

Zeitschrift: Bulletin du ciment
Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)
Band: 63 (1995)
Heft: 6

Artikel: Les ajouts : les cendres volantes
Autor: Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-146372>

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: 03.04.2026

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

Les ajouts: les cendres volantes

3e partie

Les cendres volantes de houille sont des ajouts à réaction pouzzolanique utilisés, surtout à l'étranger, pour améliorer certaines propriétés du béton (ouvrabilité, durabilité).

Dans la petite série consacrée aux ajouts, l'article sur les ajouts en général [1] et celui sur la chaux hydraulique [2] sont suivis d'un tour d'horizon sur les cendres volantes, lesquelles s'utilisent aussi bien dans le ciment que comme ajouts. Les ciments Portland aux cendres volantes ne sont toutefois pas fabriqués en Suisse, et n'y sont que rarement utilisés. On importe par contre chaque année quelque 30 000 t de cendres volantes, qui servent en partie d'ajouts dans les bétons et mortiers. Les cendres volantes sont un sous-produit résultant de la production d'électricité à partir de chaudières alimentées à l'antracite ou à la houille pulvérisées. Elles sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes des gaz brûlés. Une façon avantageuse d'évacuer ces déchets qui sont produits en énormes quantités dans le monde entier est de les utiliser en tant qu'ajouts du béton. Divers charbons dans diverses chaudières produisent des cendres volantes, lesquelles diffèrent fortement dans leur composition (voir *tableau 1*) et dans leur convenance en tant qu'ajouts du béton. C'est pourquoi les données bibliographiques ne peuvent pas être utilisées telles quelles en pratique. Des essais préalables sont indispensables si l'on n'utilise pas un béton déjà classé.

Oxydes	36 échantillons de cendres volantes	424 échantillons de cendres volantes	Valeurs d'analyse d'un ciment suisse
SiO ₂	40,0–58,4	42,6–56,3	22,5
Al ₂ O ₃	23,9–32,9	23,7–31,1	5,5
Fe ₂ O ₃	5,9–21,5	4,83–15,3	2,0
CaO	0,96–8,44	0,67–6,84	62,5
MgO	1,14–4,15	1,19–4,91	1,5
K ₂ O	0,50–5,63	2,92–5,20	1,0
Na ₂ O	–	0,36–1,43	0,4
SO ₃	0,23–1,70	0,09–1,71	2,7

Tab. 1 Domaines de la composition chimique de cendres volantes de houille en pour cent de la masse [9].

Les cendres volantes dans les normes

Le 9 septembre 1994, le Comité européen de normalisation (CEN) a ratifié l'euronorme 450 «Cendres volantes pour béton – Définitions, exigences et contrôle de qualité» [3]. En tant que membre du CEN, la Suisse avait en principe jusqu'au 31 mars 1995 pour faire de cette norme une norme nationale. Elle va le faire bientôt, et l'EN 450 deviendra la norme SIA 215.004, qui ne différera de l'EN 450 que par un frontispice national. Il en ira de même pour les deux euronormes contenant des prescriptions pour l'analyse des cendres volantes.

● L'EN 451-1 «Méthode d'essai des cendres volantes – Partie 1: Déter-

mination de la teneur en oxyde de calcium libre» deviendra la norme SIA 215.005 [4].

● L'EN 451-2 «Méthode d'essai des cendres volantes – Partie 2: Détermination de la finesse par tamisage humide» deviendra la norme SIA 215.006 [5].

Selon EN 450, chiffre 3.2, les cendres volantes sont une «poudre fine constituée principalement de particules vitreuses, de forme sphérique, dérivées de la combustion de charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO₂ et Al₂O₃, la proportion de SiO₂ réactive, définie et déterminée comme dans l'ENV 197-1, constituant au moins 25 % en mas-

