

Utilisation des sous-produits industriels – Les cendres volantes

Des possibilités d'emploi très diversifiées

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 »*

1. Documents techniques de référence	C 5 374 – 2
2. Différents types de cendres volantes	— 2
3. Commercialisation des cendres volantes	— 2
4. Emplois diversifiés des cendres volantes	— 6
5. Utilisations en remblai et couches de forme – Domaines routier et ferroviaire	— 8
6. Utilisation des cendres volantes en structures de chaussées	— 13
7. Mise en œuvre des cendres sur chantier	— 17
8. Utilisation des cendres dans les liants et ciments	— 19
9. Utilisation des cendres dans la fabrication des bétons	— 19
10. Autres types d'emplois	— 20
11. Statut réglementaire sur le plan environnemental	— 21
12. Références de chantiers	— 22
Pour en savoir plus	Doc. C 5 374

Le dossier des cendres volantes fait l'objet de trois articles :

- le [C 5 373] auquel se référer pour appréhender l'origine, la nature et les propriétés des cendres volantes, ainsi que les sources de production ;
- celui-ci, [C 5 374], consacré aux possibilités d'emploi des cendres volantes qui sont très étendues, ainsi qu'aux aspects environnementaux de ces utilisations ;
- bien que des références de chantiers réalisés récemment soient indiquées ici, certains feront l'objet d'exposés détaillés dans l'article [C 5 375].

L'emploi des cendres volantes dans l'industrie du BTP, qui remonte aux années 1960, est toujours d'actualité. Pour des raisons économiques, les cendres sont utilisées à proximité des sites de production et offrent une solution technique à privilégier.

Les cendres proviennent des stocks existants, constitués lors de l'exploitation du charbon en France, et, depuis la fermeture des sites miniers, de la production dans les centrales thermiques de résidus de la combustion de charbons importés. La production annuelle de cendres volantes est de l'ordre de 1,5 million de tonnes.

Les possibilités d'emploi des cendres volantes – notamment des cendres silico-alumineuses – sont très étendues dans les fonctions de liants ou de granulats principalement. Elles sont utilisées en construction routière et ferroviaire, à tous les stades de la réalisation des ouvrages en terre : remblai, plate-forme supérieure des terrassements (pst), couche de forme, assise de chaussée, domaines auxquels nous nous intéresserons plus particulièrement dans le présent dossier.

Les autres utilisations, comme constituants des liants et ciments, des coulis, des bétons, sont également abordées pour information.

Aujourd'hui, la production des cendres est majoritairement consommée par les fabricants de bétons et les cimentiers.

La valorisation des cendres volantes est encouragée, car c'est une bien meilleure solution – environnementale et économique – que leur élimination comme déchets. Les cendres volantes constituent en effet des déchets, dits non dangereux, suivant les réglementations en vigueur.

L'aspect environnemental de l'utilisation des cendres est dûment souligné (cf. [Doc. C 5 374]).

1. Documents techniques de référence

Les principaux documents techniques de référence sont les recommandations du Guide technique GTR édité par SETRA/LCPC en Juillet 2000, complétées par des précisions ou références données dans les guides régionaux principalement celui de la région Nord-Pas-de-Calais, de Predis.

Nous nous référons également aux fiches « produits » de la Société Surschiste (voir [Doc. C 5 374]) exemple de fournisseur de ce type d'informations.

Les normes applicables, ainsi que les sources bibliographiques concernant les cendres volantes, font également l'objet de documentations (cf. [Doc. C 5 374]).

La mise à jour des normes applicables en 2008 est prise en compte dans les exposés.

L'article porte, plus particulièrement, sur l'utilisation des cendres volantes dans le domaine routier et ferroviaire en France.

Rappelons également que nous nous intéressons spécifiquement aux cendres volantes. D'autres types de cendres (famille F9 du GTR) feront l'objet d'un dossier ultérieur.

2. Différents types de cendres volantes

Ils sont déjà définis dans l'article [C 5 373] qui comporte une classification par type de produit (§ 5), ainsi qu'un exposé sur les

caractéristiques physico-chimiques des principaux types de CV employées dans le BTP (§ 6).

Dans l'optique de cette utilisation, rappelons les propriétés suivantes :

- l'**effet pouzzolanique** est un phénomène remarquable, commun aux différents types de cendres ;
- les **caractéristiques physiques** des cendres sont essentiellement celles d'éléments fins, se traduisant par un fuseau granulométrique tel que représenté sur la figure 1 (extraite de l'article [C 5 373]) ;
- la **caractérisation chimique** des cendres réside dans les pourcentages des principaux constituants des cendres volantes que sont la silice, l'alumine, la chaux... Les types de cendres se différencient par le pourcentage de chaux plus faible pour les CV silico-alumineuses, plus fort pour les CV LFC.

3. Commercialisation des cendres volantes

3.1 Sites de production

■ Les **centrales thermiques en activité**, utilisant comme combustible le charbon en 2008, sont listées au tableau 1.

■ La **production de cendres volantes** a actuellement deux provenances :

- les stocks constitués antérieurement (essentiellement en cendres silico-alumineuses classiques) sur les sites de centrales thermiques, dont certaines ont été arrêtées ou démantelées ;
- la production proprement dite des centrales encore en activité (cendres silico-alumineuses ou LFC).

La carte de la figure 2 nous a servi dans l'article [C 5 373] pour illustrer le positionnement des sites de production des cendres.

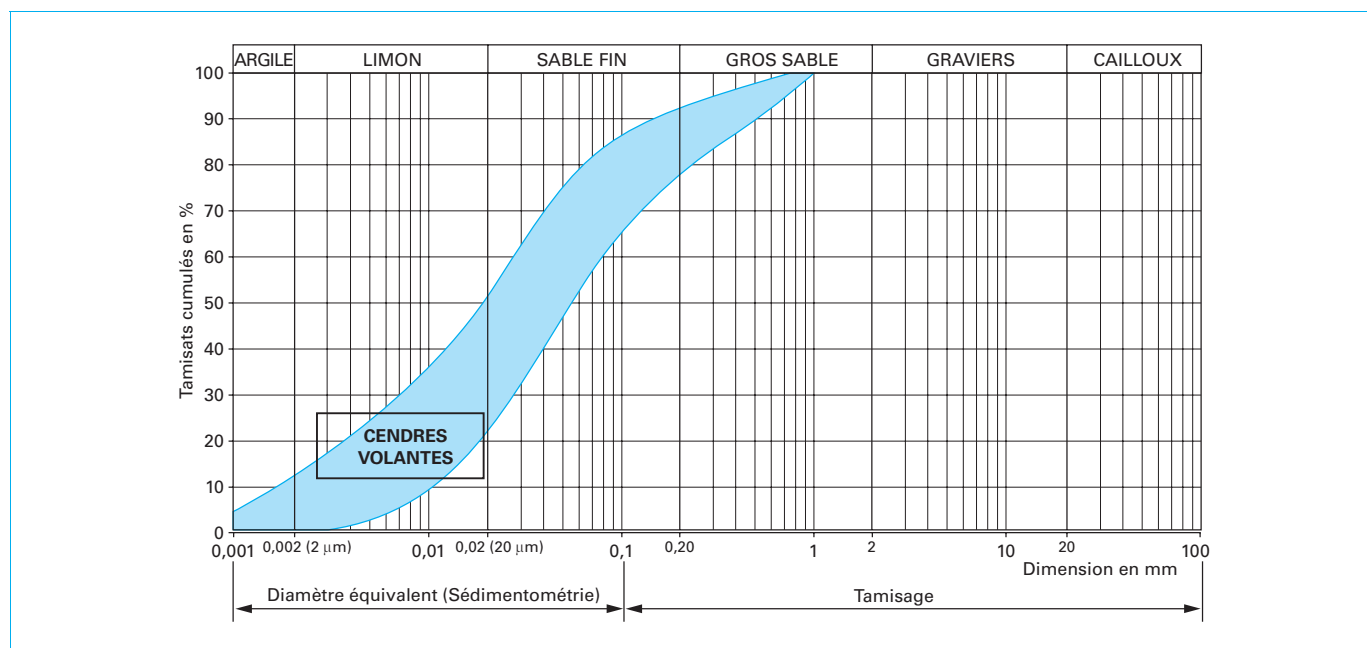


Figure 1 – Fuseau granulométrique des cendres volantes (Crédit Predis)

Tableau 1 – Centrales thermiques en activité et en cours de démantèlement

Parc	Région	Centrales thermiques	Équipements		
En activité					
Snet	Nord PdC	Hornaing			Sécheurs
EDF	Nord PdC	Bouchain			
Snet	Lorraine	Carling (Emile Huchet)	Chaudière LFC	UPPC (1)	Sécheurs
EDF	Lorraine	Blénod			
EDF	Lorraine	La Maxe			
EDF	IDF	Vitry			
EDF	Normandie	Le Havre			Sécheurs
EDF	Pays de Loire	Cordemais			
Snet	Bourgogne	Lucy (Montceau-les-Mines)			
Snet	Provence	Gardanne	Chaudière LFC	UPPC (1)	
En cours de démantèlement (arrêt d'activité)					
EDF	Rhône-Alpes	Loire-sur-Rhône			
EDF	Midi-Pyrénées	Albi			

Rappelons que les principales données concernant les sites de production des cendres volantes, l'évolution des parcs des centrales thermiques et les producteurs d'électricité EDF et Snet/Endesa ont été développées de façon détaillée dans l'article [C 5 373].

(1) UPPC : Unités de production de produits composés.

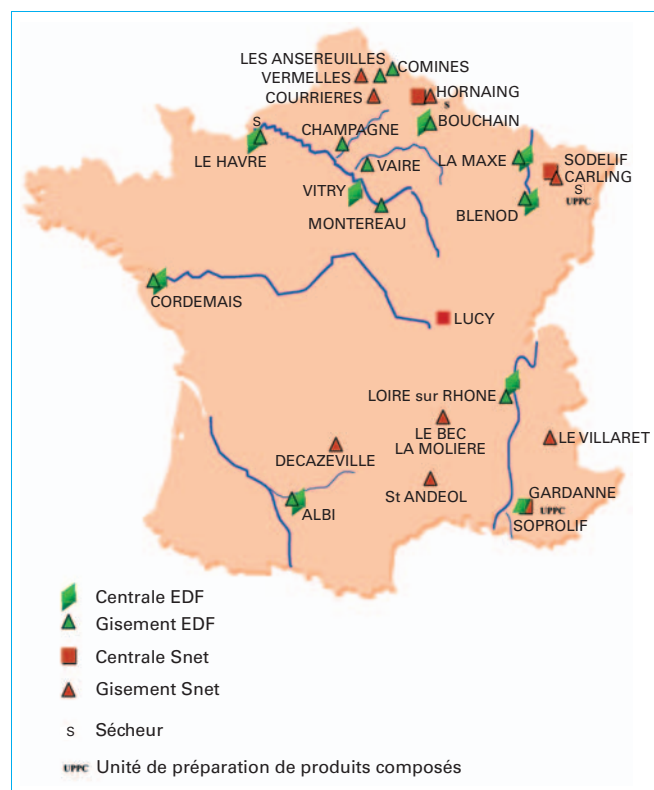


Figure 2 – Carte des implantations des centrales et des stocks de cendres – Situation en 2008 (Crédit Surschiste)

3.2 Modes de stockage des cendres

Trois modes de stockage sont à considérer suivant le type des cendres (exemple à la figure 3) :

- **cendres sèches** captées immédiatement à la base de la cheminée et, par conséquent, totalement exemptes d'eau. Elles requièrent les moyens de transport spécifiques aux pulvérulents secs (air comprimé, camions-citernes et silos) stockés sous forme de terils bâchés ou entreposés sous hangars ;
- **cendres humidifiées** pour les rendre aptes au stockage, puis au transport par camions-bennes ou wagon. Soumises aux aléas climatiques, elles s'humidifieront jusqu'à une teneur en eau d'équilibre, de l'ordre de 35 à 40 %, très variable selon la finesse du matériau, du degré de confinement au sein du stock et de la durée du stockage ;
- **cendres liquéfiées** transportées par voie hydraulique vers des bassins de décantation. Les cendres volantes qui se drainent, peu ou pas, présenteront des teneurs en eau très élevées, pouvant avoisiner les 50 %, voire plus, selon leur finesse. À titre d'exemple, les « chambres » à cendres du Havre sont à des teneurs en eau comprises entre 50 et 80 %.

