

Solutions béton

Principe de fabrication	P. 2
Caractéristiques techniques et contrôle de production	P. 3
Mode d'action	P. 4
Normes et recommandations	P. 5
Comment utiliser la fumée de silice	P. 6
Avantages de la fumée de silice	P. 7



La fumée de silice : l'addition incontournable pour des bétons durables

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une micro-structure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne.

Textes : Patricia Bredy Tuffe, Aurélie Fay, Patrick Guiraud, Élodie Infanti, Alain Picot

Principe de fabrication

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C.

La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour faciliter la manipulation.

Certaines impuretés contenues dans les matières premières (alcalins par exemple) sont également réduites, volatilisées et oxydées dans le four.

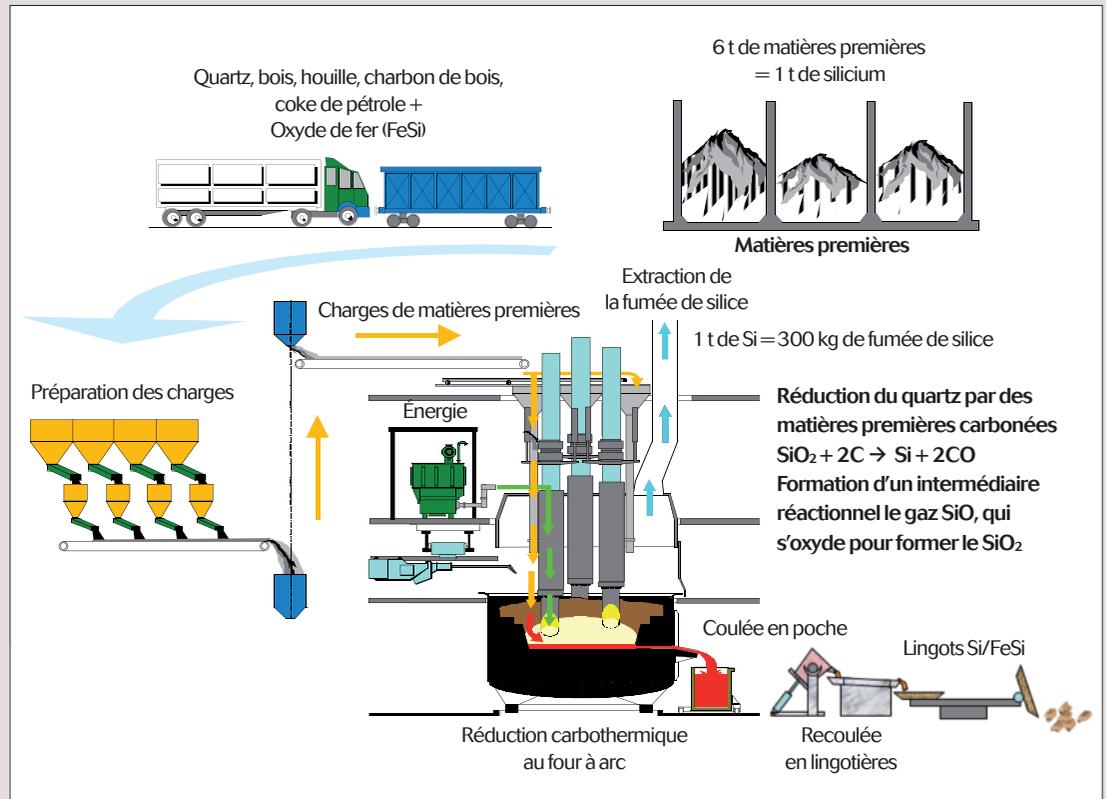
Nota : la société Ferropem[®], filiale du groupe Ferroatlantica, produit 130 000 tonnes de fumée de silice par an à partir de neuf sites situés en France et en Espagne. La société Condensil[®], commercialise au travers d'un contrat, la fumée de silice produite par Ferropem[®] pour les applications relatives au béton.



