Zeitschrift: Bulletin du ciment

Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)

Band: 63 (1995)

Heft: 7

Artikel: Les ajouts : les fumées de silice

Autor: Hermann, Kurt

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-146373

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

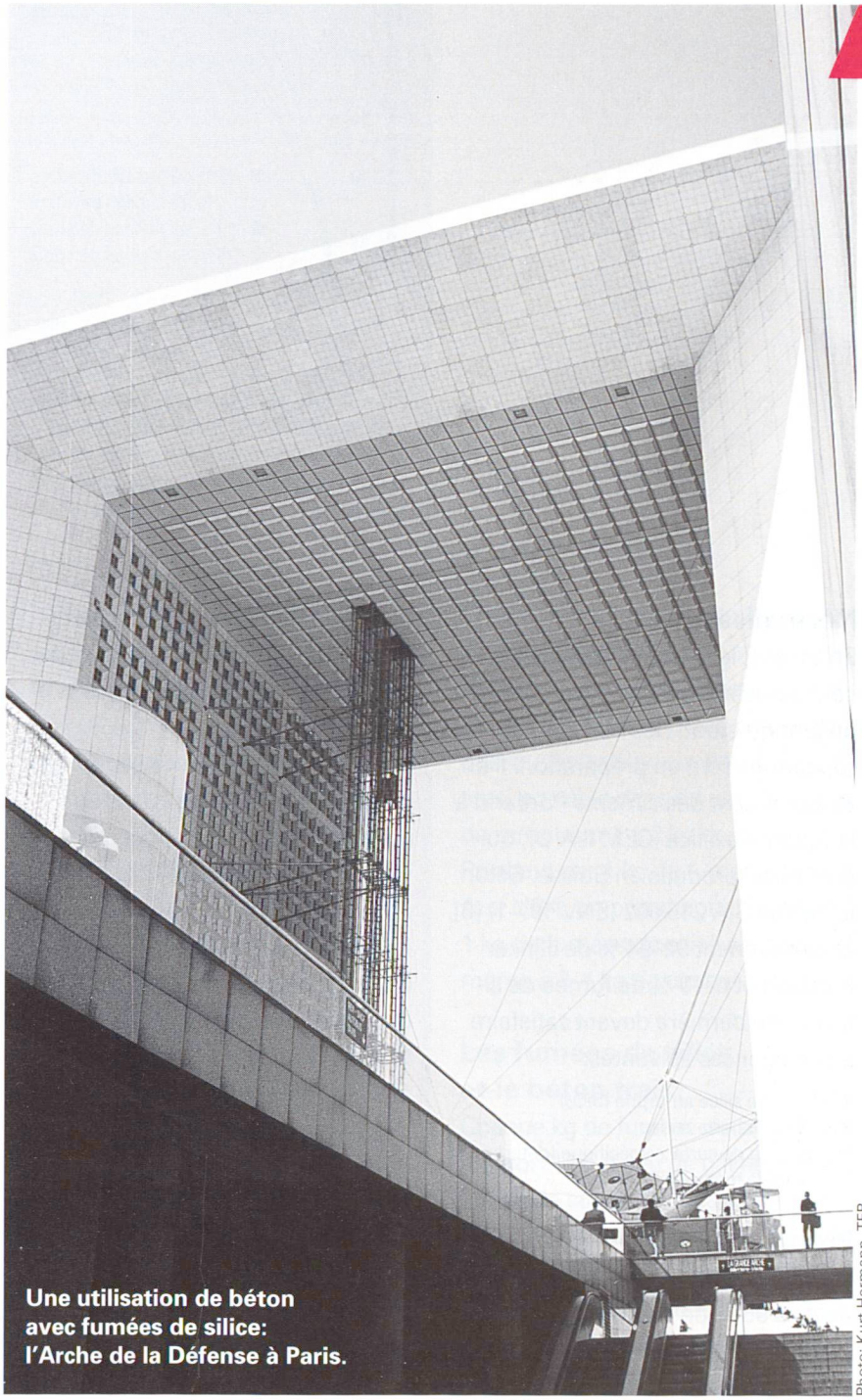
Download PDF: 16.12.2025

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

4e partie

Les ajouts: les fumées de silice

Les fumées de silice sont des pouzzolanes très réactives et des fillers efficaces, utilisés pour la fabrication de bétons à propriétés particulières (p. ex. résistance mécanique et étanchéité élevées).



