

Les ajouts

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **63 (1995)**

Heft 4

PDF erstellt am: **19.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-146370>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Pigments colorants
comme ajouts pour
des sculptures en béton
(piscine d'Olten).

1^{ère} partie

Les ajouts

Les ajouts sont ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour en obtenir de particulières.

Les ajouts du béton sont des matières fines qui, généralement, sont ajoutées au béton en grandes quantités (souvent entre 5 et 20 % du dosage en ciment). De nombreux ajouts sont déjà mélangés au ciment à la cimenterie, car les matériaux prémélangés peuvent être répartis plus uniformément dans le béton. De plus, l'action d'un ajout ne doit pas dépendre de la façon dont le produit est introduit dans le béton.

Les ajouts servent à influencer sur certaines propriétés du béton, par des effets chimiques ou physiques, par exemple

- propriétés du béton frais (teneur en air, consistance, ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau)
- raidissement, prise et durcissement, pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau
- propriétés du béton durci (résistances mécaniques et autres, compacité)
- couleur du béton

Les ajouts se divisent en matières minérales et en matières organiques,



Des bétons à hautes performances contenant de la fumée de silice confèrent stabilité et durabilité à des plates-formes de forage en mer du Nord.

comme le montre le *tableau 1*. Parmi ceux figurant dans ce tableau, tous ne sont pas, et de loin, utilisés en Suisse en quantités valant la peine d'être mentionnées, soit parce qu'eux-mêmes ou leurs matières premières n'existent pas dans la nature, soit parce que les processus industriels n'en produisent que des quantités infimes, ou parce qu'il faut les importer. Les matières indigènes utilisables comme ajouts sont les sous-pro-

duits de l'industrie métallurgique et les cendres volantes. Les produits naturels, tels que cendres volcaniques (pouzzolane), n'existent qu'en quantités insuffisantes pour être exploitées [1].

En Suisse, on utilise principalement des cendres volantes, des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des fillers (calcaires), ainsi que des agents expansifs et des colorants [1]. Il en sera traité en détail dans la série en plusieurs parties qui commence avec cet article. Les fibres synthétiques, d'acier et de verre, n'entreront pas dans cette série, car il y a peu de temps, elles ont fait l'objet d'articles dans différents numéros du «Bulletin du ciment» [2-4]. Il ne sera pas traité non plus des dispersions synthétiques, qui ne sont qu'encore rarement utilisées [1].