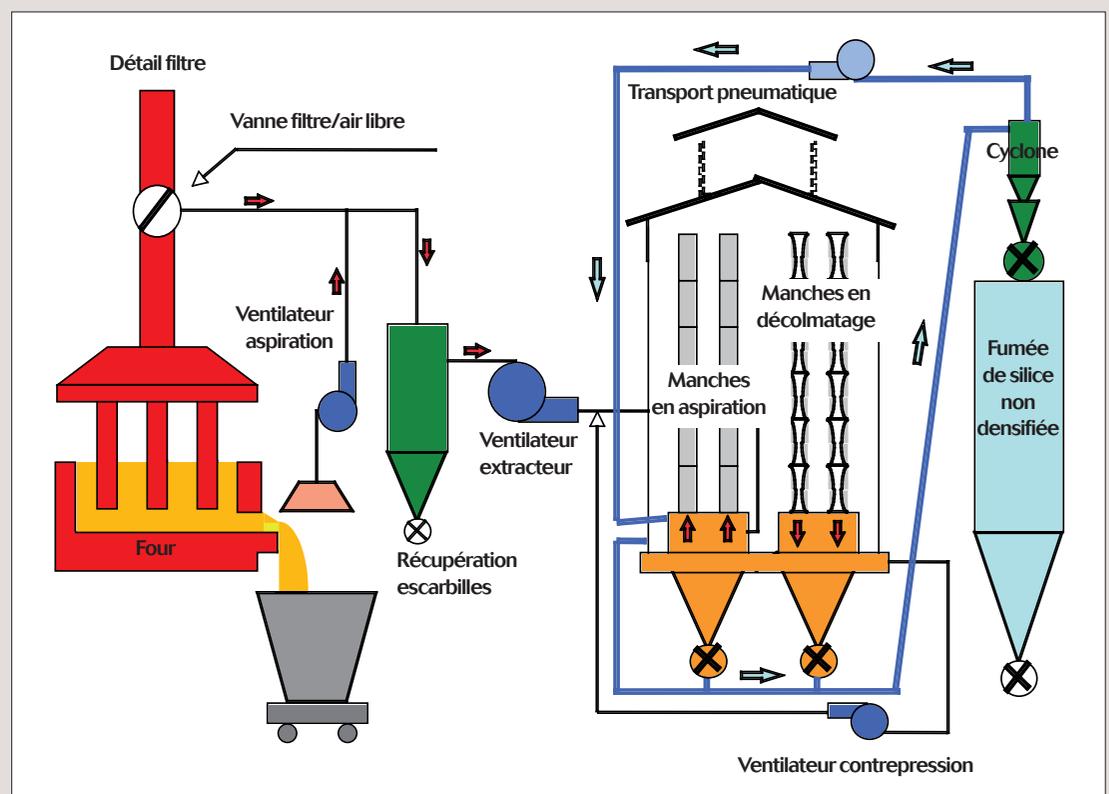
→ Four à arc.

Les caractéristiques de la fumée de silice dépendent de plusieurs facteurs. Le type de production en four à arc (Si ou FeSi) peut par exemple influencer sur la teneur en SiO₂ et les différentes impuretés de la fumée de silice. Le mélange de réducteurs utilisé dans le four peut, quant à lui, conduire à des colorations différentes du produit (de gris clair à gris foncé), sans pour autant en changer les performances. Enfin, la dernière étape de densification permet d'ajuster la densité apparente du produit. ■

Flux dans une usine de fabrication de silicium et d'alliages de ferrosilicium et principe de production de la fumée de silice



Extraction et filtration de la fumée de silice dans un filtre à manches



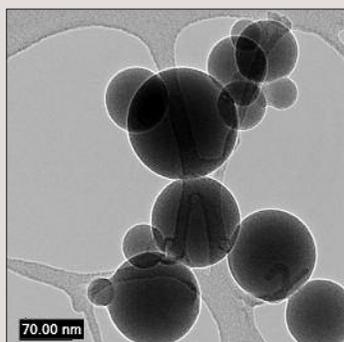
Schémas : source Ferropem[®]

Caractéristiques techniques et contrôle de production

UNE POUDRE ULTRAFINE NON CRISTALLINE

La fumée de silice se présente sous la forme de particules individuelles, avec un diamètre compris entre 50 et 200 nanomètres. Ces sphères contiennent majoritairement du SiO₂, avec des quantités variables en oxydes de Ca, Al, Na, K comme impuretés principales.

La fumée de silice est un produit amorphe et non cristallin.



→ Images prises avec un microscope électronique en transmission (MET) de marque JEOL 2010F – Haute résolution.