Une utilisation de béton avec fumées de silice: l'Arche de la Défense à Paris.

Photo: Kurt Hermann, TFB

Dans la petite série consacrée aux ajouts, cet article sur les fumées de silice fait suite à ceux sur les ajouts en général [1], sur la chaux hydraulique [2] et sur les cendres volantes [3]. Comme les cendres volantes, les fumées de silice doivent être importées. Leur analogie avec les cendres volantes va d'ailleurs plus loin: les fumées de silice sont des déchets que l'on a cherché à évacuer de façon avantageuse. Leur prix est aujourd'hui souvent supérieur à celui du ciment.

Origine

Les fumées de silice (également appelées silice, microsilice ou silicafume) sont un sous-produit résultant de la production de silicium et d'alliages au silicium (ferrosilicium): dans des fours à fusion par arc électrique, du quartz de grande pureté (SiO_2), partiellement réduit, s'évapore à environ 1900 °C sous forme de SiO. Les gaz brûlés se refroidissent dans les cheminées, et le SiO, qui s'oxyde en SiO_2, se condense sous forme de fumées de silice amorphes [4].

Les cendres de balles de riz (rice-husk ash) sont un autre sous-produit dont la composition et les propriétés sont pareilles à celles des fumées de silice. Dans les rizeries, le décorticage produit quelque 100 millions de tonnes de balles de riz par année. Une incinération contrôlée – entre 500 et 700 °C – de ces balles donne, par tonne, environ 200 kg d'un matériau hautement pouzzolanique, qui contient 90–95 % de SiO_2 et, comme les fumées de silice, peut être utilisé comme ajout [5]. L'utilisation de ce matériau pourrait être intéressante surtout dans les pays en voie de développement, où le ciment est souvent très cher, et où les balles de riz sont produites en grandes quantités.

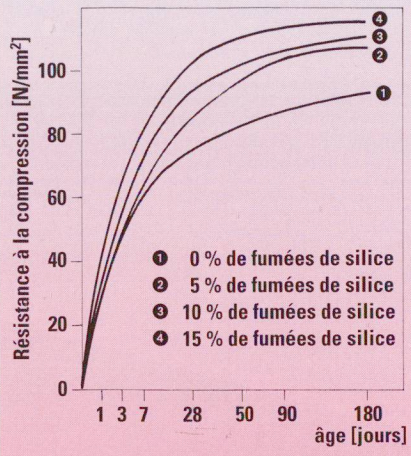


Fig. 1 Développement de la résistance de bétons avec différentes teneurs en fumées de silice, mais avec même facteur e/(c + s) (0,33) selon [10]. Graphique: TFB/ZSD, S. Einfalt

Normalisation

En Suisse, les fumées de silice ne sont actuellement pas normalisées en tant qu'ajout. Des normes européennes sont en préparation. Il en va autrement des ciments Portland à la fumée de silice (CEM II/A-D), qui sont aussi produits en Suisse. Selon la norme SIA 215.002 (ENV 197-1) [6], ils contiennent 90–94 % de clinker Portland et 6–10 % de fumée de silice, cette dernière devant satisfaire aux exigences suivantes:

- ≥ 85 % de silice amorphe (SiO_2)
- ≤ 4 % de perte au feu
- ≥ 15 m^2/g de surface spécifique (déterminée suivant la méthode BET)

Propriétés

Les fumées de silice se composent de 85 à 95 % de dioxyde de silicium (SiO_2) sous forme non cristalline. Elles se présentent en particules sphériques, qui se caractérisent par une grande surface spécifique et par un très petit diamètre (< 0,0001 mm ou < 0,1 µm en majeure partie). Les principales grandeurs caractéristiques des fumées de silice, cendres volantes et ciments Portland figurent dans le *tableau 1*. Ce tableau contient également des indications sur ce qu'on appelle la «silice de synthèse», qui est encore plus fine que les fumées de silice.