Ce type de stockage est en voie d'abandon.

Un procédé complémentaire, applicable aux cendres silico-alumineuses, est également employé. Afin de pallier aux variations saisonnières de production de cendres sèches, les cendres sont séchées dans des **installations spécifiques**. Nous l'avons vu précédemment, trois centrales sont équipées de sécheurs :

- Carling dans l'Est ;
- Gardanne en Provence ;
- Le Havre en Normandie.



Figure 3 – Vue d'un stockage de cendres – Site de la centrale de Blénod (Lorraine) (Crédit EDF)

3.3 Opérateurs et prestataires

Les opérateurs et prestataires principaux sont :

- EDF qui commercialise directement ses produits ou, éventuellement, par l'intermédiaire d'un prestataire ;
- Surschiste (cf. encadré 1) chargé de valoriser les cendres issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques de Snet.

Encadré 1 – Qui est Surschiste

Cette Société, créée en 1959, est filiale à 100 % de la Société nationale d'électricité et de thermique (Snet) depuis 1997. Surschiste est un opérateur commercial et industriel chargé de valoriser les co-produits, issus de la combustion du charbon en centrale thermique. De 1960 à aujourd'hui, elle en a commercialisé près de 60 millions de tonnes, dans tous les secteurs du bâtiment et des travaux publics : autoroutes, TGV Nord, tunnel sous la Manche, Métro Eole, tunnel de Copenhague, port de Monaco, tunnel du Lioran... Depuis 1999, Surschiste a déposé des marques de produits de cendres comme :

- Silicoline® ;
- Sodeline® ;
- Sodelit® ;
- en 2001, les marques Sibactiv® et SIB.PI® (cf. [Doc. C 5 374]).

3.4 Quantités de cendres disponibles

3.4.1 Données 2008 pour l'ensemble de la France

Nous indiquons ci-après les données récentes concernant les quantités de cendres volantes disponibles sur l'ensemble de la France, communiquées par les prestataires principaux, EDF et Surschiste.

■ Informations EDF 2008

La production annuelle totale de cendres du parc EDF varie entre 600 000 et 800 000 tonnes. Les anciens stocks exploités sont d'environ 6 millions de tonnes.

EDF valorise chaque année la totalité de la production de cendres, plus une partie des stocks existants.

À titre d'exemples.

650 000 tonnes de cendres ont été produites en 2007 pour un total de 1 million de tonnes valorisées.

Exemple de la centrale thermique du Havre : 173 480 tonnes de cendres volantes revalorisées en 2007.

■ Informations Surschiste 2008

Elles sont reportées dans le tableau 2 ci-après.

3.4.2 Données partielles pour la Région Nord-Pas-de-Calais en début de siècle

Les indications partielles fournies par Predis sur les quantités disponibles en 2000 sont utiles pour juger de l'évolution de la production et de la valorisation des cendres.

Les stocks de cendres silico-alumineuses, seules présentes dans la région Nord-Pas-de-Calais, sont constitués sur les sites de centrales thermoélectriques dont deux sont encore en activité : Hornaing et Bouchain (cf. figure 4).

Début 2000, environ 12 millions de tonnes de cendres volantes silico-alumineuses étaient disponibles (cf. tableau 3).

Dans les toutes dernières années du siècle dernier, le flux moyen annuel des cendres s'établissait comme suit :

- 140 000 tonnes, produites à partir des centrales thermoélectriques en activité ;
- 500 000 tonnes consommées (cf. § 4.3.2 pour les détails de cette répartition).

En découle un « déstockage » annuel de l'ordre de 360 000 tonnes qui conduit, toutes choses étant égales par ailleurs, à une résorption totale des dépôts de cendres volantes au terme d'une trentaine d'années.

Tableau 2 – Informations Surschiste 2008 sur productions Snet

Centrales thermiques	Production annuelle de cendres (en tonnes)	Stock en 2008 (en tonnes)
Hornaing	≈ 150 000	≈ 3 500 000
Émile Huchet	≈ 250 000	≈ 2 500 000
Provence Gardanne	≈ 150 000	0
Lucy	≈ 70 000	0

Le Guide Predis prévoyait : « ...Il est raisonnable cependant d'estimer que cette échéance sera raccourcie en raison d'une probable progression de l'activité du BTP et, surtout, d'un arrêt prévisible, dans un horizon d'une dizaine d'années, des dernières centrales thermoélectriques encore en service dans la région Nord-Pas-de-Calais... ».

La politique énergétique ayant évolué, la réalité est un peu différente...

3.4.3 Évolution et perspectives de productions de cendres

Pour ce qui est des cendres volantes silico-alumineuses classiques, la consommation est plus forte que la production, ce qui conduit à un déstockage.

On peut estimer que les stocks de cendres volantes étaient supérieurs à une vingtaine de millions de tonnes au début des années 2000. En 2008, les stocks ne représentent plus qu'environ 12 millions de tonnes (données consolidées d'EDF et de Surschiste), soit un déstockage moyen annuel dans la période 2000/2008 de l'ordre de 1 million de tonnes.

Suivant le tableau 4, la consommation est toujours largement supérieure à la production. Le déstockage annuel actuel est compris entre 600 000 et 700 000 tonnes, ce qui conduirait à un épuisement des stocks dans moins de vingt ans.

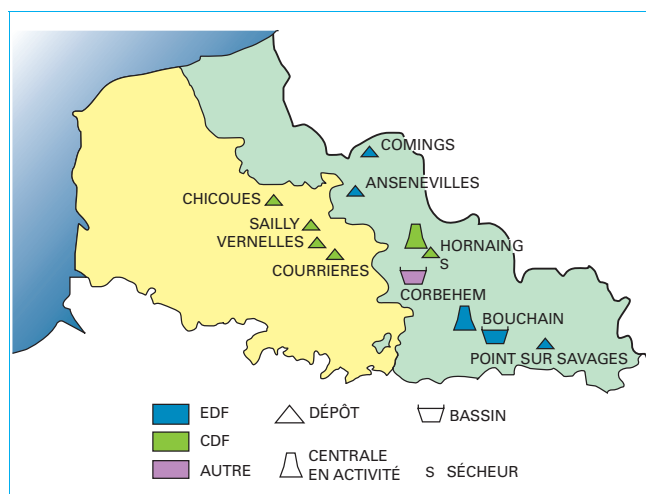


Figure 4 – Sites de production de cendres du Nord-Pas-de-Calais
(Crédit Predis)

Tableau 3 – Quantités de cendres disponibles en 2000 dans le Nord-Pas-de-Calais

Centrales EDF (1)		Centrales CDF (2) (3)		Stora (4)	
Ansereuilles	1 800 000	Hornaing	4 500 000	Corbehem	50 000
Bouchain	1 600 000	Courrières	1 500 000		
Pont-S-Sambre	1 000 000	Vermelles	600 000		
Comines	200 000	Sailly (5)	300 000		

(1) Électricité de France.

(2) Charbonnages de France.

(3) RCFC Route, prestataire de CDF.

(4) Usine Stora à Corbehem (Papeterie). Bassin de cendres volantes associé à l'ancienne centrale thermo-électrique. Il n'y a plus actuellement de production de cendre volantes en raison d'un changement de combustible.

(5) Cendres de foyer.

Tableau 4 – Données consolidées d'EDF et de Surschiste (en tonnes)			
Producteurs	Production annuelle	Consommation annuelle	Déstockage annuel
EDF	650 000	1 000 000	350 000
Snet/Endesa	720 000	1 000 000	280 000
Total	1 370 000	2 000 000	630 000

3.5 Produits commercialisés

3.5.1 Conditions générales

■ D'une façon générale, les produits peuvent être utilisés :

- sous forme sèche, pour leurs propriétés de liants ;
- sous forme humide, pour leurs propriétés de granulats.

Les produits peuvent également être utilisés sous forme de mélanges fabriqués, soit directement sur chantier avant mise en œuvre, soit en usine, pour des produits prêts à l'emploi.

■ La commercialisation des cendres se réalise par ventes directes aux utilisateurs, essentiellement sous les deux formes précitées, à savoir :

– cendres volantes sèches. Ici, les utilisateurs les plus intéressés sont des fabricants de :

- liants hydrauliques : ciments et liants routiers,
- bétons : BPE1, bétons de chantiers, préfabrication,...

– cendres volantes humides en vrac. Ici, les utilisateurs les plus concernés sont :

- des maîtres d'ouvrages pour des travaux neufs routiers, impliquant généralement des volumes importants de matériaux pour une utilisation en remblai, en couche de forme, ou en assises de chaussée,
- des fabricants de mélanges routiers ou des entreprises de travaux publics, installées à l'occasion d'un chantier particulier sur le site du dépôt de cendres,
- des producteurs de granulats disposant d'une « centrale » spécifique,
- des producteurs de ciments.

■ Les propriétés des produits de cendres, mis sur le marché, sont vérifiées et suivies par des essais d'évaluation, notamment :

- chimiques : silice, alumine, fer, chaux totale et chaux libre, sulfates ;
- physiques : finesse ;
- performancielles : pouzzolanité ou hydraulité.

3.5.2 Fiches produits

Les prestataires qualifient leurs produits en conformité avec les normes applicables.

Depuis 1999, Surschiste a déposé des marques de produits de cendres. Les fiches produits correspondantes donnent les caractéristiques et les propriétés des cendres, ainsi que les recommandations sur les possibilités d'utilisation (cf. [Doc. C 5 374]).

Les produits proposés aux clients sont, notamment, ceux de l'encadré 2.

Encadré 2 – Synthèse des produits de cendres Surschiste (depuis 1999)

Cendres volantes silico-alumineuses classiques

• Produit : Silicoline® sèches

– utilisations : toutes routes, bétons, liants hydrauliques, coulis ;

– provenance : centrales thermiques de :

- Blénod,
- Bouchain,
- Saint-Avoid,
- Hornaing,
- La Maxe,
- Lucy (Montceau-les-Mines),
- Gardanne.

• Produit : Silicoline® humides

– provenance : centrales thermiques de :

- Blénod,
- Saint-Avoid,
- Hornaing,
- La Maxe.

Cendres volantes de lit fluidisé circulant (LFC) de la centrale Émile Huchet

• Produit : Sodeline® sèches

– utilisations : traitement de sol à portance immédiate, liants spéciaux routiers, coulis, dépollution de sols ;

– provenance : centrale thermique Émile Huchet de Saint-Avoid.

• Produits composés :

– Gardanex®-PI :

- provenance : centrale de Gardanne,
- composition CV silico-alumineuses/CV de LFC/Chaux vive,
- utilisations : traitements de sols en remblai, PST et couches de forme, et traitement de graves aux liants hydrauliques ;

• FTC Desulfogypse. Provenance : centrales de Gardanne et de Saint-Avoid ;

– Injex 70® :

- provenance : centrale de Saint-Avoid,
- composition : mélange de Silicoline® et de ciment,
- utilisation : coulis d'injection pour comblement porteur de cavités souterraines ;

– Complex® :

- provenance : centrale de Saint-Avoid (UPPC),
- composition : mélange de cendres Sodeline® et de ciment,
- utilisation : coulis d'injection à faible résistance pour comblement de cavités souterraines.

4. Emplois diversifiés des cendres volantes

4.1 Classification par types

D'une manière générale, les cendres, issues de la combustion du charbon en centrale thermique, présentent des caractéristiques et

des propriétés spécifiques de finesse, de forme, d'activités pouzzolanique et hydraulique qui leur permettent d'être valorisées dans un grand nombre d'utilisations dans le BTP et, notamment, dans le domaine routier qui nous intéresse plus particulièrement.