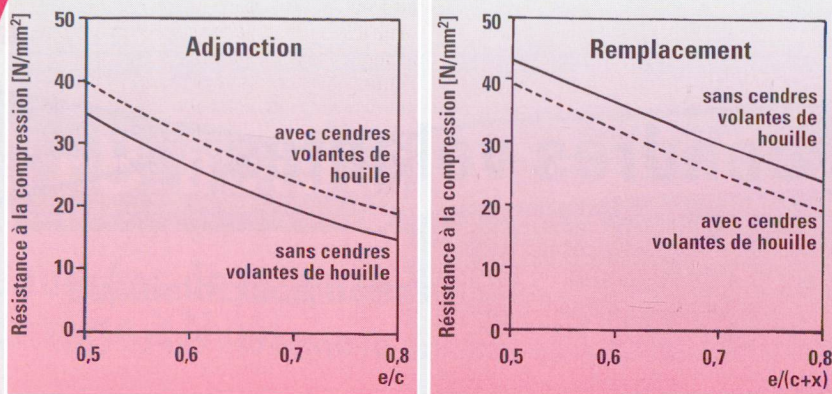


Figure 1 Résistance à la compression en fonction du genre de cendres volantes ajoutées (x = cendres volantes de houille) [9]. Graphique: TFB/ZSD, S. Einfalt

se.» Les cendres volantes sont également un constituant des ciments Portland aux cendres volantes, dont il est traité dans la norme SIA 215.002 (correspondant à l'ENV 197-1) [6, 7]. On distingue ici entre cendres volantes siliceuses (V) et cendres volantes calciques (W). Les cendres volantes siliceuses se composent essentiellement de SiO_2 réactif et de Al_2O_3 , et les cendres volantes calciques, principalement de CaO réactif, de SiO_2 et Al_2O_3 . Selon le genre et la quantité de cendres volantes contenues dans le ciment, on distingue entre

- CEM II/A-V avec 80–94 % de clinker CP et 6–20 % de cendres volantes siliceuses (V)
- CEM II/B-V avec 65–79 % de clinker CP et 21–35 % de cendres volantes siliceuses (V)
- CEM II/A-W avec 80–94 % de clinker CP et 6–20 % de cendres volantes calciques (W)
- CEM II/B-W avec 65–79 % de clinker CP et 21–35 % de cendres volantes calciques (W)

Propriétés des cendres volantes

Les cendres volantes convenant comme ajouts proviennent presque toujours de centrales thermiques utilisant de la houille. Les cendres volantes provenant de chaudières alimentées à la lignite conviennent

rarement, et celles provenant d'installations d'incinération des ordures ne conviennent pas, car en raison de leur teneur relativement élevée en gypse et en chaux, elles peuvent provoquer un gonflement dans le béton. De plus, leur teneur en métaux lourds est parfois élevée [8]. Ce qui suit se rapporte donc à peu près exclusivement aux cendres volantes de houille.

La teneur en verre des cendres volantes de houille provenant de chaudières à cendres fondues est nettement supérieure à 80 pour cent, et souvent même à 90 pour cent en masse [9]. Le faible pourcentage de matière cristalline est dû au refroidissement rapide des cendres, qui rend plus difficile la formation d'un réseau cristallin régulier. (Un pourcentage élevé de matière vitreuse est souhaité, car c'est elle qui provoque la réaction

pouzzolanique.) La forme et la grandeur des particules de cendres volantes dépendent de nombreux paramètres. Elles se composent généralement en majeure partie de sphères ou sphères creuses vitreuses, qui de leur côté peuvent contenir d'autres sphères. Le reste est constitué de particules de forme ronde à allongée, transparentes à opaques, et faiblement à fortement poreuses [10]. Le diamètre des particules de cendres volantes peut varier fortement (< 0,001 mm à > 1 mm) [10]. Pour des cendres volantes conformes à la norme, le refus sur un tamis à mailles de 0,045 mm ne doit pas excéder 40 pour cent en masse [3]. Les cendres volantes se distinguent du ciment Portland principalement par une teneur élevée en SiO_2 et Al_2O_3 , et une faible teneur en CaO (voir *tableau 1*).

