

**Zeitschrift:** Bulletin du ciment  
**Herausgeber:** Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)  
**Band:** 64 (1996)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Polluants atmosphériques et le béton  
**Autor:** Hermann, Kurt  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-146400>

#### 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:** 11.01.2026

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

# Polluants atmosphériques et le béton

## Les polluants atmosphériques ne nuisent généralement que peu au béton.

Les polluants atmosphériques peuvent être la cause de nombreux phénomènes négatifs. Il faut certainement citer avant tout les tristement célèbres «pluies acides» que l'on tient pour responsables, entre autres,

- de l'acidification des lacs, cours d'eau et eaux souterraines,
- de l'acidification et de la déminéralisation des sols,
- de la productivité amoindrie des forêts,
- des dégâts aux récoltes ainsi que
- de la destruction des matériaux de construction de genres les plus divers [1].

### Formules chimiques de polluants

Dans le présent texte, il est surtout question des composés chimiques suivants, se trouvant dans l'air et dans l'eau de pluie:

$\text{SO}_2$	dioxyde de sulfure
$\text{SO}_3$	anhydre sulfurique
$\text{NO}$	monoxyde d'azote
$\text{NO}_2$	dioxyde d'azote
$\text{NO}_x$	oxydes azotés (somme de $\text{NO}$ et $\text{NO}_2$ )
$\text{H}_2\text{SO}_3$	acide sulfureux
$\text{H}_2\text{SO}_4$	acide sulfurique
$\text{HNO}_3$	acide nitrique



Les oxydes de soufre et d'azote ne sont probablement pas étrangers aux dégâts subis par cette œuvre d'art.

Photo: Kurt Hermann, TFB

Plusieurs anciens ouvrages et œuvres d'art en grès, marbre ou autres matériaux, qui ont beaucoup souffert de l'action des polluants atmosphériques acides, témoignent de façon frappante de l'influence nuisible de ces polluants. Les dégâts subis par les ouvrages en béton sont moins graves, et c'est pourquoi les articles traitant de ce sujet sont assez rares.

### Les polluants atmosphériques

Si l'on excepte les particules de suie et de poussière, on compte parmi les principaux polluants atmosphériques, qui peuvent avoir des effets nuisibles sur le béton, les oxydes de soufre et d'azote ainsi que les acides auxquels ils donnent naissance.

Leurs formules chimiques figurent dans l'encadré «Formules chimi-

ques de polluants atmosphériques». Dans certains cas spéciaux, par exemple dans les gaz de combustion provenant d'usines d'incinération des ordures, les concentrations en gaz hydrochlorique ( $\text{HCl}$ ) ou acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$  dissous dans l'eau) peuvent aussi être supérieures. Le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), qui peut également réagir avec des composants du béton, n'est pas un polluant atmosphérique.

Les efforts entrepris depuis quelque temps en Suisse pour réduire les émissions de polluants (concentrations de polluants à la source) n'ont pas été sans effet, ainsi que le démontrent les modifications intervenues dans les immissions (concentrations ou dépôts de polluants à l'endroit où ils agissent) de dioxyde de sulfure, de dioxyde d'azote et



Les pluies acides laissent aussi des traces sur les statues.

d'ozone ( $O_3$ ), des polluants atmosphériques typiques.

Ces modifications sont résumées dans le *tableau 1*. Comme l'on s'y attendait, la pollution de l'air est plus importante dans les villes et agglomérations (Bâle-Binningen) que dans les régions rurales (Tänikon TG).

A l'étranger, on mesure souvent dans l'air des concentrations de  $SO_2$  et  $NO_2$  (ou  $NO_x$ ) beaucoup plus importantes. En 1991 par exemple, la charge moyenne de  $SO_2$  était à Wei-

mar d'environ  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [3], donc quelque 10 fois supérieure à celle mesurée à Bâle. On a enregistré des valeurs encore plus élevées à Berlin ( $> 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) [4]. On aurait même mesuré jusqu'à  $5000 \mu\text{g}$  de  $SO_2/\text{m}^3$  ( $5 \text{ mg de } SO_2/\text{m}^3$ ) dans certains cas extrêmes [5].