On peut juger de la grande finesse des particules de fumée de silice en sachant que leur surface spécifique est comparable à celle de la fumée de cigarette (10 à 25 m^2/g) [4], ou que 1 kg de fumées de silice a la même surface qu'environ 60 kg de ciment. Les fumées de silice sont proposées sous trois formes [4, 7]:

- poudre non densifiée, d'une densité apparente d'environ 200 kg/m^3; pratiquement pas manipulable sur les chantiers;
- poudre densifiée, d'une densité apparente d'environ 500 kg/m^3; sa manipulation ne pose pas de problème, mais la durée du malaxage doit être prolongée afin que l'ajout soit réparti uniformément;
- suspension aqueuse (coulis) avec environ 50 % de matières solides (densité apparente d'environ 1400 kg/m^3); sensible au gel, doit être remuée pour rester homogène et stable.

	fumées de silice	cendres volantes de houille	ciments Portland
teneur en SiO_2 [%]	85–95	40–60	17–25
teneur en CaO [%]	0,1–5	3–7	60–67
teneur en Al_2O_3 [%]	0,2–3	20–30	2–8
densité [kg/dm^3]	2,1–2,2	2,1–2,4	3,1–3,2
surface spécifique [m^2/g]	15–25 (BET)	0,3–0,55 (Blaine)	0,28–0,7 (Blaine)
densité apparente [kg/dm^3]	0,2–0,3	0,8–1,0	1,2–1,4
grandeur moyenne des particules [µm]	0,1–0,2	10	10
perte au feu [%]	0,7–4	0,5–12	0,5–5

Tab. 1 Comparaison des principales grandeurs caractéristiques des fumées de silice, cendres volantes et ciments Portland [4].

Mode d'action

Comme les cendres volantes, les fumées de silice ont une réaction pouzzolanique. Elles réagissent avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment et se transforment en silicate de calcium hydraté (CSH). Mais en raison de leur grande finesse et de leur teneur élevée en SiO_2, elles sont beaucoup plus réactives que les cendres volantes. Cela se manifeste par exemple par le fait que si l'on utilise de la fumée de silice comme ajout ou pour remplacer une partie du ciment, la chaleur d'hydratation d'un béton augmente pendant les trois premiers jours [8, 9].

L'augmentation considérable de la résistance et de la durabilité des bétons contenant de la fumée de silice par rapport aux bétons sans ajout s'explique généralement par une plus fine répartition des pores. Mais il ressort de recherches récentes que l'augmen-

Les fumées de silice améliorent la liaison

Lors de la comparaison entre des bétons avec même facteur e/c ou e/(c + s) (s = fumées de silice), on remarque que ces bétons témoignent de la même porosité globale, indépendamment d'une teneur en fumées de silice. Cependant, dans les bétons contenant des fumées de silice, la quantité de gros pores diminue au profit de pores plus fins.
Vu que la résistance d'un béton est déterminée essentiellement par la porosité, la résistance à la compression de ces bétons devrait être pareille. Les bétons contenant des fumées de silice sont toutefois plus résistants que les bétons de référence n'en contenant pas. On peut en conclure que l'augmentation de la résistance est certainement due à un autre effet, par exemple à une amélioration de la liaison entre les granulats et la pâte de ciment durcie. Ce phénomène est représenté schématiquement dans la *figure 2*, de *a* à *d*.
Dans le béton frais «normal», le ressuage, ainsi que le compactage incomplet des particules de ciment autour de la surface des granulats, donnent naissance à une zone qui est remplie d'eau (*figure 2a*). Au cours du durcissement, il se forme autour de la surface des granulats une zone de transition, qui contient de l'hydroxyde de calcium (CH), du silicate de calcium hydraté (CSH), du clinker (CP), un peu d'ettringite (ETT), et de l'eau (*figure 2b*). La pâte de ciment durcie devient de ce fait plus poreuse dans les zones de transition que dans les vides entre granulats, et la liaison entre pâte de ciment durcie et granulats s'en trouve affaiblie.
Les particules de fumées de silice agissent initialement comme des fillers; elles prennent la place qu'occupe l'eau dans les bétons sans fumées de silice (*figure 2c*). Une deuxième phase donne lieu à la formation de CSH à partir des particules de fumées de silice pouzzolaniques très tassées. La pâte de ciment durcie devient ainsi plus dense également à proximité immédiate des granulats. La liaison entre pâte de ciment durcie et granulats, et de ce fait la résistance à la compression, s'en trouvent renforcées (*figure 2d*).