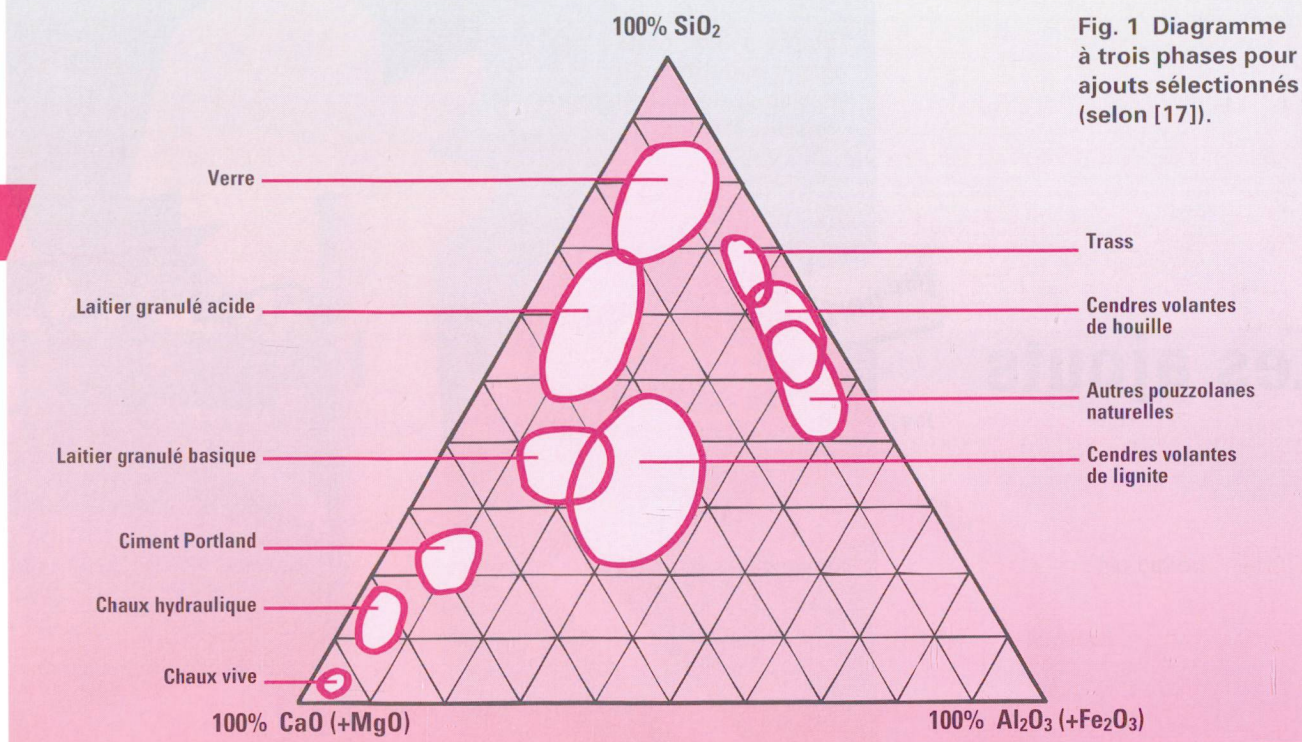


Fig. 1 Diagramme à trois phases pour ajouts sélectionnés (selon [17]).

Graphique: TFB/S. Einfalt, ZSD

Les ajouts dans les normes

Les normes SIA mettent adjuvants ([5–9]) et ajouts à peu près sur le même pied, et elles n'en traitent que très sommairement. Cela laisse d'une part beaucoup de liberté à l'utilisateur, mais lui donne d'autre part sou-

vent aussi des incertitudes quant au bien-fondé de leur utilisation. Dans la norme SIA 162, chiffre 5 14 41, les additifs – terme générique pour les adjuvants et les ajouts – sont définis comme suit [10]:

«Les additifs sont des produits ayant

des effets chimiques ou physiques, que l'on ajoute en petites quantités aux autres composants du béton lors du malaxage. On tiendra compte des additifs et de leurs effets pour déterminer la composition du béton.»

Autres prescriptions importantes figurant dans la même norme SIA:

- «On ne recourra à l'utilisation d'additifs qu'après accord.» (chiffre 5 14 42)
- «On ne combinera divers additifs qu'après s'être assuré de leur compatibilité auprès des fournisseurs.» (chiffre 5 14 42)
- La convenance des ajouts doit «être contrôlée au moyen d'essais préliminaires systématiques. On déterminera en particulier si, et dans quelle mesure, d'autres propriétés du béton, importantes quant à l'utilisation prévue, sont modifiées». (chiffre 5 14 43)
- «L'utilisation d'additifs susceptibles d'entraîner la corrosion de l'acier n'est pas admissible.» (chiffre 5 14 44)
- «On choisira la durée du malaxage de manière à assurer un mélange homogène des additifs dans le béton. On observera à ce sujet les indications du fournisseur.» (chiffre 5 14 46)

Il faut également mentionner l'essai no 17 de la norme SIA 162/1 [11], dans lequel on trouve des indications

Genre de matières	Type	Activité	Exemples
matières minérales	hydraulique	hautement actif	• ciments spéciaux • chaux hydraulique
	hydraulique latent	hautement actif	• laitier granulé (laitier de haut fourneau vitreux granulé) • cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
	pouzzolanique	hautement actif	• fumée de silice
		moyennement actif	• cendres volantes pauvres en calcium (cendres volantes siliceuses) • pouzzolanes naturelles telles que – verres volcaniques – tufs volcaniques – trass – phonolithe – terres à diatomées
		faiblement actif	• scories cristallines
	filler	inerte	• poudres minérales telles que – farine calcaire – poudre de quartz
	fibres	inerte	• fibres d'acier ou de verre
matières organiques	matières expansives	–	• ciments expansifs • oxyde de calcium • matières libérant des gaz
	pigments colorants	inerte	• oxydes et sels métalliques • terres colorantes • craie, graphite
	fibres	inerte	• fibres synthétiques (polypropylène, polyamide)
	dispersions synthétiques	–	• dispersions telles que – polyvinylpropionate – polyvinylacétate – polyacrylate – latex au styrène-butadiène – latex au néoprène • dispersions à base de résines époxydes

Tab. 1 Classification des ajouts du béton ([1], modifié).

