

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 84 (1958)
Heft: 15: Problèmes actuels du béton, fascicule no 1

Artikel: Ciments Portland et ciments spéciaux
Autor: Lafuma, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-63500>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'E.P.U.L. (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: † G. Epitaux, arch. à Lausanne
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: Cl. Grosgeurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermannen, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; E. d'Okolski, arch.;
Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: A. Stucky, ing.
Membres: M. Bridel; R. Neeser, ing.; P. Waltenspuhl, arch.
Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, ing.
Rédaction et Edition de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse Fr. 26.—	Etranger.. Fr. 30.—
Sociétaires . . .	» 22.—	» .. » 27.—
Prix du numéro . . .	» 1.60	
Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande », N° II. 57 78, Lausanne.		
Adresser toutes communications concernant abonnement, changements d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, Lausanne		

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page. Fr. 275.—
1/2 » » 140.—
1/4 » » 70.—
1/8 » » 35.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Ciments Portland et ciments spéciaux, par H. Lafuma, professeur, directeur du Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, Paris.
Appréciation de la qualité du béton, par J.-P. Stucky, ingénieur-conseil, Lausanne.
Bibliographie. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes. — Documentation générale — Documentation du bâtiment.

666.942

CIMENTS PORTLAND ET CIMENTS SPÉCIAUX

par H. LAFUMA, professeur, directeur du Centre d'études et de recherches
de l'industrie des liants hydrauliques, Paris¹

Sous le titre « Ciments portland et Ciments spéciaux », les organisateurs de ces Journées d'études m'ont plus particulièrement demandé de répondre aux quatre questions suivantes :

a) Dans quelles circonstances est-il indiqué d'utiliser, comme liant, au lieu du portland, un ciment spécial, en particulier un ferro-ciment, un ciment sursulfaté, un ciment métallurgique, ou même le cas échéant, du ciment alumineux?

b) Quels sont les avantages spécifiques de chacun de ces ciments par rapport au portland, et quelles sont les limites à considérer dans ce cas?

c) Quelles mesures particulières doivent être prises lors de la confection et de la mise en œuvre de béton avec des ciments spéciaux?

d) Qu'y a-t-il lieu de faire lorsque du portland et des ciments spéciaux sont simultanément utilisés sur un chantier et que, de ce fait même, des éléments de construction en portland doivent se trouver en contact direct avec d'autres parties en béton de ciments spéciaux?

* * *

Je m'efforcerai de répondre à ces questions dans un ordre peut-être un peu différent, car il paraît difficile, dans un exposé relativement court, d'examiner sépa-

rement les circonstances d'utilisation des différents ciments (question a) et leurs caractéristiques (question b).

J'insisterai, comme il est demandé, sur les problèmes des chantiers de génie civil et de bâtiment, c'est-à-dire que je laisserai de côté les applications très particulières des ciments (cimentation dans les sondages ou bétons réfractaires) et les applications relevant d'installations industrielles fixes (amiante-ciment, béton-gaz, pré-fabrication lourde, étuvage, autoclavage).

Mais je voudrais auparavant, au risque de paraître sortir de mon sujet, situer dans leur cadre les facteurs qui conditionnent le choix des ciments, dans les applications, et la possibilité même de ce choix.

* * *

Au regard des techniques de construction, les besoins des ingénieurs de chantier, utilisateurs de ciment,

¹ Exposé fait aux « Journées d'études sur les problèmes actuels du béton », organisées à Locarno les 20, 21 et 22 mars 1958, par la Société suisse des ingénieurs et des architectes, le Groupe professionnel des ponts et charpentes et l'Association suisse pour l'essai des matériaux et le Comité national suisse des grands barrages.

répondent à trois tendances nettement différentes, auxquelles correspondent des techniques différentes :

— Techniques souvent encore artisanales, comme celles des enduits ou de la maçonnerie. Il y a dans ce domaine un débouché important qui justifierait des études, quelque peu négligées actuellement, en France tout au moins.

— Techniques classiques, disons celles du béton armé courant, qui ne réclament pas des résistances exceptionnelles, mais des ciments d'une souplesse d'emploi et d'une adaptation suffisantes pour assurer le bon comportement des ouvrages.

— Techniques plus évoluées, exigeant un durcissement toujours plus rapide, des résistances mécaniques toujours plus élevées. La préfabrication et la précontrainte sont au premier rang de ces techniques d'avenir.

* * *

Au regard des problèmes de mise en œuvre et de conservation du béton, les difficultés que peuvent rencontrer les ingénieurs de chantier relèvent principalement des conditions thermo-hygrométriques ou de l'action éventuelle d'agents agressifs.

* * *

Enfin l'existence même des ciments spéciaux est conditionnée par des facteurs économiques, dont je voudrais dire quelques mots.

