

Utilisation des sous-produits industriels – Les cendres volantes

par **Pierre ROSSI**

Docteur en géologie. Responsable géotechnique de l'unité « Grands Travaux de Terrassement (Razel) »

Ludovic GAVOIS

Directeur du service géotechnique de VINCI Construction – Terrassement

et **Guy RAOUL**

Ingénieur de l'École spéciale des Travaux publics ; ancien Directeur de GTM Construction
Actuellement Président de la Commission française de normalisation « Terrassements »

Sources bibliographiques

À lire également dans nos bases

BERTHIER (J.). – Professeur à l'ENPC, Président du BCEOM. « Granulats et liants routiers ». Comité Technique AIPCR des terrassements – Drainage, couche de forme, matériaux légers pour remblais. Traité de Construction [C 903] (1997).

LALLEMAND (A.). – Production d'énergie électrique par centrales thermiques. [D 4 002] (2005).

DARIE (G.). – Réhabilitation des centrales thermiques. [BM 4 189] (2005).

Guides et catalogues

GTR. – Guide technique SETRA/LCPC : 2^{ème} édition : réalisation des remblais et des couches de forme (Juillet 2000).

GTS. – Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique SETRA/LCPC (Janvier 2000).

PREDIS. – Nord-Pas-de-Calais. Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels (Juillet 2002).

Guide Technique Régional relatif à la valorisation des cendres volantes de charbon.

SETRA/LCPC. – Guide technique : conception et dimensionnement des structures de chaussées (Décembre 1994).

SETRA/LCPC. – Guide technique : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des assises de chaussées (Septembre 2007).

SETRA/CFTR. – Guide technique : conception et réalisation des terrassements (Mars 2007).

SETRA/CFTR. – Guide technique : valorisation des matériaux locaux (Octobre 2004).

SETRA/LCPC. – Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Assises de chaussées (Décembre 1998).

Catalogue des structures-types de chaussées neuves 3^e trimestre 1998 : Direction des Routes et de la Circulation Routière.

GT. – Guide technique SETRA/LCPC : Remblayage des tranchées et réfection des chaussées (Mai 1994).

Thèses

ADAMIEC (P.). – Corrélation avec les caractéristiques géologiques, géologiques et minéralogiques du charbon. Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille, Caractérisation d'une Cendre Volante silico-alumineuse et sa reconstruction (1998).

FERRAND (D.). – Cendres volantes de lit fluidisé circulant, charbon : cortèges minéralogiques, traitement thermique et matériaux néoformés. Thèse Université de Montpellier II (1998).

Ouvrages – Articles

ADAMIEC (P.), BENEZET (J.C.) et BENHASAINE (A.). – « Relation entre une cendre volante silico-alumineuse et son charbon ». Revue « Poudres et grains » n° 15 (3) (Octobre 2005).

DDE Hautes-Pyrénées. – Voie express Tarbes – Lanespède – Étude de la formule de la grave traitée aux liants hydrauliques de couche de fondation. Laboratoire régional de Toulouse (30-08-1988).

TIXIER (R.), CARLES-GIBERGUES (A.) et GRANDET INSA (J.). – « Étude minéralogique du mélange cendres volantes – chaux fines ». Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées n° 158 (Novembre-Décembre 1988).

ANDRIEUX (P.) et COLOMBEL (J.-H.). – Bulletin liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées n° 83 (Mai-Juin 1976).

CASTAN (M.). – CD 75 à Pont-Évêque (38) une technique de chaussée originale – Cendres volantes hydrauliques de Gardanne – Tranche V – un activant très énergétique du laitier pré-broyé. « Retraitement de chaussées en place avec les cendres de Gardanne

CD 2 Sainte-Catherine-sous-Riverie » Cête de Lyon (Janvier 1988).

FERDY (C.). – Utilisation des cendres volantes de Gardanne en technique routière. Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées n° 126 (Juillet-Août 1983).

ALLONGE (M.) et VIVIER (M.). – Utilisation des Cendres Volantes en techniques routières. Groupe d'étude du Nord-Pas-de-Calais (1966).

VIVIER (M.). – Les remblais en Cendres Volantes dans la région Nord. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 54 (1971).

JARRIGE (A.). – Eyrolles – Les Cendres Volantes – Propriétés. Applications Industrielles (1971).

DRON (R.). – L'activité pouzzolanique. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1978).

DRON (R.) et al. – Les différents liants hydrauliques et pouzzolaniques, obtention et mode d'action. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1978).

CARLES-GIBERGUES (A.). – Propriétés hydrauliques des cendres sulfocalciques de Gardanne. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1978).

THIJS (M.). – État des connaissances relatives à l'utilisation en remblais routiers de cendres volantes de fraîche production provenant d'une ou plusieurs centrales. (CR 21/84).

CARLES-GIBERGUES (A.) et DELSOL (C.). – Les Cendres Volantes Sulfatées (désulfuration primaire) : Cendres Volantes ou liant routier ? Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 193 (1994).

DELSOL (C.) et al. – Les Cendres Volantes sulfatées (désulfuration primaire) – Utilisation en technique routière. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1997).

Asociacion de investigacion industrial electrica – *selecciones graficas* – Las Cenizas Volantes y sus aplicaciones (1970).

LECUVER and al. – *Waste management and Research*. Physico-chemical characterization and leaching of desulphuration coal fly ash (1996).

Radioactive elements in coal and fly ash : abundance, forms and environmental significance. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS. – 163-97 (October, 1997).

Charbonnages de France – Centrales thermiques : « le charbon, une énergie d'avenir ? ». de Science & Vie hors série « Énergie les défis à venir » n° 214 (mars 2001).

Actes de colloques

AFECHKAR (M.) et NAHHASS (M.). – *Valorisation des cendres volantes dans le domaine routier (Terrassements et couches de chaussées)*. Documentation routière – Actes du 7^{ème} congrès de la route – Techniques innovantes.

BRUNELLO (J.M.), SNET, MIERSMAN (F.) et SURSCHISTE. – *Maîtrise environnementale de la valorisation des cendres volantes de charbon en usage routier*. présenté au salon POLLUTEC 99 à Villepinte le 21 septembre 1999.

Service National d'information et de documentation sur l'eau. Correction des dysfonctionnements des stations d'épuration : Lestage des boues activées par des cendres de charbon. Les Nouvelles n° 12 Partenariat avec EDF – page 5 (2001).

DAVIET (B.), CAMPANAC (M.) et PERA (J.). – *Utilisation des Cendres de GARDANNE/Exemples de réalisations et résultats*. – « Historique, Réalisations, Avenir ». – « Présentation des études faites en vue de l'utilisation routière des cendres du Groupe V ». – « Perspectives de valorisation des cendres de Gardanne comme liant dans l'industrie du béton » Journée Cendres de Gardanne (15 mars 1988).

Séminaire Européen – Marseille – Coal Fly Ash : a secondary raw material (1997).

HASSET (D.J.) and al. – *Mercury release from coal combustion by-products to the environment*. International Ash Utilization Symposium (1) (1999).

SHEPS-PELLEG (S.) et COHEN (H.). – *Evaluation of the leaching potential of trace elements from coal ash to the (groundwater) aquifer*. International Ash Utilization Symposium (1) (1999).

ERBE (M.E.) and al. – *Evaluation of water quality Conditions Associated with the Use of Coal Combustion Products for Highway Embankments*. International Ash Utilization Symposium (1) (1999).

VAANANEN (V.) and al. – *Occupational and environmental hazards of coal fly ash in road paving*. 2nd Euraspalt and Eurobitume Congress Barcelona (2000).

Sites Internet

• ADEME

<http://www.ademe.fr>

• DRIRE

<http://www.drire.gouv.fr>

• EDF – L'énergie thermique à flammes – Les sites de production en France

<http://www.edf.com>

• La centrale thermique EDF au Havre

Contact presse : Déborah PRIGENT, Dossier de presse EDF Avril 2008

<http://www.assemblee-nationale.fr/rap-oecst/nucleaire/r1359-18.asp>

http://www.industrie.gouv.fr/energie/charbon/textes/se_ch_pr.htm

• LCPC

<http://www.lcpc.fr>

• SETRA Site DTRF

<http://portail.documentation.equipement.gouv.fr>

• SNET

<http://www.snet-electricite.fr>

• Surschiste

<http://www.surschiste.com>

Événements

• **International Ash Utilization Symposium** – Healths aspect of Coal Fly Ash. L'International Ash Utilization Symposium a lieu tous les 2 ans. Il est organisé par le centre de recherche appliquée à l'énergie de l'Université du Kentucky et le département à l'énergie des États Unis d'Amérique.