LES DIFFÉRENTS ASPECTS D'UNE FUMÉE DE SILICE

La fumée de silice non densifiée (ND) a une densité apparente faible, ce qui rend sa manipulation difficile. Par un traitement de densification, il est possible d'augmenter sa densité apparente et ainsi faciliter son transport, son stockage et sa manipulation. La densité apparente dépend du mode de densification qui peut être mécanique (DM) ou pneumatique (DP). Elle est généralement comprise entre 400 et 650 kg/m³. En augmentant la densité du produit, on améliore la coulabilité et la manipulation du produit, mais on diminue sa capacité à se disperser dans l'eau. L'utilisateur doit donc trouver un compromis entre la manipulation et la dispersion potentielle du produit. La densification ne change pas les

propriétés physico-chimiques du produit. La fumée de silice est aussi disponible sous une forme prête à l'emploi : le slurry, suspension aqueuse avec environ 50 % en masse de fumée de silice. Le slurry est un produit stable dans le temps, avec une basse viscosité et donc facile à pomper et à utiliser. Son procédé de fabrication conduit à un produit très finement dispersé dans l'eau et donc dans le béton lors du malaxage.

CONTRÔLE QUALITÉ

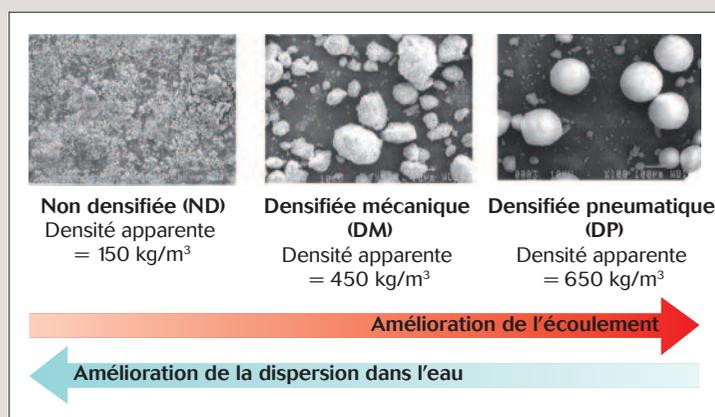
La fumée de silice issue de la fabrication du silicium et du ferrosilicium est aujourd'hui largement utilisée et de qualité régulière et maîtrisée.

Il existe plusieurs normes produit disponibles pour la fumée de silice. La norme en vigueur est la norme européenne EN 13263. Cette norme est composée de deux parties :

- EN 13263-1 : cette partie présente les caractéristiques physico-chimiques et les critères de conformité requis par la fumée de silice pour pouvoir être utilisée en tant que produit d'addition du béton de type II conforme à la norme EN 206-1, des mortiers, des coulis ou d'autres mélanges ;
- EN 13263-2 : cette partie décrit le système d'évaluation de la conformité de la fumée de silice et notamment la certification de conformité par un organisme de certification.

La fumée de silice (poudre et slurry) produite par Ferropem® fait l'objet d'un marquage CE depuis 2006, garantissant qu'elle répond ainsi aux exigences du Règlement des Produits de Construction (n° 305/2011).

Nota : une fumée de silice particulière, issue de la fabrication du silico-calcium, est par ailleurs en cours de normalisation.



→ Morphologie et influence sur les propriétés.

Le marquage CE garantit ainsi que la procédure suivante est appliquée en usine lors de la fabrication de la fumée de silice :

- autocontrôle dans toutes les usines productrices : les analyses sont faites suivant la fréquence indiquée par la norme ;
- prélèvement d'un échantillon dans chaque usine réalisé tous les deux mois par l'organisme de certification :
 - échantillonnage produit,
 - analyses croisées faites entre les laboratoires usines et le laboratoire officiel de l'organisme de certification,
 - audit complet réalisé une fois par an et par usine par un inspecteur de l'organisme de certification ;

■ évaluation de la conformité des produits de chaque usine, basée sur les contrôles et les statistiques d'auto-contrôle ;

- émission d'un certificat annuel de conformité pour chaque usine productrice ;

La norme NF EN 13263-1 fait la distinction entre deux classes de produits suivant leur teneur en SiO₂ : classe 1 pour la fumée de silice contenant plus de 85 % en SiO₂, et classe 2 pour la fumée de silice contenant entre 80 et 85 % en SiO₂. La fumée de silice commercialisée en France par Condensil® est de classe 1, et en majorité avec un SiO₂ supérieur à 95 %. ■