On ne doit pas perdre de vue que, dans l'économie actuelle, la fabrication industrielle d'un ciment spécial ne peut être pratiquement envisagée que pour un tonnage suffisant. Je ne sais plus quel cimentier déclarait sans intérêt la fabrication de moins de cent mille tonnes annuelles d'un même produit, ou alors à des prix relevant, non de la cimenterie, mais de l'industrie chimique, ce qui n'est pas toujours possible pour un ciment spécial.

Dans le numéro de décembre 1957, page 347, de la *Revue des Matériaux de construction*, on peut noter les tonnages fabriqués, en 1955, aux Etats-Unis, des différentes catégories de ciments. On constate, non sans surprise, que six usines se sont partagé la fabrication de 11 000 tonnes de ciment portland type V (résistant aux sulfates), soit environ 2 000 tonnes par usine ! Quant au ciment portland type IV (faible dégagement de chaleur), il n'en a pas été fabriqué une seule tonne. Au regard de plus de cinquante millions de tonnes de portland fabriqués la même année, c'est faire une part bien minime aux portland spéciaux.

En fait, cela veut dire que ce ne sont pas les besoins techniques qui créent le marché des ciments spéciaux ; ce sont des facteurs économiques qui conditionnent leur fabrication industrielle.

Ce n'est pas pour les besoins français de ciment résistant aux sulfates, que nous disposons de cinq cent mille tonnes annuelles, peut-être, de portland équivalent pratiquement au type V américain. C'est en raison de la faible teneur en alumine des calcaires de l'Ardèche, dont la composition moyenne répond à celle d'un excellent artificiel, d'ailleurs bien antérieur à la définition de ce type V.

Ce ne sont pas nos problèmes spéciaux qui nécessitent l'emploi annuel, par la cimenterie française, d'environ deux millions de tonnes de laitier de haut fourneau, en attendant plus, et bientôt de quelques centaines de milliers de tonnes de cendres volantes de centrale

thermique. C'est la libre disposition de quantités surabondantes d'un excellent laitier et d'un résidu encombrant doué de propriétés pouzzolaniques, matières dont l'emploi a permis une importante économie de charbon et permettra à l'avenir d'augmenter le tonnage de ciment produit, sans avoir recours aux investissements excessifs qu'exige la fabrication du portland. Ce n'est qu'accessoirement que se trouvent simultanément résolus des problèmes techniques spéciaux.

C'est pour cette même raison que nous voyons se développer maintenant aux Etats-Unis l'emploi, jusqu'ici pratiquement négligé, du laitier de haut fourneau, cependant moins bon, pour la cimenterie, que le laitier allemand, belge ou français.

En d'autres termes, dans la conjoncture actuelle, les utilisateurs ne doivent pas penser pouvoir obtenir une fabrication de ciment spécial répondant à des besoins précis trop limités ; ils doivent s'efforcer de résoudre leurs problèmes particuliers avec les ciments spéciaux fabriqués couramment, et normalement peut-on dire, par certaines usines.

On conçoit d'ailleurs facilement que l'on disposera de tonnages d'autant plus abondants, donc à des prix d'autant plus intéressants, de tels ciments spéciaux qu'ils répondront d'une manière satisfaisante à des emplois plus variés.

* * *

Arrivons-en maintenant à l'objet plus précis de cet exposé et puisque je dois vous parler des avantages spécifiques de chacun des ciments spéciaux par rapport au portland, les inconvénients seront mentionnés simultanément.

Avantages et inconvénients des ciments peuvent intervenir à tous les stades de l'élaboration ou de la conservation des bétons et peuvent avoir leur incidence sur toutes les caractéristiques : ouvrabilité, durcissement, effets thermiques, variations de volumes, fragilité, protection des armatures, perméabilité, altérabilité, etc. C'est dans ce cadre que nous nous placerons.

* * *

L'Ouvrabilité (workability) est l'ensemble des qualités qui conditionnent l'aptitude au transport et à la mise en œuvre, pour un emploi déterminé, d'un mortier ou d'un béton.

Il s'agit d'un ensemble complexe de propriétés qui dépendent, en dehors du ciment, de la proportion d'eau, du dosage, de la dimension, de la forme et de la granulométrie des agrégats, du mode et de la durée du gâchage.

L'Ouvrabilité a une incidence certaine sur le durcissement qui ne se poursuit normalement et n'atteint son maximum que si le béton peut être rendu compact par secousses ou vibration, sans damage direct.

En ce qui concerne l'influence du ciment, elle est en général d'autant plus favorable que le ciment est plus fin : ce sont surtout les grains de dimensions inférieures à dix microns qui assurent la bonne plasticité du béton frais.

Les portland, les ciments à maçonner, les chaux hydrauliques donnent des bétons dont la ségrégation est difficile ; mais les ciments alumineux, les ciments

riches en laitier, donnent des pâtes plus râches dont la ségrégation est plus à craindre, surtout aux faibles dosages. On doit noter d'ailleurs qu'une mouture plus fine améliore notablement les ciments métallurgiques à cet égard et qu'il est souvent possible d'améliorer l'ouvrabilité des bétons par l'addition de faibles pourcentages de matières fines. Comme l'ouvrabilité du béton ne conditionne jamais seule le choix d'un ciment, nous n'insisterons pas sur ce point.

