

# Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation

V. Furlan et Y. Houst

Les opinions émises dans cette chronique le sont sous la responsabilité propre des auteurs des articles mais n'engagent pas celle du Laboratoire des matériaux pierreux de l'EPFL.

## 1. INTRODUCTION

Les matériaux à caractère pouzzolanique sont généralement utilisés en mélange avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et bétons.

Les propriétés des matériaux pouzzolaniques sont de nos jours bien connues; nous pensons toutefois qu'il est utile de les rappeler. En effet, nous avons pu constater que l'usage fait de ces matériaux est parfois peu rationnel. Par exemple, on additionne aux chaux et aux ciments de petites quantités de matériaux pouzzolaniques alors que seuls des ajouts très importants permettent d'exploiter aux mieux leurs propriétés et avantages.

Après un bref historique, nous décrivons les matériaux pouzzolaniques les plus courants, leurs propriétés et leur utilisation.

## 2. HISTORIQUE

Les Grecs et les Romains avaient remarqué que les matériaux de certains dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier ayant non seulement des résistances mécaniques élevées, mais également une bonne tenue à l'action de l'eau douce et salée.

Les Grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin et ce matériau, connu sous le nom de «terre de Santorin», a encore aujourd'hui une grande réputation dans les pays méditerranéens.

Le matériau correspondant des Romains était un tuf volcanique rouge ou pourpre que l'on trouve en différents points de la baie de Naples. La meilleure variété de ces matériaux provenait des environs de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane qui a été ensuite donné à tout matériau ayant des propriétés analogues.

Lorsqu'ils n'avaient à disposition aucun matériau volcanique, les Grecs et les Romains utilisaient de la poudre de tuile ou de brique qui apparemment produit le même effet. Les poudres de terre cuite fabriquées spécialement pour cet usage, sont appelées aujourd'hui pouzzolanes artificielles. Les Romains ont utilisé de la tuile pilée, ou tuilleau, avant la découverte des pouzzolanes naturelles de la région de Rome et transmis leur connaissance dans tout l'Empire. Par exemple, les mortiers retrouvés en Angleterre, ou dans d'autres pays (voir la Suisse, fig. 1), sont de même qualité que les meilleurs mortiers d'Italie. L'usage de tufs volcaniques du Rhin, connus sous le nom de Trass, a probablement été introduit à cette époque et ce matériau, tout comme la pouzzolane, est encore employé de nos jours.

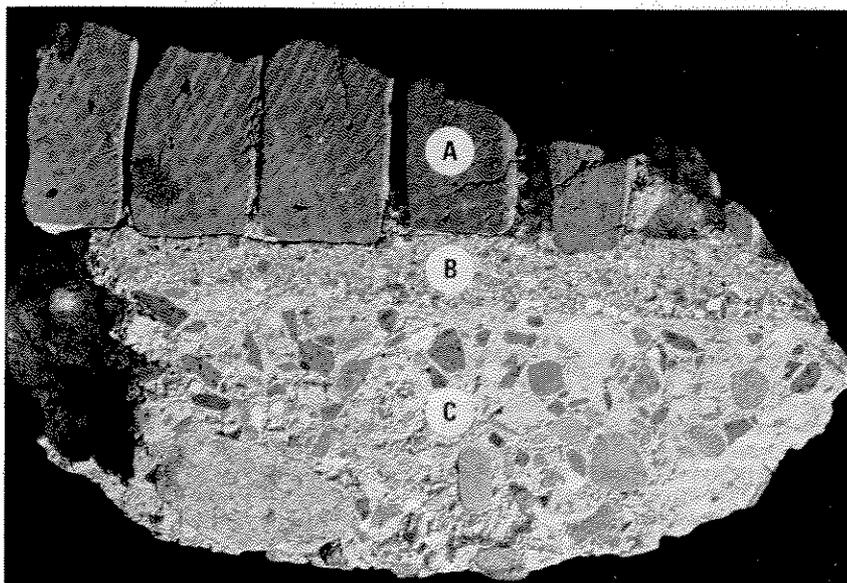


Fig. 1. Dallage en brique de terre cuite (A) d'époque romaine sur une chape (B) et un béton (C), d'excellente qualité, contenant du tuilleau. (Lousona-Vidy, environ II<sup>e</sup> siècle après J.-C.).