Suivant leur type, les cendres sont employées principalement dans des fonctions de liants ou de granulats (fines), également (dans une moindre mesure) dans des fonctions d'assèchement et d'aptitude au compactage. La classification, proposée au tableau 5 est représentative des possibilités d'utilisation dans le domaine routier principalement.

Il convient de souligner que certains types de cendres listées au tableau 5, ne sont plus produits aujourd'hui, et que d'autres ne font pas l'objet du présent article (cendres de foyer, cendres de lit).

Les différents types de cendres de charbon peuvent être utilisés comme produits indépendants, ou en associations avec d'autres sous-produits industriels tels que :

- les sulfogypses résultant de la désulfuration des fumées de centrales thermiques ;
- d'autres gypses industriels ;
- les laitiers de haut-fourneaux ;
- des matériaux de recyclage (démolitions de l'habitat, déconstructions de route...).

La combinaison de cendres silico-alumineuses et sulfo-calciques permet aussi d'obtenir de véritables liants hydrauliques (exemple du produit Gardanex PI).

4.2 Produits spécifiques et larges utilisations

Les cendres volantes peuvent être valorisées, sur une gamme très étendue d'emplois, dans les domaines suivants de la construction :

- **infrastructures routières et ferroviaires** :
 - remblais et couches de forme,

Tableau 5 – Classification par fonction dans l'utilisation en techniques routières*

Fonction « liant »	Fonction « granulat »	Autres fonctions
Pouzzolanique <ul style="list-style-type: none"> • CV silico ou • CV silico LFC 	Fines <ul style="list-style-type: none"> • CV silico • CV silico LFC • CF silico • CL silico LFC 	Assèchement <ul style="list-style-type: none"> • toutes cendres sèches • consommation chimique d'eau et dégagement de chaleur
Hydraulique <ul style="list-style-type: none"> • CV sulfo • CV sulfo LFC • CL LFC • Mélanges 		Aptitude au compactage <ul style="list-style-type: none"> • CV silico humides • CV silico LFC humides

* Information issue de l'exposé de MM. Brunello et Miersman lors du salon Pollutec de 1999

LFC : chaudière à Lit fluidisé circulant

Définitions des différentes cendres récupérées :

- CV : cendres volantes ;
- CF : cendres de foyer ;
- CL : cendres de lit.

- traitement de sol,
- assises de chaussées et couches de roulement,
- liants hydrauliques routiers et ciments,
- constituants principaux, ou secondaires ;
- **génie civil** :
 - ciments,
 - bétons : bétons prêts à l'emploi, bétons de chantier, bétons auto-plaçants, bétons de chaussées, préfabrication ;
 - **comblement de vides, parois moulées, pieux forés** :
 - coulis d'injection, faible ou forte résistance,
 - coulis spéciaux,
 - coulis légers ;
 - **remblaiement de tranchées** :
 - produits auto-compactants ;
 - **dépollution** :
 - milieux liquides, boueux ou solides,
 - métaux lourds,
 - hydrocarbures ;
- **autres utilisations**. Les cendres peuvent également être utilisées dans l'industrie comme abrasifs ou charges (plastique, peintures, réfractaires, résines...), agent d'isolation, briques..., dans l'agriculture : en substrat de croissance, allègement des sols lourds, drainage, voire **dépollution** (cf. encadré 3)..., et dans d'autres ouvrages tels que : hippodrome, piste de sport...

Encadré 3 – Les cendres comme agent de dépollution

Cendres de lit fluidisé circulant et cendres sulfo-calciques.

Ces cendres ont des caractéristiques : chimique, physique, minéralogique et performantielle qui les prédisposent à des utilisations comme agent de dépollution des milieux : liquides, semi-liquides, solides, soit :

- mélangé avec d'autres produits (liants...) ;
- en l'état.

Dans ces applications, des brevets ont été déposés.

4.3 Données sur la répartition des emplois de cendres

4.3.1 Données européennes

En Europe et selon les années, de 2 à 3 millions de tonnes de cendres volantes, sur une production totale de 43 millions, sont utilisées en constructions de routes, soit un taux d'utilisation global, dans ce secteur d'activité, pouvant atteindre 8 % (chiffres fournis au Salon Pollutec de 1999).

L'essentiel de ces utilisations est réalisé dans 7 pays : France, Royaume-Uni, Allemagne, Belgique, Hollande, Finlande et, dans une moindre mesure, Espagne. La France possède la plus grande expérience dans ce domaine, avec un taux d'utilisation des cendres en travaux routiers, proche de 30 % (cf. [Doc. C 5 374]).

4.3.2 Données pour la région Nord-Pas-de-Calais

Suivant le Guide Predis de 2000, dans les toutes dernières années du siècle dernier, le flux moyen annuel des cendres dans la région s'établissait comme suit : 500 000 tonnes consommées, selon la répartition suivante :

- 65 % en techniques routières (mélanges routiers, construction de remblais,...) ;
- 25 % dans la fabrication des bétons, coulis d'injection, et des matériaux autocompactants ;

– 10 % pour la fabrication des liants hydrauliques (ciments, liants routiers,...).

4.3.3 Données actuelles en France

La répartition annuelle des emplois des cendres est relativement irrégulière. Notamment, la part des remblais et travaux routiers est, en fait, très variable et dépendante des opportunités des besoins de projets proches des sites de production et de stockage des cendres.

Un **exemple** récent de ces opportunités est cité dans le paragraphe 10, celui de la construction d'un remblai de la ligne LGV Est qui a utilisé 120 000 m³ de cendres volantes.

À titre indicatif, les données fournies par les deux principaux prestataires sont mentionnées en suivant.

■ En ce qui concerne Surschiste

Les répartitions chiffrées sont à consulter à la figure 5.

■ En ce qui concerne EDF

À titre d'**exemples**, nous donnons les chiffres suivants qui concernent trois centrales :

- la **centrale de Blénod**, en 2008, a valorisé 70 % des cendres produites pour des utilisations principalement orientées vers les bétons. Les 30 % restants sont stockés dans des terrils qui peuvent être utilisés pour des remblais (comme en 2003 sur la ligne LGV Est) ;
- la **centrale de la Maxe** valorise 100 % des cendres produites en visant une utilisation maximale par les fabricants de bétons et les cimentiers. À titre indicatif, les chiffres 2007 sont de :

- 47 % dans les bétons,
- 52 % dans les ciments,
- 1 % dans les remblais (comblements) ;

- la **centrale du Havre**, en 2007 a valorisé 174 000 tonnes (cendres sèches), dont :

- 85 % d'utilisation par les fabricants de bétons,
- 15 % d'utilisation par les cimentiers.

À noter que plusieurs utilisations dans le domaine routier (voir § 10), sur le site du port autonome du Havre et sur des déviations routières de la région, réalisées dans les dernières années, ne sont pas prises en compte dans ces statistiques (emploi de cendres humides stockées dans des « chambres à cendres »).

À partir de ces données, des tendances fortes se confirment dans l'utilisation des cendres volantes. D'une façon générale :

- les cendres sèches sont réservées en grande partie aux fabricants de bétons, puis aux cimenteries, pour être utilisées comme composants de liants hydrauliques routiers et de ciments. Par ailleurs, les cendres sèches sont également utilisées dans le domaine routier dans la composition des structures de chaussées ;
- les cendres humides sont utilisées pour les besoins des terrassements, soit après aération, soit par traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques.

4.4 Utilisations actuelles

Nous l'avons vu précédemment, la valorisation des cendres volantes porte sur une gamme étendue de produits commercialisés qui se différencient par l'ensemble des critères suivants :

- **types de cendres**, suivant la nature du combustible et le procédé de combustion, décrits dans l'article [C 5 373] § 5 ;
- **état hydrique**, qui est décrit § 3.2 ;
- suivant les produits, l'utilisation des cendres volantes s'exerce dans des **fonctions différentes**, répertoriées au tableau 5 ;
- interviennent également les options, dans certains domaines d'emplois des cendres, à l'**état naturel ou après traitement**.

Dans les paragraphes 5 à 10, les différentes utilisations sont abordées dans différents domaines :

- domaines routier et ferroviaire : remblais, couches de forme, assises de chaussées, domaine auquel nous nous intéressons plus particulièrement ;
- fabrication de liants hydrauliques et ciments ;
- fabrication de bétons ;
- coulis d'injection ou spéciaux ;
- remblais auto-compactants.

5. Utilisations en remblai et couches de forme – Domaines routier et ferroviaire

5.1 Applications

Les possibilités d'emploi concernent les différentes couches de matériaux mises en œuvre dans les infrastructures routières (ou ferroviaires), représentées sur le schéma de profil en travers de la figure 6.

5.2 Classification géotechnique des cendres volantes suivant le GTR

Le guide le plus adapté pour l'utilisation des cendres volantes dans le domaine des terrassements est le GTR qui concerne les routes et, par extension, s'applique aux voies ferrées suivant la Notice 590 B de RFF (Réseaux ferrés de France – cf. tableau 6).

Dans la gamme des sous-produits industriels, la norme NF P 11-300 classe les cendres en catégorie F2 définie par le GTR. Le GTR ne traite dans cette famille que des cendres volantes silico-alumineuses. Le paramètre retenu pour le classement du matériau est l'état hydrique, et conduit aux sous-classes définies par le tableau 6 du GTR.

À noter également l'application des recommandations du Guide technique GTS pour le traitement des matériaux.

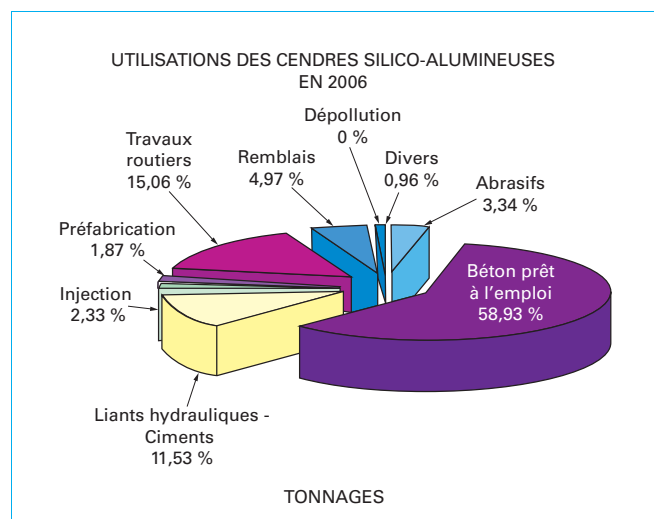


Figure 5 – Utilisation des cendres – Répartition par domaine de construction (Crédit Surschiste)

Tableau 6 – Classification géotechnique des cendres (extrait du Guide GTR)

