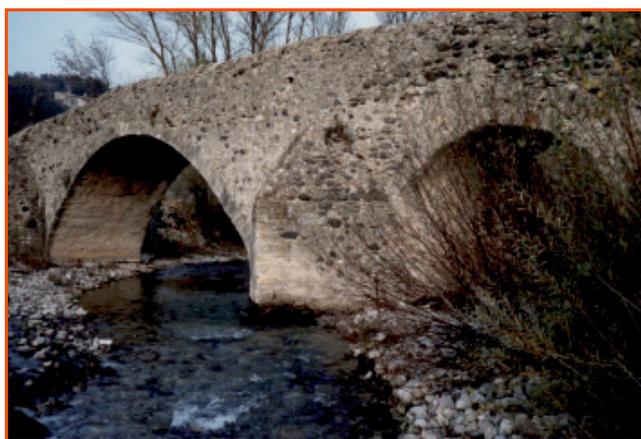
Philippe Pichat

**Résumé** Le béton peut être considéré comme un produit chimique composite. Employé dans l'habitat et nombre d'infrastructures, ce matériau participe largement au développement urbain rapide. Pour répondre aux constantes demandes des utilisateurs, la chimie et le génie des procédés contribuent à l'amélioration de ses caractéristiques finales et à la diminution de ses contraintes de fabrication et d'utilisation.

**Mots-clés** Béton, ciment, chaux, agrégat, adjuvant, chimie, génie des procédés, innovation.

**Abstract** **Ten billions of tons of concrete every year**  
Concrete is a composite material enabling the construction of buildings and infrastructure ever more essential to a rapidly urbanizing world. Chemistry and chemical engineering have greatly improved the final characteristics of concrete, reducing the limitations on its use in construction, despite builders' constantly escalating requirements.

**Keywords** Concrete, cement, lime, aggregate, admixture, chemistry, chemical engineering, innovation.



Du béton performant... pendant plus de deux mille ans ! (photo : P. Pichat).

Le béton est un matériau synthétique constitué d'agréments (sable, cailloux) réunis entre eux au moyen d'un liant [1-2]. Il est moins connu que les sciences et techniques chimiques qui ont eu, ont, et auront sans doute un rôle essentiel pour expliquer ses propriétés et pour les faire évoluer. C'est la raison de cet article.

Notre vie quotidienne bénéficie d'ouvrages en béton aux fonctions variées : habitat individuel et collectif ; production, stockage et distribution de biens y compris l'énergie ; transport (routes, ponts, tunnels, parkings, chemins de fer, canaux, ports) ; soins médicaux ; enseignement, formation et recherche ; loisirs, sports ; administration publique.

Ces ouvrages font largement appel au béton, compte tenu des propriétés qu'il offre : plasticité initiale permettant de construire des ouvrages de formes adaptées aux besoins ; résistances mécaniques élevées ; isolation thermique, phonique, tenue au feu ; imperméabilité à l'eau ; durabilité.

Une caractéristique remarquable du béton est la flexibilité – non seulement technique, mais aussi économique – avec laquelle il est capable de remplir ces fonctions d'usage. En d'autres termes, le béton offre des rapports performances/coûts adaptables aux besoins.

### Historique

À l'époque romaine, la vie quotidienne bénéficiait déjà d'ouvrages en béton dont la pérennité n'est plus à prouver ; c'est ainsi que dans le département du Gard, à Sommières, la RN 110 utilise un pont romain qui a environ deux mille ans ! Le béton romain était fabriqué avec de la chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) mélangée à un pulvérulent siliceux ( $\text{SiO}_2$ ) (cendres volantes issues d'un volcan...) et de l'eau. Suite aux invasions barbares des III<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> siècles et à la désagrégation de l'Empire romain, ce savoir-faire fut ensuite perdu pendant de nombreuses générations.

L'utilisation de houille début XIX<sup>e</sup> permit de porter à 1 450 °C un mélange spécifique de calcaire et d'argile (aluminosilicate) que l'on trouvait en particulier à Portland (Angleterre) et d'obtenir un silicate tricalcique,  $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ , le principal constituant du ciment « Portland ». Son emploi est plus souple que celui du ciment romain et c'est avec lui que sont fabriqués actuellement la majorité des bétons, d'autant plus que la résistance à la flexion peut-être améliorée par des armatures en acier. Le succès du béton doit aussi beaucoup à d'autres produits issus des sciences et techniques chimiques : les « adjuvants », des réactifs chimiques qui à faible dose améliorent sensiblement les caractéristiques du béton.

### Enjeux économiques et principaux acteurs

Les utilisations du béton rappelées précédemment concernent les collectivités, les entreprises comme les

particuliers. Au total, environ dix milliards de tonnes de béton fabriquées à partir de deux milliards de tonnes de ciment Portland sont utilisées dans le monde par des entreprises internationales telles que Holcim, Cemex, Lafarge, Itali Ciment-Italia. Un béton peut contenir jusqu'à 30 % de ciment.

En 2006, en France, 43 millions de m<sup>3</sup> de béton prêt à l'emploi ont été utilisés, ainsi que deux millions de tonnes de fer à béton pour les ouvrages d'art (~ 100 kg/m<sup>3</sup>) et 100 000 tonnes d'adjuvants (~ 0,2 kg/m<sup>3</sup>).