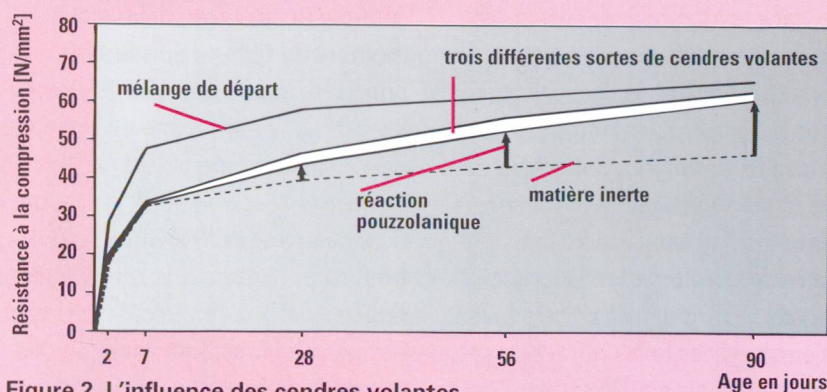


Figure 2 L'influence des cendres volantes sur le développement de la résistance ne commence qu'avec un certain retard (selon [13]).

Graphique: TFB/ZSD, S. Einfalt

Possibilités de prise en compte des cendres volantes de houille dans le béton

5

Les cendres volantes de houille peuvent s'utiliser aussi bien comme constituants de ciments normalisés que comme ajouts. Elles contribuent dans les deux cas à certaines propriétés d'un béton (résistance à la compression, durabilité ou étanchéité). On discute depuis longtemps déjà de la manière de prendre cette contribution en considération lors de l'élaboration des formulations de bétons.

La situation est claire pour les ciments Portland aux cendres volantes fabriqués en cimenterie, lesquels sont normalisés conformément à la norme SIA 215.002 (ENV 197-1) [6]: on inclut en l'occurrence toujours la masse de ciment totale, indépendamment de la teneur en cendres volantes. Cela vaut également pour le calcul du facteur e/c (facteur eau/ciment) et des teneurs en ciment, qui doivent répondre aux exigences maximales ou minimales figurant dans le tableau 3 de la prénorme SIA V162.051 (correspondant à ENV 206) [17]; ces exigences dépendent des influences prévisibles de l'environnement.

La norme SIA 162 [18] toujours en vigueur admet implicitement l'utilisation de ciment Portland (chiffre 5 14 11). Pour un béton commandé conformément au chiffre 5 12 4 de cette norme, il suffit d'indiquer la quantité et la sorte de ciment, par exemple:

- béton B 35/25, CEM I/32,5 300 kg/m³

Les propriétés d'un béton qui contient par exemple 300 kg de ciment Portland aux cendres volantes (CEM II/A-V) avec une part de cendres

volantes siliceuses (V) de 45 kg ne sont pas les mêmes que celles d'un béton comparable auquel on a ajouté 225 kg de ciment Portland (CEM I) et 45 kg de cendres volantes de houille, séparément ou sous forme de mélange préparé en centrale ou sur le chantier.

Lorsque les cendres volantes ne sont pas ajoutées au ciment, mais au béton, la question se pose de savoir dans quelle mesure il faut tenir compte des cendres volantes pour le calcul de la teneur en ciment ou en liant, ainsi que des grandeurs qui en dépendent. Il y a en principe trois possibilités:

1. Il n'est tenu compte que de la quantité de ciment c .
2. La quantité d'ajout x est ajoutée à 100 % à la quantité de ciment c . Le facteur e/l (facteur eau/liant) remplace le facteur e/c : $e/l = e/(c + x)$.
3. On inclut dans le calcul de la quantité de ciment la quantité d'ajout multipliée par un facteur k : $e/l = e/(c + kx)$, l'équivalent-ciment ou la valeur de prise en compte pour les cendres volantes étant < 1 .

La troisième possibilité a été proposée par I. A. Smith en 1976 déjà. Elle est utilisée dans les pays où la quantité d'ajout n'est pas simplement dans le calcul, ajoutée à la quantité de ciment (possibilité 2), ou totalement ignorée (possibilité 1). En Allemagne, on avait fixé initialement pour les cendres volantes de houille un facteur k de 0,3. Des recherches nouvelles ont conduit à ce qu'en 1992, ce facteur soit élevé à 0,4 pour la

plupart des utilisations [14]. Ce facteur k va probablement être accepté également dans une forme révisée de l'ENV 206. De plus, des teneurs minimales en ciment et des teneurs maximales en cendres volantes à prendre en compte vont aussi être prescrites.