Le durcissement des bétons résulte de l'hydratation progressive du ciment, qui a pour effet d'augmenter, à partir de la compacité initiale, la compacité en matières solides, par fixation d'une proportion d'eau croissante, et de renforcer la cohésion, en augmentant le pourcentage de produits hydratés qui constituent les éléments de liaison de l'ensemble.

Comme l'a montré M^{lle} Dzulinski, la résistance à la compression d'un béton, à un âge donné, peut s'exprimer d'une manière univoque en fonction de la concentration des produits hydratés, dans les vides du squelette inerte, en comprenant dans celui-ci le ciment non encore hydraté, au temps considéré.

Pour fixer les idées, en milieu aqueux et à la température ordinaire, les vitesses d'hydratation du portland et du laitier sont voisines, et de l'ordre du micron par jour, pendant le premier mois. La vitesse d'hydratation décroît ensuite rapidement jusqu'à sept mois, puis se stabilise aux environs de cinq centièmes de micron par jour.

Dans ces conditions, le durcissement du béton suit, après quelques jours, et pendant une assez longue période, une loi approximativement logarithmique.

L'allure du durcissement des divers ciments est assez variable : certains ont presque terminé leur durcissement à un mois (portland riches en aluminate et silicate tricalciques, et, plus encore, ciments alumineux) ; d'autres enregistrent au-delà des augmentations notables de résistance (portland riches en silicate bicalcique, ciments métallurgiques ou pouzzolaniques).

Le durcissement des bétons dépend des conditions de conservation et, en particulier, de l'humidité et de la température.

L'influence de l'humidité pendant le durcissement est considérable, la résistance pouvant varier du simple au double, à trois mois, suivant le mode de conservation des éprouvettes. Le durcissement dans l'eau, progressif et continu, est analogue à celui qui est réalisé dans les fondations ou les ouvrages hydrauliques, par exemple.

Le durcissement à l'air est celui qui s'observe dans les bâtiments et constructions à l'abri de l'humidité. L'accroissement de résistance est alors incertain et irrégulier dès que le béton n'est pas maintenu suffisamment humide : il est prudent de le considérer comme insignifiant au-delà d'un mois.

Si le béton peut être maintenu humide, il y a le plus souvent avantage à choisir un ciment à durcissement lent ; si, par contre, le béton doit être exposé d'une façon continue à l'air sec peu de temps après sa fabrication, il est indiqué de recourir à un ciment présentant de bonnes résistances initiales. Les ciments pouzzolaniques ou riches en laitier ne durcissent convenablement que s'ils sont maintenus humides. Mais les produits de cure permettent maintenant d'éviter la dessiccation prématurée des bétons et certains produits d'addition

(entraîneurs d'air, plastifiants) assurent aussi une meilleure rétention de l'eau de gâchage.

En ce qui concerne la température, d'une manière générale, une élévation de température accélère le durcissement, un abaissement de température le retarde ; mais cet effet est très variable d'un ciment à un autre.

L'influence de la température, très marquée les premiers jours, s'atténue avec la durée du durcissement ; à trois mois, elle est pratiquement négligeable pour les températures courantes de nos climats.

Une température voisine de 0° C retarde inégalement le début du durcissement des bétons de divers ciments. Si l'on prend, comme unité, la résistance obtenue à 15° C, les résistances à 0° C, à trois jours, seront de l'ordre des trois quarts pour les ciments alumineux, du cinquième pour les portland, du dixième pour les ciments riches en laitier ou les sursulfatés. A sept jours, les résistances à 0° C seront de l'ordre des neuf dixièmes pour les alumineux, de la moitié pour les portland, du quart pour les ciments riches en laitier. A vingt-huit jours, une différence sensible ne subsiste guère que pour les ciments les plus riches en laitier. Il convient évidemment de tenir le plus grand compte de cette caractéristique pour évaluer les délais de décoffrage en période d'hiver.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un froid sec est particulièrement redoutable pour les bétons frais. En dehors même des effets de gélivité, l'abaissement de la température ralentissant les réactions d'hydratation, le béton peut être desséché avant même d'avoir suffisamment durci et son durcissement ultérieur peut être irrémédiablement compromis si l'on n'a pas pris des précautions particulières. C'est avant les grands froids, qui nécessitent impérieusement ces précautions, que se produisent de tels incidents et, d'une manière générale, on a tendance à limiter l'emploi des ciments riches en laitier en période d'hiver.

Aux températures voisines de 30° C, le durcissement, très rapide les premiers jours, se ralentit progressivement, de sorte que, après un mois, les bétons ayant durci à 15° C sont plus résistants que ceux conservés à 30° C.