Le tableau suivant donne un aperçu du prix indicatif de ses différents composants :

Agrégats	Ciment Portland	Acier	Adjuvants	Béton prêt à l'emploi
7-30 €/t	100 €/t	500 €/t	800 €/t	80 €/m <sup>3</sup>

## Le béton : « comment ça marche ? »

### Concepts

Il est coûteux au point de vue main d'œuvre de « monter » un mur avec des pierres qui doivent être préalablement choisies, préparées, voire taillées. Il est moins coûteux et plus rapide de couler un béton obtenu en mélangeant agrégats, ciment et eau en une pâte plastique restant déformable un certain temps. Cette propriété de plasticité permet de mettre en place cette pâte dans des moules où elle durcit progressivement et devient une roche synthétique proche des « poudingues » que l'on trouve dans la nature.

Les agrégats peuvent être :

- des « cailloux », lorsqu'ils ont des dimensions de l'ordre du cm ;
- des sables, lorsqu'ils ont des dimensions de l'ordre du mm ;
- des « fillers », appelés plus communément fines, lorsqu'ils ont des dimensions de l'ordre du micron.

Ils sont généralement utilisés simultanément dans des proportions qui seront indiquées dans la suite du texte.

La fabrication d'un béton implique la maîtrise de réactions physico-chimiques qui ont lieu à l'échelle microscopique et macroscopique, c'est-à-dire à l'échelle de l'ouvrage.

### Mécanismes et réactifs physico-chimiques

Deux types de liants sont principalement utilisés : le ciment romain, obtenu avec une chaux, et le ciment Portland.

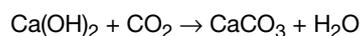
#### La chaux

##### • Chaux aériennes

La chaux dite « vive » est obtenue en chauffant un calcaire à une température de l'ordre de 900 °C. La réaction peut être représentée par l'équation :



La chaux durcit au contact du gaz carbonique contenu dans l'air, d'où son nom de « chaux aérienne ». Il y a reformation du carbonate de calcium à l'origine de la chaux :



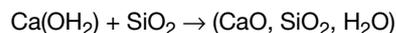
Ce liant présente un certain nombre d'inconvénients :

- il n'est pas facile d'hydrater complètement les particules de chaux vive CaO en Ca(OH)<sub>2</sub>, contrairement à ce que l'on pourrait croire. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, dans l'ouvrage monolithique, la chaux vive s'hydrate à retardement en

hydroxyde de calcium (CaO + H<sub>2</sub>O → Ca(OH)<sub>2</sub>) et augmente de volume, en causant une pression importante qui provoque des fissurations dans le béton ;

- la vitesse de durcissement sous l'influence du gaz carbonique de l'air est lente, particulièrement si la masse de béton est épaisse.

Ainsi qu'évoqué précédemment, les Romains, en ajoutant à de la chaux éteinte des cendres volantes siliceuses provenant de volcans, fabriquèrent un liant minéral hydraulique, capable de faire prise à l'abri de l'air et même sous l'eau. On peut représenter la réaction par l'équation :



Il y a formation de tobermorite (*figure 1*) que l'on trouve d'ailleurs aussi dans la nature, indice de stabilité.

La réaction est lente à des températures de l'ordre de 20 °C ; elle est par contre sensiblement plus rapide avec des températures de l'ordre de 30 °C que l'on trouve sur le bassin méditerranéen une partie de l'année. Un avantage considérable de ce liant est sa pérennité. Sur tout le territoire de l'ancien Empire romain, on trouve des ouvrages (ponts, aqueducs, réservoirs, égouts...) dans un état de conservation remarquable, y compris lorsqu'ils étaient en contact avec de l'eau, qu'elle soit non minéralisée, « minérale », salée, chaude, usée...

Au XX<sup>e</sup> siècle, la production d'énergie thermique au moyen de charbon très finement broyé, et non plus en morceaux, a eu pour résultat de rendre disponibles des quantités considérables de cendres volantes, plus de 500 millions de t/an dans le monde. Ce sont de très fines particules ayant une composition similaire à celle d'une cendre volante de volcan. Le handicap du béton romain (faible vitesse de prise), obtenu en mélangeant des cendres volantes avec de la chaux, devient un avantage en technique routière : il permet de « reprendre » pendant quelques jours une chaussée mise en place sans endommager les propriétés du béton [3].

#### Le ciment Portland

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, plus particulièrement en Angleterre, on trouvait du charbon de qualité, capable de fournir des températures beaucoup plus élevées que celles rencontrées auparavant avec du bois. En chauffant ainsi un mélange de

