

27 juin 2012 à Chambéry

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

Le 27 juin 2012, la délégation AFGC Rhône Alpes, en collaboration avec Cimbéton et le SNBPE, a organisé une journée consacrée aux fumées de silice.

Rappel du programme

9h00 : Accueil

9h30 : Ouverture de la journée

Bernard PLASSE, Secrétaire Général de FERROPEM

Jacques MARTIN, Président de la Délégation AFGC Rhône -Alpes

Eric GUILLOT, Président du Collège BPE Rhône-Alpes

Patrick GUIRAUD, Directeur Délégué Génie Civil de Cimbéton

9h45 :

PRINCIPE DE FABRICATION, CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET CONTROLES DE PRODUCTION

Présentation de l'entreprise FERROPEM

Bernard PLASSE, FERROPEM

Principe de fabrication

Aurélié FAY, FERROPEM

Caractéristiques techniques

Aurélié FAY, FERROPEM

Contrôles de production

Aurélié FAY, FERROPEM

Présentation de l'entreprise CONDENSIL

Alain PICOT, CONDENSIL

10h30 :

NORMES ET RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DE LA FUMEE DE SILICE

Norme NF EN 206-1

Alain PICOT, CONDENSIL

Recommandations LCPC

Patricia TUFFE, CONDENSIL

Evolutions du contexte normatif

Patrick GUIRAUD, Cimbéton

11h15 :

CONSEIL D'UTILISATION, ACTIONS ET PERFORMANCES DE LA FUMEE DE SILICE

Conseils d'utilisation

Alain PICOT, CONDENSIL

Actions de la fumée de silice

Patricia TUFFE, CONDENSIL

Performances de la fumée de silice

Patricia TUFFE, CONDENSIL

Références d'ouvrages avec fumée de silice

François PERRIER, Consultant

12h00 :