Le problème de l'influence de températures plus élevées ne se pose pas dans le domaine des chantiers envisagés ici ; il se pose pour la préfabrication avec autoclavage ou étuvage ; mais il sort alors de notre sujet. Disons simplement que les ciments riches en alumina sont peu influencés par les basses températures et que les ciments dont le durcissement initial est peu influencé par les basses températures se comportent moins bien aux températures relativement plus élevées. Réciproquement, les ciments dont le durcissement initial est fortement retardé par une température voisine de 0° C peuvent être exposés sans inconvenients aux températures relativement élevées.

Le durcissement, résultant de l'hydratation du ciment, sera affecté par tous les facteurs agissant sur cette hydratation. Or la plupart des corps solubles, à des doses de l'ordre du centième ou du millième, par rapport au poids du ciment, ont une action plus ou moins nette sur l'hydratation du ciment, donc sur les vitesses de prise et de durcissement des mortiers et bétons. La plupart des produits d'addition (entraîneurs d'air,

plastifiants, à base de produits organiques) ont un effet retardateur ; les accélérateurs sont généralement des sels minéraux, réagissant chimiquement, à concentration convenable, sur les alumates.

* * *

Je ne parlerai que pour mémoire de *l'effet thermique qui accompagne le durcissement*. S'il joue un rôle pri-mordial dans le bétonnage en grande masse, son influence est négligeable sur les chantiers habituels, en raison du rapport de la surface au volume du béton, le dégagement de chaleur qui accompagne l'hydratation du ciment se dissipe au fur et à mesure, par échange avec l'ambiance. Ce n'est guère que dans le bétonnage par temps froid que l'on peut se préoccuper de choisir un ciment à forte chaleur d'hydratation ; le béton frais est alors immunisé beaucoup plus rapidement contre les effets possibles du gel, et pratiquement, sauf températures excessives, dès le démarrage de la réaction, moyennant des précautions simples contre un refroidissement trop brutal du béton.

Le fait, rappelé précédemment, qu'il n'ait pas été fabriqué, en 1955 aux Etats-Unis, une seule tonne de portland à faible dégagement de chaleur (type IV) pourrait laisser supposer que le problème des ciments spéciaux pour barrages est sans grand intérêt, si les américains ne disposaient du type II (dé-gagement modéré de chaleur), mais que la statistique mentionnée ne distingue pas du ciment à usage général (type I).

Nous avons pourtant là un cas typique où les tonnages à envisager permettent des fabrications particulières. Les conditions favorables de durcissement lent et progressif favorisent les laitiers de haut fourneau, plusieurs fois utilisés, en France, les pouzzolanes, utilisées en Italie. Les portland, à faible teneur en alumine, de l'Ardèche, sont aussi couramment employés en l'occurrence.

* * *

Le durcissement des bétons s'accompagne de *variations de volumes* qu'il convient de rappeler.

La formation des hydrates s'accompagne toujours d'une diminution de volume absolu, en ce sens que le volume absolu des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes absolus des sels anhydres et de l'eau. Mais ce sont surtout les changements du volume apparent qui intéressent le constructeur, le volume apparent étant la totalité du volume compris entre les surfaces limitant la masse, donc comprenant les vides éventuels du mortier ou du béton.

En présence d'un excès d'eau liquide, la pâte pure d'un ciment peut présenter un certain gonflement ; pour un mortier ou un béton ce gonflement est insignifiant.

Sans excès d'eau et sans possibilité d'évaporation on peut déjà constater une diminution de volume apparent. Mais le retrait proprement dit est la contraction qui accompagne la dessication d'un mortier ou d'un béton. Le retrait est sous la dépendance étroite de l'humidité ; il s'accroît quand le mortier se dessèche et fait place au contraire à une dilatation quand le mortier reprend de l'eau ; en d'autres termes, les variations du volume apparent d'un béton sont, au moins approximativement, réversibles. Mais la relation entre le retrait et la dessication n'est pas simple : en augmentant la finesse d'un même ciment on augmente le retrait (en gros, propor-

tionnellement à la surface spécifique Blaine), alors qu'aux ciments les plus fins correspondent les évaporations les plus faibles ; c'est-à-dire que les pertes de poids des bétons sont en général plus caractéristiques de la texture capillaire que du retrait.

D'après les études en cours dans notre laboratoire, il semble que le retrait soit d'autant plus fort que la solution aqueuse qui imprègne le ciment est plus concentrée (alcalis, chlorure, hydrate de chaux). La nature et la concentration des sels en solution influent sur la tension superficielle et sur la tension de vapeur, donc sur la répartition de la solution. Par suite de l'hydratation du ciment et de l'évaporation partielle de l'eau, la solution aqueuse interstitielle peut atteindre la saturation et les ciments prennent leur retrait d'autant plus rapidement qu'ils durcissent plus vite. La plupart des produits d'addition solubles accélèrent et augmentent le retrait.

Comme ces facteurs ne varient pas nécessairement avec la nature du ciment, on conçoit qu'il puisse y avoir, au point de vue du retrait, la même différence entre deux ciments de même nature qu'entre deux ciments de catégories différentes.