Paramètres à contrôler selon la norme NF EN 13263-1

PARAMÈTRES	LIMITES	FRÉQUENCE DES CONTRÔLES
SiO ₂	> 85 % (classe 1)	H
	> 80 % (classe 2)	H
Perte au feu	< 4 %	H
Surface spécifique BET	15-35 m ² /g	M
Si libre	< 0,4 %	M
Alcalins totaux (Na ₂ O eq)	À reporter	H
CaO libre	1 %	H
SO ₃	< 2 %	M
Chlorures	< 0,3 %	M
Indice d'activité Pouzzolanique à 28 jours	> 100 %	M
Variation d'extrait sec (cas du slurry)	< 2 %	H

H : hebdomadaire – M : mensuel.

Mode d'action



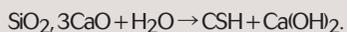
→ Viaduc de Tulle.

La fumée de silice est utilisée dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

RÉACTION POZZOLANIQUE

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.

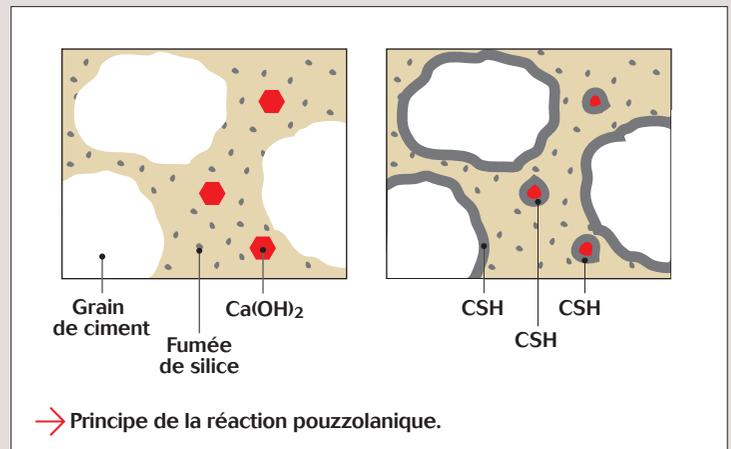
Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les Ca(OH)_2 produits durant l'hydratation du béton :



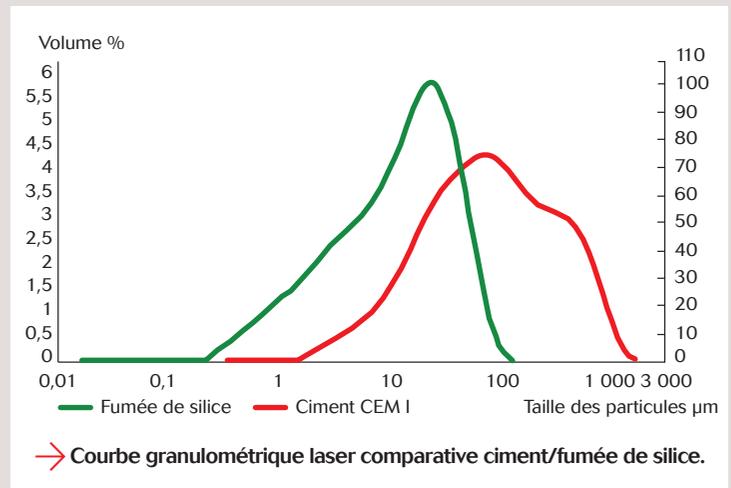
Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