PRESENTATION DE LA VISITE DES SITES DE PRODUCTION ET DES CONSIGNES DE SECURITE

12h30 : Déjeuner sur le site de CONDENSIL

14h00 : Transfert en car vers les sites de production

15h00 : Visite des sites de production

16h00 : Retour vers Chambéry

Synthèse des présentations

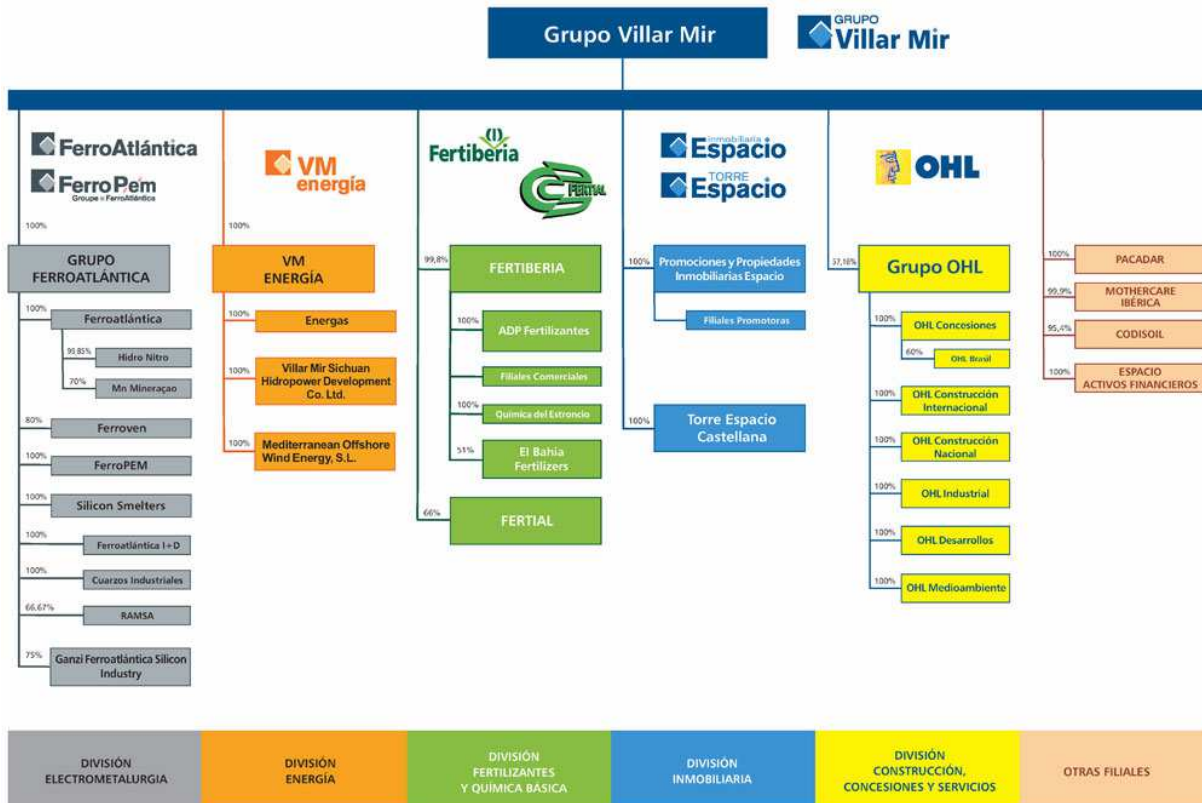
La société FerroPem en résumé

Bernard PLASSE, FERROPEM

- D'abord division électrometallurgique du Groupe Pechiney puis du Groupe Alcan, la Société PEM a été rachetée le 1er juin 2005 par le Groupe Espagnol FerroAtlántica (**Groupe Villar Mir**) pour devenir FerroPem le 1er juin 2006
- Leader mondial sur le marché du silicium, des alliages à base de silicium et de la fumée de silice.
- Spécialiste de la réduction carbothermique au four électrique
- Six usines en France et un siège social à Chambéry en Savoie
- Environ 1000 salariés au 1er janvier 2012
- 392 M€ de CA en 2010, 471 M€ de CA en 2011 d
- Seize fours de réduction pour une puissance installée de 350 MW

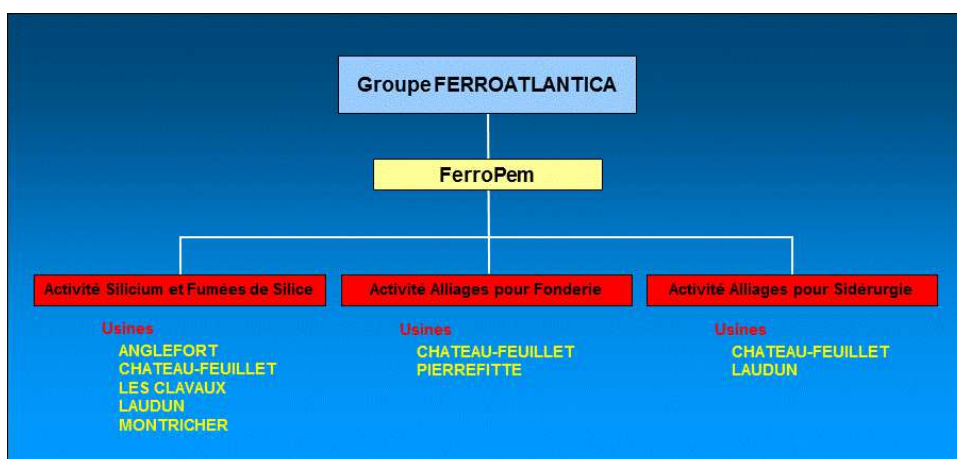
Le Groupe Villar Mir

- **FAMILIAL** : 100 % propriété de la famille Villar Mir
- **INDÉPENDANT** : aucune institution, financière ou autre, n'est propriétaire d'une seule action
- **INDUSTRIEL** :
 - ✓ secteurs industriels de base, construction, promotion immobilière et services
 - ✓ gestion à longterme, pas de revente de sociétés
- **DIVERSIFIÉ**
- **DÉCENTRALISÉ** :
 - ✓ pas de directives de Groupe : chaque Société est responsable de son bilan et de son compte de résultats
 - ✓ conçu comme un groupement d'entreprises qui conservent chacune leur propre identité et leur autonomie
 - ✓ structure centrale très réduite