Mais l'adaptation au retrait des mortiers et bétons varie très nettement avec la nature du ciment et il en résulte que les effets du retrait, pour un même retrait absolu, peuvent être très variables pour les différents ciments. C'est ce qui a lieu en particulier pour la fissuration qui est la manifestation la plus apparente du retrait.

Un béton dont la déformation est contrariée se fissure quand la contrainte du retrait (qui est égale au produit du module d'élasticité par le retrait ou plus exactement — car la notion d'élasticité s'applique mal aux mortiers et bétons jeunes — au produit du module de déformation en traction sous charge lente, par le retrait potentiel) devient supérieure à la résistance à la traction sous charge prolongée. Ces valeurs sont difficilement mesurables avec précision et sont inférieures à celles qui sont habituellement considérées : module d'élasticité, retrait libre, résistance à la traction sous charge rapidement croissante.

Dans une construction, les fissures sont susceptibles de nuire soit à l'esthétique, soit à l'étanchéité, lorsque cette dernière doit être assurée par le béton lui-même ou par un enduit peu ductile faisant corps avec lui, soit, exceptionnellement, à la stabilité, enfin à la conservation des armatures du béton armé.

Le retrait et la tendance à fissuration dépendent en fait de très nombreux facteurs : nature et caractéristiques du liant et des agrégats, degré de durcissement, conditions de mise en œuvre et de durcissement.

Les contraintes qu'impose le retrait croissent d'abord proportionnellement à celui-ci, puis tendent à se stabiliser par adaptation. Le coefficient de proportionnalité et la tendance à l'adaptation varient avec divers facteurs et plus particulièrement avec la nature du ciment et le degré de durcissement. La contrainte de retrait d'un ciment sera d'autant plus élevée que le coefficient d'élasticité est plus élevé ; l'adaptation est d'autant moindre que le retrait se manifeste plus rapidement et que le mortier est plus fragile c'est-à-dire que le rapport de la résistance à la compression à la résistance à la traction est plus élevé.

En conséquence, la contrainte de retrait est maximum avec les ciments alumineux et les supers ; elle décroît pour les portland ordinaires, les ciments à base de laitiers, ou pouzzolaniques, les ciments naturels, les chaux hydrauliques. La tendance à fissuration, à faïençage, des mortiers riches varie dans le même sens.

C'est la raison pour laquelle, dans les travaux de maçonnerie ou d'enduits, on doit préférer au ciment portland les ciments à maçonner, les ciments naturels, les chaux hydrauliques, les mortiers bâtards, qui assurent :

- la grande plasticité de la pâte fraîche, donnant un mortier gras facile à mettre en œuvre ;
- la bonne adhérence du mortier aux matériaux de construction assurant une forte liaison ;
- la faible tendance à fissuration sous l'effet du retrait ou des tassements, ce qui entraîne une imperméabilité et un aspect satisfaisants.

Tous les produits préconisés sont caractérisés, par rapport au portland, généralement, par une finesse supérieure, et toujours, par un rapport très inférieur des résistances compression/traction.

La fissuration peut jouer un rôle important dans la protection des armatures du béton armé, car cette technique suppose l'emploi d'un ciment dont les résistances mécaniques soient nettement plus élevées que celles des produits précédents.

Dès l'origine, des craintes furent exprimées au sujet de l'oxydation des armatures au droit des fissures ; on craignait que, dans le vide de ces dernières, la rouille attaque plus ou moins profondément le métal. Ces craintes ne se sont confirmées que dans des cas heureusement exceptionnels.

Le béton non armé se rompt en général par traction lorsqu'il subit des allongements de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm par mètre. Les armatures ne suppriment pas ce comportement, mais elles tendent à remplacer une fissure unique par plusieurs petites, réalisant ainsi la ductibilité apparente qui caractérise le béton armé.

On estime généralement que le danger d'oxydation des armatures est pratiquement inexistant si l'ouverture de la fissure n'excède pas deux tiers de millimètre, et l'expérience montre que le danger des fissures perpendiculaires aux armatures est beaucoup moins grave pour la conservation du métal qu'on aurait pu le redouter.

Les fissures parallèles aux armatures sont beaucoup plus à craindre ; il semble d'ailleurs que ce soit moins au retrait du béton qu'à des phénomènes de gel et dégel successifs qu'il faille attribuer ce genre de fissures, car le béton gelé gonfle, tandis que l'armature refroidie se contracte, et la répétition de ces effets peut faire naître des fissures parallèles aux armatures voisines des surfaces libres.

En dehors des fissures, la crainte quelquefois exprimée d'une mauvaise protection des armatures, ou même d'une attaque par les sulfures des laitiers, ne repose sur aucune donnée expérimentale. Il est seulement nécessaire que le béton soit suffisamment compact et sans rechercher le maximum de compacité, il convient d'utiliser un dosage en ciment assez élevé et une quantité d'eau suffisante pour obtenir une bonne ouvrabilité du béton et une mise en place facile, donnant un enrobage correct, sans moyens de serrage trop éner-

giques. L'oxydation des armatures n'est à craindre que si celles-ci sont mal enrobées ou si le béton est poreux.