EFFET D'OPTIMISATION DE L'EMPILEMENT GRANULAIRE

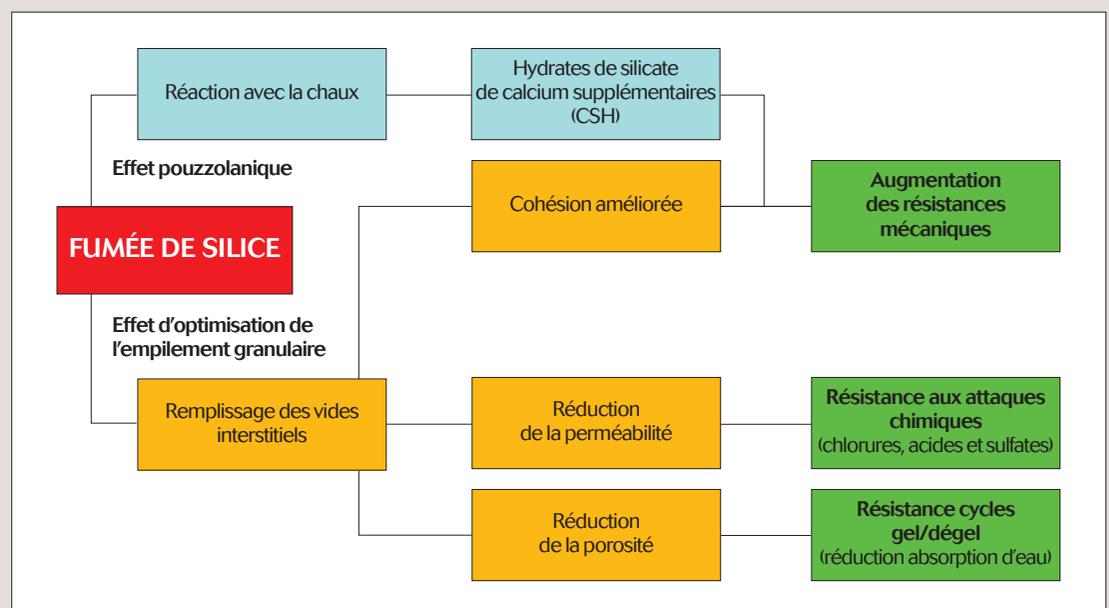
La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton. ■



→ Tunnel de Lötschberg.



Combinaison des effets pouzzolaniques et d'optimisation de l'empilement granulaire de la fumée de silice



Normes et recommandations

LA FUMÉE DE SILICE DANS LA NORME BÉTON NF EN 206-1

L'aptitude générale à l'emploi comme addition de type II pour des bétons utilisés en France est établie dans la norme béton NF EN 206-1, pour la fumée de silice conforme à la norme NF P 18-502-1 puis à la norme NFEN 13263-1 qui l'a remplacée.

L'utilisation en substitution partielle du ciment est traduite par la notion de liant équivalent.

Le concept du coefficient k autorise la prise en compte des additions de type II :

- en remplaçant le terme « rapport eau/ciment » par celui de « rapport eau/(ciment + $k \times$ addition) » ;

- en respectant l'exigence relative au dosage minimal en ciment fonction de la classe d'exposition.

La valeur de k dépend du type d'addition selon ses propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

Dans le cas de la fumée de silice, k peut atteindre la valeur la plus élevée attribuée à ces additions (2).

LA FUMÉE DE SILICE DANS LES RECOMMANDATIONS POUR LA MAÎTRISE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS

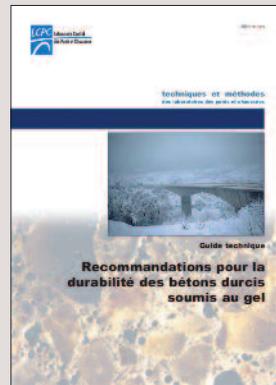
Les ouvrages en béton disposent désormais d'un ensemble de textes normatifs complet et cohérent, constitué de normes européennes complétées par des recommandations techniques françaises.

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel

Les recommandations relatives à la prévention contre les mécanismes développés par le gel font l'objet d'un guide technique édité par le LCPC en décembre 2003.

Ces recommandations permettent de :

- maîtriser les agressions résultant



des cycles de gel/dégel en présence ou non de sels de déverglaçage ;

- formuler et confectionner des bétons durables en ambiance hivernale.

La fumée de silice peut être utilisée de trois manières :

- comme correcteur de la granulité des sables ;
- en addition au ciment (10 %) ;
- en substitution partielle au ciment.

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction

Les recommandations relatives à la prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction font l'objet d'un fascicule édité par le LCPC en juin 1994.

Le principe de la démarche de prévention consiste à ne pas se retrouver dans une situation dans laquelle sont présentes simultanément les trois conditions nécessaires à l'amorçage de la réaction : eau – quantité importante d'alcalins dans



le béton – silice réactive (présence de granulats réactifs).

La fumée de silice contribue à la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction.

Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne

Les recommandations pour se prémunir contre le développement de réactions sulfatiques internes et limiter le risque d'apparition des désordres induits par ces réactions font l'objet d'un guide technique publié en août 2007.



Ces recommandations précisent des dispositions constructives à mettre en œuvre pour la conception et la réalisation de l'ouvrage et des précautions à appliquer pour la fabrication, le transport, la mise en œuvre et la formulation du béton. Elles sont complémentaires des spécifications de la norme NF EN 206-1.

Elles prennent en compte :

- la catégorie d'ouvrage ;
- les actions environnementales auxquelles seront soumises les parties d'ouvrage concernées pendant la durée d'utilisation de la structure ;
- les conditions thermiques du béton lors de sa mise en œuvre et au cours de son durcissement.

Il est possible d'utiliser des additions minérales en substitution du ciment de type CEM I pour diminuer l'exo-

thermie du béton. Des travaux récents montrent l'intérêt de la fumée de silice en la matière et son utilisation devrait être prise en compte dans la prochaine version des recommandations en cours de révision.

Fascicule de documentation FD P 18-011

Le fascicule de documentation FD P 18-011 publié en décembre 2009 définit des environnements agressifs, pour les bétons armés et précontraints. Il permet de spécifier des dispositions préventives adaptées pour la formulation des bétons résistant à ces environnements agressifs.

Ce fascicule est complémentaire de la norme NF EN 206-1.

L'incorporation dans le béton d'une addition hydraulique ou pouzzolanique est un moyen de limiter sa teneur en portlandite et donc de lui conférer une bonne tenue au contact des eaux pures.

Les additions peuvent être :

- utilisées en substitution partielle de ciment CEM I pour constituer un liant équivalent, conformément aux dispositions de l'article NA 5.2.5.2.1 et des tableaux NA.F.1 et NA.F.2 de la norme NF EN 206-1 ;
- incorporées au béton en tant qu'additions.

La fumée de silice est particulièrement adaptée pour la formulation des bétons résistant aux attaques chimiques. ■



Comment utiliser la fumée de silice

Pour les usines de préfabrication et les centrales de Béton Prêt à l'Emploi, la fumée de silice est approvisionnée en vrac ou en big-bags, stockée en silo à pulvérulent et introduite dans le malaxeur par l'intermédiaire de la bascule à ciment ; quelques adaptations du matériel sont toutefois recommandées pour sa bonne utilisation. Les adjuvants sont introduits de façon classique lors de la confection du béton.

Pour des petits volumes et/ou des emplois ponctuels, la fumée de silice est également conditionnée en sacs (25 ou 30 kg principalement). Ceux-ci doivent être introduits dans le malaxeur et homogénéisés avec les autres constituants non hydratés. L'eau et les adjuvants sont incorporés ensuite.

Des additifs prêts à l'emploi à base de fumée de silice sont également disponibles en sacs ; leur composition est adaptée aux utilisations en milieux agressifs. Ces produits sont particulièrement appropriés pour des utilisations dans des « petites » centrales de Béton Prêt à l'Emploi. ■



→ Relax en BFUP.



→ Viaduc du Crozet.



→ EPR Flamanville.



→ Musée Mucem.



→ Tour Oxygène.

Jusque dans le milieu des années 1970, la fumée de silice était généralement rejetée dans l'atmosphère. Dans un souci de protection de l'environnement, des procédés de valorisation ont ensuite été développés afin d'éviter ces rejets. Le produit a dans un premier temps été stocké en décharge, puis à partir des années 1980, suite à d'importants travaux de R&D, son utilisation dans les bétons a été reconnue. Ce qui était un déchet est alors devenu une addition incontournable pour les producteurs de béton. Aujourd'hui, ce sont des centaines de milliers de tonnes dans le monde qui sont ainsi valorisées.

En France, la fumée de silice fabriquée par Ferropem®, couverte par la norme NF EN 13263, est commercialisée par la société Condensil® pour les applications relatives au béton. www.condensil.fr

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et des alliages de ferrosilicium. Elle est donc considérée comme issue des stocks et n'apporte pas de contribution propre aux flux d'inventaire. Seuls les impacts de sa transformation, son stockage et son transport sont pris en compte.

Avantages de la fumée de silice

PERFORMANCE À L'ÉTAT

FRAIS

Maniabilité

Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression.