Présence internationale





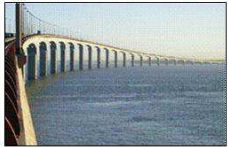
Produits / Applications / Clients

FUMEE DE SILICE (58 185 tonnes vendues en 2010 dont slurry)

Bétons et mortiers à hautes performances

destinés principalement à la construction d'ouvrages d'art

La fumée de silice diminue la porosité et renforce les résistances mécaniques et la durabilité des bétons




Pont de l'Île de Ré

Torre Espacio Madrid



Arche de la Défense

Fibrociments (tuiles, plaques)

La fumée de silice diminue la perméabilité, la porosité et les déformations dues au vieillissement. Elle se substitue à l'amiante



Bétons réfractaires

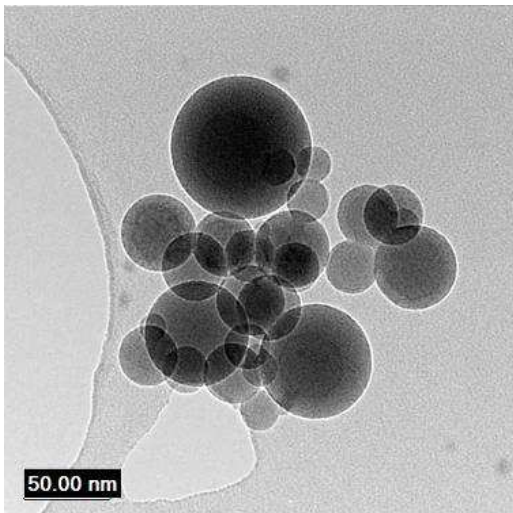



Qualité / Sécurité / Environnement

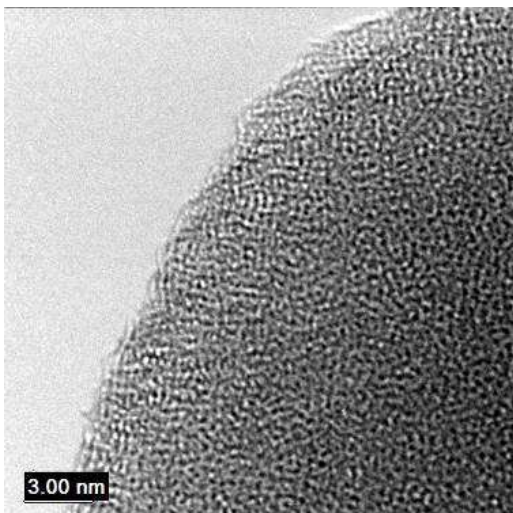
QUALITE	• L'ensemble des établissements de la société est certifié ISO 9001 (certificat commun)
SECURITE	• Maintenir un haut niveau de Sécurité est une priorité pour FerroPem. La démarche de Sécurité Active s'appuie sur l'engagement de l'encadrement et la participation du personnel • Toutes les usines sont certifiées OHSAS 18001
ENVIRONNEMENT	• Toutes les usines sont certifiées ISO 14001



Qu'est-ce que la fumée de silice?
Des particules individuelles de SiO_2 .
Diamètre moyen = 150 nm.



Une structure amorphe



Les manifestations régionales

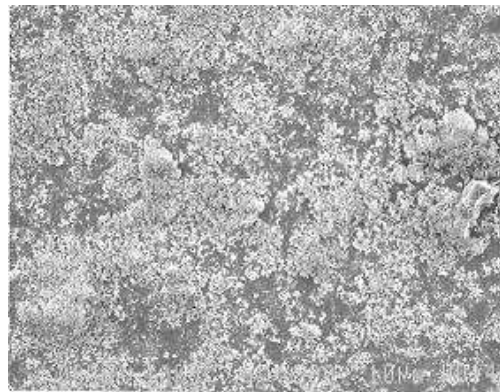
Les paramètres influant sur les caractéristiques du produit :