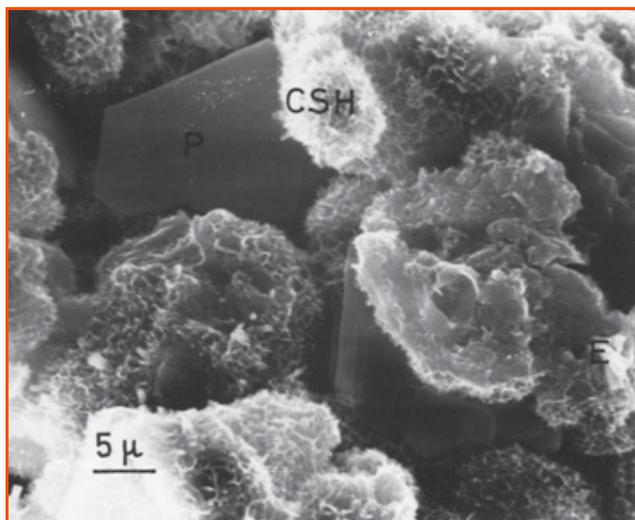
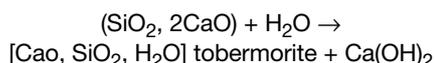
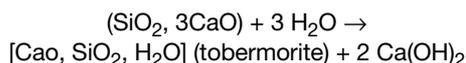
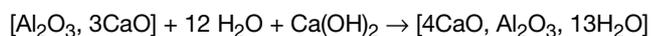


Figure 1 - Tobermorite (photo prise au microscope électronique à balayage).

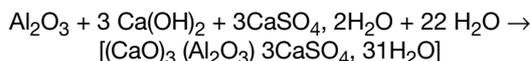
calcaire et d'argile (silice, alumine, oxyde de fer), on obtient, à environ 1 450 °C, des blocs de « clinker » (pierre artificielle) très différent du produit pulvérulent (la chaux) obtenu en calcinant le calcaire. La production de 1 kg de clinker nécessite environ 800 kcal et s'accompagne d'un rejet dans l'atmosphère d'environ 0,5 kg de CO<sub>2</sub>. Il se forme du silicate tricalcique (CaO)<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub> et, dans une plus faible proportion, du silicate bicalcique (CaO)<sub>2</sub> SiO<sub>2</sub>, un aluminoferrite tétracalcique Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4CaO, un aluminat tricalcique Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (CaO)<sub>3</sub>. En concassant, puis en broyant finement ce clinker, on dispose d'une colle capable de faire prise, à l'abri de l'air et même sous l'eau. Effectivement, au contact de l'eau, ces composés donnent naissance à des molécules hydratées selon les réactions suivantes :



La chaux provenant de l'hydratation des silicates de calcium permet d'hydrater l'aluminat tricalcique en aluminat tétracalcique. On peut représenter la réaction par l'équation :



Ce liant initial avait un gros inconvénient : la vitesse de prise était difficilement reproductible car trop sensible aux conditions de travail (température, agitation...). Elle était soit lente, soit quasi immédiate, et il était alors difficile de mettre en place le béton qui était partiellement durci. On trouva qu'en ajoutant environ 4 % de gypse (sulfate de calcium hydraté, CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), la vitesse de prise se régulait. On explique cette action par la formation d'un sulfo-aluminat de calcium (ettringite) autour des particules de clinker, ce qui tempère la vitesse de la réaction. À cette dose, le gypse est consommé en 15-18 heures. On peut représenter la réaction par l'équation :



On trouve d'ailleurs de l'ettringite dans la nature, indice de sa faible solubilité.

### Topologies des réactions d'hydratation du ciment Portland et du ciment romain

Les réactions d'hydratation de ces deux ciments sont notablement différentes [4].

#### - Ciment Portland

Une particule de ciment Portland contient tous les éléments nécessaires pour produire des silicates hydratés, comme il a été vu précédemment. Les phénomènes d'hydratation se déroulent avec formation de pré-hydrates constituant une couche protectrice plus ou moins stable. Sa durée de vie est très variable : presque nulle par exemple en présence de chlorure de calcium, qui joue le rôle d'accélérateur, et longue avec les phosphates, borates, certaines matières organiques... qui jouent le rôle de retardateur.

Il en résulte une période dite « dormante » où apparemment rien ne se passe, mais qui permet la mise en place des mortiers et bétons.

La destruction de cette couche dormante peut provenir :  
- d'une modification lente de sa texture (par polycondensation de la silice dans le cas de silicates tricalciques + molécules d'eau) ;  
- d'une modification de son équilibre chimique avec la solu-

tion qui, elle, a évolué. C'est le cas de l'ettringite quand il n'y a plus de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en solution par suite de la formation de celle-ci. Dans les deux cas, la particule n'est plus enrobée par sa « couche protectrice » et sa réaction avec les molécules d'eau peut reprendre.

#### - Ciment romain

En présence de molécules d'eau, les réactions ont lieu entre des particules de nature chimique différente (silice, chaux) ; une particule seule ne peut pas donner le silicate de calcium hydraté. La silice ne contient pas de chaux, la chaux hydratée ne contient pas de silice ! En conséquence, au point de vue génie des procédés, un mélange très soigné est nécessaire et, toutes conditions égales par ailleurs, pendant une période plus longue qu'avec le ciment Portland. Il n'y a pas de « période dormante », mais les réactions sont si lentes que tout se passe lors des premières heures comme s'il n'y avait pas de réactions chimiques et, de ce fait, on a le temps de bien mettre en place le béton.

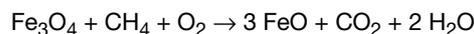
Par ailleurs, la relative simplicité du mélange initial et des réactions chimiques dont il est le siège évite la chaîne complexe d'interactions que l'on observe avec le ciment Portland. Cela pourrait être l'origine de la bonne pérennité du ciment romain.