Cette particularité offre en particulier les avantages suivants :

- moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances ;
- projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton projeté.

PERFORMANCES À L'ÉTAT

DURCI

Performances mécaniques

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

Durabilité

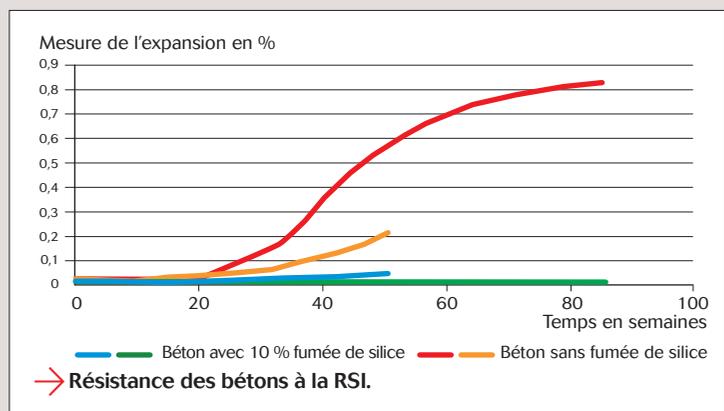
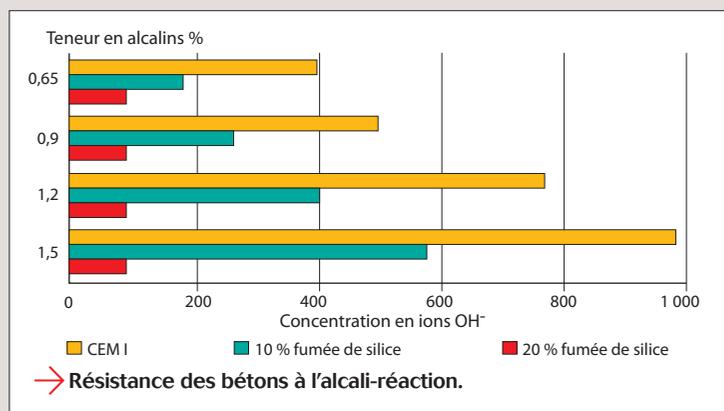
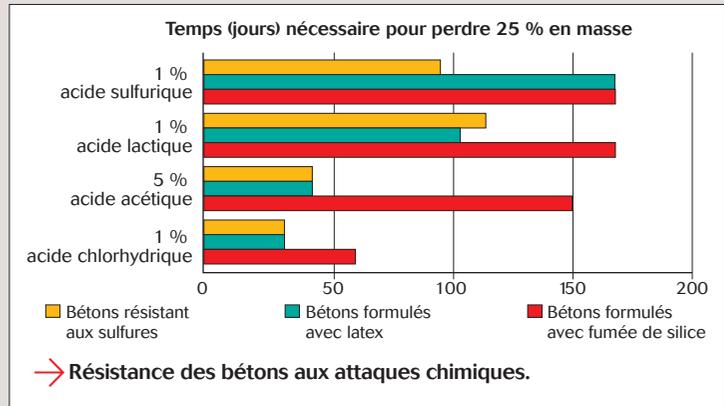
L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins. L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer.

Alcali-réaction

La fumée de silice a un effet favorable vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Les particules fines et amorphes de la fumée de silice réagissent avec les alcalins du ciment et réduisent ainsi leur teneur dans le béton avant son durcissement.

Réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement les ouvrages en béton. L'influence de la fumée de silice à des teneurs optimisées de 10 % en taux de substitution est très significative en prévention de cette pathologie.



Performances mécaniques

Type de béton	Fumée de silice (% masse de ciment)	Résistance en compression (MPa – 28 J)	Exemples d'utilisation
Traditionnel	4 – 7	25 – 50	Immeubles – Ponts
Béton projeté	40	15	Tunnels – Réparations d'ouvrages de génie civil – Confortement de remblais
À hautes performances	8 – 10	> 50	Ouvrages d'art – Immeubles de grande hauteur – Plateformes offshore
À très hautes performances	11 – 15	> 80	Ouvrages d'art – Plateformes offshore – Containers de déchets radioactifs
À ultra hautes performances	20 – 30	> 150	Ouvrages d'art – Applications innovantes – Construction architectonique – Containers de déchets radioactifs

REACH

La fumée de silice est une substance enregistrée dans le cadre du règlement REACH (n° 1907/2006/EC) sur l'Enregistrement, l'Évaluation et l'Autorisation des Substances Chimiques au sein de l'espace économique européen.