### Mécanismes de l'action des polluants

Les oxydes d'azote et de soufre, ou les acides forts auxquels ils donnent naissance, peuvent entrer en

contact avec le béton de différentes manières [6]:

- En cas de *déposition humide*, les molécules de gaz dissoutes dans des gouttes d'eau, ou les acides auxquels elles donnent naissance, arrivent sur le béton sous forme de pluie, de brouillard ou de neige (important surtout du côté le plus exposé aux intempéries).
- En cas de *déposition sèche*, les molécules de gaz sont adsorbées directement à la surface du béton.

Année	$SO_2$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$		$NO_2$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$		$O_3$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Tänikon	Binningen	Tänikon	Binningen	Tänikon	Binningen
1984	9	31	—	44	—	90
1985	12	36	21	47	140	207
1986	9	33	28	38	140	215
1987	6	16	19	36	137	164
1988	6	17	20	41	144	148
1989	4	18	22	45	156	164
1990	4	14	18	41	170	172
1991	5	13	22	36	159	168
1992	3	11	17	31	152	166
1993	3	9	15	31	151	159
1994	3	7	15	26	176	171
<i>Valeurs limites</i>	30	30	30	30	100	100

Tab. 1 Résultats de mesure du réseau national d'observation des polluants atmosphériques (Nabel): immissions (valeurs annuelles moyennes) de dioxyde de sulfure, dioxyde d'azote et ozone à Binningen-Bâle et Tänikon TG [2].

Conditions d'essai	Charge de SO <sub>2</sub>	Résultats
Prismes de mortier en PZ 35 F (correspond approximativement à CEM I 42,5) sulfatation après 7 jours de conditionnement ( <i>Knöfel et Böttger [8]</i> )	2 x par jour 1,3 g SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> , 90 cycles au total	profondeur de sulfatation environ 5 mm
Cubes de béton en PZ 35 F (correspond approximativement à CEM I 42,5) sulfatation après 28 jours de conditionnement ( <i>Engelfried et Tölle [7]</i> )	absorption pendant trois mois d'un mélange de gaz composé de – 2 parts volumétriques d'air – 1 part volumétrique de CO <sub>2</sub> – 0,001 part volumétrique de SO <sub>2</sub>	sulfatation maximale 1 mm, nette carbonatation
Plaques de béton en PZ 35 F (correspond approximativement à CEM I 42,5) sulfatation après 59 jours de conditionnement ( <i>Knöfel et Böttger [9]</i> )	1 x par jour 1,8 g SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> , introduit, 100 cycles au total	sulfatation dans les mm superficiels nouvelle formation d'ettringite et de gypse, diminution de la résistance
Prismes de mortier en PZ 35 F (correspond approximativement à CEM I 42,5) sulfatation après 7 jours de conditionnement ( <i>Knöfel et Böttger [9]</i> )	2 x par jour 1,3 g SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> , introduit, 90 cycles au total	sulfatation dans les mm superficiels nouvelle formation d'ettringite et de gypse, diminution de la résistance
Prismes de mortier en PZ 45 F (correspond approximativement à CEM I 42,5) sulfatation après 7 jours de conditionnement ( <i>Scholl et Knöfel [10]</i> )	0,7 %vol. CO <sub>2</sub> et 0,06 %vol. SO <sub>2</sub> , pendant 90 jours (hum. rel. 65 %, 20 °C)	couche de gypse de 0,5 mm d'épaisseur profondeur de carbonatation 6 mm

Tab. 2 Essais en laboratoire concernant la sulfatation de mortiers et bétons [3].