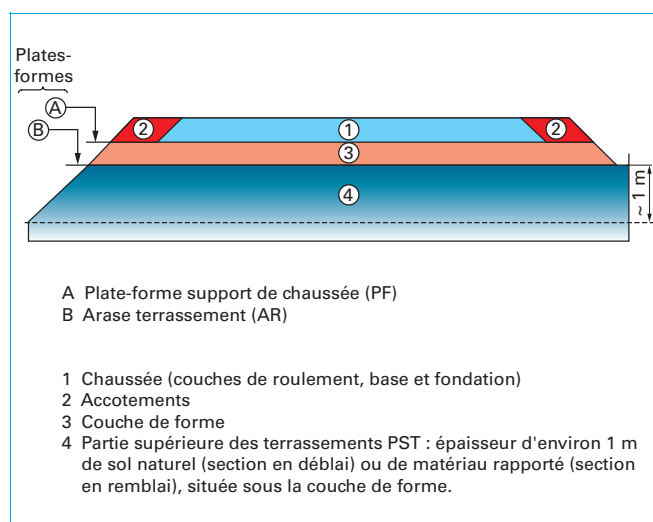
Famille de Matériaux	Caractères principaux	Classement du matériau		
		Paramètres retenus	Valeurs seuils	Sous-classe
F ₂ Cendres volantes silico-alumineuses de centrales thermiques	Ces matériaux constituent le résidu de la combustion du charbon dans des centrales thermiques. Ce sont des matériaux constitués d'éléments fins (60 % < 80 µm), relativement homométriques, sphériques, poreux, mais ne présentant aucune plasticité. De ce fait, ils sont sensiblement moins denses que les sols, relativement drainants, et présentent une portance satisfaisante jusqu'à des teneurs en eau dépassant largement la W _{OPN} . (1) Toutefois, au-delà d'une teneur en eau limite, leur portance chute de manière extrêmement brutale.	Le paramètre caractéristique de ces matériaux est le rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal. (W _{OPN})	$IPI \leq 4$ ou $W_n \geq 1,3 W_{OPN}$ (2)	F _{2th} Cendres volantes très humides
			$4 < IPI \leq 10$ (3) $1,2 W_{OPN} \leq W_n < 1,3 W_{OPN}$	F _{2h} Cendres volantes humides
			$0,85 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN}$	F _{2m} Cendres volantes à teneur en eau moyenne
			$0,75 W_{OPN} \leq W_n < 0,85 W_{OPN}$	F _{2s} Cendres volantes sèches
			$W_n < 0,75 W_{OPN}$	F _{2ts} Cendres volantes très sèches

Intitulés normes citées :

- **NF P 94-049-1** Février 1996 « Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes. »
- **NF P 94-049-2** Février 1996 « Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Partie 2 : Méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants. »
- **NF P 94-050** Septembre 1995 « Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage. »
- **NF P 94-078** Mai 1997 « Sols : reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice portant immédiat. »
- **NF P 94-093** Octobre 1999 « Sols : reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal. Essai Proctor modifié. »

(1) W_{OPN} : teneur en eau de l'Optimal Proctor Normal(2) W_n : teneur en eau naturelle (cf. NF P 94-049-1 et NF P 94-049-2 et NF P 94-050)

(3) IPI Indice portant immédiat (cf. NF P 94-078)

**Figure 6 – Définition des couches de structures de chaussées**
(Crédit GTR)

5.3 Utilisation en remblai

5.3.1 Recommandations du GTR

Le fascicule 2 du GTR définit les conditions d'utilisation des cendres volantes en remblai figurées sur le tableau 7.

5.3.2 Utilisations dans le domaine des terrassements

Pour les besoins des terrassements, des cendres humides sont utilisées – mais également des cendres sèches pour certaines fonctions –, **soit à l'état naturel après aération** si nécessaire, **soit après traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques**.

■ À l'état naturel

On les emploie de trois manières :

- en corps de remblai moyennant une protection des talus, généralement avec la terre végétale ;
- en corps de remblai allégé, 1,3 à 1,4 de densité humide (1 de densité sèche pour 30 à 40 % de teneur en eau), notamment en zone compressible ;
- incorporation de cendres sèches pour un ajustement de teneur en eau de sols très humides. Utilisations locales et ponctuelles, pour des craies par exemple.

Tableau 7 – Conditions d'utilisation des matériaux en corps de remblais (extrait du guide GTR)

Sous-classe	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
F ₂ th Cendres volantes très humides	Matériaux inutilisables en l'état				
F ₂ h Cendres volantes silico-alumin. humides	La faible portance de ces matériaux et leur grande capillarité interdit de les utiliser dans leur état naturel à la partie supérieure des remblais et à la base des remblais situés en zone inondable. Le traitement notamment avec de la chaux vive devrait théoriquement lever ces restrictions, mais cette solution n'est cependant pas envisagée ici par manque d'expérience	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec une garantie de qualité suffisante	NON
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage faible H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	0 0 0 0 0 3 1
		–	évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	0 0 0 0 0 3 1
				Solution 2 : aération W : utiliser tous moyens d'aération permettant la réduction de W par évaporation R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 1 0 1 2 2
F ₂ m Cendres volantes silico-alumin. à teneur en eau moyenne	La grande capillarité de ces matériaux interdit leur utilisation à la base des remblais situés dans des zones inondables. Le traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques devrait théoriquement permettre de lever cette restriction mais cette solution n'est cependant pas envisagée ici par manque d'expérience.	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec une garantie de qualité suffisante	NON
		+	pluie faible	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 2 2
		=	ni pluie, ni évaporation	C : compactage moyen	0 0 0 0 0 2 0
		–	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état hydrique C : compactage moyen	0 0 3 0 0 2 0
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 1 2
F ₂ s et ts Cendres volantes Silico-alumin. sèches	La grande capillarité de ces matériaux interdit de les utiliser dans la base des remblais situés en zone inondable. Par ailleurs dans cet état il est toujours nécessaire de les arroser par situation météorologique = ou pour éviter la formation importante de poussières au cours de la mise en œuvre. Leur humidification pour changer d'état est une opération relativement facile à réaliser.	++	forte pluie	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec une garantie de qualité suffisante	NON
		+	faible pluie	R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 1 2 2
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 3 0 0 1 2
				Solution 2 : humidification dans la masse W : humidification pour changer d'état hydrique R : couches minces C : compactage moyen	0 0 4 0 1 2 0
		–	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel C : compactage intense H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	0 0 3 0 0 1 1
				Solution 2 : humidification dans la masse W : humidification pour changer l'état hydrique C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 4 0 1 1 2

■ Avec traitement

En corps de remblai traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, moyennant également une protection des talus (encagement).

Le traitement à la chaux est très efficace pour diminuer la teneur en eau et améliorer les caractéristiques mécaniques des remblais spécifiques, comme les remblais techniques.

À retenir, en pratique : « les cendres aiment la chaux ».

5.3.3 Précautions relatives à la sensibilité des cendres à l'eau

Dans le cadre de toute utilisation en terrassement, il est impératif de se soucier constamment de la sensibilité des cendres vis-à-vis de l'eau.

Les **cendres sont sensibles à l'imbibition** (mise en saturation d'eau) au point de perdre toute portance et, aux limites, de se liquéfier. Elles sont facilement érodables.

Les dispositions constructives des remblais d'un projet devront donc comporter une protection contre toute imbibition accidentelle. Les remblais en cendres ne devront en aucune manière avoir la possibilité d'être au contact immédiat de l'eau, comme cela peut se produire en zone inondable.

Les cendres ne sont pas utilisables en zone inondable sans dispositions particulières.

5.3.4 Dispositions constructives des remblais

D'une façon générale, les remblais en cendres doivent être protégés par un encagement tel que représenté sur la figure 7.

Les remblais constitués en cendres volantes sont beaucoup plus légers après compactage, de 30 à 50 %, que les remblais en matériaux classiques (cf. figure 8).

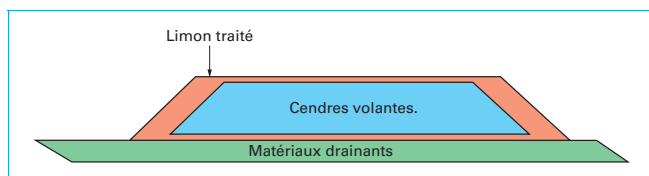


Figure 7 – Remblai en encagement – Cas d'une zone inondable



Figure 8 – Illustration d'une utilisation en terrassement (Crédit Predis Nord-Pas-de-Calais)

Exemple

Des remblais allégés en cendres volantes ont été notamment mis en œuvre sur une voie d'accès à la ligne LGV Est à Claye-Souilly (voir § 10).

L'emploi des cendres volantes est particulièrement approprié en zone compressible, les tassements en zone compressible étant une fonction directe de la pression apportée par le remblai sur le sol support.

Les dispositions constructives concernent diverses parties du remblai abordées successivement.

■ Base du remblai

Les cendres sont particulièrement hydrophiles et se drainent difficilement.

Aux fins de le soustraire au contact direct de l'eau, mais également des remontées capillaires, le massif de cendres devra être établi soit :

- le plus généralement sur un soubassement perméable constitué de matériaux, par exemple de type D21 ou D31 selon NF P11-300 ;
- sur un soubassement imperméable constitué de matériaux type argiles, lorsqu'un risque de pollution est à prendre en compte (exemple du chantier de SODES Lillebonne cité au § 10).

L'assise précédemment citée devra être dressée sous des pentes transversales de l'ordre de 4 % afin de permettre une évacuation de l'excès d'eau (par des infiltrations par le haut et les flancs du remblai) qui pourrait s'établir à la base du remblai en cendres.

■ Talus

Les corps de remblai en cendres, traitées ou non, sont réalisés avec une protection des talus généralement constituée en terre végétale ensemencée (cf. figure 9).

Suivant le Guide Predis, les pentes de talus des remblais peuvent être dressées avec une pente de 3/2 (2 de haut pour 3 de base), compte tenu des caractéristiques intrinsèques de cisaillement à long terme des matériaux. Toutefois, compte tenu des retours d'expériences et en raison des phénomènes d'érodabilité des talus, il nous paraît prudent de prévoir dans les projets des pentes plus douces, jusqu'à 2/1 pour des cendres utilisées à l'état naturel.

■ Remblais de faible hauteur

La mise en œuvre des cendres volantes naturelles en remblai rasant ou de faible hauteur ($h < 3$ m) n'est pas adaptée.

■ Remblais de grande hauteur

Pour ceux-ci, il sera prudent de prévoir, à fréquence régulière, des redents sur les pentes de talus pour éviter tout glissement du placage de terre végétale. La mise en œuvre des cendres volantes



Figure 9 – Remblai en cendres volantes avec protection des flancs par placage de terre végétale (Crédit Predis)

devra être stoppée durant les périodes de pluie, le matériau devenant très rapidement incompactable en raison d'un excès d'eau.

L'organisation du chantier conduit à un délai important, entre la fin de la montée du remblai et la mise en place de la couche de forme. Il devient alors indispensable de prévoir une protection de l'arase-terrassement par le biais d'une émulsion gravillonnée (ou de tout autre moyen adéquat) qui ralentira la dessiccation, en été, ou l'imbibition, en hiver.

■ Remblais contigus d'ouvrages

Le traitement à la chaux permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques de remblais spécifiques comme les remblais techniques contigus aux ouvrages (la prise résulte de la réaction entre l'alumine et la silice).

À noter que, dans le cadre d'une utilisation en remblai, le matériau devra satisfaire les spécifications définies dans la norme A 05-252 juillet 1990 – « Corrosion par les sols-aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai (sols) » – et, plus particulièrement, celles relative aux « critères chimiques et électrochimiques d'acceptation d'un remblai », à savoir résistivité, PH et teneur en sels solubles.

5.3.5 Normes applicables

Les spécifications techniques du GTR, relatives aux remblais en cendres, sont les mêmes que pour les remblais constitués avec tous matériaux courants. Il en est de même des normes applicables, lesquelles sont inventoriées dans l'article [C 5 361] « Classification des matériaux ».

Les contrôles à effectuer, au moment de la mise en œuvre, seront abordés au § 7.

5.3.6 Caractéristiques – Comportement sous compactage

Suivant la classification du GTR, exposée au § 3.2, le paramètre caractéristique des cendres volantes est le rapport entre les teneurs en eau naturelle et en eau optimum Proctor normal (cf. figure 10).

La figure 11 met en évidence les valeurs seuils de l'Indice portant immédiat (IPI) qui correspondent aux plages de teneur en eau.

Il convient de définir les courbes Proctor/IPI en début de chaque chantier et de « caler » précisément la fourchette de teneur en eau naturelle aux fins de bien apprécier, en fonction de l'état hydrique des cendres volantes, « la **marge de portance disponible lors du compactage** ».

Après densification obtenue sous l'énergie du Proctor normal, la masse volumique sèche se situe généralement entre 1 et 1,3 t/m³ pour une plage de teneurs en eau optimales de 20 à 35 %, avec parfois, quelques légers dépassements de ces fourchettes, tant par le haut que par le bas. Pour les cendres les plus courantes, il faut surtout noter une courbe de compactage Proctor normal, telle que représentée sur la figure 10, plutôt plate.