• 2^e Colloque « Terrassements en Europe »

Ce 2^e Colloque se tiendra à Londres les 3 et 4 Juin 2009. Il fait suite au 1^{er} Colloque organisé à Paris en Octobre 2005.

Intervenants JP MAGNAN, G RAOUL.

Normes et standards

■ Normes de référence françaises

NF P11-300	Septembre 1992	Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière.	XP P18-545	Février 2004	Granulats – Eléments de définition, conformité et codification. Remplace et annule la norme XP P 18-540. Norme remplacée par XP P18-545 édition de Mars 2008.
NF P11-301	Décembre 1994	Exécution des terrassements Terminologie.	XP P18-594	Février 2004	Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis.
NF P15 301	Juin 1994	Liants hydrauliques. Ciments courants. Compositions, spécifications et critères de conformité.	NF P94-068	Octobre 1998	Sols : Reconnaissances et essais – Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.
NF P15 108	Décembre 2000	Liants hydrauliques Liants hydrauliques routiers Composition, spécifications et critères de conformité.			
P18-011	Juin 1992	Bétons Classification des environnements agressifs.			

NF P98-111	Mars 1992	Assises de chaussées – Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux.			Partie 40 : Méthode d'essai de détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques.
NF P98-128	Novembre 1991	Assises de chaussées – Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques à hautes performances.	NF EN 13286-41 (NF P 98-846-41)	Juillet 2003	Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques.
		Définition – Composition – Classification.			Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
A05-252	Juillet 1990	Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis au contact de matériaux naturels de remblai (sols).	NF EN 13286-42 (NF P 98-846-42)	Septembre 2003	Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques.
NF M03-003	Janvier 1994	Combustibles minéraux solides. Détermination du taux de cendres.			Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydraulique.
NF U44-160	Novembre 1985	Amendements organiques et supports de culture – Détermination de la matière organique totale – Méthode par calcination.	NF EN 13286-43 (NF P 98-846-43)	Septembre 2003	Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques.
NF X11-640	Juillet 1979	Granulométrie – Analyse granulométrique des poudres fines sur tamiseuse à dépression d'air.			Partie 43 : Méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants.
		Indice de classement : X11-640.			
		Statut : Fascicule de documentation.	Normes NF EN 14 227 - 1 à 5 (NF P98-887-1 à 5)	Février 2005	respectivement intitulées : Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – partie 1 : Mélanges traités au ciment.
		Le fascicule de documentation a pour objet de décrire une méthode permettant de déterminer les refus sur tamis et la répartition granulométrique de poudres fines, sur tamiseuse à dépression d'air. La méthode est particulièrement intéressante dans le cas de poudres dont l'étendue granulométrique est comprise entre 10 µm et 315 µm. Une tamiseuse de ce type est commercialisée sous le nom d'appareil Alpine.			Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – partie 2 : mélanges traités aux laitiers.
					Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante.
					Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – partie 4 : Cendre volante pour mélanges traités aux liants hydrauliques.
FD P18-542	Février 2004	Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.			Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – partie 5 : Mélanges traités au liant hydraulique routier.
ST N° 590 B	Mars 1999	Spécification Technique pour la fourniture des granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien des voies ferrées. SNCF. CG AS 2 C 3 n° 1, annexe 9.	NF EN 450-1 (NF P18-050-1)	Octobre 2005	Cendres volantes pour béton Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité.
			NF EN 450-1 (NF P18-050-1/IN1)	Décembre 2007	Cendres volantes pour béton – Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité.
■ Normes de référence européennes					
Les normes Européennes font l'objet d'un indice de classement français AFNOR (indication entre parenthèses)					
NF EN 10036 (NF A06-301)	Juin 1989	Analyse chimique des matériaux sidérurgiques – Dosage du carbone total dans les aciers et les fontes Méthode gravimétrique après combustion dans un courant d'oxygène.	NF EN 450-1 + A1 (NF P18-050-1 + A1)	Décembre 2007	Cendres volantes pour béton – Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité.
NF EN 196-1 (NF P15-471-1)	Avril 2006	Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques.	NF EN 450-2 (NF P18-050-2)	Octobre 2005	Cendres volantes pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.
NF EN 196-2 (NF P15-471-2)	Avril 2006	Méthodes d'essais des ciments Partie 2 : analyse chimique des ciments.	NF EN 995 (NF G35-040)	Novembre 1995	Revêtements de sol textiles – Évaluation du fluage des sous-couches.
NF EN 196-6	Août 1990	Méthodes d'essais des ciments – Détermination de la finesse	■ Normalisation européenne des terrassements		
NF EN 13286-40 (NF P 98-846-40)	Juillet 2003	Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques.	Création du « <i>Technical Committee Earthworks</i> » (TC 396) par décision du Comité Européen de Normalisation (CEN) du 26-03-09.		
La décision du CEN a été prise au vu du rapport final établi par le groupe de travail européen constitué à cet effet en Décembre 2007 (Participants JP MAGNAN, G RAOUL).					
Le nouveau TC dédié aux Terrassements concrétise la reconnaissance au plan européen d'une activité importante et spécifique des TP et des savoir-faire qu'elle représente.					

Réglementation

■ Extraits de références législatives

• **Article L. 511-1 du code de l'environnement.** Sont soumis aux dispositions du présent titre les usines, ateliers, dépôts, chantiers et, d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publiques, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature et de l'environnement, soit pour la conservation des sites et des monuments « ainsi que des éléments du patrimoine archéologique ».

• **Article L. 541-1 du code de l'environnement I.** Les dispositions du présent chapitre et de l'article « L. 125-1 » ont pour objet :

1° De prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits ;

2° D'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ;

3° De valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;

4° D'assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique des opérations de production et d'élimination des déchets, sous réserve des règles de confidentialité prévues par la loi, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables.

II. Est un déchet au sens du présent chapitre tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. III. Est ultime au sens du présent chapitre un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

• **Article L. 541-2 du code de l'environnement.** Toute personne qui produit ou détient des déchets dans des conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination conformément aux dispositions du présent chapitre, dans des conditions propres à éviter lesdits effets. L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances mentionnées à l'alinéa précédent.

Circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 relative aux cendres issues de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement (BO min. Équip. n° 1109-96/93 du 10 décembre 1996).

■ Historique des lois applicables

• **Loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux (JO du 16 juillet 1975).** Texte modifié par :

- loi n° 88-1261 du 30 décembre 1988 (JO 4 janvier 1989) ;
- loi n° 90-1130 du 19 décembre 1990 (JO 22 décembre 1990) ;
- loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 (JO 14 juillet 1992) ;
- loi n° 92-1336 du 16 décembre 1992 (JO 23 décembre 1992) ;
- loi n° 93-3 du 4 janvier 1993 (JO 5 janvier 1993) ;
- loi n° 95-101 du 2 février 1995 (JO 3 février 1995) ;
- loi de finances rectificative pour 1996 n° 96-1182 du 30 décembre 1996 (JO du 31 décembre 1996) ;
- loi de finances pour 1998 n° 97-1269 du 30 décembre 1997 (JO du 31 décembre 1997) ;
- loi de finances pour 1999 n° 98-1266 du 30 décembre 1998 (JO du 31 décembre 1998) ;
- ordonnance n° 2000-914 du 18 septembre 2000 (JO du 21 septembre 2000).