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'en cas de commande de béton selon norme SIA 162, le facteur e/c ne doit pas être prescrit. Des problèmes peuvent cependant survenir, si lors de la commande de béton, l'utilisation de cendres volantes comme ajout est expressément demandée.

Dans le meilleur des cas, le producteur de béton proposera un béton déjà classé, qui témoigne des performances requises. Autrement, il faut s'en tenir au chiffre 5 14 43 de la norme SIA 162 [18]: «Le cas échéant, on contrôlera les effets et la convenance des adjuvants et ajouts 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.» Concrètement, personne ne doit dans ce cas se soucier de savoir s'il faut calculer avec le facteur e/c ou le facteur e/l . L'important est que le béton témoigne des propriétés requises. Dans la plupart des cas, il s'agira des résistances minimales à 28 jours. Les facteurs k peuvent servir de point de repère lorsqu'en cas d'essais préliminaires, il faut établir quelle quantité d'ajout pourrait être équivalente à une quantité de ciment donnée.

Mode d'action des cendres volantes de houille

Le mode d'action des cendres volantes est décrit en détail dans l'encadré «Voici comment réagissent les cendres volantes de houille». Nous nous limiterons donc ici à ce qui suit: les cendres volantes ne commencent à réagir qu'après environ sept jours ou plus, lorsque par suite de l'hydratation du ciment, il a été libéré suffisamment d'hydroxyde de calcium. Les bétons dans lesquels seul le 50 % des cendres volantes ajoutées n'a réagi qu'après une année ne sont pas rares [11].

Le critère de loin le plus important pour juger de l'efficacité des cendres volantes est leur finesse, qui influe de façon déterminante, non seulement sur la réactivité pouzzolanique, mais également sur la rhéologie et l'activité des fines [9].

Ajout ou substitut du ciment

Les cendres volantes peuvent en principe soit servir d'ajout, soit remplacer partiellement le ciment. Les différentes conséquences qu'entraînent ces utilisations sont repré-

sentées dans les figures 1a et 1b, par l'influence des cendres volantes sur la résistance à la compression [9]. Si l'on ajoute des cendres volantes sans changer le dosage en ciment, il en résulte, comparativement à un béton sans cendres volantes, une augmentation de la résistance à la compression (figure 1a). Le remplacement d'une certaine quantité de ciment par une quantité correspondante de cendres volantes entraîne par contre des résistances à la compression plus faibles. Si des résistances à la compression pareilles à celles d'un béton sans cendres volantes sont exigées, il faut donc diminuer la teneur en eau (figure 1b), ou augmenter la quantité de liant.

Pour ce qui est de quantifier la contribution des cendres volantes aux propriétés d'un béton, un grand désaccord règne depuis plusieurs années. Cela va de l'ignorance totale des cendres volantes à leur entière prise en compte. Lors du calcul de la teneur totale en ciment ou du facteur eau/ciment (facteur e/c), la masse des cendres volantes est ainsi ajoutée partiellement, entièrement ou pas du

tout à la masse du ciment. Ce problème est exposé en détail dans l'encadré «Possibilités de prise en compte des cendres volantes de houille dans le béton».

Influence sur les propriétés du béton frais

Lorsque des particules sphériques de cendres volantes remplacent des particules angulaires de ciment Portland, et que la quantité d'eau est la même, la cohésion et l'ouvrabilité d'un béton s'améliorent [12]. Les bétons contenant des cendres volantes sont généralement plus faciles à pomper que des bétons comparables n'en contenant pas.

Si l'on utilise des entraîneurs d'air (LP), des essais préliminaires sont nécessaires, car les cendres volantes peuvent avoir un effet négatif sur la teneur en pores et sur la stabilité de ceux-ci; on utilise généralement davantage de LP dans les bétons avec cendres volantes que dans ceux qui n'en contiennent pas [10]. Tous les bétons exigent un bon traitement de cure, mais ce traitement est particulièrement important pour les bétons

Voici comment réagissent les cendres volantes de houille

Les cendres volantes de houille ont une réaction pouzzolanique. Cela signifie qu'en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elles se transforment en silicate de calcium et aluminat de calcium hydratés. La réaction entre clinker et eau donne également naissance à des hydrates de ce genre. Les mécanismes de cette formation sont toutefois très divers. Ils sont représentés d'une manière très simplifiée dans les figures 3a et 3b.