- Le type de production des fours Si / FeSi / CaSi
> Influence sur les teneurs en SiO_2 et autres impuretés
- Les mélanges de réducteurs utilisés
Bois + Houille / Charbon de bois / Coke de pétrole
> Influence sur la couleur du produit
- Le procédé de densification: densification mécanique/pneumatique
> Influence sur la densité du produit

Les différents aspects

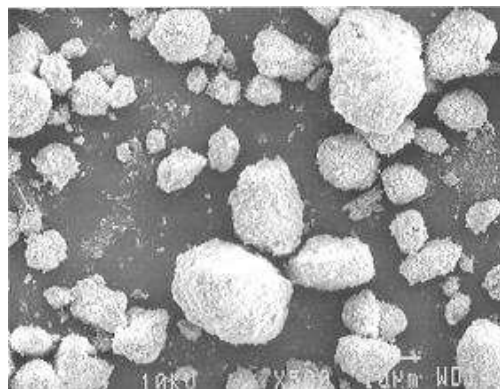
- FerroAtlantica a deux méthodes de densification:
 - Densification pneumatique (avec de l'air)
 - Densification mécanique
- La méthode de densification a un impact sur:
 - La densité apparente
 - L'écoulement du produit
 - Sa faculté de dispersion
- Il existe un produit prêt à l'emploi: le slurry (50% MS)
 - Stable dans le temps
 - Fumée de silice finement dispersée
 - Basse viscosité = facile à pomper

Morphologie et influence sur les propriétés



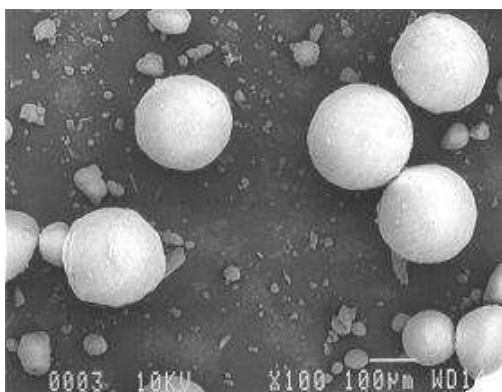
Non Densifiée (ND)

Densité apparente = 150 kg/m³



Densifiée Mécanique (DM)

Densité apparente = 450 kg/m³



Densifiée Pneumatique (DP)

Densité apparente = 650 kg/m³

Contrôles de production

Contrôles Qualité

- Pour commercialiser au sein de l'Europe pour des applications bétons, le **marquage CE** est obligatoire pour la fumée de silice selon le Règlement des Produits de Construction (n°305/2011).
- Pour ce marquage CE, la fumée de silice est soumise à un système d'attestation de conformité de **niveau 1+**, contrôle le plus strict à mettre en place.
- Depuis **2006**, la fumée de silice produite par le Groupe FerroAtlantica fait l'objet d'un marquage CE et est certifiée selon les normes **EN 13263-1:2009 et EN 13263-2: 2009**

Normes EN 13263-1 et EN 13263-2

- **EN 13263-1:** précise les caractéristiques physico-chimiques et les critères de conformité pour pouvoir être utilisée en tant que produit d'addition du béton.
- **EN 13263-2:** décrit le système d'évaluation de la conformité de la fumée de silice.
- Certificat délivré **annuellement** par un organisme de certification accrédité

Principe du système d'attestation de conformité de niveau 1+ (CE)

- **Autocontrôle** dans toutes les usines productrices.
- **Prélèvement d'un échantillon dans chaque usine tous les deux mois par l'Organisme tiers de Certification:** Echantillonnage / Analyses croisées
- Un **audit complet (système/ produit / process)** annuel
- Evaluation de la **conformité** du produit pour chaque usine
- Emission par l'organisme accrédité d'un **certificat annuel** de conformité pour chaque usine productrice