Ajout	Provenance	Forme d'utilisation	Composition chimique moyenne en %										Granu- lométrie moyenne (µm)	Surface spécifique (m²/g)	Source
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	GV ¹⁾				
Ciment Portland (CEM I)	cimenterie	poudre	22,5 19,8	5,5 4,9	2,0 3,1	62,5 62,8	1,5 2,5	2,7 2,5	0,4 0,5	1,0 0,9	3,0 2,7		2,89 3,20	valeurs pro- venant d'une cimenterie suisse	
Chaux hydraulique	chaufournerie	poudre	11–27	3–8	2–3	40–59	2–3	1,5–3,5			11–20		7–9	[18]	
Cendres volantes riches en Ca	cendres volantes obtenues par dépoussiérage électrostatique	poudre	38	22	4	24	5	3	1	2	1	1–10	0,5–1	[1]	
Cendres volantes pauvres en Ca	cendres volantes obtenues par dépoussiérage électrostatique	poudre	48	28	9	4	2	1	1	2	5	1–10	0,5–1	[1]	
Fumée de silice (microsilice)	sous-produit provenant de la production de ferro-silicium	poudre/bouillie	75–98	0,2–3	0,3–1	0,1–5	0,3–3,5	0,4–1,2			0,7–4	0,1–0,2	15–25	[15]	
SiO ₂ synthétique	fabriqué artificiellement	bouillie/poudre	> 98								0	0,02	170–200	[15]	
Farine calcaire	roche moulue	poudre									> 40	1–10	0,5–1	[1]	
Poudre de quartz	roche moulue	poudre	> 95									1–10	0,5–1	[1]	
Trass rhénan	pouzzolane naturelle d'origine volcanique	poudre	53	16	6	7	3				–			[16]	
Terre de Santorin	pouzzolane naturelle d'origine volcanique	poudre	65	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5			[16]	
Terre à diatomées (diatomite)	sédiments	poudre	86	2	2	–	1				5			[16]	

¹⁾ perte au feu

Tab. 2 Composition d'ajouts du béton sélectionnés.

sur les essais de convenance des additifs.

Depuis l'introduction de la norme SIA 215.002 (ENV 197–1) [12], il existe au moins pour la fabrication de ciments avec ajouts tels que pouzzolanes, cendres volantes, calcaires ou fumées de silice, des prescriptions pour la composition de ces ajouts. Et en tant que membre du CEN, la Suisse est tenue d'élever au statut de norme nationale la norme EN 450 sur les cendres volantes pour béton [13], qui a été ratifiée en septembre 1994. En Suisse, après l'introduction de la norme ENV 197–1 en tant que norme SIA 215.002 [12], plusieurs ciments normalisés avec additifs ont été mis sur le marché, par exemple

- Ciment Portland au calcaire CEM II/A-L 32,5
- Ciment Portland à la fumée de silice CEM II/A-D 52,5
- Ciment Portland à la fumée de silice CEM II/A-D 52,5 R
- Ciment Portland composé CEM II/A-M 52,5

Les raisons d'utiliser des ajouts

A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques. Soit ils existaient sous forme de produits naturels, qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels, sous forme de déchets ou de sous-produits. Il y a eu en outre l'augmentation des coûts énergétiques, auxquels, plus tard, sont venues s'ajouter des raisons écologiques. On compte parmi ces dernières les oppositions pour la mise en exploitation de nouvelles zones d'extraction de matières premières pour la fabrication du clinker, ainsi que la possibilité d'utiliser judicieusement des déchets industriels tels que laitier de haut fourneau, cendres volantes ou fumée de silice, au lieu de les déposer dans une décharge. Indépendamment de ces avantages écologiques et économiques, des ajouts appropriés influent positivement sur certaines des propriétés du béton, à l'état frais, mais surtout à l'état durci. Dans de nombreux pays

où les matériaux appropriés sont à disposition, cela a entraîné une forte augmentation de l'utilisation de bétons avec ajouts; les ciments de haut fourneau en Allemagne en sont un bon exemple. De plus, sans ajouts, certains bétons avec propriétés particulières (bétons à faible chaleur d'hydratation, bétons teintés, bétons à retrait compensé, etc.) ne pourraient pas être fabriqués.