Ces observations topologiques pourraient expliquer pourquoi le ciment Portland, contrairement au ciment romain, fait prise facilement, d'où son usage répandu auprès d'utilisateurs n'ayant pas reçu de formation technique poussée et non équipés pour effectuer des mesures. Une autre raison de son succès, par rapport au ciment romain, est une vitesse de prise plus élevée et moins sensible au froid.

### Les agrégats

Le ciment Portland est essentiellement mélangé à des granulats, pour des raisons économiques (coût de l'ordre de 100 €/t, prix des granulats de l'ordre de 10 €/t), mais aussi pour des raisons techniques puisque les retraits et expansions, qui ont lieu pendant le durcissement du ciment seul, prohiberaient son utilisation à l'état pur pour de nombreux usages.

Le ciment Portland est généralement gris. Pour les applications où il est apparent, on peut lui préférer du ciment blanc, obtenu en réduisant le Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> présent dans le clinker par du méthane, et dont le prix est sensiblement plus élevé que celui du Portland. La réaction partielle peut se représenter par l'équation simplifiée :



L'hydratation du ciment Portland conduit à la formation, pendant des années, de chaux libre dont la solubilité n'est pas négligeable (1,85 g/L). Lorsqu'un béton est au contact d'eau renouvelée (pluie par exemple), la chaux se dissout et un certain affaiblissement du béton se produit, ce qui le distingue du béton romain qui, toutes conditions égales par ailleurs, ne relâche pas de chaux libre.

Cette caractéristique du ciment Portland représente par contre un avantage lorsque le béton est armé de barres et/ou de fibres d'acier. En effet, l'acier a tendance à « rouiller », à se corroder, en quadruplant de volume au contact de l'oxygène, de l'humidité et du gaz carbonique de l'air. Cette tendance est combattue pendant des années par la chaux libre libérée lors de l'hydratation du ciment Portland, à condition que l'épaisseur et la compacité du béton soient telles que le gaz carbonique de l'air ait des difficultés à pénétrer le béton et à neutraliser la chaux. Mais à la longue, l'armature en acier peut finir par être corrodée et perdre ainsi ses qualités mécaniques [5]. La chaux libérée par l'hydratation du ciment

Portland peut être en partie fixée en tobermorite par l'addition des cendres volantes de charbon, ce qui a pour résultat d'améliorer les performances mécaniques du béton.

Au point de vue propriétés physiques, les agrégats (granulats) doivent résister à l'écrasement et à l'usure par frottement lors de la confection du béton par mélange. Ils doivent présenter par ailleurs une faible porosité.

Pour ces raisons, les granulats proviennent dans la mesure du possible de roches dures compactes et saines, siliceuses, gréseuses, calcaires. Ces roches ne doivent pas contenir de calcaires tendres, de feldspaths, de schistes, d'argile source d'alumine, de sulfate de fer (pyrite), de gypse... qui, à retardement, peuvent former dans un milieu solidifié des composés expansifs du type ettringite. Ces derniers, rappelons-le, créent des pressions considérables dans la structure durcie. Les agrégats ne doivent pas contenir des substances telles que matières organiques, phosphates, borates... susceptibles de perturber (retarder...) la formation des silicates et des aluminates.

Dans de nombreux ouvrages sur le béton, on lit que les agrégats doivent être inertes. La réalité est plus complexe.

Autour des agrégats, on observe une zone de pâte hydratée spécifique : « l'auréole de transition » (figure 2). Il est souhaitable que celle-ci ne donne pas naissance à retardement à des composés expansifs, friables, dont le résultat serait l'affaiblissement des liaisons ciment-agrégat.

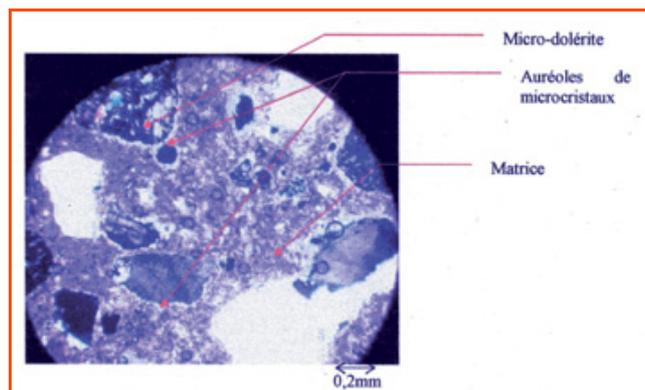


Figure 2 - Étude classique d'une lame mince (échantillon R-122 en lumière polarisée).

L'auréole de transition à environ 15 microns de largeur et s'observe sur environ 60 % des joints de grain.

### L'eau

L'eau a un rôle chimique essentiel, en étant le réactif qui permet de transformer des chaux, des silices, des silicates, des aluminates et des aluminates pulvérulents anhydres en silicates et aluminates hydratés, principaux constituants du liant romain et du liant Portland. Il y a également de manière générale de l'eau adsorbée en surface des particules.

Dans un mélange malléable de liant et d'agrégats, l'eau libre en excès par rapport à l'eau chimiquement liée a aussi un rôle mécanique important en permettant la formation d'une pâte fluide, capable de remplir le moule où elle durcira.