Source: [10]

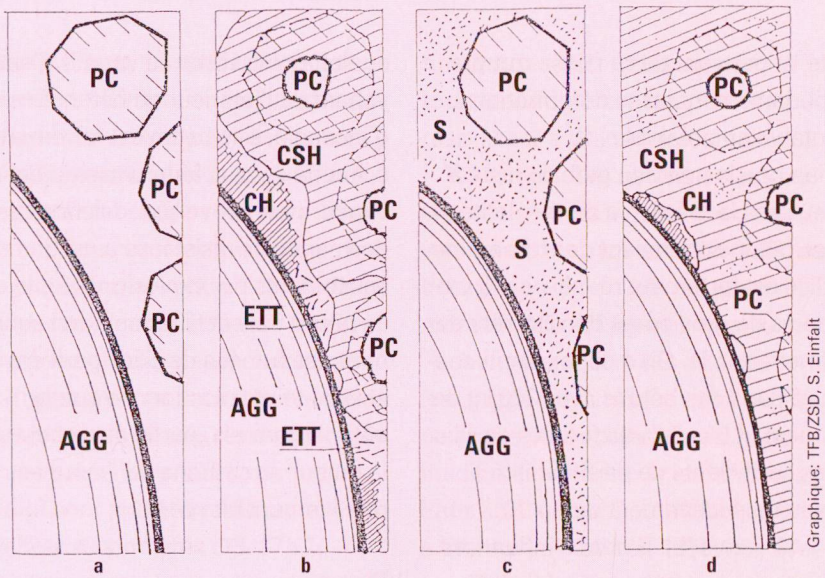


Fig. 2 Représentation schématique de la formation de zones de transition dans les bétons sans (*2a* et *2b*) et avec fumées de silice (*2c* et *2d*) selon [10] (voir texte). Abréviations: AGG = granulats, PC = particules de clinker Portland, S = particules de fumées de silice, CH = $Ca(OH)_2$, CSH = silicate de calcium hydraté, ETT = ettringite.

tation de la résistance peut également être due à une meilleure liaison entre la pâte de ciment durcie et les granulats [10]. Ce phénomène est expliqué en détail dans l'encadré «Les fumées de silice améliorent la liaison».

Utilisation

Les fumées de silice peuvent être utilisées aussi bien comme ajout que comme substitut du ciment. Les ciments Portland à la fumée de silice (CEM II/A-D) ont d'ailleurs déjà été mentionnés dans cet article.
La façon de prendre en compte les fumées de silice (s) pour le calcul du facteur eau/liant (facteur e/l) est aussi discutée que celle pour les cendres volantes de houille. Ce problème a été présenté en détail dans l'encadré «Possibilités de prise en compte des cendres volantes de houille dans le béton» figurant dans le précédent numéro du «Bulletin du ciment» [3]. C'est pourquoi il n'en sera traité ici que brièvement.
Dans la forme révisée de l'EN 206 actuellement en discussion, on donne pour base de calcul de la valeur e/l la formule suivante:

$$e/l = e(c + k\,s)$$

Pour k, des facteurs entre 1 et 2 sont en discussion. La teneur en fumées de silice sera probablement limitée à environ 10 % de la masse (par rapport au dosage en ciment). Il serait ainsi possible dans de nombreux cas de remplacer 1 à 2 kg de ciment Portland par 1 kg de fumées de silice. Aux USA, on prend pour base que 1 kg de fumées de silice correspond même à 3–4 kg de ciment [11].

Les fumées de silice et le béton frais

Chaque kg de fumées de silice fixe environ 1 kg d'eau de gâchage sous forme de couche mince sur la surface [4]. Les particules de fumées de silice mouillées adhèrent aux particules de ciment, lesquelles sont de ce fait réparties uniformément. Elles remplacent également une partie de l'eau interstitielle. Il en résulte une pâte de ciment durcie de structure plus régulière [12].
Les fumées de silice exigeant beaucoup d'eau, particulièrement si elles sont utilisées en grandes quantités, le béton obtenu est collant et difficile à mettre en œuvre. On peut y remédier en ajoutant des plastifiants (BV) ou des superfluidifiants (HBV) [12]. Un béton frais de cette composition témoigne d'une bonne cohésion et d'une bonne pompabilité et, même de consistance plastique, ne tend ni

Photo: Bram van Egmond, TFB

Mise en place d'un revêtement routier en béton recyclé contenant des fumées de silice (N 13).

au ressuage ni à la ségrégation [8, 12]. Les fumées de silice ayant une grande affinité avec l'eau, l'eau s'évaporant à la surface ne vient pas de l'intérieur du béton. Le traitement de cure pour humidifier le béton doit commencer sitôt après la mise en place, afin d'empêcher la formation de fissures de retrait à un stade précoce [11].