• **Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (JO du 20 juillet 1976).** Texte modifié par :

- loi n° 76-1285 du 31 décembre 1976 (JO du 1^{er} janvier 1977) ;
- loi n° 85-661 du 3 juillet 1985 (JO du 4 juillet 1985) ;
- loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 (JO du 4 janvier 1986) ;
- loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 (JO du 23 juillet 1987) ;
- loi de finances pour 1990 n° 89-935 du 29 décembre 1989 (JO du 30 décembre 1989) ;
- loi n° 90-85 du 23 janvier 1990 (JO du 25 janvier 1990) ;
- loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (JO du 1^{er} janvier 1992) ;
- loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 (JO du 14 juillet 1992) ;
- loi n° 92-654 du 13 juillet 1992 (JO du 16 juillet 1992) ;
- loi n° 92-1336 du 16 décembre 1992 (JO du 23 décembre 1992) ;
- loi de finances pour 1993 n° 92-1376 du 30 décembre 1992 (JO du 31 décembre 1992) ;
- loi n° 93-3 du 4 janvier 1993 (JO du 5 janvier 1993) ;
- loi n° 95-95 du 1^{er} février 1995 (JO du 2 février 1995) ;
- loi n° 95-101 du 2 février 1995 (JO du 3 février 1995) ;
- loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 (JO du 1^{er} janvier 1997) ;
- loi n° 99-574 du 9 juillet 1999 (JO du 10 juillet 1999) ;
- loi n° 99-1140 du 29 décembre 1999 (JO du 30 décembre 1999) ;
- abrogé et codifié par l'ordonnance n° 2000-914 du 18 septembre 2000 (JO du 21 septembre 2000).

• **Circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996** relative aux cendres issues de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement (BO min. Équip. n° 1109-96/93 du 10 décembre 1996).

• **Ordonnance n° 2000-914 du 18 septembre 2000** relative à la partie Législative du code de l'environnement.

Données statistiques et économiques

Commission européenne – Direction générale Énergie et transports.

Énergies conventionnelles – Charbon et pétrole – Importations communautaires de houille originaire de pays tiers et destinée aux centrales électriques au cours des années 2000-2001.

Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, DGEMP, 24/06/2008.

Charbon : les principaux résultats provisoires en 2007. DGEMP/Observatoire de l'énergie. Juin 2008.

ENDESA/SNET – La dynamique des marchés charbonniers – CGEMP Paris Dauphine 31-05-2007.

■ Présentation des FICHES PRODUITS SURSCHISTE

La nature des cendres dépend de différents paramètres de production : composition du charbon, type de combustion, système de filtrage et de dépollution des fumées, point de prélèvement. De ces différents paramètres vont découler les caractéristiques de chacun des produits.

Surschiste propose donc différents produits à ses clients dont certains ont un nom de marque déposé.

• Cendres « classiques »

Silicoline® : cendre volante silico alumineuse sèche, séchée ou humide (figure 1).

Silicolit : cendre de foyer silico alumineuse (Fiche non présentée).

• **Cendres « fondues » (De LFC)**

Sodeline® : cendre volante du lit fluidisé circulant de la centrale Emile Huchet (figure 2).

Sodelit® : Cendre de foyer de lit fluidisé circulant de la centrale Emile Huchet (Fiche non présentée).

• **Produits composés :**

- Gardanex (figure 3) ;
- FTC Desulfogypse (figure 4) ;
- Injex (figure 5) ;
- Complex (figure 6).

Tableau 1 – Fiche produit Silicoline® Humides
(Crédit Surschiste)

Critères	Caractéristiques normalisées
Perte au feu sur sec à 1 000 °C	< 10 %
Finesse (passants au tamisats à 0 045 mm, en %)	≥ 40 %
Finesse (passants au tamisats à 0 090 mm, en %)	≥ 70 %
Teneur en Sulfates exprimée en SO ₃ (%)	< 4 %
Teneur en CaO Libre (%)	< 1 %
Stabilité si CaO LIBRE > 1 %	< 10 mm
Principaux constituants	SiO ₂ AL ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
Pouvoir Pouzzolanique à 60 jours (Mpa)	> 3,3 Mpa
Pouvoir Pouzzolanique à 360 jours	> 10 Mpa

■ **Présentation des FICHES PRODUITS SILICOLINE**

• **Cendres volantes silico-alumineuses classiques Silicoline® Sèches** – Provenance (figure 1) :

- Blenod ;
- Bouchain ;
- Saint-Avoid ;
- Hornaing ;
- La Maxe ;
- Lucy (Montceau-Les-Mines) ;
- Gardanne.

• **Fiche produit Silicoline® Humides** – Provenance (tableau 1) :

- Blenod ;
- Saint-Avoid ;
- Hornaing ;
- La Maxe.

■ **Caractéristiques environnementales**

• **Extraits d'un document LCPC sur les cendres volantes**

On ne dispose pas encore d'un panorama complet des caractéristiques environnementales des cendres volantes de charbon. Les quelques résultats disponibles sont assez disparates sur ce point.

Il est probable que les caractéristiques d'origine (provenance du charbon) et minéralogiques influencent les relargages à long terme, ainsi que le procédé de fabrication.

Des travaux (Lecuyer et al. 1996) ont été effectués pour comparer les lixiviats issus des trois process différents :

- cendre S-A : une cendre volante silico-alumineuse classique produite à la centrale de Loire-sur-Rhône (charbon d'origine américaine à une masse de cendres volantes égale à 13 % de celle du charbon et 0,97 % de soufre) ;
- cendre S-C : une cendre volante silico-calcique de désulfuration primaire produite à la centrale de Loire-sur-Rhône (même origine du charbon) dont l'agent de désulfuration est de la chaux hydratée ;
- cendre S-A-C LFC : une cendre volante silico-alumineuse ou silico-calcique de LFC de la Centrale Emile Huchet à Carling (type de combustible : résidu de charbon ou schlamms, et charbon humide).

Des essais de lixiviation ont alors été menés sur les trois cendres (suivant la norme X 31-210), présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 – Analyse des lixiviats suivant X31-210 après 24 heures (Lecuyer et al. 1996)* : obtenus après 16 heures seulement

	Cendre S-A	Cendre S-C	Cendre S-A-C LFC
pH	11,5	12,6	11,4
Conductivité (mS · cm ⁻¹)	0,9	8,8	3,4
Sulfates (mg · l ⁻¹)	197	1 434-1 824	658-1 440 *
Chlorures (mg · l ⁻¹)	4,5	44-55	34-86 *
Fluorures (mg · l ⁻¹)	1	1,9-2,1	0,4-2 *
Ca²⁺ (mg · l ⁻¹)	164	1 560-1 610	425-820 *
As (µg · l ⁻¹)	60-80	< 4,5	12-27
Cd (µg · l ⁻¹)	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cr (µg · l ⁻¹)	190	226-267	23-410
Cr VI (µg · l ⁻¹)	81-151	23-236	18-276
Cu (µg · l ⁻¹)	< 1	< 1	< 1
Ni (µg · l ⁻¹)	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Pb (µg · l ⁻¹)	< 1	1,5-2,4	< 1
Se (µg · l ⁻¹)	421-511	21-34	20-136
Zn (µg · l ⁻¹)	< 5	< 5	< 5

Tableau 3 – Résultats de diffusion d'un enrobé contenant des cendres volantes (Väänänen et al. 2000)

à 64 jours en mg/m ²	Résultats de diffusion d'un enrobé contenant des cendres volantes	Valeurs seuils des sites de stockage de classe 1A dans des conditions conti- nuellement humides et sans isolation
As	< 3,6	41
Cd	< 0,7	1,1
Cr	< 1,7	140
Pb	< 3,3	120
Ni	< 3,3	50
V	< 2,0	230
Mo	< 1,9	14
Hg	< 0,6	0,4

On remarque que les cendres volantes issues des procédés destinés à réduire les émissions d'oxydes de soufre ont des lixivats très riches en sulfates solubles. Le pH du lixiviat est important et impose des conditions de solubilité différentes pour chaque élément. Dans ces conditions, ce sont surtout le chrome, l'arsenic et le sélénium qui sont solubilisés. La différence observée au niveau de l'arsenic entre les cendres silico-alumineuses classiques et les cendres silico-alumineuses de désulfuration primaire a pu être expliquée par la présence de chaux, beaucoup plus importante dans le deuxième cas. L'essai de lixiviation réalisé avec un mélange de cendres silico-alumineuses et de chaux vive a produit un lixiviat dont les teneurs en arsenic étaient aux limites de la détection, et les teneurs en sélénium très diminuées.