Au cours de l'hydratation du ciment Portland (figure 3a), il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse (d'abord principalement du silicate de calcium hydraté, CSH), alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. (Les réactions d'hydratation du ciment sont décrites de façon simplifiée dans l'encadré «Ce qui se passe lors de la réaction entre le ciment et l'eau» [1].)

La situation est différente en présence de

pouzzolanes, donc par exemple de cendres volantes de houille (figure 3b). Le point de départ des réactions est ici aussi l'hydratation du clinker de CP, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminat de calcium hydraté (CAH). Les particules de cendres volantes, qui servent d'abord simplement à amorcer la réaction des produits d'hydratation du ciment, ne réagissent pas directement avec l'eau; elles ne forment pas de produits d'hydratation. Si la concentration d'hydroxyde de calcium est suffisante, leur matrice vitreuse est généralement dissoute lentement dans la solution interstitielle.

Les SiO_2 et Al_2O_3 libérés sous forme de SiO_3^{2-} ou $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ réagissent avec les produits d'hydratation du ciment (principalement $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et l'eau pour se transformer en silicate de calcium et aluminat de calcium hydratés, dont la composition est la même que celle des produits d'hydratation du ciment, et remplissent lentement l'espace contenant la solution interstitielle.

Principale source: [9]

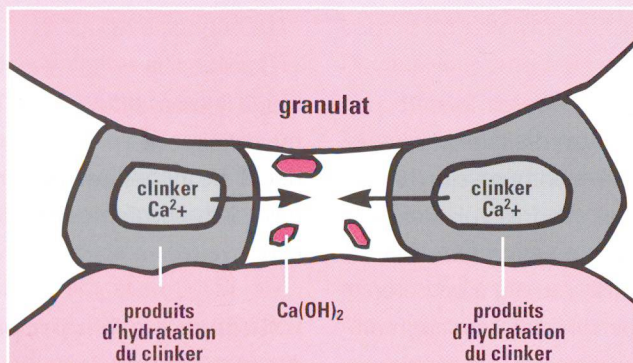


Figure 3a Hydratation du clinker de ciment Portland (selon [9]).

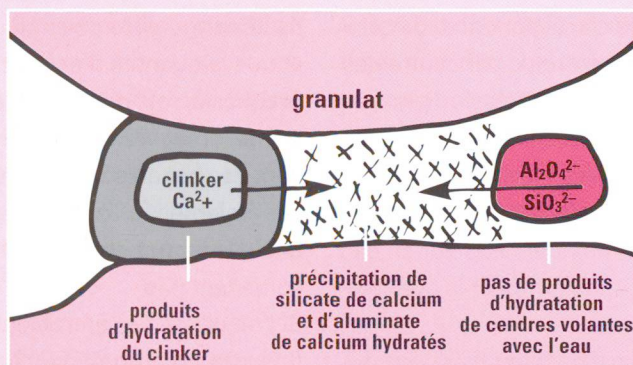


Figure 3b Représentation schématique de la réaction de cendres volantes en présence de clinker de ciment Portland hydraté (selon [9]).

Graphique: TFB/ZSD, S. Einfalt

avec cendres volantes, dans lesquels l'amélioration de la structure de la pâte de ciment durcie par réaction pouzzolanique des cendres volantes ne peut se faire qu'en milieu humi-

de. En cas de pertes d'eau et d'humidité à un stade précoce, il faut s'attendre, aux endroits exposés, à ce que le béton soit perméable et peu résistant [12].