Les fumées de silice et le béton durci

Deux des propriétés des bétons contenant des fumées de silice sont particulièrement intéressantes: la faible perméabilité et la résistance élevée. C'est entre le 3e et le 28e jour que les fumées de silice apportent la principale contribution à la résistance. La résistance à un jour est généralement pareille ou supérieure à celle des bétons sans fumées de silice, indépendamment de l'utilisation des fumées de silice comme substitut du ciment ou comme ajout [11]. La *figure 1* donne une idée du développement de la résistance dans le temps. Les fumées de silice augmentent non seulement la résistance à la compression, mais également la résistance à la traction par flexion et – ce qui souvent n'est pas souhaité – le module d'élasticité [11]. Les bétons à haute résistance en particulier – sur lesquels nous reviendrons plus loin – sont sensibles à la rupture de fragilité, et peuvent de ce fait se rompre soudainement, sans déformation notable au préalable [4].

Bien que la porosité globale reste à peu près la même, la perméabilité des bétons contenant des fumées de silice est fortement réduite, car il y a moins de gros pores dans la pâte de ciment durcie. On a par exemple mesuré dans des bétons avec 300 kg de ciment et 0 et 5 % de fumées de silice des cœfficients de perméabilité à l'eau respectivement de 3×10^{-11} et 6×10^{-14} m/s [8]. D'autres influences positives de cette perméabilité réduite sont:

- résistance plus élevée aux agents chimiques agressifs [8],
- profondeurs de carbonatation réduites [8],
- faibles profondeurs de pénétration des chlorures [8],
- plus grande résistance aux sulfates même avec des ciments à teneur élevée en C_3A [11],
- amélioration tendancielle de la résistance au gel et aux fondants chimiques [8, 14].

La réduction de la perméabilité et la conductivité moindre favorisent la protection contre la corrosion [8]. De plus, malgré la réaction pouzzolanique de l'ajout, la valeur pH ne tombe pas en-dessous de 12, même avec des quantités relativement élevées de fumées de silice dans le ciment Portland; la protection de l'armature contre la corrosion par un milieu fortement basique est ainsi assurée. La faible perméabilité des bétons contenant des fumées de silice entrave également la sortie de vapeur d'eau venant de l'intérieur du béton. En cas d'incendie, si le béton est fortement échauffé, la plus forte pression de la vapeur peut provoquer des fissures, des pertes de résistance ainsi que des éclatements par explosion [15].

Le béton frais et le béton durci contenant des fumées de silice peuvent être de teinte plus foncée que le béton «normal», particulièrement si la teneur en carbone de l'ajout est relativement élevée [11].

Dosage

Les fumées de silice sont généralement ajoutées en quantités variant entre 5 et 15 % de la masse de ciment. C'est cependant à partir de 10 % de la masse que l'on constate une nette amélioration de l'ouvrabilité [16]. Le dosage de certains entraîneurs d'air doit être plus élevé dans les bétons contenant des fumées de silice que dans les bétons «normaux», particulièrement en présence de faibles valeurs e/(c + s) [8] et de certains superfluidifiants.

Utilisations

Des fumées de silice ont été utilisées pour la première fois en 1952, à Oslo, pour la construction d'un tunnel, où l'on s'en était servi pour remplacer 15 % de la masse de ciment [12]. Ce n'est toutefois que depuis la fin des

années 70 que leur utilisation s'est répandue. L'utilisation de fumées de silice est conseillée pour des bétons à propriétés particulières (résistances ou étanchéité élevées) ou pour des éléments de construction spéciaux. Les plates-formes pétrolières en mer, pour lesquelles la résistance aux intempéries et aux agents chimiques est importante, en sont des exemples frappants. Les hautes résistances à la compression (env. 80 N/mm^2) et la rigidité sont mises à profit en tant qu'effets secondaires [15, 17].
Les bétons à haute résistance ne doivent pas obligatoirement contenir des fumées de silice. Cet ajout permet toutefois d'obtenir à coup sûr des résistances à la compression de > 100 N/mm^2. Les bétons à haute résistance se caractérisent par de faibles valeurs e/c ou e/(c + s) (0,22–0,36), des dosages en ciment élevés (généralement de 380–450 kg/m^3), quelques % en masse de fumées de silice (par rapport à la masse de ciment), ainsi que par la présence de superfluidifiants. L'Arche de la Défense à Paris ainsi que le South Wacker Drive à Chicago, achevé en 1990, qui, avec ses 292 m, est l'immeuble commercial le plus haut du monde, comptent parmi les nombreux ouvrages pour lesquels on a utilisé du béton à haute résistance [15]. Aux USA, le nombre de ponts construits avec du béton contenant des fumées de silice est en augmentation, et en Scandinavie on construit des routes qui, avec des résistances à la compression de 100 à 110 N/mm^2, témoignent d'une grande résistance à l'usure [16].
Le béton projeté est un autre domaine d'utilisation des fumées de silice, sous leurs trois formes. En plus des effets déjà mentionnés (augmentation de la résistance à la compression et amélioration de l'étanchéité), les fumées de silice diminuent considérablement le rebond et, grâce au plus grand pouvoir agglutinant, permettent l'application de couches plus épaisses sur surfaces verticales et en plafond, avec une meilleure adhérence sur le support [19].