Le mélange romain de chaux et de pouzzolane naturelle ou artificielle est longtemps resté le seul matériau convenant aux ouvrages sous-marins ou exposés à l'eau.

Ce n'est qu'à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle avec l'invention des chaux hydrauliques et, plus tard, des ciments du type portland qu'on a pu confectionner des mortiers résistant à l'eau (réf. 3).

## 3. MATÉRIAUX À PROPRIÉTÉS POUZZOLANIKES

### 3.1 Définition

La définition donnée par Lea (réf. 7) est souvent citée:

*Les pouzzolanes sont communément définies comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes en eux-mêmes mais qui, en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.*

Dans les normes ASTM sur les ciments (Désignation C 340-58 T), la définition est pratiquement identique:

*Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent en eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.*

On remarque qu'aucune de ces deux définitions n'est basée sur la nature du matériau, mais seulement sur son aptitude à se combiner avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour former des composés possédant des propriétés liantes.

L'activité pouzzolanique désigne cette aptitude du matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et à durcir sous l'eau.

Le durcissement des produits de réaction n'est pas une conséquence obligatoire de la fixation de l'hydroxyde de calcium. En effet, ces caractéristiques sont séparées l'une de l'autre, et il peut arriver que de grandes quantités de chaux soient fixées par un matériau pouzzolanique, alors que les propriétés liantes des produits de réaction sont faibles.

Les matériaux à caractère pouzzolanique sont donc définis, en fonction de leur emploi, comme matériaux liants, indépendamment des phénomènes chimiques et chimico-physiques qui sont responsables du durcissement.

Beaucoup de matériaux, qui diffèrent grandement les uns des autres par leur origine, composition chimique et constitution minéralogique, peuvent réagir avec l'hydroxyde de calcium. Sur le diagramme de la figure 2, on peut voir la composition des pouzzolanes par rapport au laitier de haut fourneau et aux principaux liants. Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories: les matériaux naturels et les artificiels.

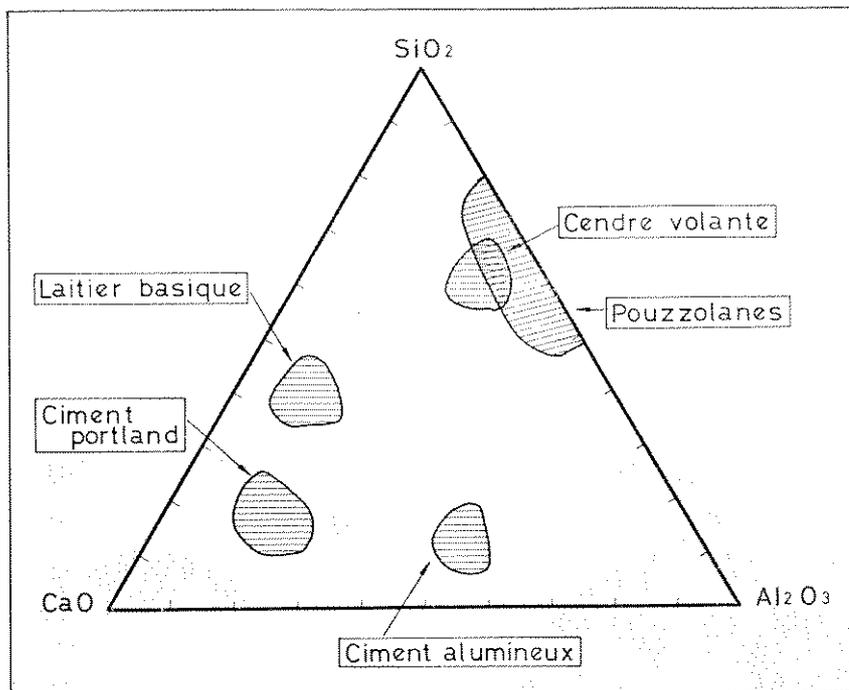


Fig. 2. Composition des pouzzolanes par rapport au laitier de haut fourneau et aux principaux ciments.