- Un cas spécial de déposition est la *déposition par aérosol*, avec laquelle ce sont principalement du  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (sulfate d'ammonium) et du  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (nitrate d'ammonium) qui se déposent à la surface des éléments de construction.

Il résulte d'analyses faites dans des régions fortement polluées d'Allemagne, qu'avec les oxydes de soufre, la déposition sèche est prédominante. Il est alors théoriquement possible que du SO<sub>2</sub>, par exemple, pénètre relativement profondément dans les pores qui ne sont pas remplis d'eau. En cas de déposition humide, il faut en revanche s'attendre à une réaction rapide à la surface du béton [6].

## Réactions de composés soufrés

On part aujourd'hui du fait que parmi les polluants atmosphériques, ce sont les composés soufrés qui causent les dégâts les plus importants. C'est pourquoi dans les considérations qui suivent, il a fallu tenir compte d'au moins quatre composés, soit SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pour simplifier, on admet qu'avec la déposition sèche, c'est principale-

ment le SO<sub>2</sub> primaire se formant lors de la combustion qui joue un rôle, alors qu'avec la déposition humide, le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> domine, car l'oxydation (par exemple la poussière) transforme facilement le H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Dans le béton, les combinaisons basiques telles qu'hydroxyde de calcium, de potassium et de sodium ainsi que carbonate de calcium, sont les principaux partenaires réactionnels de l'oxyde de soufre et de l'acide sulfurique. Les sulfates qui se forment sont, soit facilement solubles dans l'eau (sulfate de sodium, sulfate de potassium), soit difficilement solubles (sulfate de calcium, par exemple sous forme de gypse,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). Dans l'air, les composés soufrés sont ainsi toujours en concurrence avec le CO<sub>2</sub>, dont la concentration est d'environ 5000 à 7000 fois supérieure [7].

En raison des faibles concentrations de polluants atmosphériques, et naturellement aussi pour des raisons de temps, les analyses en laboratoire sont effectuées avec des concentrations de SO<sub>2</sub> nettement plus élevées qu'à ce qui correspondrait à des conditions réelles. Une sélection

d'essais est présentée dans le tableau 2 [3]. On peut en tirer les conclusions suivantes:

- ce n'est qu'à la surface, ou que juste sous la surface (jusqu'à 5 mm de profondeur au maximum), que des réactions (sulfatation) se produisent;
- lorsque du CO<sub>2</sub> et du SO<sub>2</sub>, en concentrations pareilles à celles que l'on trouve en réalité, agissent simultanément sur les éprouvettes, la sulfatation est nettement moindre que la carbonatation.

Les mesures effectuées sur le béton d'ouvrages existants fournissent des résultats plus explicites, mais ces résultats ne sont pas nombreux. On a toutefois analysé des bunkers en béton de bonne qualité, datant d'une cinquantaine d'années, ainsi que des anciens bâtiments en béton de qualité comparativement mauvaise, datant d'une vingtaine d'années [6]. La plupart des bâtiments étaient situés dans des zones à forte pollution atmosphérique (par exemple dans la Ruhr). Des analyses physiques et chimiques très poussées faites sur des carottes ont fourni, entre autres, les résultats suivants:

- des concentrations de sulfates

élevées ont été constatées dans la couche de béton superficielle (0–1 cm) de tous les échantillons;

- du gypse nouvellement formé a été décelé à la surface;
- des teneurs en sulfates élevées, à de plus grandes profondeurs, n'ont été constatées qu'avec un béton de mauvaise qualité et une très forte pollution de l'environnement;
- le microclimat (proximité des émetteurs, grands ensembles dans le voisinage) et la porosité du béton exercent une grande influence sur la sulfatation;
- les surfaces de béton très exposées à la pluie témoignent de teneurs en sulfates moins élevées que celles qui sont plus sèches (élimination par la pluie des sulfates de calcium nouvellement formés);
- les surfaces situées sur le côté exposé aux intempéries poudrent, mais seulement sur quelque 2 à 3 mm, après 50 ans.