Des travaux finlandais (V. Väänänen et al. 2000) relatent des essais environnementaux de relargage d'enrobés contenant des cendres volantes utilisées comme filler (tableau 3). Ces tests de diffusion ont été effectués suivant le test de diffusion néerlandais NEN 7345. Ces tests laissent apparaître des valeurs de diffusion inférieures aux seuils des sites de stockage finlandais (sans isolation et en conditions humides continues).

Une étude complète de l'impact environnemental des cendres volantes et de mélanges contenant des cendres volantes est également en cours dans le cadre de la démarche RPT. Cette étude, réalisée pour le compte de SNET et EDF, est pilotée par INSAVALOR-POLDEN. À ce jour (mars 2003), les résultats et conclusions n'ont pas été rendus publics.

Un remblai en cendres volantes réalisé dans l'Etat du Maryland a été instrumenté au moyen de lysimètres (M.W. Erbe *et al.* 1999). Cette étude a permis de mettre en évidence la présence de calcium, magnésium, chlorures, sulfates mais également arsenic et manganèse en proportions importantes dans l'eau présente dans le remblai en cendres volantes. Elle a également permis de montrer que des réactions de précipitation et d'adsorption rendent ces concentrations plus faibles dans l'eau présente dans les sols sous-jacents (pour le calcium, le sodium, le chlore, les sulfates et l'arsenic). Plus globalement, l'étude conclue à un impact infime sur l'eau de la nappe sous-jacente.

• Risques sanitaires

Les cendres volantes de charbon sont d'une grande finesse et contiennent de la silice cristalline, que l'on peut trouver sous la forme de quartz, mais également de cristoballite ou tridymite. Ces particules de silice cristalline peuvent être à l'origine de pathologies respiratoires. De ce fait, le décret 97-331 du 10 avril 1997 (Décret relatif à la protection de certains travailleurs exposés à l'inhalation de poussières siliceuses sur leurs lieux de travail) impose des seuils de poussières alvéolaires cristallines inhalée sur 8 heures, dans tous les établissements relevant de l'article L. 231-1 du Code du travail (c'est-à-dire les établissements industriels, commerciaux et agricoles et leurs dépendances, de quelque nature que ce soit, publics ou privés, laïques ou religieux) :

- 0,1 mg/m⁻³ pour le quartz ;
- 0,05 mg/m⁻³ pour la cristoballite et la trydimite.

Dans le cas de la présence simultanée de poussières alvéolaires contenant de la silice cristalline et d'autres poussières alvéolaires non silicogènes, la valeur limite d'exposition Vle correspondant au mélange est fixée par la formule suivante :

$$Vle = Cns/Vns + Cq/0,1 + Cc/0,05 + Ct/0,05 \leq 1$$

où :

- Cns est la concentration en poussières alvéolaires non silicogènes en mg/m³, ce qui correspond à la différence entre la concentration totale des poussières alvéolaires et la somme des concentrations correspondant aux silices cristallines ;
- Vns la valeur limite moyenne de concentration en poussières alvéolaires non silicogènes, en mg/m³, admise sur huit heures et telle que définie par l'article R. 232-5-5 du code du travail ;
- Cq la concentration en quartz en mg/m³ ;
- Cc la concentration en cristoballite en mg/m³ ;
- Ct la concentration en tridymite en mg/m³.

Néanmoins, selon R. Meij et H. te Winkel, les études épidémiologiques montrent que le quartz présent dans les cendres volantes (issues de combustion de charbon pulvérisé), n'a pas le même effet sur l'homme que le quartz pur. Cependant, une exposition à des niveaux élevés de concentration de cendres dans l'air peut conduire à des bronchites chroniques (R. Meij et H. te Winkel), bronchites dont le quartz ne semble pas être la raison.

Les autres risques sanitaires (ou environnementaux) éventuels sont liées à des éléments chimiques présents sous forme de trace dans les cendres. En effet, les cendres contiennent du chrome, présent sous forme trivalent et hexavalent, la forme hexavalente étant la plus dangereuse. Néanmoins, les concentrations semblent faibles. R. Meij et H. te Winkel relatent des teneurs moyennes de 13 mg/kg, dont seulement un faible pourcentage est susceptible d'être lixivié. Ils relatent également que ce chrome VI une fois lixivié, en réagissant avec des composés ferreux, conduit à des composés insolubles contenant du chrome III.

Le problème de la radioactivité peut également être posé. En effet, le charbon est un matériau naturel, et comme tout matériau naturel est susceptible de contenir des éléments radioactifs. Dans la mesure où la cendre est un résidu du charbon, elle contient la majeure partie des éléments radioactifs du charbon d'origine. L'US Geological Survey Fact Sheet FS-163-97 relate des teneurs en radio-nucléides inférieures à celles de sols naturels trouvés communément à la surface.

La combustion de charbon peut également conduire à la production de dioxines. R. Meij et H. te Winkel donnent des valeurs de 1 picogramme I - TEQ (équivalent toxique international) par gramme (cendres issues de la combustion de charbon pulvérisé de production néerlandaise). Selon les mêmes auteurs, que ce soit pour des gens travaillant avec des cendres ou des riverains, la consommation d'aliments (et notamment les graisses animales) sera encore la source la plus importante de dioxines.

Pour ce qui est des composés hydrocarbonnés aromatiques polycycliques (HAP), il semble que les cendres n'en contiennent pas, ou que les valeurs soient inférieures au seuil de détection de 0,07 mg/kg (R. Meij et H. te Winkel).

En tout état de cause, ces produits peuvent être irritants en cas d'inhalation et de contact avec les yeux. Pour ceux qui ont à manipuler ces matériaux, il faut donc éviter :

- le contact avec les yeux (il faut utiliser des lunettes de sécurité) ;
- l'inhalation (il faut utiliser des masques contre la poussière en particulier dans les lieux peu ventilés) ;
- le contact avec la peau (il faut utiliser des gants et des vêtements appropriés).

■ Centrales thermiques

• Contexte énergétique

Production du charbon dans le monde

Souvent considéré comme un combustible du passé, le charbon est encore aujourd'hui à l'origine de près de 40 % de la production de l'électricité mondiale.

Les réserves de charbon constituent les réserves prouvées de combustibles fossiles de loin les plus importantes (1) et elles sont bien réparties dans le monde.

L'utilisation principale du charbon est devenue aujourd'hui la production d'électricité.

(1) 64 % charbon – 18 % pétrole – 18 % gaz.

Politique énergétique de la France

La production d'électricité est fournie en forte proportion par l'énergie nucléaire. À titre de référence récente, la production d'EDF se répartit comme suit en 2006 :

- nucléaire 88 % ;
- hydraulique 8 % ;
- thermique à flammes 4 %.

La proportion relativement faible de 4 % fournie par l'énergie thermique à flamme est toutefois très utile. En effet, pour les producteurs d'électricité, les centrales thermiques à flamme constituent l'un des moyens les plus efficaces pour faire face aux variations de consommation d'électricité, et notamment aux augmentations fortes et soudaines de la demande.

Flexibles et réactives, elles sont capables de produire de l'électricité très rapidement. Soulignons qu'EDF souhaite maintenir, voire relancer la production thermique en France et investit dans de nouvelles installations aux technologies innovantes.

En France, l'extraction du charbon est arrêtée depuis Avril 2004, date de la fermeture de la dernière mine lorraine de la HOUVE (pour la lignite fin des années 90).

Les centrales thermiques à flammes fonctionnant au charbon sont aujourd'hui alimentées en utilisant des charbons importés depuis principalement l'Australie, l'Afrique du Sud, la Colombie et les États-Unis dans une moindre mesure.

Une politique de modernisation de ces centrales est développée afin d'optimiser leurs performances techniques et environnementales.

• Producteurs d'électricité en France

Deux grands groupes gèrent les parcs de centrales thermiques à flammes :

- électricité de France (EDF) ;
- société Nationale d'Electricité et de Thermique (SNET), filiale électrique de Charbonnages de France (CDF).

La Société Nationale d'Electricité et de Thermique est un producteur et fournisseur reconnu et installé depuis sa création en 1995 sur le territoire national. SNET est issue de l'expérience des professionnels des centrales thermiques.

La gestion de la production de SNET a évolué. La programmation axée en grande partie sur les demandes d'EDF (Les ventes à EDF ont représenté les trois-quarts de la production 2002), est aujourd'hui autonome pour répondre notamment aux besoins des marchés de gros.