La gamme de teneurs en eau relativement large permet de mettre en œuvre le matériau, tout en conservant une portance (IPI) – telle que représentée sur la figure 11 – compatible avec le bon fonctionnement des engins de chantier.

Une vigilance accrue devra être exercée vis-à-vis de l'excès d'eau qui conduira à une perte importante et soudaine de la portance immédiate.

Les valeurs peuvent varier par rapport au standard défini précédemment. Chaque utilisation de cendres volantes pour constitution de remblais et couches de forme de chaussées devra être considérée au cas par cas.

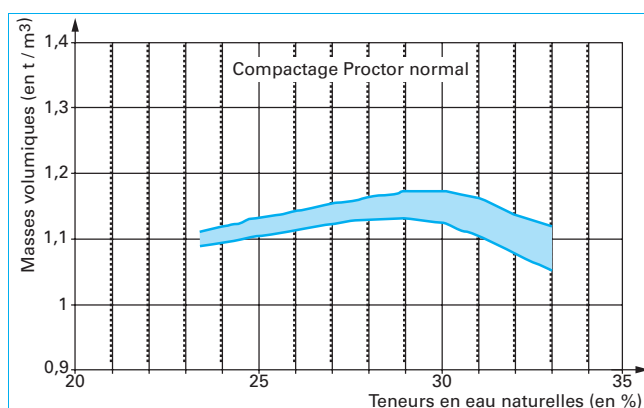


Figure 10 – Plages de variation des courbes de compactage Proctor normal

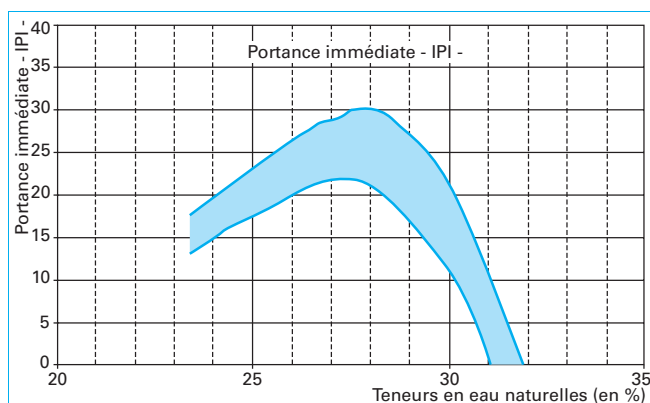


Figure 11 – Plages de variation des courbes de portance immédiate IPI



Figure 12 – Compactage au vibrant – Feuilletage à éviter (Crédit Sotruga/GTM Terrassement)



Figure 13 – Compactage au pneu recommandé – Vérification de la compacité au gammadensimètre (Crédit Sotraga/GTM Terrassement)

5.3.7 Mise en œuvre et compactage des cendres

Il convient d'utiliser les grilles de compactage, relatives au sols de classe définies dans le GTR. En première action, un pré-compactage sera effectué aux fins de « pré-serrer » la couche étalée afin que le compacteur ne s'enfonce pas dans le matériau foisonné.

L'utilisation de compacteurs à pneus est vivement recommandée (figure 13), l'utilisation de compacteurs vibrants pouvant conduire à des pertes de portance brutales, dues à la migration de l'eau vers le haut et la création de phénomènes de feuillette (figure 12). Pour éviter le ravinement, il faut veiller au bon compactage des flancs (la meilleure solution est d'opérer par sur-largeurs d'environ 1 m) et à leur protection (terre végétale ensemencée).

5.4 Utilisation des cendres en couches de forme

5.4.1 Recommandations du GTR

Le fascicule 2 du GTR définit les conditions d'utilisation des cendres volantes en couches de forme figurées sur le tableau 8.

5.4.2 Utilisations en couches de forme

Le mode d'utilisation des cendres volantes en couches de forme est pertinent, mais il est relativement peu usité et limité à des chantiers proches des stocks.

■ Après traitement aux liants

La couche de forme qui constitue la plate-forme, sur laquelle s'appuiera le corps de chaussée proprement dit, doit assurer la traficabilité des engins approvisionnant les matériaux de la première couche de chaussée. Ces impératifs conduisent à n'envisager l'utilisation de cendres volantes qu'après leur **traitement avec un liant hydraulique** ou un simple traitement à la chaux.

En règle générale, il est souhaitable de traiter en centrale, lorsque c'est possible pour des raisons d'homogénéité de l'humidification des cendres notamment, permettant de traiter correctement les bords de plateformes (problèmes de fluage sous le poids des engins). La technique de traitement en place est plus délicate à maîtriser.

Citons des **exemples** récents sur lesquels nous donnons des précisions au paragraphe 10 : les déviations de Liocourt (traitement en centrale) et Harfleur (traitement en centrale et en place pour une partie mineure des couches de forme), ainsi que certaines plateformes de dessertes ferroviaires du Port autonome du Havre (traitement en place).



Figure 14 – Traitement en centrale – Chantier de RN 33 (Crédit Weiler)



Figure 15 – Traitement en place au pulvimixer – Chantier doublement de faisceaux ferroviaires du port du Havre (Crédit Sotraga/GTM Terrassement)

■ En correcteur granulométrique

Les cendres peuvent être employées à l'état naturel comme correcteur granulométrique – en remplacement de fillers ou de sables fins – pour couches de forme avec un pourcentage important de l'ordre de 15 à 20 %.

La mise en œuvre est généralement réalisée en centrale, parfois en place (technique difficile). Des exemples de chantiers sont cités dans le paragraphe 10, la déviation de Creutzwald RN33 en Moselle (cf. figure 14 traitement en centrale) et des plateformes de dessertes ferroviaires du Port autonome du Havre (cf. figure 15 traitement en place).

Signalons que le mode d'utilisation en correcteur granulométrique est également possible pour des couches d'assises de chaussées, voire pour des couches de béton compacté roulé (BCR) mises en œuvre dans les barrages ou les stross de tunnels.

6. Utilisation des cendres volantes en structures de chaussées

Notre exposé porte essentiellement sur les cendres silico-alumineuses classiques, les plus répandues et cela, en nous appuyant sur les recommandations du Guide Predis Nord-Pas-de-Calais qui bénéficie de retours d'expérience, importants et nombreux dans cette région, au cours des décades précédentes.

Tableau 8 – Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code G W T S	Épaisseur préconisée de la couche de forme <i>e</i> (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
F_{2h} Cendres volantes humides	La grande sensibilité à l'eau de ces matériaux implique de les traiter pour les utiliser en couche de forme. Les réactifs les plus appropriés sont les liants hydrauliques éventuellement associés à de la chaux vive lorsque les cendres se trouvent dans un état (h). Le traitement est réalisé le plus souvent en place.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique ou mélange sol + liant	NON	(1)	<i>e</i> = 0,35	<i>e</i> = 0,35	<i>e</i> = 0,35	<i>e</i> = 0,35
		= ou –	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 2 2					
F_{2m} Cendres volantes à teneur en eau moyenne		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
F_{2s} Cendres volantes sèches		= ou –		W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 1 2					
		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou –	pas de pluie	W : Humidification pour changement de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 2 1 2		PF2	PF2	PF3	PF3

Les techniques d'utilisation des cendres volantes dépendent de la disponibilité et de la proximité des produits en concurrence avec les laitiers granulés. Elles sont toujours utilisées, mais dans une moindre mesure, essentiellement dans le Nord-Pas-de-Calais.

6.1 Normes applicables

Pour les usages routiers, les cendres volantes silico-alumineuses doivent répondre aux spécifications définies dans les normes

européennes suivantes : normes NF EN 14 227 – 3 et 4 (Février 2005), respectivement intitulées :

- 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.

Le pouvoir pouzzolanique des cendres étant déterminé selon la norme : NF P 98-111 (Mars 1992) : Assises de chaussées – Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux.

6.2 Différents mélanges routiers

La capacité de la cendre volante silico-alumineuse à engendrer des prises hydrauliques en milieu basique est intéressante pour la fabrication de mélanges routiers.

Après mise en œuvre et à terme plus ou moins éloigné (phénomène de prise différée plus ou moins lente), les mélanges se présenteront sous une forme monolithique (couche homogène).

Les mélanges les plus usités sont les suivants :

- cendre volante traitée à la chaux (activant) et au gypse (accélérateur de prise) ;
- grave-cendres volantes ;
- grave mixte-laitier granulé (ou pré-broyé) de haut-fourneaux/cendres volantes.

À noter que, dans une moindre mesure, les cendres volantes ont été (ou sont) également utilisées pour la confection de bétons routiers à destinations diverses.

6.3 Cendres volantes traitées à la chaux et au gypse (CVCG)

Les exemples d'utilisation les plus nombreux se situent dans les régions Nord, Est et Centre de la France.

6.3.1 Normes applicables

Ce matériau fait l'objet de la norme européenne : NF EN 14227-3 : « Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante » qui annule et remplace la norme NF P98-124 de mars 1992 : « Cendres volantes – chaux – gypse : définition, composition et classification » qui précise, notamment, les valeurs limites à ne pas dépasser en dosage des différents composants (cf. [Doc. C 5 374]) :

- chaux vive : 5 % ;
- chaux éteinte : 6 % ;
- gypse : 7 %.

La chaux utilisée devra, par ailleurs, satisfaire aux spécifications proposées par la norme NF P98-101 Juillet 1991 – « Assises de chaussées – Chaux aériennes calciques pour sols et routes – Spécifications ».

6.3.2 Composition

Nous citons des exemples de compositions de CVCG pratiquées dans la région Nord.

Dans le mélange, la cendre volante joue, à la fois, le rôle de granulats et de liant. La composition moyenne s'établit comme suit (en poids secs des constituants) :

- 91 % de cendres volantes ;
- 4 % de chaux vive ;
- 5 % de gypse.

ou

- 90 % de cendres volantes ;
- 5 % de chaux éteinte ;
- 5 % de gypse.

Il est important de noter les restrictions formulées par la norme, concernant les dosages de la chaux et du gypse dans le mélange : un excès de l'un de ces composants, principalement le gypse, conduirait inévitablement à des gonflements du mélange, durant sa prise, en raison de la formation d'ettringite (sel résultant de la combinaison de CaO , de SO_4Ca et de Al_2O_3 en présence d'eau).



Figure 16 – Chantier d'assise de chaussée en cendres volantes CVCG (Crédit Predis)

6.3.3 Utilisation des CVCG

Le Guide Predis mentionne les observations suivantes concernant l'évolution de l'utilisation des CVCG.

Les CVCG ont été abondamment utilisées dans les années 1970 et 1980 dans le Nord-Pas-de-Calais, dans le cadre de la mise à niveau du réseau routier (cf. figure 16). Elles ont donné toute satisfaction en terme de pérennité des ouvrages construits.

Les documents de portée nationale, « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » de 1994 et « Catalogue des structures de type de chaussées neuves » de 1998, ne mentionnent plus, d'une manière explicite, l'utilisation des cendres volantes traitées chaux et gypse (CVCG), en tant que matériaux de chaussée, mais laissent entendre que des produits spécifiquement régionaux peuvent cependant être utilisés.

L'utilisation des CVCG, dans les années suivantes et récentes, est moins soutenue. Cela est essentiellement dû à :

- d'une part, l'intérêt technique présenté par d'autres structures (structures mixtes GTLH-GTLHc) (cf. **Nota**) ;
- d'autre part, des contraintes particulières de mise en œuvre de la CVCG, notamment :

- la nécessité de maintenir de l'humidité en surface pour éviter les problèmes de dessiccation,
- les sujétions de feuilletage (défaut de liaison des éléments de surface).

Nota :

GTLH : graves traitées aux liants hydrauliques.

GTLHc : graves traitées aux liants hydrauliques et à la chaux.

6.4 Grave cendres volantes (GCV)

C'était un produit très utilisé pour la constitution de couches de forme dans les décades 1970 et 1980, aujourd'hui d'un emploi, moindre notamment dans le Nord, et conditionné par des opportunités économiques (cf. figure 17).