Les effets dus aux composés soufrés constatés étaient donc en fin de compte relativement minimes. Des analyses d'un tunnel ferroviaire de 100 ans d'âge ont fourni des résultats analogues: ce n'est que dans les 2 cm supérieurs que des concentrations de sulfates élevées ont été trouvées [3].

### Réactions de composés azotés

Bien que les polluants atmosphériques azotés soient parfois présents en concentration plus élevée que les polluants atmosphériques soufrés [1], leurs effets sur le béton ont été encore moins étudiés. Cela tient peut-être au fait que les composés formés, tels que nitrates de calcium, de potassium ou de sodium, sont plus facilement solubles dans l'eau que les sulfates correspondants. Lors des processus de combustion, il se forme surtout, outre un peu de NO<sub>2</sub>, du NO, qui, dans l'atmosphère, se transforme (par oxydation) en quelques heures en NO<sub>2</sub>. Comme pour les composés soufrés, on peut

ici également distinguer entre déposition humide et déposition sèche. Les réactions en présence d'eau peuvent être formulées au moyen d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>).

Les dégâts que peut causer le NO<sub>x</sub> ou HNO<sub>3</sub> [11] sont les suivants:

- transformation en nitrates (agression provoquant une dissolution) de composants de la pâte de ciment durcie et des solutions interstitielles, tels qu'hydroxyde de calcium, de potassium ou de sodium;
- augmentation de volume due à la cristallisation de nitrates dans les pores (agression provoquant un gonflement, fissuration);

### Bibliographie

- [1] Webster, R. P. et Kukacka, L. E., «Effects of acid deposition on Portland cement concrete», pages 239–249 dans Baboian, R. (ed.), «Materials degradation caused by acidic rain», ACS Symposium Series **318** (1986).
- [2] «Valeurs d'immission mesurées en 1994», Document environnement no 41, édité par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (1995).
- [3] Müller, A., «Einfluss des Luftschatdstoffs SO<sub>2</sub> auf Beton», Betonwerk + Fertigteil-Technik **59** [11], 69–73 (1993).
- [4] Mehlmann, M., «Wechselwirkung von Putzsystemen mit sauren Luftinhaltsstoffen (insbesondere SO<sub>2</sub>)», Bautenschutz und Bausanierung **11**, 157–162 (1988).
- [5] Hensel, W., «Chemische Reaktionen von Atmosphärlionen mit zementgebundenen Baustoffen», Betonwerk + Fertigteil-Technik **51** [11], 714–721 (1985).
- [6] Scholl, E., et Knöfel, D., «Der Einfluss von Luftschatdstoffen auf Betonbauwerke», Beton **41** [1], 17–21 (1991).
- [7] Engelfried, R. et Tölle, A., «Einfluss der Feuchte und des Schwefeldioxidgehalts der Luft auf die Carbonatisierung des Betons», Betonwerk + Fertigteil-Technik **51** [11], 722–729 (1985).
- [8] Knöfel, D., et Böttger, K. G., «Zum Einfluss SO<sub>2</sub>-reicher Atmosphäre auf Zementmörtel», Bautenschutz und Bausanierung **8**, 1–5 (1985).
- [9] Knöfel, D., et Böttger, K. G., «Zum Verhalten von zementgebundenen Baustoffen in SO<sub>2</sub>-angereicherter Atmosphäre», Betonwerk und Fertigteil-Technik **51** [2], 107–114 (1985).
- [10] Scholl, E., et Knöfel, D., «On the effect of SO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on cement paste», Cement and Concrete Research **21** [1], 127–135 (1991).
- [11] Knöfel, D., et Scholl, E., «Einfluss von NO<sub>2</sub>-angereicherter Atmosphäre auf zementgebundene Baustoffe», Betonwerk + Fertigteil-Technik **57** [1], 53–60 (1991).