L'eau ne doit pas contenir de substances susceptibles de perturber l'hydratation des silicates et des aluminates anhydres ; la solidification/stabilisation de résidus dangereux au moyen de liants hydrauliques a constitué un véritable défi à ces règles [6].

### Aspects granulométriques

Ils concernent les dimensions et les formes des granulats utilisés pour confectionner du béton. Plus les granulats seront

rapprochés, et plus faible sera la quantité de liant nécessaire à remplir les vides et à provoquer l'adhésion des granulats.

Ces objectifs doivent être compatibles avec la nécessité de disposer d'un béton facile à homogénéiser par mélange, à transporter sans ségrégation appréciable et à mettre en place.

La figure 3 apporte des précisions sur la granulométrie d'un ciment Portland, d'un sable et d'un gravillon mélangés avec de l'eau et le béton en résultant. On observe que les fines particules proviennent principalement du ciment Portland et du sable. La fabrication d'un tel béton peut être facilitée par l'utilisation de « réactifs chimiques », appelés adjuvants par les bétonniers et leurs clients, et sur lesquels nous reviendrons.

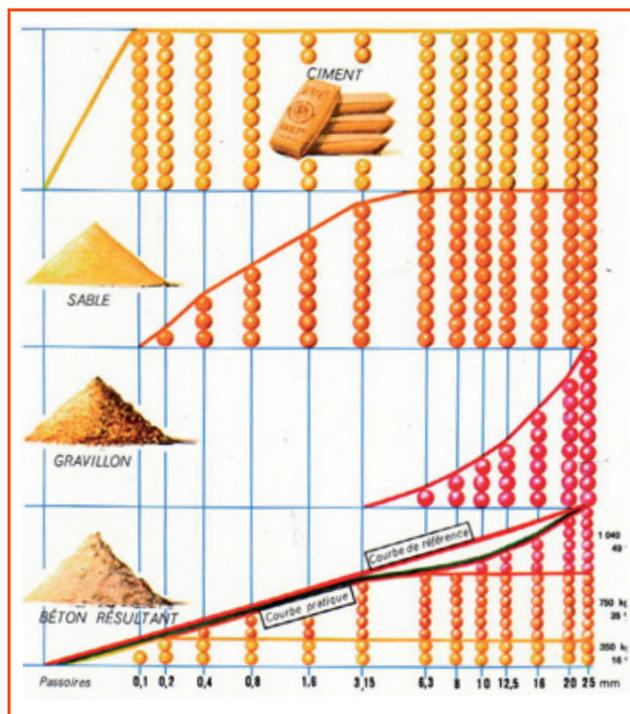


Figure 3 - Quelques exemples de granulométrie.

### Porosité d'un béton et influence sur ses performances

Pour des raisons mécaniques, une quantité d'eau en excédent par rapport à celle qui a servi à transformer des silicates, aluminates anhydres en silicates, aluminates hydratés, doit être utilisée pour fabriquer du béton. Cette eau excédentaire s'évapore au cours du durcissement du béton, créant un réseau de vides au cœur du béton : les pores capillaires.

Un directeur de laboratoires cimentiers disait volontiers que le béton pourrait être comparé à du fromage de gruyère, aux nombreuses cavités. Sous sa direction, nous avons réussi à diminuer le nombre et les dimensions des cavités.

### Béton imprégné de polymères

Des essais menés sur du béton soulignent l'importance cruciale de la porosité sur les propriétés physico-chimiques du béton durci. Après séchage à 105 °C, ce dernier a été mis sous vide dans une enceinte dans laquelle on a injecté un monomère additionné d'un catalyseur de polymérisation et un agent réticulant. Le mélange pénètre dans ces conditions au cœur du béton ; la polymérisation étant effectuée dans une étuve.

Tableau I - Essais et résultats comparés de bétons imprégnés de polymères.  
 $R_C$  : résistance à la compression,  $R_F$  : résistance à la friction ( $R_{C0}$  et  $R_{F0}$  : béton non imprégné).

Éléments à imprégner	Agents imprégnant	$R_{C0}$	$R_C$	$R_C/R_{C0}$	$R_{F0}$	$R_F$	$R_F/R_{C0}$	$R_{C0}/R_{F0}$	$R_C/R_F$
Mortier 1/3CPA 325 SETE Sable normal	Styrène + agent réticulant	400	1450	3,5	65	410	6,3	6,2	3,5
Béton CPA 325 Lafarge HTS 350 kg m <sup>3</sup>	Méthacrylate de méthyle + agent réticulant	520	1040	2	75	185	2,5	7	5,6

qui ne fournissaient pas d'informations granulométriques précises sur les particules les plus fines. Le choix de la bonne granulométrie peut être facilité par les informations fournies par un granulomètre à laser [7].

### Méthodologies et contrôles

La résistance à la compression du béton imprégné par rapport au béton non imprégné pouvait être augmentée de 300 % environ ! (tableau I). En montrant que la porosité du béton était un paramètre essentiel – ce qui n'était pas évident en 1972 –, ces résultats ont contribué à inciter les bétonniers à s'intéresser davantage aux sciences et techniques chimiques. Ces derniers ne cherchèrent plus à diminuer la porosité du béton *a posteriori* et à un coût relativement élevé, mais en utilisant un moindre pourcentage d'eau. Le résultat a été obtenu en ajoutant au mélange initial quelques pour mille d'un adjuvant plastifiant fluidifiant.