Modes de réaction des ajouts

Les ajouts diffèrent parfois beaucoup dans leur composition. Le *tableau 2*, qui comprend également des ciments Portland, en donne un aperçu. Ces différences sont représentées sous une forme concrète dans un diagramme à trois phases (*figure 1*), au moyen des teneurs en oxyde de calcium et de magnésium, en dioxyde de silicium, ainsi qu'en oxyde d'aluminium et de fer.

Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore, sous forme de fillers, être dans une



Une utilisation intéressante des ajouts du béton: revêtements en béton teinté aux arrêts de bus.

large mesure inertes. Afin que ces définitions soient mieux comprises, elles sont expliquées brièvement ci-après. Aux lecteurs intéressés, nous conseillons d'étudier l'encadré «Ce qui se passe lors de la réaction entre le ciment et l'eau».

Les liants hydrauliques sont des matériaux minéraux finement moulus qui, après avoir été gâchés avec l'eau, deviennent durs comme de la pierre, aussi bien à l'air que sous

l'eau (c'est-à-dire à l'abri de l'air), et résistent ensuite à l'eau [14]. Les principaux responsables du comportement hydraulique d'un liant sont les composés d'oxyde de calcium (CaO), de dioxyde de silicium (SiO_2 souvent appelé acide silicique), d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3 , alumine), ainsi que d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Le plus important et le plus connu des liants hydrauliques est le ciment Portland, qui se distingue des autres, principale-

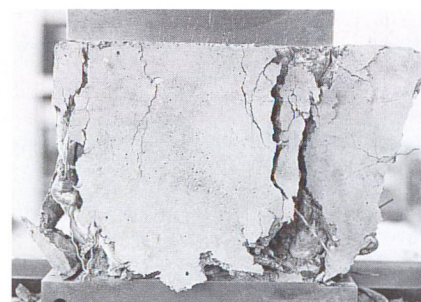


Photo: Kurt Habersich, TFB

Le béton contenant des fibres d'acier témoigne d'une résistance à la traction de flexion plus élevée avant la rupture définitive; en cas de contrainte de compression, il ne rompt pas sitôt après l'apparition de fissures.

ment par sa résistance mécanique nettement plus élevée. Un autre de ces liants, sur lequel nous reviendrons par la suite, est la chaux hydraulique.

Les matériaux hydrauliques latents ont une composition chimique pareille à celle des ciments Portland. Ils ne réagissent avec l'eau qu'en présence d'un activateur (par exemple hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2), mais l'activateur n'est pas incorporé dans les produits réactionnels. Les plus connus des matériaux hydrauliques latents sont les cendres calciques et le laitier granulé.

Les pouzzolanes ont une teneur élevée en dioxyde de silicium («acide silicique») seul, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium (alumine) combinés. Elles réagissent avec l'eau et l'hydroxyde de calcium pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium développant des résistances. La composition et la structure de ces composés sont pareilles à celles des produits d'hydratation du clinker Portland (CSH et CAH) [16]. L'hydroxyde de calcium provient des réactions d'hydratation du clinker Portland.

Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment Portland

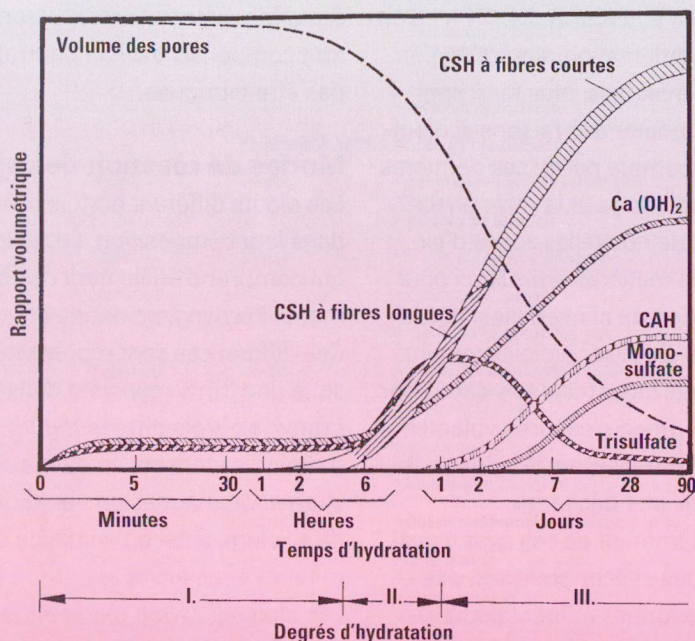


Fig. 2 Evolution dans le temps de la formation de produits importants lors de l'hydratation du ciment Portland contenant du gypse (modifié selon [17]).

Ce qui se passe lors de la réaction entre le ciment et l'eau

7

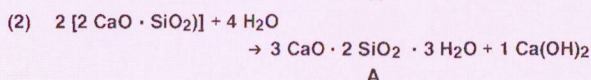
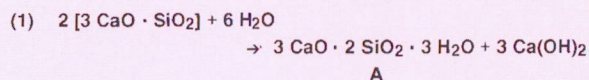
Les ajouts qui témoignent de propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques latentes ont besoin d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 pour réagir. Ce dernier ne se trouve toutefois pas en forme libre dans le ciment Portland. Il se forme par suite des réactions entre les composants du clinker et l'eau de gâchage. Il est donc utile de s'attarder un peu sur les réactions qui se développent alors, pour comprendre certaines réactions des ajouts dans le béton.

Dans un récent «Bulletin du ciment» consacré aux retardateurs de prise [8], il a déjà été traité de quelques-uns des aspects des réactions chimiques des composants du ciment et de l'eau de gâchage. Il y a surtout été question de l'évolution dans le temps de la réaction des différents composants. Nous y revenons maintenant dans le détail.

Quatre minéraux à clinker sont les composants essentiels du ciment Portland:

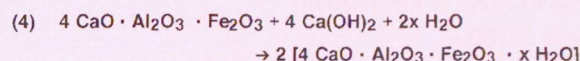
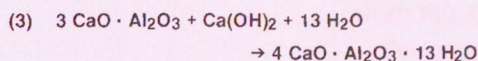
- environ 60 pour cent en masse de silicate tricalcique (C_3S ou $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- environ 16 pour cent en masse de silicate bicalcique (C_2S ou $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- environ 11 pour cent en masse d'aluminate tricalcique (C_3A ou $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
- environ 8 pour cent en masse d'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF ou $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)

On emploie C pour CaO , S pour SiO_2 , A pour Al_2O_3 et F pour Fe_2O_3 . Les minéraux à clinker C_3S et C_2S sont déterminants pour le développement de la résistance des ciments. Ils réagissent immédiatement avec l'eau de gâchage, et s'hydratent:



Les deux réactions d'hydratation donnent naissance aux mêmes produits, $\text{C}_3\text{S}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ et hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2 , mais pas en mêmes quantités. Les équations (1) et (2) ne reproduisent qu'incomplètement les réactions se produisant effectivement, car la

composition du produit d'hydratation A qui y est donnée ne correspond qu'approximativement à la réalité. C'est pourquoi on qualifie fréquemment A de silicate de calcium hydraté (CSH). Une partie du Ca(OH)_2 formé lors de l'hydratation de C_2S et C_3S réagit avec les deux autres minéraux à clinker. Les produits réactionnels, groupés sous le nom générique d'aluminate de calcium hydraté (CAH), ne diffèrent que par leur teneur en Fe_2O_3 :



La réaction (3) se développe de manière extrêmement rapide et, sans contre-mesures appropriées, elle entraînerait une solidification du béton d'une rapidité indésirable. On peut contrer ce phénomène en ajoutant au ciment du sulfate de calcium, sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$) ou d'anhydrite (CaSO_4): C_3A et CaSO_4 forment de très fins cristaux d'ettringite ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$), qui se déposent à la surface des particules de C_3A , et ralentissent le développement de leur réaction. L'ettringite (également appelée trisulfate) se transforme avec le temps en monosulfate ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$).