### 3.2 Pouzzolanes naturelles

Pour des raisons historiques et pour leur grande utilisation, il faut tout d'abord citer les pouzzolanes italiennes d'origine volcanique de Pozzuoli et du Latium.

Ces pouzzolanes sont des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques de type explosif. Les particules de ce type de roche sont dans un état vitreux ou du moins dans un état spécial d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium.

Les tufs volcaniques compacts, employés après pulvérisation, sont différents des pouzzolanes décrites ci-dessus. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'exemple le plus connu est le «trass» du Rhin qui est obtenu par broyage de la roche tufeuse très tendre des carrières de l'Eifel.

Des roches tufeuses compacts et broyées pour produire du trass sont utilisées, notamment en Bavière, en Roumanie et en Crimée.

Entre les pouzzolanes riches en composés vitreux et les tufs compacts, il y a toute une gamme de roches possédant des degrés d'activité pouzzolanique variables. Certains tufs sont même plus réactifs que les pouzzolanes.

POUZZOLANE	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Trass du Rhin	54,6	16,4	3,0	3,8
Trass du Rhin	54,8	17,2	2,3	4,4
Trass de Bavière	57,0	10,9	6,0	5,6
terre de Santarón *	63,2	12,2	4,0	4,9
terre de Santarón	65,2	12,8	3,2	6,3
Rhône				
- Sagel	44,1	17,3	17,0	10,7
- Sagel	48,2	21,9	7,5	9,6
- S. Pado	45,7	20,0	9,8	10,7
Naples				
- Sacoli	55,7	19,0	5,0	4,6
- Sals	59,5	19,3	2,1	2,3
Trass Roumain	62,5	11,6	6,6	1,8
Tuff de Dronse	70,1	10,7	2,5	1,0
Wegelleit USA	65,7	16,8	3,4	7,5
Pudricite	72,3	13,3	0,7	1,4
gaize crue	78,6	7,1	2,4	3,2
Diatomite crue USA	86,0	2,3	traces	1,8

Tableau 1. Principaux constituants de quelques pouzzolanes naturelles d'après la référence 7.

A côté des pouzzolanes et des tufs volcaniques compacts, plusieurs autres matériaux naturels ont une activité pouzzolanique: produits d'altération de roches volcaniques, terres à diatomées, argiles naturellement cuites par la lave incandescente qui a coulé sur elles, etc. La composition chimique de quelques pouzzolanes naturelles est donnée au tableau 1.

### 3.3 Pouzzolanes artificielles

#### Cendres volantes

Les pouzzolanes artificielles les plus importantes sont aujourd'hui les cendres volantes qui sont un résidu de combustion de la houille pulvérisée ou de la lignite, dans les centrales thermiques. Ces cendres, très fines, d'où leur nom, peuvent être stockées à l'état sec ou en silo ou humidifiées pour faciliter leur transport. Les quantités de cendres d'une centrale peuvent être très élevées et atteindre, pour certaines installations, 2000 tonnes/jour (réf. 9).

L'emploi des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a commencé aux USA en 1937 et depuis s'est largement répandu en Europe. Le constituant majeur (60 à 90 %) est une phase vitreuse accompagnée de composés cristallins, tels que le quartz. La phase vitreuse, surtout formée de silice et d'alumine, est la phase active des cendres volantes. La plupart des cendres volantes sont équivalentes aux meilleures pouzzolanes naturelles.

Les cendres volantes de houille, contenant une faible teneur en chaux et en sulfate, ont une composition proche de celle des cendres volcaniques. Les cendres de lignites contenant moins de silice et d'alumine et une plus forte teneur en chaux, ont de faibles propriétés hydrauliques.