• Historique de la Société Charbonnage de France

CDF Le démembrement du groupe CDF a donné naissance à six filiales dont deux nous intéressent plus particulièrement dans le présent article : SNET et SURSCHISTE.

SNET (Société Nationale d'Electricité et de Thermique) est le pôle électricité de Charbonnages de France (CDF) créé en 1995. Filiale de CDF (81,25 %) et de EDF (18,75 %). La loi électrique du 10 février 2000 lui permet de devenir un producteur d'électricité pérenne.

En 2001 le groupe Espagnol **Endesa** entre dans le capital de la SNET (30 %) (1).

(1) Le groupe espagnol Endesa est devenu propriétaire à 65 % de la Snet.

Devenu un acteur majeur du marché de l'électricité, le SNET est depuis 2007, le premier fournisseur indépendant d'énergie électrique en France.

Snet dispose depuis 1999 du centre de recherche, le **Cerchar**, dont les objectifs sont axés sur l'efficacité énergétique et la préservation de l'environnement.

Le Cerchar, créé au début des années 80, est une plateforme d'essais dédiée à la combustion sur pilotes. Il a également été pendant plus de dix ans un des partenaires Européens majeurs des contrats de recherche de la **Ceca**.

Le Cerchar propose des missions en conseil et expertise, en appui technique et normalisation ou encore en formation, permettant de procéder à des analyses et des évaluations de procédés dans différents domaines :

- optimisation de la combustion ;
- traitement et valorisation des résidus ;
- réduction des émissions de polluants.

Surschiste. Autre filiale de CDF qui valorise les cendres de combustion des centrales thermiques de la Snet dont elle dépend.

SILICOLINE®

■ Cendre volante silico-alumineuse issue de la combustion de houille pulvérisée en centrale à flamme à la température d'environ 1400°C

■ La silicoline® se présente sous la forme de poudre grise, douce au toucher, ensemble de sphères pleines ou creuses, de nature vitreuse

■ La silicoline est disponible sèche ou humide, en vrac ou conditionnée en big bag, et se transporte par camion par bateau ou par fer

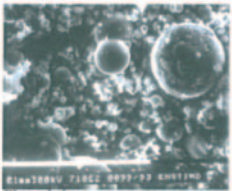


Photo de la structure microscopique d'une silicoline®

PROPRIETES POZZOLANQUES

BETON
Selon la norme EN 196.1
Détermination résistances mécaniques
Indice activité à 28 jours en % = 75* à > 90
Indice activité à 90 jours en % = 85* à >100
*minimum exigé par EN 450-1 +A1

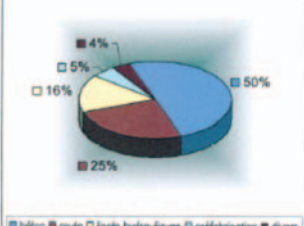
ROUTE
Selon norme NF P 98 111
Essais de réactivité des cendres silico-alumineuses à la chaux
Indice pouzzolanique : à 60 jours MPa > 3.5 et à 360 jours MPa >10

PROPRIETES PHYSIQUES

Densité	En Vrac	Sèche non tassée	0,55 à 0,85
		Sèche tassée	0,8 à 1
		Humide	0,95 à 1,2
Masses volumiques	t/m³	EN 196-6	2,1 à 2,4
Finesse Blaine	cm²/g		1900 à 2500

ANALYSE 1999		Moyenne	
PROPRIETES			
Perte au feu à 800°C	%	2 à 7	
Masses volumiques	t/m³	2,1 à 2,3	
GRAVIMETRIE			
passants à 45 µm	%	65 à 75	
passants à 60 µm	%	75 à 90	
passants à 200 µm	%	95 à 99	
passants à 315 µm	%	100	
CHIMIE			
SiO2	%	50	
Fe2O3	%	8,5	
Al2O3	%	29	
MgO	%	3	
MnO2	%	0,5	
CaO total	%	3	
CaO libre	%	0,15 à 1	
Na2O	%	0,7	
K2O	%	4,5	
SO3	%	0,6	
TiO2	%	1,6	
Chlore	%	0,04	
P2O5	%	0,25	
Total Alcalins disponibles	%	0,05 à 0,15	

LES DIFFERENTES VALORISATIONS



■ béton ■ route ■ liants hydrauliques ■ préfabrication ■ divers

REGLEMENTATION

CIMENT
Spécifications dans la norme NF P 15 301 et NF EN 197-1

ROUTE
NF P 11 300 Classification des sols
NF EN 14227-XX Mélanges traités aux liants hydrauliques
NFP 15108 Liants hydrauliques routiers

BETON
EN 450-1+A1 Cendres volantes pour béton, spécifications et critères de conformité
EN 450-2 Cendres volantes pour béton, Evaluation de la conformité
EN 206-1 Béton – Spécification – Performance

CONTROLE QUALITE
La Silicoline fait l'objet d'un Manuel d'Assurance Qualité

REFERENCES CHANTIERS

- Composant des ciments.
- Composant des bétons pour : préfabrication, bétons autoplaçants, bétons de chaussée
- Corps de remblai : rocade de Pont à Mousson (54), A31 échangeur de Custines (54)
- Couche de forme traitée : liaison A31/RN4, aéroport de Louvigny (57), RN 61 Sarreguemines (57), usine Smart à Hambach (57)
- Couches de fondation ou de base sous trafics : RD 955 déviation Liocourt (57), RD 999 Ars Laqueux (57), RD 400 Saint Nicolas de port (54), RD 910 Luppy Bechy (57)

DISPONIBILITE
Dans toutes les agences de Surschiste

UTILISATIONS

- Béton
- Préfabrication
- Route
- Liants hydrauliques
- Coulis
- Divers

Figure 1 – Fiche produit Silicoline 2009 (Crédit Surschiste)



Figure 2 – Fiche produit Sodeline 2008 (Crédit Surschiste)

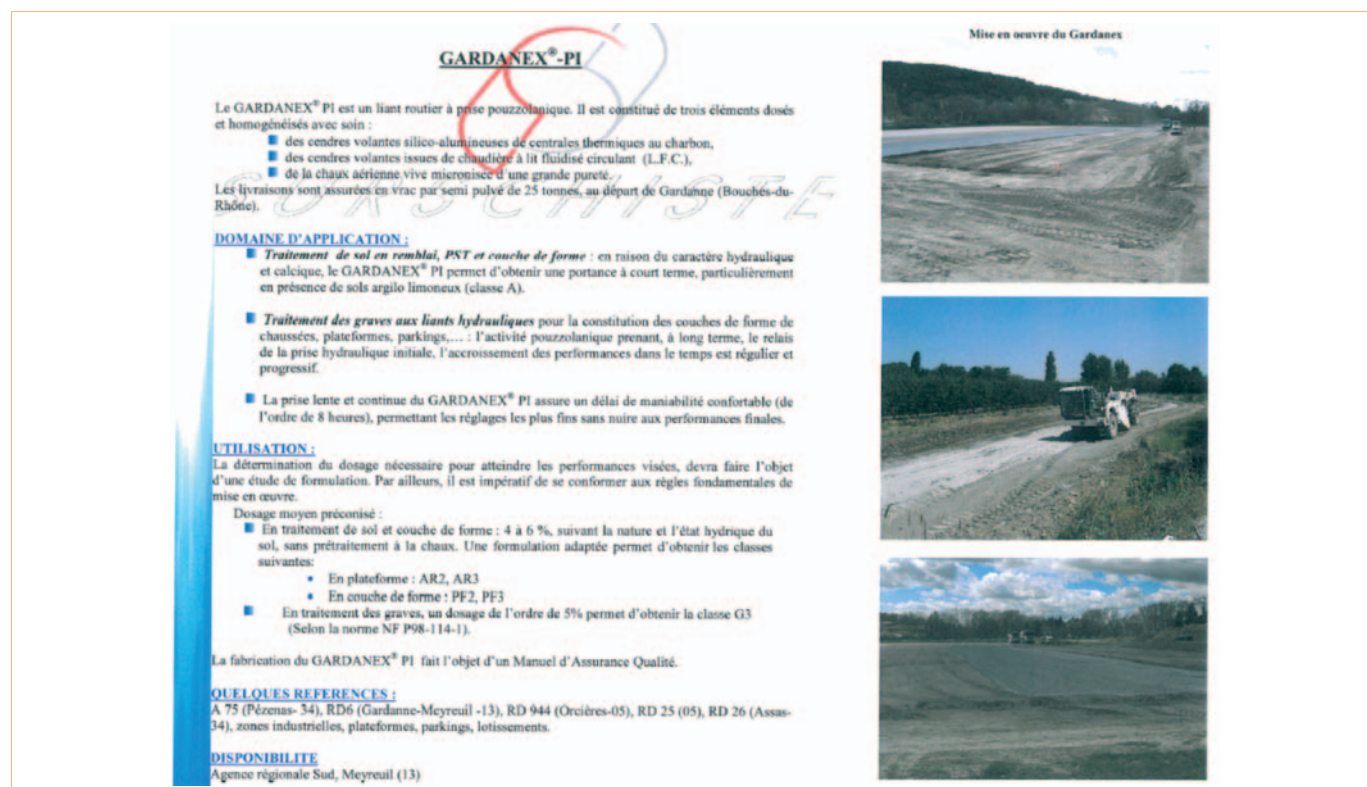


Figure 3 – Fiche produit Gardanex 2009 (Crédit Surschiste)