#### Apport des adjuvants fluidifiants plastifiants

Leur rôle est d'augmenter la fluidité d'un béton, toutes conditions égales par ailleurs, ce qui permet de diminuer la proportion d'eau à usage mécanique dans le mélange.

Des lignosulfonates d'ammonium, de calcium et de sodium – sous-produits de la fabrication de la pâte à papier – sont les adjuvants dont on a la plus longue expérience. Ils agissent comme des dispersants de nature électrocinétique. Étant adsorbés par les particules des agrégats, les lignosulfonates qui sont anioniques apportent une charge négative sur ces particules, amenant des interactions répulsives qui sont à l'origine de la diminution de la viscosité du système. Plus récemment, on a utilisé des éthers polycarboxyliques modifiés qui jouent le même rôle.

#### Autres types d'adjuvants

D'autres types de molécules sont capables de modifier sensiblement les propriétés d'un béton frais et/ou durci, comme par exemple :

- des accélérateurs de prise, tel le chlorure de calcium qui permet d'obtenir des résistances mécaniques élevées à court terme (intéressant par temps froid) ;
- des tensio-actifs entraîneurs d'air, permettant la création de pores fermés qui améliorent la protection contre les cycles gel/dégel ;
- des agents moussants pour préparer des bétons légers, présentant un coefficient d'isolation thermique amélioré ;
- des retardateurs de prise, utilisés dans le bétonnage par temps chaud, pour le transport sur de longues distances de béton.

C'est là un domaine où la chimie a beaucoup apporté et peut sans doute encore beaucoup apporter.

#### Les particules fines

On a vu précédemment qu'il était possible de réduire la porosité d'un béton en diminuant la quantité d'eau « mécanique ». Cela peut également se faire en introduisant dans la formulation des particules fines qui viennent occuper les interstices laissés vacants par les grosses particules. On utilise actuellement de fines particules de silice, de calcaire...

Pendant longtemps, on ne disposait guère que de tamis

Le béton décrit précédemment ne peut être utilisé pour construire un ouvrage (pont, tunnel, barrage, réservoir, bâtiment...) que dans la mesure où il permet d'obtenir un matériau aux propriétés physico-chimiques prévues. En d'autres termes, il est essentiel pour l'utilisateur du béton que le produit livré soit bien conforme à celui du modèle qu'il a utilisé dans le calcul de l'ouvrage, ce qui implique de nombreux contrôles portant sur :

- *Les matières premières* : ciment, eau, agrégats (composition, phases minéralogiques...), espèces chimiques nuisibles (par exemple retardateurs de prise : phosphates, borates...), adjuvants, dosage, armatures (barres, fibres).
- *Les modalités du mélange de ces constituants* : types de malaxeur, conditions de malaxage (temps, vitesse de rotation).
- *Le béton frais* : caractéristiques physico-chimiques, teneur en ciment et en eau, composition granulométrique, propriétés rhéologiques en vue de sa mise en place, vitesse de durcissement.
- *La mise en place du béton* : techniques de vibration, de vibro-compaction ou d'auto-placement.
- *Le béton durci* : un béton de ciment Portland obtient généralement 70 % de ses performances au bout de 28 jours, ce qui nécessite des essais mécaniques (résistance à la compression, à la flexion, dureté...), des essais hydrauliques (perméabilité à l'eau sous pression, étanchéité à l'eau), et des essais physico-chimiques (lixiviation, comportement vis-à-vis de l'eau).

Enfin, pour contrôler l'ouvrage en béton, diverses méthodes sont utilisées :

- vérification avec les documents élaborés lors de la conception de l'ouvrage pour s'assurer par exemple qu'il y a suffisamment d'armatures et qu'elles sont agencées convenablement ;
- auscultation dynamique par la propagation d'ondes sonores : la vitesse du son est reliée au module d'élasticité et à la résistance mécanique ;
- analyse physico-chimique du béton en prélevant des échantillons par carottage.

Le nombre de défauts du béton est relativement faible : c'est une indication de la maturité qu'a acquise l'industrie du BTP dans la conception, la fabrication et la mise en place d'ouvrages en béton. Ces résultats considérables n'auraient pas pu être atteints sans la maîtrise d'un ensemble de procédures de contrôle commençant par les matières premières et finissant par l'ouvrage.

### Situation actuelle et tendances

L'urbanisation se développe et de nouveaux pays s'industrialisent davantage. La demande d'ouvrages de tous genres en béton devrait donc rester soutenue, y compris pour les bétons à hautes performances (BHP), à très hautes



Du béton accueillant.  
(Source : collection technique CIMBETON B50).

performances (BTHP) et à ultra hautes performances (BUHP) (voir *tableau II*) [8]. Le recours à ces bétons de qualité particulièrement élevée permet de moindres dépenses en quantité de béton, donc de fondations, et raccourcit les délais de construction. Des résistances mécaniques plus élevées permettent la construction d'ouvrages de plus grande hauteur et/ou de plus grande portée.

Tableau II - Comparaison de la résistance à la compression.