Les manifestations régionales

Paramètres à contrôler suivant la norme EN 13263-1

PARAMETRES	LIMITES	FREQUENCE DES CONTROLES
SiO ₂	>85% (Classe 1) >80% (Classe 2)	Hebdomadaire Hebdomadaire
Perte au Feu	<4%	Hebdomadaire
Surface Spécifique BET	15 – 35 m ² /g	Mensuel
Si libre	< 0,4%	Mensuel
Alcalins totaux (Na ₂ O Eq)	A reporter	Hebdomadaire
CaO Libre	<1%	Hebdomadaire
SO ₃	<2%	Hebdomadaire
Chlorures	<0,15%	Mensuel
Indice d'activité Pouzzolanique à 28j	>100%	Mensuel
Variation d'extrait sec (cas du slurry)	<2%	Hebdomadaire

Equipements analytiques

Techniques analytiques utilisées:

- ✓ Fluorescence X
- ✓ LECO C/S
- ✓ Volumétrie / gravimétrie
- ✓ BET monopoint
- ✓ ICP OES (Eléments trace)
- ✓ Granulométrie Laser

Echanges croisés inter-laboratoires Ferroatlantica

Echanges croisés laboratoires extérieurs

Laboratoire Central d'Analyses / Ferropem

Utilisation du SRM 2696 comme Matériau de Référence Certifié

SRM 2696

Eléments certifiés	Valeur moyenne
SiO ₂ (%)	95,61
CaO (%)	0,426
K ₂ O (%)	0,652
Na ₂ O (%)	0,129
H ₂ O (%)	0,251
Perte au Feu (%)	2,11
BET m ² /g (%)	22,92

Présentation de l'entreprise CONDENSIL

Alain PICOT, CONDENSIL

HISTORIQUE

- **Années 80** : La société SATM utilise en Savoie de la Fumée de Silice "locale" dans des centrales BPE.
- **Mars 1986** : Un protocole d'accord est signé entre **SIKA** et **SATM**.
- **juillet 1987** : Premier contrat signé entre **SATM/SIKA** et **PECHINEY ELECTROMETALLURGIE**.
- **14 septembre 1987** : Création de la société **CONDENSIL**, filiale de **SATM** et **SIKA**.

- **Printemps 1988** : Démarrage de l'installation de Chambéry (mise en sacs). - **Septembre 1989** : Les Ciments **VICAT** achètent **SATM**

GENERALITES

- Dans le cadre d'un contrat de commercialisation signé entre **FERROPEM** et **CONDENSIL**, celle-ci possède l'exclusivité de la commercialisation de la Fumée de Silice issue des usines **FERROPEM**, installées en France, pour le territoire national et ce pour les utilisations BPE et les usines de préfabrication.
- Ce partenariat est effectif depuis 1987.
- Tonnage annuel commercialisé: entre 7 000 et 10 000 tonnes de fumées de silice

ORGANISATION

CONDENSIL dispose des appuis suivants:

- Structure interne dédiée uniquement au marché des additions performantes et principalement la fumée de silice
- R&D du groupe **VICAT**
- Laboratoire **SIGMA-BETON** pour études, essais et tests de contrôle
- Réseau technico-commercial **SIKA** (28 personnes)
- Société **SATM** pour la logistique des transports (vrac, big bag ou sacs)

Norme NF EN 206-1

Alain PICOT, CONDENSIL

LES NORMES ADDITIONS

Les ADDITIONS pour béton sont définies dans la norme NF EN 206-1 :

- ✓ matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières.
- ✓ Il existe deux types d'additions :
 - o Les additions quasiment inertes (type I),
 - o Les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II).

LA NORME FUMEE DE SILICE

- ✓ **NF EN- 13263-1 et 2 :**

Son domaine d'application concerne la **Fumée de Silice**, co-produit du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de ferrosilicium.

Cette norme présente les caractéristiques chimiques et physiques exigées pour de la Fumée de Silice utilisée en tant que produit d'addition du béton de type II conforme à la norme NF EN 206-1.