FTC DESULFOGYPSE		
Analyses	seuils	Méthodes
Humidité H ₂ O	< 10 %	Séchage 24h, 50°C Gravimétrie
Pureté Gypse - CaSO ₄ , 2H ₂ O	> 95 %	ATG Gravimétrie
Sulfite de calcium CaSO ₃ · ½H ₂ O	< 0,50 %	Dosage chimique Sodium nitroprusside
Chlorure Cl	< 0,01 %	EN196-2 Gravimétrie
Inertes		Gravimétrie
Carbonate CaCO ₃		Dosage chimique TGA 701
pH	6 - 9, neutre	ISO 10390 Potentiométrie
Granulométrie	10 µm - d ₅₀ - 80 µm	EN933-2 laser Méthode alpine Autres méthodes
Densité apparente	> 1000 g/l	



Figure 4 – Fiche produit Desulfogypse (Crédit Surschiste)

INJEX® 70

PRESENTATION

L'INJEX® est un produit pulvérulent fabriqué à partir de cendres silico-alumineuses pour l'élaboration de coulis d'injection.

COMPOSITION

Basé sur un mélange de silicoline® et de ciment, il est élaboré dans l'unité de production des produits composés (UPPC) situé à CARLING (57).

EMPLOI

Comblement porteur des cavités souterraines.
Restauration des tunnels SNCF

L'Injex® fait l'objet d'un manuel d'assurance qualité

Mise en œuvre d'un coulis

CARACTERISTIQUES

Granulométrie 0-200 µm
Densité foisonnée ≈ 1t/m³

Ressuage et Fluidité

E/L	Fluidité (□ 4,75)	Ressuage (2h)	Ressuage (24h)
0,40	150 s	3%	5%
0,45	75 s	3%	6%
0,50	56 s	4%	7%
0,62	40 s	8%	18%

PERFORMANCES MECANQUES

Résistance à la compression en N/mm²

E/L	Rc 3j	Rc 7j	Rc 28j
0,40	4,1	11,5	22,5
0,45	3	8,9	15,1
0,50	2,5	7,4	12,6
0,62	1,1	4,1	8,7

Résistance à la flexion en N/mm²

E/L	Rc 3j	Rc 7j	Rc 28j
0,40	1,7	2,6	3,7
0,45	1,5	2,3	3
0,50	1,2	2	2,6
0,62	0,5	1,6	2,9

REFERENCES CHANTIERS

- Comblement porteur des cavités souterraines.
- Tunnel de Lotschberg (CH)
- Comblement de l'espace annulaire de tunnels SNCF
- (Nice Saint Roch (06), Bolozon (01), métro Parisien, métros de Rennes, Lyon et Lille.
- Injection autour d'un collecteur d'assainissement à Besançon (25).

Figure 5 – Fiche produit Injex 2009 (Crédit Surschiste)

COMPLEX®

PRESENTATION

Le COMPLEX® est un produit pulvérulent fabriqué sur la base d'un mélange de cendres silico-calciques et de ciment pour l'élaboration de coulis d'injection à faible résistance.

COMPOSITION

Basé sur un mélange de sodeline® et de ciment, il est élaboré dans l'unité de production des produits composés (UPPC) situé à CARLING (57).

EMPLOI

- Comblement des cavités souterraines.
- Comblement des puits des mines HBL.
- Comblement des carrières de gypse
- Consolidation souterraine par injection

PERFORMANCES MECANQUES

Résistance à la compression en N/mm ²					
	E/L	Fluidité (□ 4,75)	Re 7j	Re 14j	Re 28j
A	1,3	49 s	1,6	2,1	2,7
B	1,4	45 s	1,1	1,4	1,4
C	1,3	43 s	1,2	1,5	2,4
D	1,4	50 s	1,4	1,3	1,3

L=matière sèche


CARACTERISTIQUES

Une large gamme de produits peut être développée, selon les caractéristiques rhéologiques que l'on souhaite privilégier :

- Fluidité
- Re 28 j

REFERENCES CHANTIERS

- Comblement de cavités souterraines : mines de fer Thill (54), anciennes exploitation de gypse en Région Parisienne.
- Coulis bouchons pour combler les puits de mines des houillères de Lorraine et d'Allemagne



Mise en œuvre d'un coulis

Figure 6 – Fiche produit Complex 2009 (Crédit Surschiste)

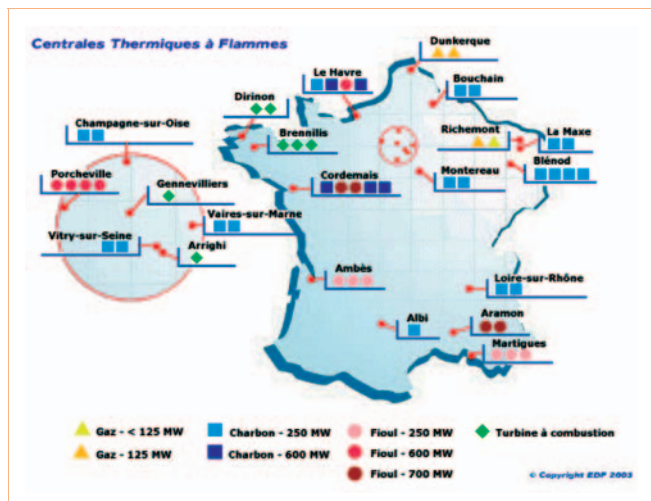


Figure 7 – Situation en 2003 du parc EDF des centrales thermiques à flammes (tous combustibles) (Crédit EDF)

• Centrales thermiques à flammes

Évolution du parc de centrales thermiques en France

Un certain nombre de centrales ou de tranches de production sont arrêtées, en phase de démantèlement en cours ou programmé.

Des centrales sont toujours en activité comme l'indiquent les cartes ci-dessous.

Nous distinguons ci-après les parcs de centrales d'EDF et de SNET dans la configuration actuelle. La répartition des tranches de production, entre les deux producteurs d'électricité, a et peut encore évoluer en fonction des projets industriels et de leur financement.

Certaines tranches de production des centrales sont gérées par des filiales communes aux deux producteurs.

Parc EDF

Les sites des centrales thermiques à flammes fonctionnant au charbon, au fioul ou par turbines de compression sont répertoriés dans les cartes EDF des figures 7 et 8 ci-après.

On notera l'évolution de l'activité des tranches de production entre 2003 et 2008 (figures 7 et 8).

Les centrales thermiques qui nous intéressent ici, utilisant comme combustible le charbon, encore en activité pour EDF en 2008, sont : Cordemais (figure 9), Le Havre (figure 10), Blénod, La Maxe, Vitry et Bouchain.

EDF met en œuvre un programme de rénovation de ses centrales au charbon.

EDF souhaite réduire les émissions de ses centrales thermiques de 30 à 40 % et pour cela développer plusieurs techniques :

- des combustibles de meilleure qualité, des charbons moins cendreux ;
- la désulfuration des fumées qui permet de réduire de 90 % les émissions de dioxyde de soufre ;
- des installations de dénitrification, qui permettent de supprimer les émissions d'oxyde d'azote.