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)
Traditionnel	20-50
BHP	50-80
BTHP	80-100
BUHP	< 120

Ainsi que le lecteur le pressent, ces bétons à hautes performances sont obtenus en utilisant des agrégats sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques, en utilisant des adjuvants qui permettent d'abaisser la teneur en eau mécanique tout en facilitant la mise en œuvre, et enfin en soignant les conditions de mélange.

Les entreprises de BTP sont demandeurs de bétons 1) encore moins sensibles aux conditions météorologiques (température), 2) nécessitant encore moins de précautions de transport, en particulier en hauteur, et 3) permettant une cadence plus élevée de rotation des coffrages et des moules.

Le recours à des granulats de béton recyclé devrait se développer, compte tenu des programmes de démolition en cours dans les pays industrialisés et des préoccupations de protection de l'environnement. Des souhaits ont été exprimés pour du béton sans ciment Portland [8].

Il existe également d'autres types de béton, comme le béton au ciment au laitier de haut fourneau ou le béton au ciment alumineux.

### Le béton au ciment au laitier de haut fourneau

Le « laitier de haut fourneau » est un coproduit de l'industrie sidérurgique provenant de la fusion des composants minéraux contenus dans le minerai de fer lors de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau.

Le refroidissement rapide du laitier fondu, par trempe, le transforme en matériau vitreux, amorphe, qui, une fois broyé finement, présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable par un agent basique (alcalin ou/et sulfate).

La composition chimique du laitier de haut fourneau est riche en oxyde de calcium (CaO) et de silicium (SiO<sub>2</sub>) et, en plus faibles proportions, en oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de magnésium (MgO) ; il contient aussi de faibles quantités d'autres composants. L'hydratation du laitier vitrifié produit essentiellement des silicates de calcium hydratés (CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) et, en plus faible quantité, des aluminates de calcium hydratés (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.13H<sub>2</sub>O) et des silico-aluminates de calcium hydratés (2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O) s'il subit une activation alcaline, et de l'ettringite (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O) s'il subit une activation sulfatique ou sulfatocalcique.

Quel que soit l'activant, la progression de l'hydratation, surtout aux jeunes âges, est plus lente que celle du ciment Portland soumis aux mêmes conditions (quantité d'eau, température) et au moins deux fois moins exothermique. De même, la réduction de la porosité est plus faible, ainsi que les résistances mécaniques atteintes jusqu'à 28 jours. En contrepartie, la progression de l'hydratation du laitier est continue sur plusieurs années, donnant des performances intéressantes à long terme.

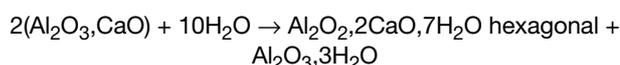
Le ciment au laitier de haut fourneau est un mélange de laitier de haut fourneau vitrifié, de clinker Portland et de sulfates de calcium. Dans ce mélange, le clinker Portland et les sulfates de calcium jouent le rôle d'activant de l'hydraulicité du laitier. Suivant la quantité plus ou moins importante du laitier introduit dans le ciment, ses propriétés s'approchent de celles du laitier activé décrites précédemment ou de celles du ciment Portland.

Ce béton est recommandé pour la réalisation des ouvrages exposés en milieux agressifs (eaux pures, eaux acides, chargées en ions chlorures ou en ions sulfates). En effet, d'une part les silicates de calcium hydratés produits par le laitier forment une microstructure plus fine que celle des silicates de calcium hydratés produits par le ciment Portland, plus dense et qui résiste donc mieux aux agressions ; d'autre part, la chaux formée par le ciment au laitier est en quantité négligeable par rapport à celle produite par le ciment Portland, ce qui rend le ciment au laitier moins sensible à la lixiviation.

L'utilisation du ciment au laitier est depuis plusieurs dizaines d'années généralisée dans la construction des fondations de bâtiments, d'ouvrages d'art et de routes (massifs de fondation, pieux, parois moulées, radiers, sous-couches), dans les constructions en milieu marin (quais, ouvrages portuaires) et dans les constructions exposées à des milieux agressifs (installations de traitement des eaux usées, égouts, réservoirs), avec un retour d'expérience favorable.

### Le béton au ciment alumineux

On peut aussi fabriquer des bétons avec du ciment alumineux obtenu par fusion de calcaire et de bauxite, d'où son nom courant de « fondu ». Ce ciment renferme principalement 70-80 % d'aluminate monocalcique Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaO et du silicate bicalcique SiO<sub>2</sub>.2CaO.β. Les réactions de prise peuvent être représentées par les équations suivantes :





Cette chaux se combine avec l'alumine hydrate produite (2<sup>e</sup> équation).

Ce type de béton bénéficie des propriétés spécifiques à ce type de liant par rapport au ciment Portland : une prise plus rapide et à une température plus basse que pour le ciment Portland, et une meilleure tenue vis-à-vis de certains agents chimiques, du fait de l'absence de chaux libre.

Certains ouvrages en béton ont pour vocation d'être soumis à des températures élevées. Or l'hydroxyde de calcium formé par l'hydratation du ciment Portland commence à perdre de l'eau de constitution vers 400 °C. Il est donc nécessaire de faire appel à un autre type de liant dont l'hydratation se fait sans dégagement de chaux : le ciment alumineux répond aussi à ce besoin.