#### Argiles calcinées

Comme on l'a vu précédemment les propriétés pouzzolaniques des argiles

calcinées étaient bien connues des Grecs et des Romains qui utilisaient des briques et des tuiles pilées pour remplacer les pouzzolanes naturelles. De nos jours, ces pouzzolanes artificielles sont obtenues généralement par cuisson d'argiles, à une température variant de 600° à 900° C, dépendant de la nature des matériaux et des conditions de calcination. Le produit obtenu est moulu à la finesse des ciments.

Les argiles crues sont essentiellement formées de silicates d'aluminium hydratés dont la formule peut être schématisée ainsi:  $xAl_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot nH_2O$ . Le traitement thermique détruit le réseau cristallin; l'eau est éliminée, la silice et l'alumine transformées dans un état amorphe. Dans cet état elles peuvent réagir rapidement, à la température ordinaire et en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium.

Un autre matériau naturel activé par traitement thermique est la «gaize», roche sédimentaire contenant de l'argile et une forte teneur en silice. On la trouve largement répandue en France dans les vallées des Ardennes et de la Meuse. La roche a été utilisée crue, comme pouzzolane, mais généralement on la calcine à environ 900° C. Un ciment pouzzolanique, composé de gaize calcinée et de ciment portland, a servi aux travaux de bétonnage de nombreux ports maritimes français (réf. 7).

La composition chimique de quelques pouzzolanes artificielles est donnée au tableau 2.

**Remarque: les laitiers de hauts fourneaux ne peuvent être inclus dans les matériaux pouzzolaniques puisqu'ils sont différents à la fois par leur composition et par leur mode de durcissement hydraulique. Les pouzzolanes, quelles que soient leur origine et leur composition, donnent des composés à propriétés liantes seulement par fixation d'hydroxyde de calcium, tandis que les laitiers sont eux-mêmes suffisamment basiques pour former des composés à propriétés liantes par une faible adjonction de chaux. Les laitiers ont toutefois une faible activité pouzzolanique dans le sens qu'ils sont capables de fixer de la chaux. Les chaux hydrauliques ont également cette propriété.**

POUZZOLANE	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Argile calcinée	58,7	16,4	3,0	3,8
gaize calcinée	56,0	4,4	1,2	2,3
Argentine calcinée USA	69,1	14,1	1,5	6,3
Cendre volante USB	47,1	16,2	2,6	19,0
Cendre volante L.-D.	45,0	14,4	1,6	12,3
Cendre volante houille f.	58	19	3	9 *
Cendre volante lignite f.	49	29	2	11 *
Cendre de lignite f.	35	11	10	11 *
Cendre de lignite T.	30	8	45	6 *

\* Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>

Tableau 2. Principaux constituants de quelques pouzzolanes artificielles d'après les références 7 et 9.

## 4. L'ACTIVITÉ POUZZOLANIQUE

### 4.1 Réactions avec la chaux

Les différents matériaux décrits dans le chapitre précédent possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'eau, pour former des composés possédant des propriétés liantes. Du point de vue de cette propriété,

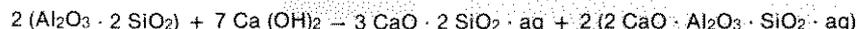
l'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être dissociée. Il y a des matériaux siliceux, avec pas ou très peu d'alumine, qui fixent très rapidement d'importantes quantités de chaux, mais qui ne donnent que de faibles résistances mécaniques. La présence d'alumine réactive augmente considérablement les résistances mécaniques, surtout à court terme.

Deux théories principales ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes: l'échange de base et la combinaison directe.

Selon la première théorie, les pouzzolanes auraient la propriété d'échanger leurs alcalis contre le calcium. Cette propriété est la même que celle que possèdent les résines échangeuses d'ions utilisées pour déminéraliser l'eau (permutation). De nombreux travaux ont montré que cette théorie n'est pas très valable et que l'échange d'ions ne joue qu'un rôle secondaire.