Le ciment portland est certes le ciment par excellence du béton armé, mais tous les ciments dont les résistances mécaniques sont comparables peuvent parfaitement convenir. Cela peut être précieux dans certains cas, par exemple si le béton armé doit être exposé à des atmosphères agressives : il convient alors de choisir un ciment chimiquement résistant et de se montrer plus sévère en ce qui concerne les fissures, dont l'ouverture ne devrait pas excéder deux dixièmes de millimètre seulement.

La perméabilité des bétons dépend avant tout des conditions de conservation. Les bétons conservés à l'air accusent une perméabilité beaucoup plus élevée, jusqu'à cent fois, que les bétons conservés dans l'eau ; la différence s'explique par la fissuration très fine, due au retrait, des bétons conservés à l'air. En ce qui concerne l'influence du ciment lui-même, pour des conditions de conservation favorables, l'imperméabilité est en relation directe avec la proportion d'éléments fins de dimensions inférieures à dix microns. Du fait qu'elle dépend de la formation de fissures microscopiques, la perméabilité du béton sera d'autant moindre que le ciment employé présente une plus faible tendance à fissuration, c'est-à-dire que la perméabilité du béton est en relation étroite avec les qualités du ciment au point de vue de la plasticité, de l'adaptation et du retrait comme nous l'avons vu précédemment.

L'altérabilité des bétons, enfin, peut se manifester sous des influences variées : intempéries, atmosphères industrielles, eaux résiduaires ou terrains sulfatés, par exemple. Il est certain que les facteurs chimiques n'excluent nullement l'action physique des intempéries et, si dans l'attaque chimique on doit de toute nécessité envisager la résistance chimique du ciment utilisé, on ne peut négliger la compacité du béton, facteur primordial de résistance aux intempéries.

La porosité du béton doit donc être combattue par un dosage suffisant en ciment et une granulométrie correcte des agrégats ; on réduit ainsi au minimum les possibilités d'infiltration des agents agressifs.

Schématiquement, on peut considérer deux mécanismes de corrosion chimique des bétons :

- une attaque acide qui détruit la cohésion du liant par formation de sels solubles aux dépens de l'hydrate de chaux libre ou de la chaux combinée sous forme de silicates ou d'aluminates ; la corrosion par les atmosphères polluées est généralement de ce type ;

- une attaque saline, du type eaux sulfatées, par réaction avec les aluminates de calcium hydratés, réaction accompagnée éventuellement d'expansion ; on peut rencontrer ce type d'action dans les fondations en terrains industriels ou séléniteux.

Eventuellement, les deux mécanismes peuvent jouer simultanément.

Pratiquement, la résistance chimique d'un ciment est d'autant meilleure que l'indice de Vicat de celui-ci — c'est-à-dire le rapport, à la chaux, de la somme silice et alumine — est plus élevé. Les causes d'altération chimiques résultent en effet principalement de la présence, dans le béton durci, d'hydrate de chaux libre et d'aluminate riche en chaux qui conditionnent l'apti-

tude à l'hydrolyse du ciment hydraté et sa sensibilité chimique.

Remarquons que les hautes résistances mécaniques des superciments, obtenues avec les compositions les plus calciques, le sont au détriment de la résistance chimique. En revanche, en dehors des portland à faible teneur en aluminate tricalcique potentiel, il existe toute une variété de produits réputés pour leur bonne résistance chimique : ciments métallurgiques riches en laitier, ciments sursulfatés, ciments pouzzolaniques, ciments alumineux, tous produits largement utilisés dans ce domaine d'élection des ciments spéciaux.

* * *

Ce tour d'horizon des facteurs qui conditionnent le choix des ciments en fonction des applications ou des techniques d'emploi nous permet de répondre maintenant à la troisième question :

Quelles mesures particulières doivent être prises lors de la confection et de la mise en œuvre du béton avec des ciments spéciaux ?

* * *

Ainsi que nous l'avons vu, les conditions dans lesquelles on est amené à envisager l'emploi de ciments spéciaux exigent, avant toute mesure particulière, que les mesures normales d'un bétonnage correct soient respectées.

Dans de nombreux cas, une exécution correcte du béton pourrait dispenser de l'emploi d'un ciment spécial et cet emploi apparaît alors plutôt comme une sécurité supplémentaire que comme une nécessité, sans dispenser d'ailleurs d'une exécution correcte du béton.

Enumérons donc, avec les commentaires appropriés, les conseils souvent donnés aux constructeurs :

— Eviter l'excès de ciment au-delà de ce qui donne au mortier, ou au béton, les résistances exigées et la compacité suffisante pour une bonne tenue aux intempéries.