6.4.1 Normes applicables

Ce matériau fait également l'objet de la norme NF EN 14 227-3 (Février 2005) « Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante ».

6.4.2 Composition

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, pour la majorité des cas, la fraction granulats est représentée par une grave 0/20 mm de calcaire dur. Il était toutefois possible, dans le bassin minier, de recourir à des granulats fabriqués à partir de schistes houillers rouges.

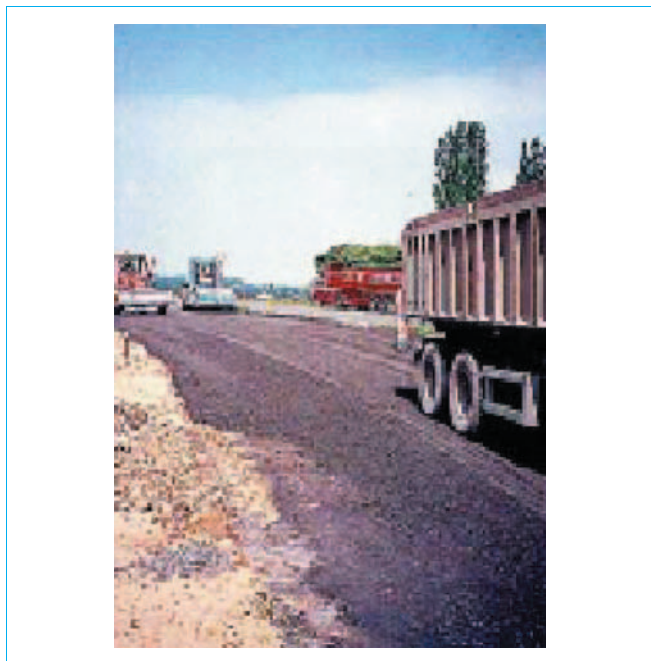


Figure 17 – Régilage de graves cendres volantes GCV (Crédit Predis)

Le liant hydraulique est constitué par la présence simultanée de cendres volantes silico-alumineuses et de chaux.

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, la composition du mélange le plus souvent proposé s'établit comme suit :

- grave 0/20 mm : 85 % ;
- cendres volantes : 13 % ;
- chaux vive : 2 %.

6.5 Grave laitier-cendres volantes (GLCV)

Les GLCV sont utilisées surtout dans le Nord et l'Est. Moins utilisées dans la période récente, leur emploi est lié aux conditions économiques, essentiellement la conjonction de proximité des stocks de cendres et de laitiers.

Dans la Région Nord, la GLCV est souvent désignée par le terme de « grave mixte ».

6.5.1 Normes applicables

Ce matériau fait également l'objet de la norme NF EN 14 227-3 (Février 2005) « Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante ».

6.5.2 Composition

Le principe de composition est identique à celui de la GCV. La part liant est assurée ici par une combinaison de cendres volantes silico-alumineuses et de laitier granulé de haut-fourneau de fonte hématite.

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, les mélanges les plus souvent proposés présentent des compositions se situant dans les valeurs indiquées au tableau 9.

Tableau 9 – Compositions de GLCV

Grave 0/20 mm (en %)	Cendres volantes (en %)	Laitier granulé (en %)	Chaux vive (en %)
83,5 à 84	7,5	7,5	1 à 1,5
	9	6	

6.6 Performances mécaniques des différents mélanges routiers

6.6.1 Plages d'utilisation

Les normes relatives aux mélanges routiers proposent un classement catégoriel en fonction du couple : « **Résistance à la traction directe/Module d'élasticité en traction directe** », soit R_{td}/E_{td} .

Ces paramètres sont mesurés après un délai de prises de 360 jours des éprouvettes, selon des conditions normalisées de conservation.

Les diverses formulations sont réalisées en laboratoire sur matériau 0/20 mm.

Établi suivant des normes applicables antérieurement (cf. **Nota**), le graphique de la figure 18, présenté dans le Guide Predis, permet de distinguer les différentes plages d'utilisation des mélanges routiers.

Nota. Les nouvelles normes applicables, basées sur les mêmes principes généraux, font l'objet du § 6.6.2.

6.6.2 Normes applicables

En 2008, la norme applicable pour appréhender les classes mécaniques des mélanges traités à la cendre volante est la norme NF EN 14 227-3 (NF P98-887-3) Février 2005 « Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante ».

En France, les classes couramment utilisées sont les suivantes (cf. figure 19) :

- T3 et T4, pour les graves traitées à la cendre volante ;
- T1, T2 et T3, pour les sables traités à la cendre volante.

À noter que la norme NF P98-128 Novembre 1991 – « Assises de chaussées – Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques à hautes performances. Définition – Composition – Classification. » est toujours applicable aux bétons compactés.

6.7 Utilisation de cendres volantes de LFC

Comme indiqué précédemment, les mélanges routiers, utilisés essentiellement dans la région Nord-Pas-de-Calais, contiennent des cendres volantes de type silico-alumineuses classiques.

Nous évoquons ici l'utilisation des cendres volantes de LFC produites actuellement en France par deux centrales : Saint-Avoid et Gardanne.

Les valorisations de CV LFC, envisagées et effectivement réalisées, utilisent les propriétés liantes de ces produits dues à leur pouvoir hydraulique et/ou pouzzolanique. Employées en structure de chaussée, ces cendres volantes ne le sont jamais telles quelles, mais comme constituants d'un mélange (de ciment, conformément à la norme NF P 15-301 ou liant hydraulique, conformément à la NF P 15-108). Ces liants peuvent ensuite être utilisés en traitement de sol, de sables ou de graves.

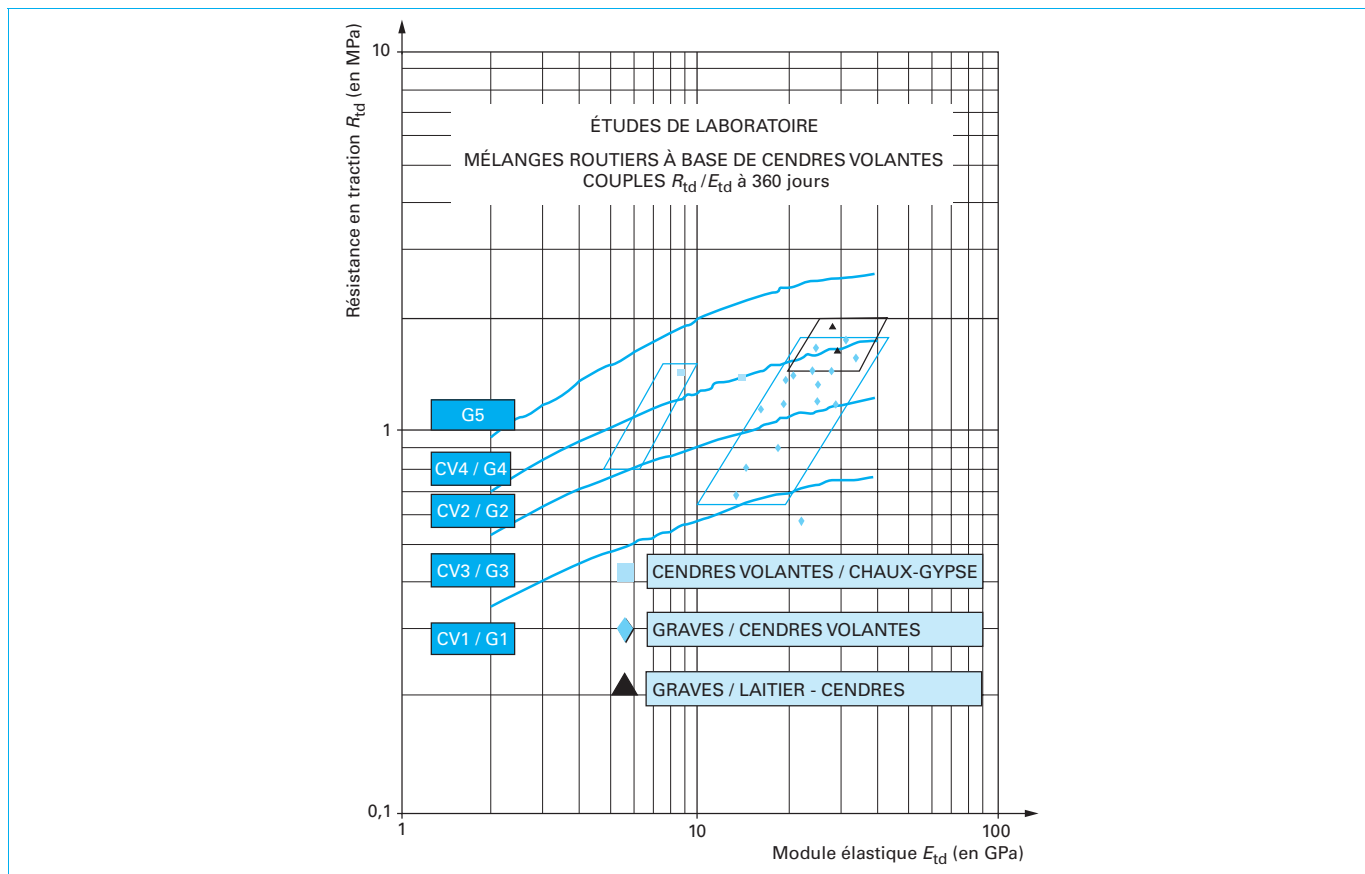


Figure 18 – Plages d'utilisation des différents mélanges routiers (Crédit Predis)

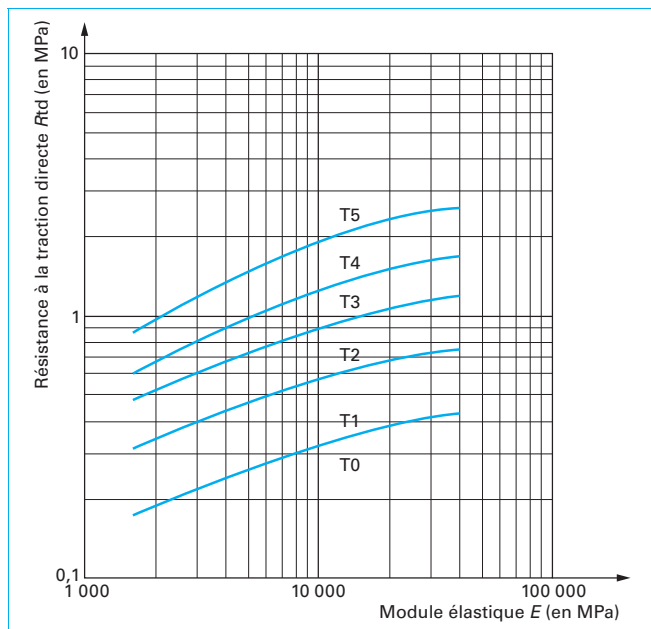


Figure 19 – Classes mécaniques des matériaux en fonction des valeurs du couple R_t et E

Ces produits font l'objet de brevets ou d'appellations. Parmi les produits très riches en cendres de LFC, on peut citer des SIB-PI® et Gardanex-PI® (se référer aux fiches « produits » de [Doc. C 5 374]).

Les nouveaux produits (à partir de charbons importés) sont plutôt utilisés en liants routiers.

7. Mise en œuvre des cendres sur chantier

7.1 Recommandations générales

Rappelons, en premier lieu (cf. § 3.5.1), que des essais d'évaluation doivent être effectués sur les produits-cendres commercialisés pour vérifier, et suivre, les propriétés requises pour ces matériaux, à savoir :

- propriétés chimiques (silice, alumine, fer, chaux totale et chaux libre, sulfates) ;
- propriétés physiques (finesse) ;
- propriétés performanciellles (pouzzolanité ou hydraulité).

Les informations minimales nécessaires à recueillir, durant la mise en œuvre pour assurer une utilisation optimale des cendres volantes, sont listées dans le tableau 10.