La combinaison progressive de la chaux avec la pouzzolane, selon la deuxième théorie, a pu être confirmée de plusieurs manières.

L'étude des produits de réaction s'est révélée cependant difficile et les composés identifiés à ce jour sont très nombreux. La réaction de certaines pouzzolanes artificielles peut par exemple être représentée par l'équation suivante:



#### 4.2 Evaluation de l'activité pouzzolanique

Divers essais ont été proposés et employés dans le passé pour évaluer l'activité pouzzolanique. Actuellement, deux seuls types d'essai sont généralement retenus. Ils sont basés sur deux facteurs: a) la résistance mécanique de mortiers et bétons confectionnés avec des mélanges chaux ou ciment portland-pouzzolane et b) la réduction de l'hydroxyde de calcium dans le ciment pouzzolanique durci.

Des méthodes d'essais basées sur la résistance mécanique sont données par l'ASTM (réf. 1 et 2).

Indépendamment des méthodes standard, pour déterminer l'efficacité d'une pouzzolane, on peut simplement comparer la résistance mécanique de deux séries d'éprouvettes de mortier, l'une confectionnée en remplaçant une partie du ciment (par exemple 30%) par la pouzzolane et l'autre par une poudre inerte. Les essais effectués à 14, 28 et 90 jours par exemple. Si les mortiers contenant la pouzzolane ont des résistances mécaniques supérieures, la pouzzolane est donc active.

Une méthode d'essai accéléré, basée sur la réduction en chaux pour évaluer si un liant satisfait à l'appellation de ciment pouzzolanique, a été proposée par Fratini en 1950. Cet essai (réf. 6), actuellement admis universellement, consiste, à comparer la quantité d'hydroxyde de calcium présente dans la solution aqueuse en contact avec le liant hydraté, avec la quantité d'hydroxyde de calcium pouvant saturer un milieu de même alcalinité. Les ciments pouzzolaniques donnent toujours des solutions sous-saturées en chaux. Par conséquent, sur le diagramme de la figure 3, les points représentant la composition de la solution en contact avec des ciments pouzzolaniques doivent se trouver au-dessous de la courbe de saturation.

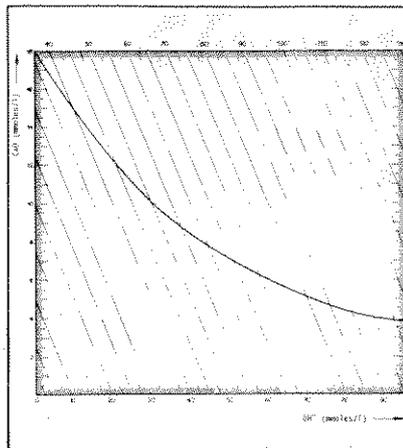


Fig. 3. Diagramme de pouzzolanité.

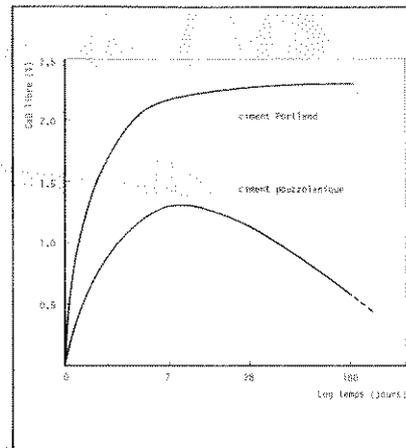


Fig. 4. Chaux libre dans mortiers 1:3 (réf. 7).

### 5. UTILISATION DES POUZZOLANES

#### 5.1 Mélanges chaux-pouzzolane

Les pouzzolanes sont normalement utilisées avec des chaux aériennes à

formation de composés chaux-pouzzolane.

Le remplacement d'une partie du ciment par la pouzzolane réduit les résistances à court terme, mais donne généralement des résistances supérieures à long terme. Cela est illustré par les figures 5 et 6 où l'on peut constater l'évolution des résistances à la compression et à la flexion de mortiers confectionnés avec deux ciments portland suisses et ces mêmes ciments additionnés de trass. Le dosage en liant est le même pour tous les mortiers. Le liant pouzzolanique est formé de 70% de ciment et de 30% de trass.