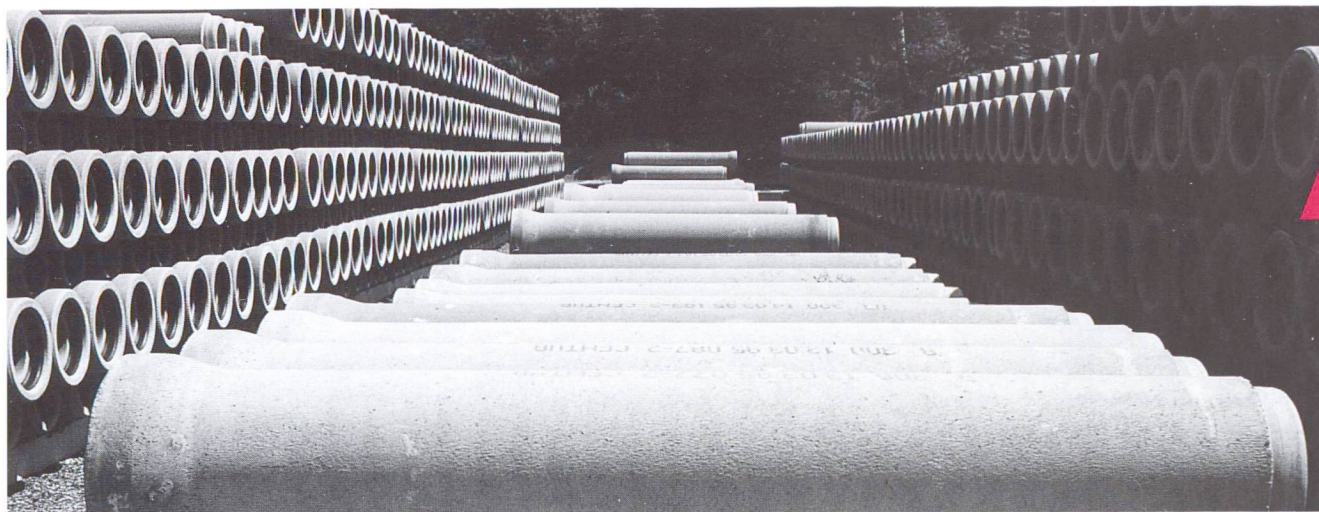
Influence sur les propriétés du béton durci

Trois facteurs caractérisent l'influence des cendres volantes de houille sur les propriétés du béton durci [13]:

- la réaction relativement lente
 - la consommation d'hydroxyde de calcium
 - l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie
- La réaction relativement lente a été démontrée au moyen d'une analyse, dont les résultats sont résumés dans la figure 2 (voir page 4). L'analyse a été effectuée sur la base
- d'un mélange de départ sans ajout,
 - de trois bétons, dans lesquels 32 pour cent du volume de ciment ont été remplacés par des cendres volantes de houille, et
 - d'un béton, dans lequel 32 pour cent du volume de ciment ont été remplacés par de la poudre de quartz inerte (de même composition granulométrique que les cendres volantes).

Comme ciment, on a utilisé un CP 45 F (correspondant à peu près à un CEM I 52,5). La teneur en eau n'a pas été modifiée.

Les bétons avec cendres volantes et ceux avec poudre de quartz se sont comportés au début de façon très semblable: leur résistance était nettement moins élevée que celle du béton témoin. Après sept jours, la réaction pouzzolanique a commencé lentement, et après 90 jours, la



Tuyaux en béton contenant des cendres volantes.

Photo: Kurt Haberstich, TFB

résistance des bétons avec cendres volantes était proche de celle du mélange de départ.

L'hydroxyde de calcium se trouvant dans l'eau interstitielle d'un béton est un facteur essentiel pour protéger l'armature contre la corrosion. Les réactions pouzzolaniques des cendres volantes entraînent la consommation d'hydroxyde de calcium. Des analyses prouvent que la valeur pH de la solution interstitielle n'est pas beaucoup plus basse que dans les bétons comparables sans ajout, et qu'il y a suffisamment d'hydroxyde de calcium pour la protection contre la corrosion. La structure poreuse

étant en outre densifiée par la réaction pouzzolanique – après une année, la teneur en vides capillaires du domaine de 0,1 à 1 mm était nettement réduite, et le pourcentage de pores du domaine ultrafin nettement augmenté –, la perméabilité du béton diminue par rapport à un béton lié uniquement au ciment Portland [14]. Une perméabilité plus faible signifie une plus grande résistance à la pénétration d'eau (résistance au gel) et aux ions dissous dans l'eau (ions de sulfate et de chlorure) [15]. Des mesures effectuées sur des bétons de plus de huit ans, ayant les mêmes résistances à 28 jours, ont en outre

révélé des profondeurs de carbonatation pareilles pour les bétons avec cendres volantes que pour ceux n'en contenant pas [16]. On a également obtenu des résultats comparables avec d'autres analyses ([11, 13, 14]).