La figure 2 donne une bonne vue d'ensemble de l'évolution dans le temps des différentes réactions d'hydratation: au cours de la première phase, il se forme principalement de l'ettringite et peu de Ca(OH)_2 . La deuxième phase, qui entraîne la libération de beaucoup plus de Ca(OH)_2 , ainsi que la solidification de la structure, commence avec la formation de cristaux de CSH en longues fibres entrelacées. Et finalement, au cours de la troisième phase, des cristaux de CSH et CAH à courtes fibres se développent dans les pores encore existants. Ces cristaux densifient la structure et augmentent la résistance. Le trisulfate se transforme en monosulfate, et le Ca(OH)_2 , dont il y a abondance, est le cas échéant à disposition pour des réactions avec les ajouts.

- témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker Portland,
- d'un échauffement moindre dans les éléments de construction massifs, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et
- exigent un apport d'humidité suffisant pendant plus longtemps.

Les pouzzolanes peuvent être naturelles (trass) ou industrielles (cendres volantes de houille, fumée de silice).

Les fillers sont des matières inorganiques naturelles ou synthétiques spécialement sélectionnées qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pou-

voir de rétention d'eau). Ils peuvent être inertes, ou témoigner de propriétés pouzzolaniques, faiblement hydrauliques, ou hydrauliques latentes [12]. Le calcaire (carbonate de calcium) ou la poudre de quartz par exemple sont des fillers.

Kurt Hermann

Bibliographie

- [1] Brianza, M., «Betonzusatzmittel», documentation écrite pour le séminaire TFB «Betonzusatzmittel und -zusatzstoffe» du 27 octobre 1994, à Wildegg.
- [2] Hermann, K., «Le béton de fibres d'acier», Bulletin du ciment 60 [7], 1–8 (1992).
- [3] Hermann, K., «Le béton de fibres synthétiques», Bulletin du ciment 60 [8], 1–8 (1992).
- [4] Hermann, K., «Le béton de fibres de verre», Bulletin du ciment 60 [9], 1–8 (1992).
- [5] Hermann, K., «Les adjuvants», Bulletin du ciment 62 [9], 3–7 (1994).
- [6] Hermann, K., «Les adjuvants: BV et HBV», Bulletin du ciment 62 [10], 3–7 (1994).
- [7] Hermann, K., «Les adjuvants: LP», Bulletin du ciment 62 [11], 3–7 (1994).
- [8] Hermann, K., «Les adjuvants: VZ», Bulletin du ciment 62 [12], 3–7 (1994).
- [9] Hermann, K., «Les adjuvants: BE», Bulletin du ciment 63 [1], 3–7 (1995).
- [10] Norme SIA 162, «Ouvrages en béton» (édition 1993).
- [11] Norme SIA 162/1, «Ouvrages en béton – Essais des matériaux» (édition 1989).
- [12] Norme SIA 215.002, «Ciment – composition, spécifications et critères de conformité – Partie 1: Ciments courants» (édition 1993).
- [13] EN 450:1994, «Cendres volantes pour béton – Définitions, exigences et contrôle de qualité» (ratifiée le 9 septembre 1994).
- [14] Weigler, H., et Karl, S., «Beton: Arten – Herstellung – Eigenschaften», Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1989), pages 83–96, 118.
- [15] Linder, R., «Silica für Beton-Bauteile und -Waren?», Betonwerk + Fertigteil-Technik 58 [11], 63–68 (1992).
- [16] «Proposed report: Use of natural pozzolanes in concrete», ACI Materials Journal 91 [4], 410–426 (1994).
- [17] Wesche, K., «Baustoffe für tragende Bauteile», Bauverlag, Wiesbaden, 2e édition (1981), volume 2, pages 36 et 44.
- [18] «Hydraulischer Kalk – Eigenschaften/Anwendungen», édité par le TFB, Wildegg (1987).