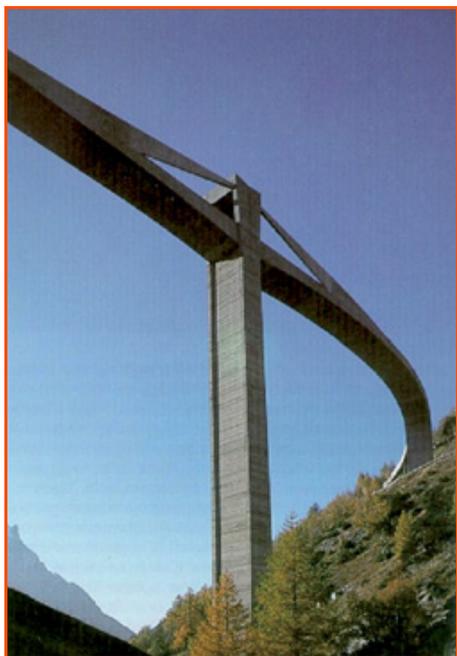
Les granulats doivent être adaptés à ces conditions d'emploi : la brique concassée entre 350-800 °C, et de la chamotte argile\* fortement cuite entre 800-1 200 °C...

Lorsque le béton a pour vocation de supporter des températures atteignant 1 800 °C, on utilise des ciments contenant encore davantage d'alumine (70 %) que précédemment et des granulats encore davantage réfractaires : corindon (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), zircone (Zr<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Ces bétons ont un rôle important, par exemple dans la production d'énergie électrique.

## Conclusion

Le béton a été l'objet d'efforts interdisciplinaires commençant dans les carrières d'agrégats et se poursuivant dans sa



Du béton transcendant...

fabrication, son transport et sa mise en place pour constituer un ouvrage [8-11]. Ces efforts ont été effectués à plusieurs échelles : microscopique, macroscopique et macrométrique.

Les sciences et techniques chimiques ont beaucoup apporté et pourraient sans doute apporter encore davantage à une évolution du béton rendue nécessaire par les exigences croissantes de la société civile.

## Remerciements

L'auteur remercie tous ceux (nombreux) avec qui il a effectué des travaux sur le béton et ceux qui, plus récemment, ont contribué à améliorer ce texte.

## Note et références

- \* Chamotte argile : terre cuite ayant des propriétés réfractaires compte tenu de sa composition et de son mode de cuisson.
- [1] Baron J., Sauteray R., *Le béton hydraulique*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, **1982**.
  - [2] Pichat P., Les liants minéraux, *La Technique Moderne*, n° 1, 2, 3, **2001**, p. 23-31.
  - [3] Blondin J., ENDESA France, Division de l'Engineering, communication orale, **2006**.
  - [4] Cottin B., The first reactions in cement hydration, *Hydratation and setting of cement, Proceedings of the International Rilem Workshop Dijon (France)*, E. et F.N. Spon (eds), **1991**.
  - [5] voir entre autres à ce sujet la partie « Pierres, mortiers et bétons » du numéro consacré au patrimoine culturel, *L'Act. Chim.*, **2007**, 312-313, p. 11-28.
  - [6] Pichat P., Aller jusqu'au bout de la dépollution. Le traitement ultime des déchets toxiques, *L'Act. Chim.*, **2004**, 277-278, p. 70.
  - [7] Méric J.-P., Mesure en continu de la granulométrie par diffraction d'un faisceau laser, *Bull. Soc. Fr. Ceram.*, **1972**, 95(67), p. 76.
  - [8] a) Phair J.W., Green chemistry for sustainable cement production and use, *Green Chem.*, **2006**, 8, p. 763 ; b) Annie P.J., Gopalakrishman S., High performance concrete, an overview of research and development, *Metals, Materials and Processes*, **2005**, 17(2), p. 113.
  - [9] Pichat P., *L'innovation*, Chotard et associés, **1989**, p. 27.
  - [10] Remond S., Gallias J.L., A 3 D semi-digital model for the placing of granular materials, *Powder Technology*, Elsevier Science, **2004**, 148(1), p. 56.
  - [11] Rousset A., Sur quelques aspects des nanomatériaux, *L'Act. Chim.*, **2005**, 288, p. 15.



**Philippe Pichat**

est directeur technique de la société ADT, expert national agréé par la Cour de Cassation\*. Il a contribué, d'abord en tant que chef du service Polystructures chez un cimentier, à explorer de nouveaux types de béton bénéficiant des synergies entre les liants traditionnels et des molécules organiques. Il a

ensuite été à l'initiative de la transformation de déchets industriels ultimes, à l'état liquide, pâteux ou pulvérulent, en bétons qu'il ne cesse d'adapter aux besoins [6].

\* Société ADT, 18 rue des Tournelles, 75004 Paris.  
Courriel : philippe.pichat@wanadoo.fr

## « Comment ça marche ? »

Agroalimentaire, carburants, colles, cosmétiques, matériaux, peintures, pharmacie, produits d'entretien...

**La rubrique de L'Actualité Chimique qui répond à vos questions sur la chimie de votre quotidien.**

Proposez-nous vos sujets, vos projets d'articles...

Coordinatrice de la rubrique : Véronique Nardello-Rataj (Université de Lille)

Courriel : veronique.rataj@univ-lille1.fr - Tél./fax : 03 20 33 63 69.