Utilisations

La diminution de la chaleur d'hydratation est une propriété importante des bétons avec cendres volantes. Cette propriété a des effets positifs, particulièrement pour le béton de masse. C'est pourquoi aux USA, les cendres volantes font partie intégrante de nombreux barrages et écluses. Le Hungry Horse Dam, construit dans le Montana avec plus de 2,3 millions de m³ de béton contenant 120 000 t de cendres volantes, en est un exemple. On a également utilisé de grandes quantités de cendres volantes dans les barrages en béton compacté [10]. Les cendres volantes confèrent aux tuyaux en béton une meilleure résistance aux ions de sulfate et aux acides faibles. Pour la préfabrication, la meilleure ouvrabilité permet des angles et arêtes plus nets, et la meilleure fluidité, des surfaces plus belles [10]. Encore une mise en garde pour conclure: comme déjà mentionné, la composition des cendres volantes peut différer fortement. Leur utilisation exige donc toute une série de mesures de précaution, ainsi que des contrôles réguliers de la composition.

Kurt Hermann

Bibliographie

- [1] Hermann, K., «Les ajouts» (1re partie), Bulletin du ciment **62** [4], 3–7 (1995).
- [2] Hermann, K., «Les ajouts: la chaux hydraulique», Bulletin du ciment **62** [5], 3–7 (1995).
- [3] EN 450: 1994, «Cendres volantes pour béton – Définitions, exigences et contrôle de qualité» (future norme SIA 215.004).
- [4] EN 451-1: 1994, «Méthode d'essai des cendres volantes – Partie 1: Détermination de la teneur en oxyde de calcium libre» (future norme SIA 215.005).
- [5] EN 451-2: 1994, «Méthode d'essai des cendres volantes – Partie 2: Détermination de la finesse par tamisage humide» (future norme SIA 215.006).
- [6] Norme SIA 215.002, «Ciment – composition, spécifications et critères de conformité – Partie 1: Ciments courants» (édition 1993).
- [7] Hermann, K., «Ciments: des nouvelles normes et sortes», Bulletin du ciment **62** [6/7], 3–11 (1994).
- [8] Brianza, M., «Betonzusatzstoffe», documentation écrite pour le séminaire TFB «Betonzusatzmittel und -stoffe» du 21 février 1995, à Wildegg.
- [9] Sybertz, F., «Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **434**, 1–89 (1993).
- [10] «Use of fly ash in concrete», ACI Manual of Concrete Practice, part 1, pages 226.3R-1 to 226.3R.29 (1994).
- [11] Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., et de Haan, Y.M., «The reaction of fly ash in concrete. A critical examination», Cement and Concrete Research **19** [2], 235–246 (1989).
- [12] Miller, E. W., «Blended cements – Applications and implications», Cement and Concrete Composites **15** [4], 237–245 (1993).
- [13] Schiessl, P., «Wirkung von Steinkohlenflugaschen in Beton», Beton **40** [12], 519–523 (1990).
- [14] Schiessl, P., et Härtl, R., «Steinkohlenflugasche in Beton – Untersuchung über Wirkung und Anrechenbarkeit», Beton **43** [11], 576–580 et [12], 644–648 (1993).
- [15] Ellis, Jr., W. E., «For durable concrete, fly ash does not «replace» cement», Concrete International **14** [8], 47–51 (1992).
- [16] Hobbs, D. W., «Carbonation of concrete containing pfa», Magazine of Concrete Research, **46** [166], 35–38 (1994).
- [17] Prénorme SIA 162.051, «Béton – Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité».
- [18] Norme SIA 162, «Ouvrages en béton» (édition 1989).