— Choisir l'agrégat du calibre le plus gros, compte tenu des conditions de mise en œuvre et du ferraillage dans le cas du béton armé.

— Ecartez les sables fins, les sables argileux et les sables de concassage à teneur élevée en farine de pierre.

— Veiller à la propreté des agrégats et des sables. Les ciments riches en laitier sont beaucoup plus sensibles que les portland à la qualité du sable et s'accompagnent très mal des sables argileux. Avec les ciments alumineux, il convient d'éviter absolument les sables susceptibles de libérer des alcalis (sables le plus souvent d'origine schisteuse, granitique, micacée) et qui sont susceptibles de provoquer une recristallisation désastreuse des alumates hydratés du ciment durci. A un degré beaucoup moindre, cette altération peut aussi se manifester avec des ciments riches en laitier.

— N'employer qu'avec circonspection les produits d'addition solubles dans l'eau ; il arrive que leur effet sur un ciment spécial soit de sens contraire à celui qu'ils ont sur un portland... et que ce soit quelquefois bénéfique.

— Utiliser le minimum d'eau compatible avec les moyens de serrage : le retrait augmente avec le rapport e/c et avec le dosage en ciment, et l'effet des variations du rapport e/c est plus prononcé avec les bétons riches.

Les bétons de ciments alumineux doivent être gâchés avec un rapport e/c minimum ; en revanche, les ciments sursulfatés s'accompagnent d'un rapport e/c plus élevé.

— Mais il faut naturellement, pour un e/c faible, mouiller au préalable les agrégats et supports poreux.

— Serrer fortement le béton pour lui donner sa compacité maximum.

— Eviter la dessiccation rapide dès la mise en place et maintenir le béton humide pendant la première période de durcissement. Les conditions de conservation initiale, le maintien de l'humidité aux premiers âges ont une influence bénéfique bien connue. Les ciments riches en laitier, les ciments pouzzolaniques sont particulièrement sensibles à cet égard.

C'est dire que, toutes les fois que cela est possible, on ne doit pas hésiter à recourir aux techniques particulières de mise en œuvre, comme l'emploi des produits de cure, qui diminuent le risque de fissuration du béton frais et les mauvais durcissements initiaux, ou aux moyens de protection de surface tels que les pellicules imperméables (bitumes, matières plastiques ou silicones) ou la flutuation qui neutralise la chaux.

Là encore, ces techniques peuvent éventuellement dispenser de l'emploi d'un ciment spécial ou donner une sécurité supplémentaire ; c'est au maître d'œuvre d'en décider.

* * *

Reste la dernière question :

Qu'y a-t-il lieu de faire lorsque du portland et des ciments spéciaux sont simultanément utilisés sur un chantier et que, de ce fait même, des éléments de construction en portland doivent se trouver en contact direct avec d'autres parties de béton en ciments spéciaux ?

* * *

Quand du portland et des ciments spéciaux sont simultanément utilisés sur un chantier, il faut surtout éviter de mélanger, dans la bétonnière, du portland avec un ciment alumineux ou un ciment sursulfaté.

Quant au contact direct de deux bétons durcis exécutés avec deux ciments de nature différente, je pense que cela n'a pas grande importance, dans la mesure où les deux bétons sont exécutés correctement.

En principe, les hydrates qui se forment lors de la prise d'un ciment sont pratiquement insolubles, et c'est à cette condition d'ailleurs que le produit mérite le nom de liant hydraulique, résistant à l'action de l'eau. Le sulfate de chaux d'un sursulfaté durci est insolubilisé, donc sans possibilité d'action sur le portland d'un autre béton au contact. On pourrait à la rigueur craindre que les alcalis d'un portland favorisent la recristallisation de l'aluminate hydraté, d'un béton de ciment alumineux voisin ; le phénomène a été obtenu en laboratoire mais avec des bétons franchement poreux.

En fait les craintes exprimées à cet égard apparaissent toutes théoriques et, dans les cas dont j'ai eu à connaître, il semble surtout que l'on ait voulu rejeter sur un phénomène mystérieux d'incompatibilité d'humeur des altérations dues à des malfaçons.

Dans le cas du béton armé, on a souvent déclaré que les armatures traversant deux bétons différents au contact pouvaient être facilement corrodées en raison d'une dissymétrie génératrice de courants électroly-

tiques. Là encore, il ne semble pas que des exemples précis aient apporté une démonstration probante du phénomène et je ne pense pas qu'il y ait beaucoup plus de différence, à cet égard, entre un portland et un ciment spécial (ayant chacun toujours une réaction franchement alcaline) qu'entre deux portland d'origines différentes, et l'on sait que sur les chantiers de béton armé les reprises en portland d'origines différentes ne sont pas si rares. Les phénomènes électrolytiques sont conditionnés par les phases aqueuses interstitielles et l'on peut penser que celles-ci s'homogénéisent rapidement au contact des deux bétons. Là encore la compacité du béton prend le pas sur la nature du ciment.