Trois unités à Cordemais et au Havre sont en cours d'équipement.

À Vitry, sont utilisés des brûleurs « bas Nox », qui réduisent les émissions d'oxyde d'azote, ainsi que des mélanges de charbon de diverses origines pour obtenir un produit contenant peu de soufre et produisant peu de cendres.

Centrale thermique du Havre

À titre d'exemple, la **Centrale Thermique du Havre** (figure 10) est l'une des plus importantes du parc d'EDF.

Située au cœur même de l'agglomération havraise, la centrale thermique du Havre a une puissance installée de 1 450 Mégawatt. Elle utilise le charbon comme combustible.

Les trois unités de production disposent des technologies permettant de mieux préserver l'environnement : procédés de dépoussiérage, de dénitrification et désulfuration des fumées.

La centrale dispose également d'une unité de séchage des cendres.

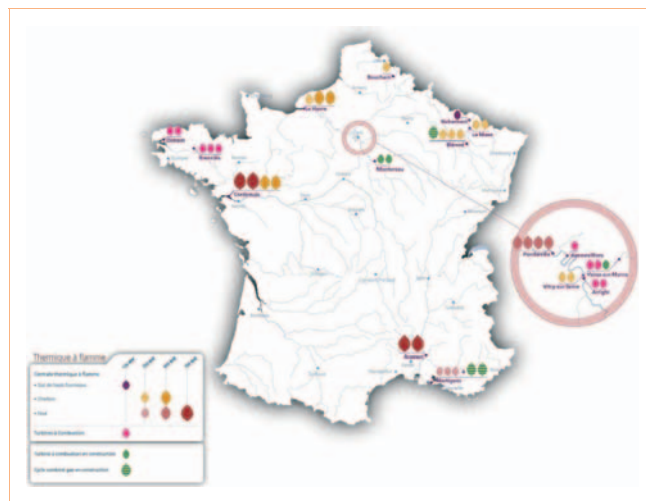


Figure 8 – Situation en 2008 du parc EDF des centrales thermiques à flammes (Crédit EDF)



Figure 9 – Centrale de Cordemais (Crédit EDF)



Figure 10 – Centrale thermique du Havre (Crédit Port Autonome du Havre)

Les co-produits issus de la combustion et des opérations de traitement des fumées, les cendres et le gypse, sont valorisés par des entreprises de la région, notamment sous forme de ciments, de remblais routiers et de plâtre.

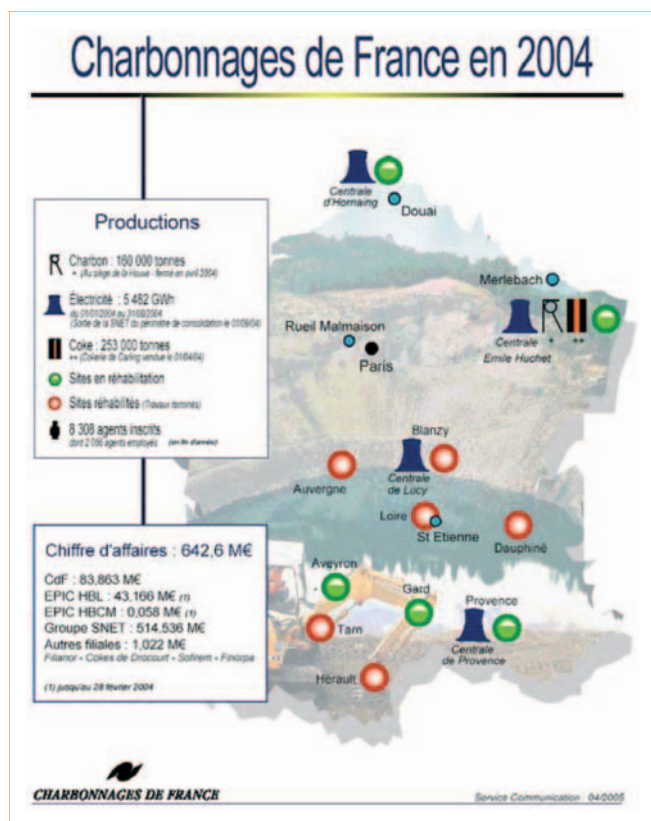


Figure 11 – Situation du parc CDF en 2004 (Crédit CDF)

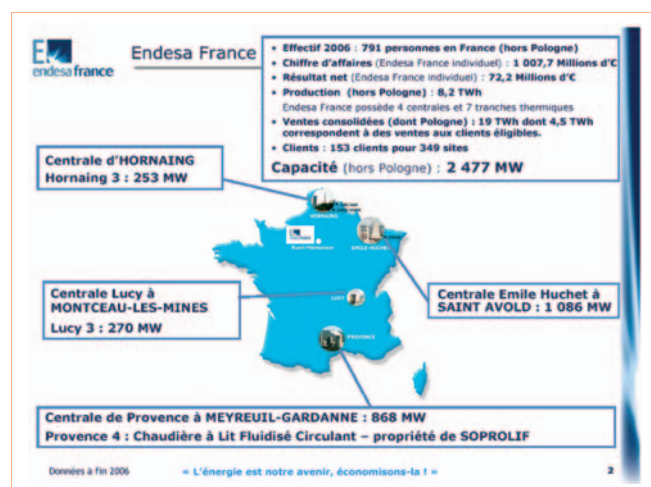


Figure 12 – Situation du parc Endesa/SNET en 2006 (Crédit Endesa France)

Parc CDF/Snet/Endesa

La configuration du parc de centrales thermiques à flammes utilisant le charbon comme combustible est représentée sur les cartes des figures 11 et 12, pour CDF en 2004 (figure 11) devenu Endesa/Snet en 2006 (figure 12).

L'outil de production de Snet est composé de 4 sites industriels répartis sur d'anciens bassins houillers français :

- centrale d'Hornaing (Nord) (figure 13) ;
- centrale Émile Huchet/Carling à Saint-Avold (Moselle) (figure 14) ;



Figure 13 – Centrale de Hornaing (Crédit SNET)



Figure 14 – Centrale de Carling Émile Huchet (Crédit SNET)

- centrale de Lucy à Montceau-les-Mines (Saône-et-Loire) ;
- centrale de Provence à Gardanne (Bouches-du-Rhône) (figure 15).

Snet a développé des technologies innovantes notamment sur deux de ses sites de production. Les centrales de Carling et de Gardanne sont des centrales à chaudière LFC, technique qui permet d'utiliser des charbons de mauvaise qualité. Ces deux centrales comportent des Unités de Production de Produits Composés (UPPC), mises en service, respectivement en 2000 et 2001, qui fournissent des produits composés.

La centrale de Gardanne est actuellement la plus puissante du monde dans le domaine des centrales LFC.

À noter que les centrales d'Hornaing et de Carling sont équipées de sécheurs permettant une production à la demande.

• Centrale thermique à lit fluidisé circulant de Gardanne

Extrait du rapport n°1359 de l'Assemblée nationale

« ... La centrale à lit fluidisé de Gardanne est actuellement la plus puissante au monde.

La technologie du lit fluidisé circulant présente l'intérêt particulier de pouvoir utiliser une large gamme de combustibles. La technique du LFC a prouvé sa capacité à consommer des combustibles difficiles, comme les « schlamms » de Lorraine, ou le charbon fortement soufré de Gardanne.

Elle peut s'appliquer également à la combustion des bris pétroliers, des boues de traitement des eaux usées, de la biomasse et même des déchets combustibles (figure 16).

Grâce à l'injection directe de calcaire dans le foyer, la désulfuration est réalisée à 90 %, pour un ratio calcium-soufre de 1,5 à 2 et peut même atteindre 95 %.

La formation d'oxydes d'azote est peu importante, du fait que la température du foyer est limitée à 850 °C. Les émissions de NOx peuvent être encore diminuées par l'injection complémentaire d'ammoniac.



Figure 15 – Centrale de Gardanne (Crédit SNET)

L'expérience acquise par la Snet et le groupe Charbonnages de France sur la technologie LFC est considérable.

Une première centrale de 125 MWe a été mise en service à Carling en 1990.