Résistance au cycle gel/dégel

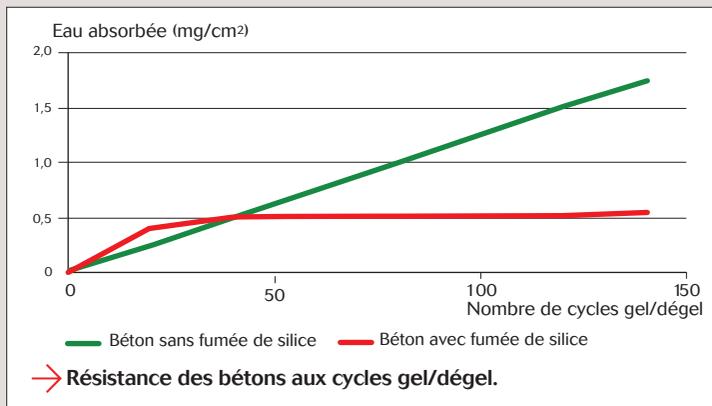
En diminuant la perméabilité du béton, la fumée de silice réduit les mouvements d'eau et les pressions internes dans le béton qui sont source de pathologies.

Un béton contenant de la fumée de silice supporte un plus grand nombre de cycles gel/dégel.

OPTIMISATION DE L'ENROBAGE DES ARMATURES

L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages aux phénomènes de corrosion et donc leur durée d'utilisation. Ainsi il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure adaptée.

Les recommandations de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1-section 4) en matière d'enrobage des bétons de structures sont novatrices. Elles résultent d'un retour d'expérience sur la durabilité des



→ Pont de la Chabotte sur l'A51.



→ Terminal Méthanier, Fos-sur-Mer.

ouvrages construits depuis plusieurs décennies et sur les recherches récentes en matière de protection des armatures vis-à-vis des risques de corrosion. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser la durabilité des ouvrages.

La détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon extrêmement détaillée :

- les **classes d'exposition** dans lesquelles se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) et qui traduisent les conditions environnementales ;
- la durée d'utilisation du projet traduite par la classe structurale de l'ouvrage (S1 à S6) ;
- la **classe de résistance du béton** ;
- les dimensions des armatures ;

- le type de système de contrôle qualité mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton ;
- la maîtrise du positionnement des armatures ;
- la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé ;
- le **type d'armatures** (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable).

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée en particulier si : l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition). Elle peut être réduite de quelques centimètres.

L'utilisation de fumée de silice dans le béton augmente sa résistance mécanique, ce qui permet de réduire la valeur de l'enrobage des armatures et d'optimiser les épaisseurs des structures. Il en résulte une économie de ressources naturelles (en particulier en granulats) et de ciment.

PAREMENTS

L'incorporation de la fumée de silice permet d'obtenir au décoffrage des parements d'une excellente qualité. Les teintes des parements sont plus homogènes et généralement plus claires que celles des bétons de référence. ■

Les avantages de la fumée de silice

Bétons à l'état frais

Réduction de :

- la ségrégation ;
- la chaleur d'hydratation ;
- l'exsudation.

Amélioration de :

- l'adhésion ;
- la cohésion.

Bétons durcis

Amélioration des résistances mécaniques (en particulier résistance en compression).

Amélioration significative de :

- la résistance aux attaques chimiques, aux sulfates et aux chlorures ;
- la corrosion des armatures ;
- la résistance au cycle gel/dégel ;

Réduction significative de :

- la porosité et la perméabilité ;
- la carbonatation.

■ la résistance à l'abrasion ;

Prévention du risque :

- d'alcali-réaction ;
- de RSI.

Homogénéisation de la teinte des parements.

Béton témoin sans fumée de silice	Avec fumée de silice Condensil®		
	Taux de carbone standard	Taux de carbone élevé	
			Ciment clair Granulat clair
			Ciment clair Granulat gris
			Ciment gris Granulat gris

→ Teintes des bétons en fonction des taux de carbone de la fumée de silice.