On remarque que les résistances à la compression sont un peu inférieures à 7 et 28 jours tandis qu'elles sont égales ou supérieures à 90 jours.

Les résistances à la flexion sont toujours inférieures, mais tendent vers les mêmes valeurs à 90 jours. En général, ces résistances sont supérieures à plus long terme.

Le développement des résistances mécaniques des ciments pouzzolaniques est fortement accéléré par une augmentation de température. Inversement, à basse température, les résistances mécaniques des ciments pouzzolaniques sont plus fortement affectées que celles des ciments portland.

Les bétons au ciment pouzzolanique demandent une longue période de conservation à l'état humide si l'on désire obtenir les meilleurs résultats. C'est naturellement aussi une caractéristique des ciments portland, mais elle est nettement plus marquée avec les ciments pouzzolaniques. Dans le cas d'éléments minces, exposés à l'air et soumis à une dessiccation rapide, il faut pratiquement considérer la pouzzolane comme inerte et donc comme un simple diluant du ciment. Cependant, dans un béton, et particulièrement dans la pâte de ciment, un peu d'eau est toujours retenue, ce qui permet au clinker de s'hydrater ultérieurement avec libération de chaux susceptible de réagir, dans une certaine mesure, avec la pouzzolane.

Les ciments pouzzolaniques ont une chaleur d'hydratation plus basse et une résistance à la corrosion plus élevée que celles des ciments portland ordinaires. La structure particulière du ciment durci et notamment la présence de composés pseudo-gélatineux qui tendent à remplir les vides, assurent également une meilleure étanchéité aux bétons de ciment pouzzolanique. Cette propriété

haute teneur en calcium. Le temps de prise de tels mélanges varie de 1 à 3 heures pour le début de prise et de 10 à 12 heures pour la fin de prise. Les résistances mécaniques obtenues avec des mélanges chaux-pouzzolane varient selon le rapport chaux-pouzzolane. Avec des matériaux finement divisés et bien mélangés, à court terme, la résistance maximum est obtenue avec un rapport chaux-pouzzolane d'environ 1:4, mais à long terme (environ 1 an), les mélanges 1:3 à 1:2 donnent les meilleures résistances. Pour confectionner des mortiers, le rapport liant-sable est de 1:3 à 2:3. L'augmentation de température a un effet favorable important sur la vitesse d'augmentation de la résistance. Des additions de gypse de l'ordre de 5% sont courantes en Italie. Elles accélèrent la prise et le durcissement des mortiers et augmentent la résistance à l'attaque de l'eau de mer. La conservation des mortiers à l'état humide est essentielle pour obtenir de bonnes résistances. En général, dans le bâtiment, les mélanges de chaux hydratée et pouzzolane remplacent avantageusement les chaux hydrauliques. Des mélanges chaux-pouzzolane, et notamment chaux-cendres volantes, sont utilisées également dans la stabilisation des sols (réf. 9).

#### 5.2 Ciments pouzzolaniques

A l'origine, les pouzzolanés ont été additionnées au ciment portland (ciment pouzzolanique = ciment portland + pouzzolane) dans le but de fixer l'hydroxyde de calcium libéré pendant l'hydratation de ce type de liant (fig. 4).

Les inconvénients découlant de ce phénomène ont été décrits dans la référence 5.