Photo: archives du TFB

### Dégâts sur la cheminée d'une usine d'incinération des ordures, dus entre autres à la corrosion.

**Causes:** couverture insuffisante, carbonatation, action de l'acide muriatique (chlorures). Il est probable que les polluants atmosphériques soufrés et azotés ne sont que marginalement responsables de ces dégâts.

- transport capillaire ou diffusion de ions de nitrate vers la surface de l'armature (corrosion de l'acier).

Des analyses faites sur des prismes de mortier, avec une concentration de  $\text{NO}_2$  mille fois plus élevée que celle se trouvant dans l'atmosphère des grandes villes, ont donné les résultats suivants [11]:

- en présence d'humidité, agression à la surface du mortier provoquant une dissolution, due à la formation de nitrate de calcium;
- fort poudrage des surfaces de mortier en cas d'humidification régulière, dû au lessivage du nitrate de calcium;
- en climat sec, fissuration et écavements dus à la cristallisation du nitrate de calcium dans les pores.

### Dégâts aux enduits [4]

Parmi les divers systèmes d'enduits minéraux, ce sont les mortiers d'enduit légers, au ciment ou au ciment-chaux, qui présentent les plus grands volumes de pores, et donc également les plus grandes surfaces de réaction. Aussi bien lors d'essais en laboratoire que sur des enduits altérés par les intempéries, on a observé des produits provenant de l'agression de composés soufrés atmosphériques:

- plâtre (réaction de l'hydroxyde ou du carbonate de calcium avec le  $\text{SO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ );

- ettringite ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 31 \text{H}_2\text{O}$ ), qui peut provenir des alumates de calcium (surtout  $\text{C}_3\text{A}$ );
- monosulfate ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ), qui peut également se former à partir d'alumates de calcium (surtout  $\text{C}_3\text{A}$ ).

Ces trois composés ont en commun que leur volume est plus grand que le volume du produit de départ. Il en résulte une densification de la structure du mortier à proximité de la surface. Étant donné que le comportement à la dilatation en fonction de la température des phases nouvellement formées diffère de celui des phases du liant résiduel, des tensions peuvent se produire dans la structure. La pénétration des gaz ne dépasse pas une profondeur de 2 à 5 mm au maximum; les solutions interstitielles alcalines empêchent que les gaz soient transportés plus profondément.

### A quel point les polluants atmosphériques sont-ils réellement dangereux?

Lorsque des ouvrages en béton armé subissent des dégâts dus à des composants de l'air, il est probable que ces dégâts résultent de la carbonatation, car le  $\text{CO}_2$  «naturel» est présent dans l'air en concentration quelque 5000 fois supérieure à celle des oxydes de soufre et d'azote.

On admet en général qu'il n'est pas simple de déterminer les causes des dégâts subis par des ouvrages, car les polluants atmosphériques ne sont pas seuls à exercer des influences négatives sur le béton. Le climat par exemple joue également un rôle important: les variations de température du béton, son humidification et son assèchement ainsi que l'action du vent à laquelle il est soumis, sont dus entre autres au climat. Et même les micro-organismes peuvent, le cas échéant, avoir une action nuisible. Inversement, les pluies acides peuvent exercer une influence positive sur la surface du béton, en la débarrassant des impuretés sèches qui s'y sont déposées.

Les rares études faites à ce sujet permettent de tirer la conclusion suivante: on peut généralement admettre que les polluants atmosphériques ne représentent pas un grand danger pour un béton compact, dont la fabrication, la mise en œuvre et le traitement de cure ont été effectués dans les règles de l'art. Dans un environnement industriel fortement pollué (cheminées), il ne faut pas négliger les influences exercées par les composés soufrés et azotés. Protéger la surface du béton, par exemple par des matières organiques insaponifiables telles que les résines époxy, peut en l'occurrence être utile [5]. Kurt Hermann, TFB