Tableau 10 – Recommandations pour l'utilisation optimale des cendres

Informations à fournir	Ouvrages en terre/Remblais	Couches d'assises de chaussées/Couches de forme		
		CV + liant	G-CV	G-L CV
Plage des teneurs en eau au stock ou à la livraison sur chantier	X	X	X	X
Courbe Proctor (normal et/ou modifié) en 5 points minimum	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)
Courbe de portance immédiate en 5 points (systématiquement associée à l'essai Proctor)	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)	X (en début de chantier)
R _c à 28 jours (si risque de gel, peu après la mise en œuvre de la couche de forme) R _{tb} > 0,25 MPa avant l'apparition des premiers gels		X Suivant besoin (résistance vis-à-vis du gel pour un usage en cdf)		
R _{td} /E _{td} à 360 jours		X	X	X
Au minimum 1 fois par an				
R _t : essai de référence pour la détermination des caractéristiques mécaniques. R _{tb} : essai de compression diamétrale (traction par fendage ou essai brésilien). R _{td} : essai de résistance à la traction directe. R _c : essai de résistance à la compression. E : essai de module d'élasticité. Les essais sont définis selon les normes (vues au § 7.2).				

7.2 Normes applicables

■ La **résistance en traction R_t** est déterminée soit :

– **directement par l'essai en traction directe R_{td}** selon la norme **NF EN 13286-40** (NF P 98-846-40), Juillet 2003 – « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 40 : Méthode d'essai de détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques » – qui remplace la norme P98 232-2 ;

– **par l'essai de traction indirecte R_{tb}** selon la norme **NF EN 13286-42** (NF P 98-846-42) – Septembre 2003 – « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 42 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydraulique » – qui remplace la norme P98 232-3. En utilisant la relation $R_t = R_{tb} \times 0,8$.

À noter que l'essai de résistance à traction indirecte est plus usité, car plus aisé à pratiquer.

■ La **résistance à la compression R_c** est calculée suivant la norme **NF EN 13286-41** (NF P 98-846-41) Juillet 2003 – Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

■ Le **module d'élasticité E** dépend de la norme **NF EN 13286-43** (NF P 98-846-43) Septembre 2003 – « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 43 : Méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants ».

Les valeurs de résistances et modules à 360 jours peuvent être estimées à partir des valeurs mesurées à 90 jours, ou 60 jours, par les coefficients de correspondance indiqués au tableau 11 (à défaut d'études spécifiques).

Tableau 11 – Coefficients de correspondance à prendre en compte pour l'estimation des performances mécaniques à 360 jours

Mélange	Âge <i>n</i> (jours)	$R_t \ n / R_t \ 360$	$E \ n / E \ 360$
Grave-cendre silico-alumineuse – chaud	90	0,65	0,75
Sable – cendre – silico-alumineuse – chaud	90	0,65	0,75
Grave-cendre hydraulique	60	0,60	0,65
Grave-cendre silico-alumineuse – laitier – chaud	90	0,60	0,65
Sable – cendre silico-alumineuse – laitier – chaud	90	0,70	0,75

7.3 Fabrication des mélanges routiers

Les trois produits que nous avons décrits sont fabriqués dans des centrales spécialisées où est assuré, dans les proportions requises, le mélange des divers granulats entrant dans leur composition.

Régulées, ces unités de production (cf. figure 20) peuvent être considérées fiables et produire un mélange relativement peu dispersé, sous réserve de s'assurer en amont de la régularité, en terme de qualité, des divers constituants (sables, gravillons, cendres, laitier, gypse, chaud, eau d'apport).

8. Utilisation des cendres dans les liants et ciments

8.1 Dans les liants hydrauliques routiers

Considérées comme un des constituants principaux entrant dans la fabrication de ces produits, elles doivent répondre aux spécifications définies dans la norme – **NF P 15-108** de Décembre 2000 : « Liants hydrauliques routiers – Composition – Spécifications – critères de conformité ».

Citons également la norme qui s'applique aux mélanges traités au liant hydraulique routier, **NF EN 14 227 – Partie 5** (NF P 98-887 – Partie 5) Février 2005 – « Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 5 : Mélanges traités au liant hydraulique routier », dont le domaine d'application concerne les cendres volantes siliceuses et calcaires utilisées dans les mélanges traités aux liants hydrauliques pour routes, aéroports et autres aires circulées. La norme s'applique à la cendre volante par combustion de lignite ou de charbon pulvérisé dans des centrales électriques (cf. [Doc. C 5 374]).

8.2 Dans la fabrication des ciments

Le guide Predis indique les différentes possibilités d'emploi des cendres dans d'autres domaines que ceux que nous venons de décrire.



Figure 20 – Centrale de fabrication de mélanges (Crédit Weiler/GTM Terrassement)

Dans la fabrication des ciments, les cendres sont utilisées selon plusieurs modes :

- **matière première** venant en substitution d'une partie de l'argile nécessaire à la fabrication du clinker ;
- **ajout en tant que constituant actif du ciment** et participant à sa prise. Selon les ciments, elles prennent le statut de :
 - constituant, si le taux d'introduction dans le ciment se situe entre 6 et 55 %,
 - constituant secondaire, s'il se situe entre 0 et 5 % dans tous les ciments ;
- **épaississeur de « résidus huileux »**, permettant de la sorte d'utiliser les combustibles pétroliers les plus divers.

La norme applicable est **NF P 15-301** Juin 1994 « Liants hydrauliques – Ciments courants – Composition, spécifications et critères de conformité ».

Elle classe les ciments en fonction de leur composition. Le tableau **12** présente un extrait de ce classement.

9. Utilisation des cendres dans la fabrication des bétons

Les cendres volantes peuvent être également intégrées en tant que granulats, dans les bétons et mortiers, et venir en substitution du ciment. Dans le cadre de cet usage, elles doivent répondre aux exigences de qualité proposées par la norme **NF EN 450** – Octobre 1995 – (Classement P18-050) et son annexe nationale – « Cendres volantes pour béton – Définition, exigences et contrôle de qualité ».

■ Les cendres volantes peuvent entrer dans la **composition de différentes catégories de bétons** :

- bétons fabriqués sur chantier ;
- bétons prêts à l'emploi (BPE) ;
- bétons pour préfabrication ;
- bétons de chaussée ;
- bétons autoplaçants.

Elles sont employées avec un taux de l'ordre de 80 à 100 Kg/m³ de béton. Compte tenu de leurs propriétés, les cendres volantes contribuent à améliorer notablement les caractéristiques du béton (cf. figure **21**).

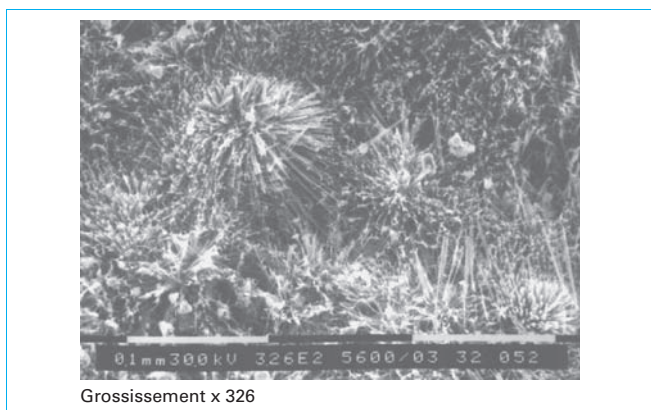
Tableau 12 – Composition de ciments ayant des cendres comme constituants
(Crédit Predis) (Valeurs en % en masse)

Catégories	Notation	Clinker - K -	Cendres	
			Siliceuses - V -	Calcaïques - W -
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	6-20 21-35
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	40-64 20-39	18-30 31-50
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B	65-90 45-64	10-35 36-55

Des laitiers de HF, des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles, des cendres volantes siliceuses ou calcaïques, en tant que constituants, peuvent se trouver seuls, ou associés, dans la composition du ciment (la proportion de fumée de silice ne doit pas dépasser 10 % dans tous les ciments).



Figure 21 – Chantier de génie civil (Crédit Predis)



Grossissement x 326

Figure 22 – Aiguilles d'ettringite rayonnantes consécutives à l'attaque du béton, soit par l'eau de mer, soit par un environnement riche en sulfates (Crédit LCPC)

Dans le béton frais, leur présence permet, notamment, d'améliorer l'ouvrabilité, d'augmenter la compacité, d'améliorer l'aspect de surface après décoffrage. Elles permettent également d'alléger les produits préfabriqués pour un taux de cendres supérieur à 7 %.

■ La présence des cendres volantes est très bénéfique vis-à-vis de la résistance et de la pérennité des bétons durcis. Elles contribuent, entre autre, à :

- augmenter la résistance mécanique finale, en raison de leur pouvoir pouzzolanique ;
- diminuer la fissurabilité, en relation avec la diminution de la chaleur d'hydratation ;
- accroître la résistance aux eaux pures et aux eaux sulfatées ;
- assurer une meilleure résistance au feu et aux chocs thermiques.

■ L'action des cendres volantes est primordiale vis-à-vis de l'alcali-réaction. L'alcali-réaction provoque une dégradation interne du béton survenant par formation d'un gel expansif à partir de silice amorphe et d'alcalins (sodium et potassium), en présence d'eau. La réaction alcali-silice concourt, à terme, à la ruine de la structure (cf. figure 22).

Parmi les solutions proposées pour limiter cette réaction, dans le cadre de l'emploi de granulats potentiellement réactifs (PR) (cf. Nota), l'incorporation de fines inhibitrices de la réaction est retenue. Les cendres volantes silico-alumineuses sont au nombre de ces dernières.



Figure 23 – Remblayage de tranchées (Crédit Predis)

À noter, cependant, que des essais sont nécessaires, au cas par cas, pour vérifier l'efficacité des cendres selon la nature du granulat.

Nota. Selon la norme XP P18-594 (Février 2004) : « Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis », qui a remplacé les normes suivantes : P18-542, P18-585, P18-587, P18-588, P18-589 et P18-590.

10. Autres types d'emplois

Pour ces emplois, on se référera notamment aux fiches produits Injex 70 et Comblex® (cf. [Doc. C 5 374]).

■ Les coulis représentent les autres emplois significatifs des cendres volantes. Elles sont mélangées avec du ciment, et quasi saturées en eau, pour atteindre une viscosité permettant leur mise en place sans autre moyen que la gravité. Elles sont essentiellement utilisées pour :

- Le remblayage de galeries ou, plus largement, de toutes cavités souterraines résultant de l'activité humaine. Dans la région lilloise, Predis cite les « Catiches » issues de l'exploitation de la craie.

Le dosage en ciment de tels produits est généralement très faible : 50 kg de ciment et 400 litres d'eau, approximativement, par tonne de cendres.

Exemple. Un chantier récent est inventorié au § 10 : le comblement d'anciennes carrières de gypse, dans le cadre de la construction de la déviation Sud-Ouest de Meaux, en utilisant des coulis composés de cendres volantes humides.

- Le remblayage de tranchées, plus particulièrement celles liées aux travaux d'assainissement, lorsqu'elles s'avèrent relativement profondes (cf. figure 23).



Figure 24 – Élargissement de voiries (Crédit Predis)

Cette configuration conduit à soutenir les parois (blindage), rendant ensuite difficile le comblement par couches successives compactées dans les règles de l'art.

Les matériaux autocompactants, ainsi désignés, se justifient pleinement pour cet emploi en comblement de tranchées. Le dosage en ciment de ces matériaux est faible, sensiblement du même ordre que celui des coulis évoqués précédemment. La prise à terme doit être modérée pour faciliter une reprise qui pourrait éventuellement s'avérer nécessaire pour des travaux ultérieurs.

Comme, par ailleurs, il est recherché une prise relativement rapide pour des raisons de remise en circulation de la voirie, le dosage en eau est obligatoirement réduit, conduisant, pour maintenir une ouvrabilité satisfaisante lors du remplissage, à l'ajout d'un entraîneur d'air et/ou d'un plastifiant.