Conclusion

Au terme de cet exposé, je ne pense pas que, dans le domaine du génie civil et du bâtiment, sur lequel j'ai

voulu plus particulièrement mettre l'accent, le choix d'un ciment spécial s'impose fréquemment pour des raisons techniques ; cette obligation est assez rare, mais alors impérieuse, et le choix du ciment est conditionné par un ensemble de facteurs particuliers.

Bien souvent, une bonne exécution du béton, la mise en œuvre de moyens de protection relativement simples, permettent d'utiliser le ciment portland pour des usages où les ciments spéciaux paraissent indiqués.

Mais réciproquement ces ciments peuvent très fréquemment et sans complication trop gênante se substituer au portland dans les emplois courants. C'est dans la mesure où cette substitution, actuellement commandée en France par des raisons économiques, se répandra, qu'il nous sera possible d'obtenir, en cas de nécessité, des ciments spéciaux, à des prix acceptables ; mais on peut alors se demander si ce sont des ciments spéciaux.

APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ DU BÉTON¹

par J.-P. STUCKY, ingénieur-conseil, Lausanne

1. Introduction

L'appréciation de la qualité du béton joue un rôle fondamental dans les ouvrages pour lesquels se pose un problème de sécurité, comme c'est le cas dans les barrages-vôûtes actuels, dans les ponts de grande portée, et d'une manière générale dans les constructions hardies du génie civil qui caractérisent notre époque.

La première question qui se pose est de savoir si les propriétés du béton, étudiées avec soin sur des échantillons de dimensions restreintes, se retrouvent telles quelles dans l'ouvrage lui-même. Par la nature des choses, celui-ci sera en effet exécuté dans des conditions différentes : le coulage peut durer plusieurs heures, de sorte qu'une partie du béton commencera son durcissement tandis qu'une autre sera encore soumise à une intense vibration ; les couches de béton frais peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et donnent ainsi naissance à des phénomènes de capillarité inexistant dans un petit cube de 20 ou de 30 centimètres de côté.

Une deuxième question est de savoir si les sollicitations auxquelles on soumet les petits échantillons (compression uni-axiale, gélivité sur toutes les faces, etc.) sont comparables à celles de l'ouvrage (contraintes dans deux ou trois directions, gélivité sur une seule face).

C'est à ces deux questions, dimension des échantillons de contrôle et mode d'application des sollicitations, que je vais m'efforcer de répondre, en faisant la synthèse des observations recueillies sur quelques chantiers de barrages suisses. Ces chantiers sont en effet devenus depuis quelques années de remarquables champs d'expériences, tant par les moyens disponibles que par la continuité des essais, qui s'étendent souvent sur plusieurs campagnes successives. Bien que les barrages ne consomment que le cinquième de la production suisse du ciment (500 000 tonnes sur 2,5 millions, en 1957), ce sont eux qui donnent lieu aux études technologiques et aux contrôles les plus systématiques. La raison en

est facile à donner : la moindre économie s'applique à de très grands volumes et se traduit immédiatement par une diminution appréciable du coût des travaux. Mais, comme je m'efforcerai de le démontrer, cette économie ne s'obtient nullement aux dépens de la sécurité. On voit donc d'emblée le rôle que joue, aujourd'hui, l'*appréciation de la qualité du béton*, autrement dit l'interpolation des résultats sur petits échantillons, pour juger du comportement réel de l'ouvrage.

2. Les critères de qualité d'un béton

Parmi les qualités que l'on doit exiger d'un béton, je citerai : la maniabilité, les résistances mécaniques, l'étanchéité, la résistance au gel et aux eaux agressives.

C'est intentionnellement que j'ai placé la *maniabilité* au début de cette énumération. En effet, seule une bonne maniabilité du béton permet de garantir, dans l'ouvrage, toutes les autres qualités que l'on s'est efforcé d'obtenir par des essais préliminaires sur petits échantillons. L'*essai de rupture en compression* est celui que l'on utilise le plus souvent comme critère de qualité du béton. Une éprouvette, sciée dans un bloc, ou moulée, est comprimée jusqu'à rupture entre deux plateaux d'une presse. L'*essai de traction directe* n'est pas facile à réaliser pour les gros bétons. On le remplace par l'*essai de flexion* qui donne, il est vrai, un chiffre de résistance plus grand que celui résultant de l'*essai de traction directe* ; dans la pratique, on l'admet deux fois plus grand. Les *essais de gélivité et d'étanchéité* du béton sont complexes, en raison du nombre élevé de facteurs qui les influencent et de la difficulté que présente la reproduction en laboratoire des conditions réelles auxquelles l'ouvrage sera soumis. Enfin, le *module d'élasticité* est aussi un critère important de la qualité du béton.

3. Influence de la forme et de la dimension des éprouvettes

Il est connu que le cube, utilisé couramment dans l'*essai de rupture en compression*, donne une idée fausse

¹ Exposé fait aux « Journées d'études sur les problèmes actuels du béton ». Locarno 1958.