La seconde centrale, celle de Gardanne d'une puissance de 250 MWe, est la plus puissante du monde. Elle démontre une souplesse remarquable, sa puissance pouvant varier entre 65 et 250 MWe. La désulfuration atteint 99,7 %. La teneur des fumées en oxydes d'azote atteint 240 mg/Nm3, les imbrûlés représentent 0,40 % et le rendement de la chaudière atteint 95,7 %.

Les voies de progrès sont les suivantes : d'une part l'augmentation de puissance, avec un passage au palier 600 MWe, d'une part l'amélioration des rendements avec une évolution vers un cycle vapeur supercritique ; d'autre part la diminution des coûts avec une diminution des surfaces en matériaux réfractaires ; enfin à plus long terme, l'intégration d'un cycle combiné gaz...

Aspect environnemental

L'aspect environnemental est pris en considération par les producteurs d'électricité. Le traitement des émissions polluantes générées par l'utilisation du charbon est de mieux en mieux assuré dans les centrales de dernière génération. Les techniques nouvelles dites de « charbon propre » permettent à la fois de diminuer les émissions atmosphériques et d'augmenter l'efficacité thermique (ce qui diminue la consommation de charbon).

L'enjeu technologique majeur est à terme la maîtrise de solutions viables pour la capture et le stockage de CO₂ (voir encadré 1).

Techniques nouvelles « charbon propre »

Les nouvelles technologies sont orientées vers la préservation de l'environnement.

L'option « charbon propre » est en cours de développement et se traduit par des investissements sur les centrales thermiques en activité, voire déboucher sur l'implantation de nouvelles tranches (1).

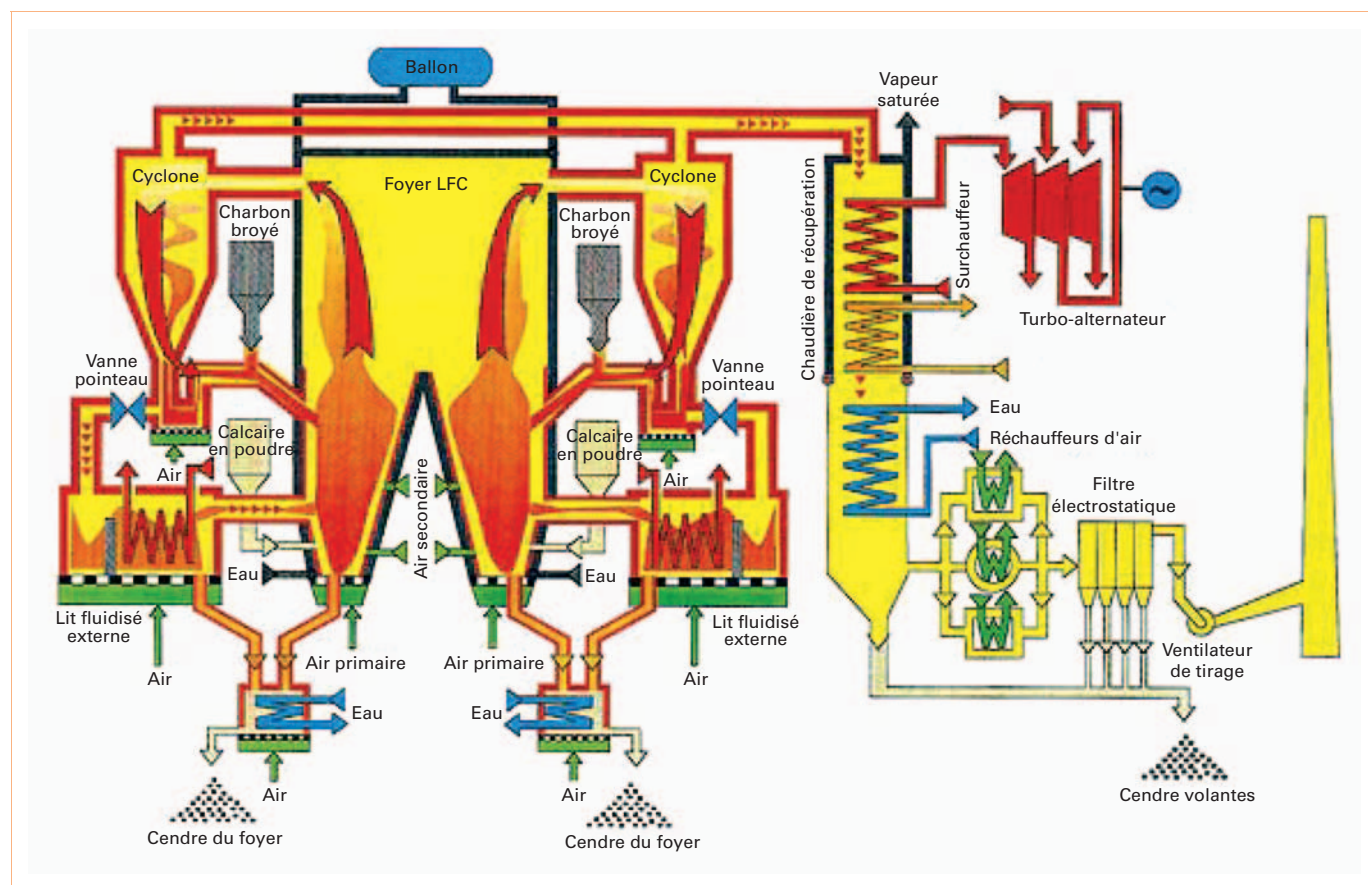


Figure 16 – Schéma de principe de la chaudière LFC de Gardanne (Crédit SNET)

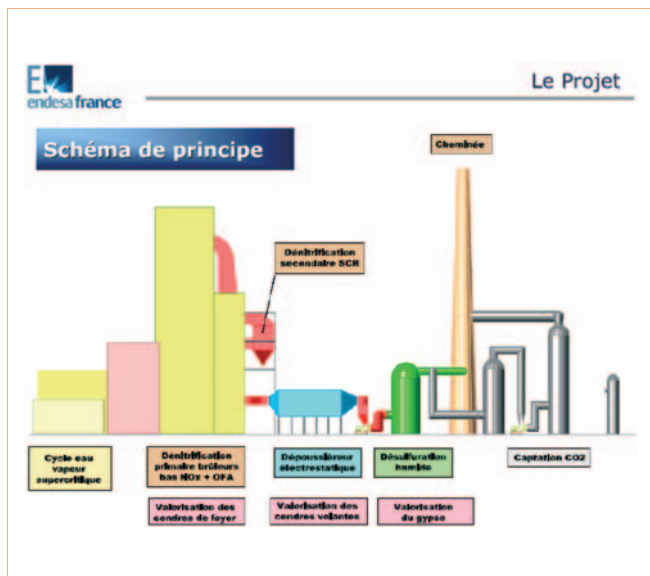


Figure 17 – Exemple du projet concernant la centrale thermique du Havre (Crédit ENDESA France)

Les centrales thermiques doivent pour ce faire :

- **disposer d'un traitement des effluents gazeux** :
 - dépoussiérage,
 - dénitrification,
 - désulfuration ;
- **disposer d'un traitement des effluents liquides** ;
- **réduire la production de gaz à effet de serre** :
 - cycle supercritique ou ultra-supercritique : CO₂ évité,
 - réduction des transports,
 - capture du CO₂ conditionné pour valorisation ou stockage définitif (1) ;
- **réduire les prélèvements sur l'environnement** :
 - gestion optimisée des prélèvements d'eau,
 - production de résidus solides utilisables en génie civil,
 - rendement élevé : moins de charbon pour plus d'électricité.

Un projet d'implantation de centrale thermique à charbon propre est envisagé sur le site du Port du HAVRE (figure 17).

À noter qu'EDF investit dans le domaine des centrales à charbon propre, notamment via sa filiale EnBW.

Encadré 1 – CAPTAGE DE CO₂ suivant EDF

Pour enrayer l'augmentation de la concentration atmosphérique du CO₂ qui contribue au réchauffement climatique, l'une des solutions envisagées est la capture et le stockage géologique du CO₂. En attendant d'autres formes d'énergie moins polluantes, il est indispensable, pendant les décennies à venir, de développer les technologies permettant de capturer à la source le CO₂ émis. Une fois capturé, celui-ci pourrait être stocké dans les couches profondes des sous-sols dont il a souvent été extrait.