Les manifestations régionales

LA NORME BÉTON : NF EN 206-1

RESPONSABILITÉS DES ACTEURS

• LE PRESCRIPTEUR

Le prescripteur est responsable de la spécification du béton (Article 6) et du choix de la classe d'exposition.

• LE PRODUCTEUR

Le producteur est responsable de la conformité et du contrôle de production (Article 8 et 9).

Nota : Pour un BPS, le producteur est responsable de fournir un béton qui satisfasse les propriétés spécifiées (résistance, consistance...).

Pour un BCP le producteur est responsable de fournir un béton qui respecte la composition prescrite

• L'UTILISATEUR

L'utilisateur est responsable de la mise en oeuvre du béton dans l'ouvrage ou dans l'élément structurel.

NORMALISATION ET REGLEMENTATION

Norme Béton : NF EN- 206-1

- Cette norme européenne s'applique au béton destiné aux structures coulées en place, aux structures préfabriquées, aux éléments de structure préfabriqués pour bâtiments et structures de génie civil.
- Elle spécifie les exigences applicables aux différents constituants du béton.
- Elle spécifie que les additions de type II (comme la **Fumée de Silice**) peuvent être utilisées dans la composition des bétons et définit un concept de coefficient k (liant équivalent) :
Liant équivalent = **C+ kA**

C'est la quantité de ciment par m³ de béton (ciment de type CEM I uniquement)

A est la quantité d'addition prise en compte, dont la valeur maximale: $A/(A+C)$

K est le coefficient de prise en compte de l'addition

Coefficient k pour la **Fumée de Silice**:

- k= 2.0 pour un rapport E/C spécifié inférieur ou égal à 0.45
- k= 1.0 pour un rapport E/C spécifié supérieur à 0.45

Le rapport maximal $A/(A+C)$ doit être inférieur ou égal à 0.10 **et ce pour toutes les classes d'exposition** (seule addition le permettant).

Exemple: C 40/50 en XA3

- 1) 385 kg CEM I
- 2) Si $E/C \leq 0.45 = 315 \text{ kg CEM I} + 35 \text{ kg FS}$
- 3) Si $E/C > 0.45 = 350 \text{ kg CEM I} + 35 \text{ kg FS}$

La fumée de silice dans les recommandations pour la maîtrise de la durabilité des bétons

Patricia Brédy Tuffé, *CONDENSIL*

Notion de durée d'utilisation de l'ouvrage

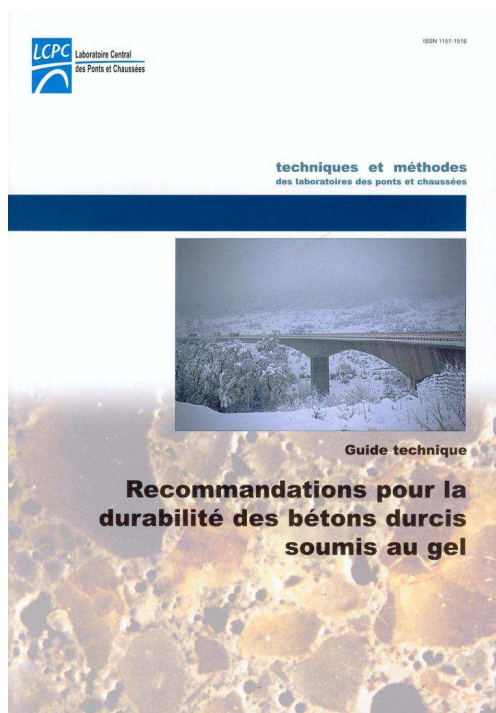
- Bâtiment = 50 ans
- Structure de Génie Civil = 100 ans
- Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage (à chaque classe d'exposition correspondant des performances mécaniques minimales pour le béton) et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.

Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel

Guide technique LCPC – 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



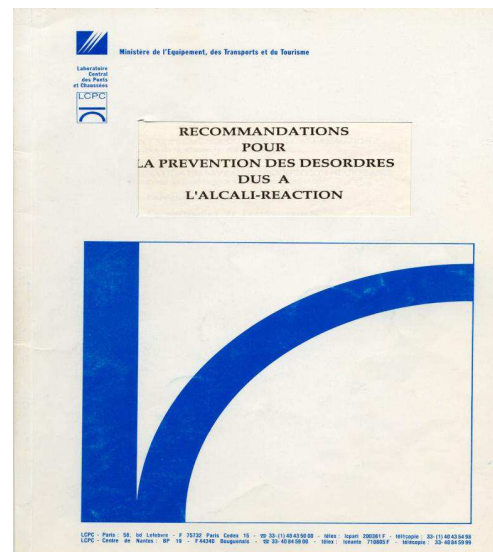
La fumée de silice peut être utilisée:

- ✓ Comme correcteur de la granularité des sables
- ✓ En addition au ciment
- ✓ En substitution partielle du ciment CEM I

Les manifestations régionales

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

Fascicule LCPC – Juin 1994



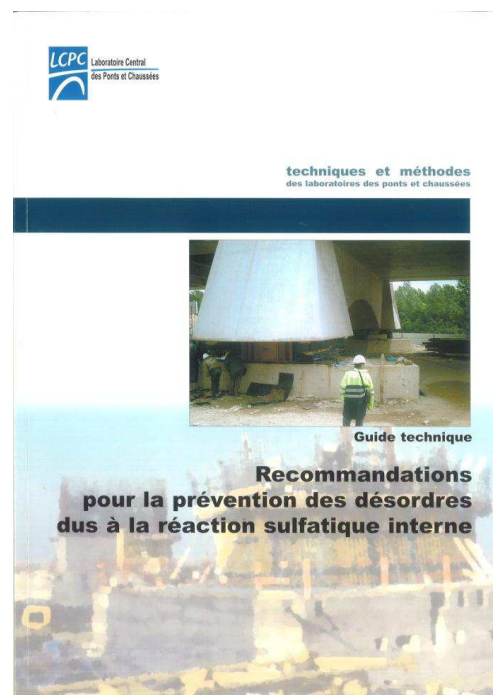
Principe de prévention: éviter la conjonction des 3 facteurs

- ✓ Eau HR > 80 – 85%
- ✓ Silice réactive
- ✓ Alcalins solubles

Pour le calcul des alcalins actifs: Tableau des coefficients totaux actifs FS = 0.1

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

Guide technique LCPC – Août 2007



Prise en compte de:

- ✓ La catégorie de l'ouvrage
- ✓ Les actions environnementales
- ✓ Les conditions thermiques du béton lors de sa mise en oeuvre et de son durcissement
- Les fumées de silice ne sont pas citées dans ce document
- Mais des travaux récents montrent l'intérêt de la fumée de silice
- Prise en compte dans la prochaine version en cours de révision

Fascicule de documentation FD P 18-011

Environnements agressifs

Publié en décembre 2009

Dispositions préventives adaptées

- ➔ Environnements agressifs pour bétons armés et précontraints

Les additions de type fumée de silice peuvent être utilisées

- ✓ Substitution partielle de ciment CEM I
- ✓ Incorporées au béton en tant qu'additions

Conseils d'utilisation

Alain Picot, *CONDENSIL*

LIVRAISON EN VRAC : centrale BPE et préfa

Volume du silo

- Tenir compte de la densité apparente de la **Fumée de Silice**: de 0.35 à 0.75 en fonction des produits (S 95 DP ou S 95 DM pour CONDENSIL)
- Tonnage « standard » par livraison = 24 tonnes ; soit un volume de 35 m³ à 65 m³

Equipement du silo

- Utiliser de préférence des tuyaux PVC ou caoutchouc semi rigide pour le tuyau de vidange
- Eviter tout relief (soudure ou bride) à l'intérieur du tuyau
- Prévoir un angle le plus ouvert possible en partie haute du silo