L'hydroxyde de calcium, qui est particulièrement sujet au délavage et aux attaques chimiques, est ainsi fixé par

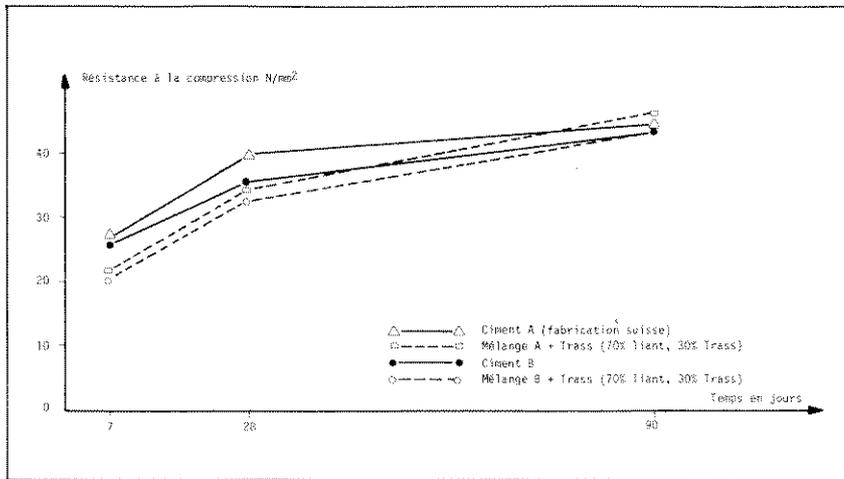


Fig. 5. Résistance à la compression de mortier au CP avec et sans trass.

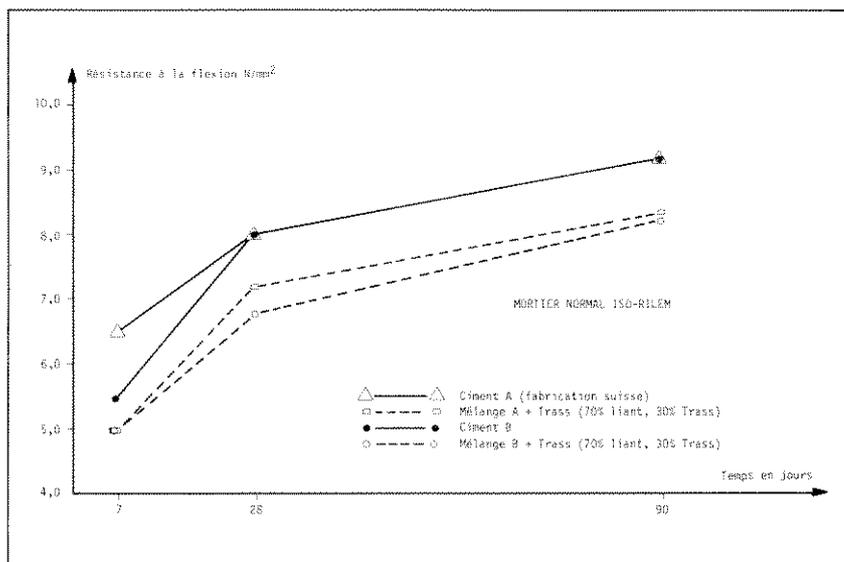


Fig. 6. Résistance à la flexion de mortier au CP avec et sans trass.

est particulièrement importante pour les bétons des ouvrages en contact constant avec l'eau. En Italie, des quantités très importantes de ciment pouzzolanique ont été utilisées pour ces ouvrages et les résultats ont toujours été excellents.

Avec des additions telles que poudres à diatomées, la maniabilité des bétons est augmentée et la tendance à la ségrégation des granulats est diminuée par un même rapport E/C.

Les ciments pouzzolaniques ne possèdent pas une résistance intrinsèque et spécifique aux attaques des sulfates. Cependant, comme l'hydroxyde de calcium disparaît graduellement avec l'action pouzzolanique, les conditions de formation et de stabilité de sulfoaluminates expansifs sont défavorables. La basicité réduite du ciment pouzzolanique et la basse teneur en hydroxyde de calcium, comme l'action protectrice et d'étanchéité des nouveaux composés formés, diminuent les échanges avec l'extérieur. Ces facteurs expliquent certainement la meilleure résistance des ciments pouzzolaniques aux attaques des sulfates.

On peut s'attendre qu'une conservation à l'humidité prolongée augmente encore la résistance aux agents agressifs puisqu'elle permet une meilleure

réaction de la pouzzolane et une plus importante formation de composés gélatineux.