Les fumées de silice – un risque pour la santé?

Il ressort des quelques études publiées, que les fumées de silice, malgré leur très grande finesse et leur nature non cristalline, ne présentent aucun risque pour la santé des utilisateurs. Aux USA, on a cependant fixé pour les fumées de silice une valeur de concentration maximale à l'emplacement de travail de 10 mg/m^3 [5, 11].

Kurt Hermann

Bibliographie

[1] *Hermann, K.*, «Les ajouts», Bulletin du ciment **63** [4], 3–7 (1995).
[2] *Hermann, K.*, «Les ajouts: la chaux hydraulique», Bulletin du ciment **63** [5], 3–7 (1995).
[3] *Hermann, K.*, «Les ajouts: les cendres volantes», Bulletin du ciment **63** [6], 3–7 (1995).
[4] *Linder, R.*, «Silica für Beton-Bauteile und -Waren?», Betonwerk + Fertigteil-Technik **58** [11], 63–68 (1992).
[5] *Malhotra, V.M.*, «Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: A review», Concrete International **15** [4], 23–28 (1993).
[6] Norme SIA 215.002, «Ciment – composition, spécifications et critères de conformité – Partie 1: Ciments courants» (édition 1993).
[7] *Bächli, R.*, et *Bracher G.*, «Béton projeté à haute durabilité et hautes performances avec la technologie des fumées de silice», dans «Tunnels et ouvrages souterrains», Sika Information, pages 19–25 (1991).
[8] *Khayat, K.H.*, and *Aitcin, P.-C.*, «Silica fume – A unique supplementary cementitious material» in *Gosh, S.N.*, *Sarkar, S.L.*, and *Hars, S.*, (éd.) «Mineral admixtures in cement and concrete» vol. 4 of «Progress in Cement and Concrete», ABI Books Pvt. Ltd., New Delhi (1994), pages 227–265.
[9] «Guide to using silica fume in precast/prestressed concrete products», PCI Journal **39** [5], 37–45 (1994).
[10] *Goldman, A.*, and *Bentur, A.*, «Bond strengths in high-strength silica-fume concretes», ACI Materials Journal **86** [5], 440–447 (1989).
[11] «Silica fume in concrete», reported by ACI Committee 226, ACI Materials Journal **84** [2], 158–166 (1987).
[12] *Herfurt, E.*, «Microsilica-Stäube als Betonzusatzstoff», Beton- und Stahlbetonbau **83** [6], 172–173 (1988).
[13] *Hermann, K.*, «Les adjuvants: BV et HBV», Bulletin du ciment **62** [10], 3–7 (1994).
[14] *Bürge, Th.*, «Les fumées de silice: une nouvelle technologie», dans «La technologie des fumées de silice», Sika Information, pages 4–11 (1989).
[15] «Hochfester Beton», rapport édité par l'Österreichischer Betonverein (1993).
[16] *Walraven, J.C.*, «Hochfester Beton – Herstellung», Betonwerk + Fertigteil-Technik **58** [2], 68–72 (1992).
[17] «Beton met hoge sterkte», Betoniek **12** [9], 1–8 (1993).
[18] *Luther, M.D.*, «Silica fume (microsilica) concrete in bridges», Concrete International **15** [4], 20–23 (1993).
[19] *Wolsiefer, J., Sr.*, and *Morgan, D.R.*, «Silica fume in shotcrete», Concrete International **15** [4], 34–40 (1993).