Vidange

- La pression de la citerne doit être de 0.8 bar maxi
- Le camion se place au plus près du silo pour réduire les longueurs horizontales de tuyaux
- Surveiller en continu le bon écoulement du produit
- Temps indicatif moyen de vidange : 1h30 pour 24 t
- Le transporteur doit respecter « La charte de bonnes pratiques pour la prévention des risques liés au déchargement de ciment vrac », signée par le SFIC, SNBPE et SNMI. Cette charte étant principalement axée sur la sécurité des intervenants

Les manifestations régionales

DOSAGE

Vis à ciment

La vis « idéale » est :

- La plus proche possible de l'horizontale
- D'un diamètre ≥ 200 mm
- La plus courte possible
- Vitesse de rotation plus lente que pour le ciment
- Eviter les paliers intermédiaires (centrale neuve)
- Ne jamais remplir totalement la vis : réduire l'ouverture de la vanne sous silo
- Dans la mesure du possible adapter un variateur de vitesse (pas progressif)

MALAXAGE

Pesage

- Le pesage de la **Fumée de Silice** est, normalement, réalisé à l'aide de la bascule à ciment (pesage en cumulé)

Malaxage

- Les pulvérulents (ciment et **Fumée de Silice**) doivent être homogénéisés avec les granulats non hydratés.
- L'incorporation d'un super plastifiant (de type polycarboxylate si possible) est obligatoire pour une défloculation optimale
- Le temps de malaxage doit être augmenté (en fonction des résultats recherchés) de l'ordre de 90 à 120 secondes (rappel temps malaxage mini Marque NF-BPE = 55")
- Il ne faut jamais rajouter de la Fumée de **Silice** dans un béton déjà malaxé avec l'eau.
- L'addition de **Fumée de Silice** aux constituants du béton donne au mélange en cours de malaxage une apparence plus visqueuse que l'on est tenté de compenser par addition d'eau, ce qui viendrait dégrader les qualités ultérieures du béton:
 - ➔ **importance de l'adjuvantation adaptée**

Actions de la fumée de silice

Patricia Brédy Tuffé, *CONDENSIL*

Mode d'action de la fumée de silice

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

- ✓ Réaction pouzzolanique
- ✓ Effet d'optimisation de l'empilement granulaire

Réaction pouzzolanique

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (**gel CSH**)

Effet 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.

Performances de la fumée de silice

Patricia Brédy Tuffé, CONDENSIL

Les avantages de la fumée de silice

1- Bétons à l'état frais -> maniabilité

- ✓ Réduction de :
 - La ségrégation
 - La chaleur d'hydratation
 - L'exsudation
- ✓ Amélioration de:
 - L'adhésion
 - La cohésion

Fluage

Le fluage de dessiccation est nettement réduit par rapport aux bétons courants (au moins 30%) et peut même être inexistant en présence de fumées de silice (Rapport BHP 2000)

- Documentation LCPC « Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL / BPEL aux bétons à 80 Mpa (1996) »
- Coef de fluage = 2 béton ordinaire
 - = 1.5 BHP sans FS
 - = 0.8 BHP avec FS
- Diminution des pertes de précontrainte
- Diminution des redistributions d'efforts

Les manifestations régionales

- Meilleur contrôle géométrique des ouvrages
- Le module de déformation différé des bétons avec des fumées de silice est plus élevé

2- Bétons à l'état durci

- ✓ Amélioration des résistances mécaniques
- ✓ Amélioration significative de:
 - La résistance aux attaques chimiques, aux sulfates, aux chlorures
 - La corrosion des armatures
 - La résistance aux cycles de gel/dégel
- ✓ Réduction significative de:
 - Porosité et perméabilité
 - Carbonatation
 - Résistance à l'abrasion
- ✓ Prévention du risque:
 - D'alcali-réaction
 - De RSI
- ✓ Homogénéisation de la teinte des parements

Optimisation de l'enrobage des armatures

- Corrosion des armatures
- Durée d'utilisation de l'ouvrage
 - Recommandations de l'Eurocode 2
- Classes d'exposition
- Classe de résistance du béton
- Dimensions, nature et type des armatures

Si on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition)

➔ l'enrobage peut être réduit