L'addition de certaines pouzzolanes au ciment portland est également considérée comme un moyen efficace pour réduire l'expansion due à la réaction alcalis-granulats (réf. 4). Les matériaux pouzzolaniques en question ne doivent contenir que peu ou pas d'alcalis. Les meilleurs sont certaines argiles calcinées, certains types de cendres volantes et les terres à diatomées. Les pouzzolanes italiennes et le trass qui libèrent des quantités relativement importantes d'alcalis ne sont en principe pas recommandables pour prévenir la réaction alcalis-granulats. Cependant, en Italie, où l'on utilise des pouzzolanes depuis plus de deux mille ans avec la chaux et depuis soixante-dix ans avec le ciment portland, aucun dégât n'est survenu bien que l'on ait souvent utilisé des granulats comme la lave, contenant des verres réactifs.

Les ciments pouzzolaniques ont cependant un inconvénient par rapport aux ciments portland. Ils demandent un peu plus d'eau de gâchage; le retrait au séchage ainsi que l'expansion au mouillage sont plus élevés. On admet également que les bétons aux ciments pouzzolaniques ont une résistance au gel

inférieure à celle des bétons au ciment portland, bien que ce défaut puisse être combattu par l'adjonction d'agents entraîneurs d'air.

L'emploi de ciments pouzzolaniques pour d'autres applications que les travaux maritimes et les grandes constructions massives en béton coulé a été et est certainement encore freiné par le manque de critères valables pour prédire le comportement des pouzzolanes lorsqu'on les mélange aux ciments. Les propriétés physico-mécaniques des mélanges dépendent à la fois du clinker et du type de pouzzolane, aussi bien que de la proportion du mélange.

En fonction du but recherché, l'optimisation du mélange ciment-pouzzolane requiert presque toujours une étude préalable, souvent d'assez longue durée. En effet, malgré les connaissances actuelles, il est pratiquement impossible d'estimer a priori et avec précision le mélange qui donnera les meilleures performances.

Cependant, tous les travaux qui ne concernent pas des éléments minces, comme les structures précontraintes légères, pourraient être réalisés avec des ciments pouzzolaniques. En Italie par exemple, les ciments avec des fortes teneurs en pouzzolane sont utilisés depuis de longues années pour toute sorte de constructions courantes et la demande de tels ciments est toujours considérable.

## RÉFÉRENCES

- (1) ASTM, *Fly ash and other pozzolans for use with lime*, C 593 - 76 a, Part 13, Philadelphia (1977), pp. 363-368.
- (2) ASTM, *Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete*, C 311 - 77, Part 14, Philadelphia (1977), pp. 220-231.
- (3) FURLAN V., BISSEGGER P., *Les mortiers anciens - Histoire et essai d'analyse scientifique*, «Revue suisse d'art et d'archéologie» 32 (1975), pp. 166-178.
- (4) FURLAN V., HOUST Y., *Réaction des alcalis du ciment avec les granulats et le verre*. «chantiers» N° 11 (1979), pp. 51-54.
- (5) HOUST Y., DELISLE J.-P., *L'obstruction des canalisations et drainages en béton filtrant par les dépôts calcaires*.
- (6) ISO, *Essai de pouzzolanité pour le contrôle des ciments pouzzolaniques*, Recommandation ISO R 863, Genève (1968).
- (7) LEA F.M., *The chemistry of cement and concrete*, Ed. Arnold, 3th Ed., Glasgow (1970), pp. 414-453.
- (8) MALQUORI G., *Portland-pozzolans cement*, Proc. 4th, Intern. Symp. Chem. Cem., Washington (1960), pp. 983-1000.
- (9) VENUAT M., *Le traitement des sols à la chaux*, Ed. par l'auteur, Châtillon-sur-Bagneux (1980).
- (10) VENUAT M., *La pratique des ciments et des bétons*, Ed. du Moniteur, Paris, (1976).