La commercialisation par des entreprises de TP se traite de façon similaire à celle des bétons et mortiers prêts à l'emploi (BPE et MPE).

■ **À noter que ces produits autocompactants** sont de plus en plus utilisés pour le remplissage de canalisations hors services, évitant ainsi le démontage imposé par la législation. La mise en place des matériaux s'effectue au moyen de pompes (type béton).

Pour plus de détails, on se reportera à la brochure éditée par le CERTU en avril 1998 – toujours en vigueur en 2008 – « Remblayage des tranchées – Utilisation des matériaux autocompactants – État des connaissances au 31 décembre 1997 » (cf. [Doc. C 5 374]).

■ Le Guide Predis signale également un début d'utilisation dans le cadre de l'**élargissement de voiries étroites**, très peu fréquentées. Le revêtement bitumineux vient s'appuyer directement sur le massif ainsi constitué (cf. figure 24).

11. Statut réglementaire sur le plan environnemental

11.1 Règlements applicables

Se référer aux textes figurant en [Doc. C 5 374].

Le statut spécifique, applicable actuellement, est défini par la **circulaire du ministère de l'Environnement n° 96-85 en date du 11 octobre 1996 relative aux cendres volantes issues de la filtration**

des gaz de combustion d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement.

Cette circulaire, toujours en vigueur en 2008, précise les conditions de valorisation et, dans le cas où elles ne peuvent pas être valorisées, les conditions d'élimination des cendres résultant de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile dans des installations thermiques. Cette circulaire ne traite pas du cas spécifique des résidus produits lors du traitement de ces gaz de combustion par lavage, injection de réactif, ou tout autre moyen équivalent, ni des résidus de combustion dans des lits fluidisés circulants.

Les installations thermiques sont des installations classées pour l'environnement, lesquelles font l'objet d'une réglementation spécifique, au titre des articles du Titre I^{er} du Livre V du Code de l'environnement (parties législative et réglementaire) :

- articles L. 511-1 et suivants du Code de l'environnement ;
- articles R. 511-9 et suivants du Code de l'environnement.

D'autre part, s'appliquent les dispositions relatives aux déchets qui font l'objet du Titre IV du Livre V du Code de l'environnement relatif à la prévention des pollutions, des risques et des nuisances et ont pour objectif :

- de prévenir, ou de réduire, la production et la nocivité des déchets, de la fabrication à la distribution des produits ;
- d'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ;
- de valoriser les déchets par réemploi, recyclage, ou toute autre action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

Se référer à l'article L. 541-1 du code de l'environnement [Doc. C 5 374].

L'objectif, qui nous a plus particulièrement intéressé dans ce dossier, est de favoriser la valorisation des cendres.

11.2 Possibilités d'utilisation des cendres

Le guide technique régional Predis Nord-Pas-de-Calais de 2002, relatif à la valorisation des cendres volantes de charbon, nous fournit une bonne synthèse en la matière, toujours d'actualité.

La valorisation est organisée *via* l'utilisation des cendres volantes préconisée si celles-ci entrent dans la composition de produits qui, au final, par leur pouvoir d'hydraulicité, provoqueront, ou participeront, à des prises pérennes des mélanges dans lesquels ils sont introduits.

Deux grands axes se dessinent en la matière.

11.2.1 Fabrication de liants normalisés

Pour ces usages, les cendres volantes doivent respecter les critères de qualité spécifiés dans les normes :

- **NF P 15-301** de Juin 1994 – « Liants hydrauliques – Ciments couvrants : Composition, spécifications et critères de conformité » ;
- **NF P 15-108** de Décembre 2000 – « Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers : Composition, spécifications et critères de conformité ».

11.2.2 Fabrication des mélanges routiers et des bétons

Celles-ci doivent respecter les critères de qualité spécifiés dans les normes :

- **NF EN 450**, Octobre 1995, « Cendres volantes pour béton : Définitions, exigences et contrôle de qualité » ;
- **NF 98-110**, novembre 1991, « Assises de chaussées – Cendres volantes silico-alumineuses – Spécifications ».

11.2.3 Autres destinations

Les autres possibilités d'utilisation intéressant le domaine des terrassements. Elles sont cependant **subordonnées à une étude, au cas par cas**, de la composition des cendres et de leurs lixiviats selon la norme **NF P 31-210**, dans les cas suivants :

- **cendres prélevées sur des stockages.** Les analyses portent sur des échantillons prélevés selon des règles permettant une représentativité suffisante ;
- **production régulière.** Les analyses sont renouvelées périodiquement, compte tenu de la variabilité des charbons brûlés et d'autres paramètres de la combustion.

Cette disposition concerne tout ouvrage au sein duquel il est établi que les cendres volantes ne développeront pas de prises hydrauliques (remblais routiers, plates-formes,...).

À ce jour, et moyennant l'observation de ces dispositions, **l'utilisation des cendres volantes de charbon est autorisée** pour la construction de remblais ou, plus largement, pour la construction de tout « ouvrage en terre ».

Conformément à l'article L. 541-2 du Code de l'environnement (cf. [Doc. C 5 374]), cette utilisation se fait cependant sous la responsabilité du producteur de déchets, en vertu du principe voulant que ce dernier sous sa responsabilité juridique et financière, porte remède à toute situation déclarée critique vis-à-vis de l'environnement, du fait de l'utilisation de ses matériaux.

11.2.4 Réglementation des déchets issus des procédés thermiques (RPT)

La situation des réglementations a évolué dans la mesure où les producteurs de matériaux, issus de procédés thermiques, sont engagés depuis quelques années (avec le concours de l'Insa Polden et le réseau technique du ministère de l'Équipement) avec le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement (MATE) de l'époque, dans une démarche visant à une « **Réglementation des déchets issus des procédés thermiques (RPT)** ».

Les cendres volantes des centrales thermiques au charbon sont classées dans la liste verte de l'OCDE. Elles constituent un **Résidu de procédé thermique (RPT)** qui porte le numéro de code 10 01 02 dans la liste des déchets de la Communauté européenne (décision de la Commission 2001/118/CE du 16 janvier 2001, modifiant la décision 2000/532/CE, en ce qui concerne la liste des déchets).

Il est à noter qu'elles ne sont pas classées déchet industriel spécial, ni déchet dangereux, suivant le Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 codifié aux articles R. 541-7 et suivants du Code de l'environnement.

11.2.5 Risques sanitaires

Les cendres volantes de charbon ont une grande finesse et contiennent de la silice cristalline, que l'on peut trouver sous la forme de quartz, mais également de cristobalite ou trydimite. Ces particules de silice cristalline peuvent être à l'origine de pathologies respiratoires. Les valeurs limites d'exposition sont répertoriées à l'article R. 4412-149 du Code du Travail.

Se référer aux informations détaillées de [Doc. C 5 374].

À noter que 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) a été abrogé par le Décret 2008-244 du 07 mars 2008.

12. Références de chantiers

12.1 Historique des utilisations

Selon la source LCPC, les emplois répertoriés des cendres volantes dans le domaine routier sont nombreux dans le monde.

■ **En France**, depuis les années 1960, les emplois en construction routière ont été nombreux. Les cendres volantes silico-alumineuses, autrefois produites en plus grande quantité, ont été utilisées en remblais et, notamment, pour des remblais de moyenne hauteur. De nombreux chantiers pourraient être cités, parmi lesquels des chantiers autoroutiers. Les cendres volantes ont été utilisées, soit traitées ou non traitées en remblai, soit traitées en couches de forme.

Pour ce qui sont des couches de chaussée, les techniques grave-laitier-cendres-volantes et grave-cendres-volantes sont encore utilisées aujourd'hui en couches de fondation et de base.

■ **En Europe**, les cendres volantes sont également utilisées dans certains pays. On peut notamment citer l'Espagne, l'Angleterre, la Belgique.

En Angleterre, on recense également leur utilisation en remblai et, en particulier, pour des rampes d'accès à des ouvrages.

En Belgique, le LCPC cite un chantier pilote à Vilvorde (N1) où les cendres volantes ont été utilisées, à la fois, en couche de forme (traitées avec de la chaux) et en couche de fondation, là aussi avec de la chaux comme liant dans un béton pouzzolanique.

■ **Aux États-Unis**, les cendres volantes sont également utilisées en remblais, mais également mélangées avec de la chaux et des boues de désulfuration des fumées (il s'agit d'un produit breveté nommé Poz-O-Tec®).

Remarque

Les **cendres volantes sulfo-calciques de Gardanne** sont des cendres plus fines utilisées il y a quelques années.

Les études et les suivis de ces produits étaient réalisés, notamment, par le CETE d'Aix-en-Provence.

Elles présentaient l'inconvénient d'être riches en carbonates, ce qui entraînait des retraits importants.

12.2 Références de chantiers inventoriés par Surschiste

Les fiches produits de Surschiste (cf. [Doc. C 5 374]), fournissent de nombreuses références de chantiers et d'utilisations qui illustrent la diversité des emplois soulignée au § 2.

Outre des références d'utilisations pour des plateformes routières et ferroviaires, (cf. § 12.3), Surschiste fait état de références importantes dans d'autres domaines comme :

- le comblement de puits de mines de houillères de Lorraine et d'Allemagne ;
- le confinement de terrils pollués ;
- l'inertage de déchets.

12.3 Références de chantiers récents de terrassements

Dans le domaine qui nous intéresse plus particulièrement, nous citons ici des chantiers ayant utilisé des cendres volantes pour la réalisation de remblais et de couches formes d'infrastructures



Figure 25 – Chantier dessertes ferroviaires du Havre – Traitement au liant (Crédit Sotraga/GTM Terrassement)

routières ou ferroviaires. Certains de ces chantiers feront l'objet d'exposés techniques détaillés, illustrant des expériences d'entreprises, (dans l'article suivant [C 5 375]).

■ Port autonome du Havre/Parc Roulier (1998)

Réalisation de la couche de fondation d'une plateforme de stockage de containers. Des cendres humides, voire sèches, en provenance de la centrale thermique EDF du Havre ont été reprises majoritairement dans des « chambres à cendres » et utilisées en correcteur granulométrique : 15 à 20 % incorporés dans des sables graveleux provenant des dragages des estuaires.

■ Plateforme industrielle de Sodes Lillebonne (2006)

Des cendres ont été utilisées en corps de remblai. La plateforme de plusieurs hectares était constituée comme suit :

- TN ;
- argiles à silex 35 cm ;
- cendres traitées en place à la chaux 50 cm à 1 m, suivant les zones.

Les cendres provenaient également de la centrale EDF du Havre, stockées dans des chambres à cendres sur les terrains du PAH et reprises humides, voire très humides.

■ Déviation d'Harfleur (2005-2006)

Il s'agit d'une déviation de route nationale. La constitution des couches de forme a été réalisée en cendres de la centrale du Havre, traitées au liant hydraulique routier (LHR produit Rolac PI).

Le traitement a été réalisé en centrale, sauf zones particulières traitées en place, selon les proportions de : 94 % de cendres et 6 % de LHR.

■ Port autonome du Havre/Plateformes de voies de desserte ferroviaires

Plusieurs chantiers sont réalisés de **2004 à 2008** (cf. figures **25** et **26**). Les travaux concernent la réalisation de couches de formes. Les cendres volantes proviennent des stocks de la centrale du Havre. Suivant les tronçons, les cendres sont utilisées soit :

- en correcteur granulométrique dans les proportions suivantes : 30 % de cendres traitées au liant Rolac 645 (environ 6 %) pour 70 % de sables de dragages ;
- en couches de forme traitées à 6 % au liant Rolac PI.

Les traitements sont réalisés en place à l'aide de pulvimixers. (Rapport détaillé de chantier dans l'article [C 5 375]).



Figure 26 – Chantier dessertes ferroviaires du Havre (Crédit Sotraga/GTM Terrassement)



Figure 27 – Centrale de traitement aux liants de Liocourt (Crédit Weiler)

■ RD 955 Déviation de Liocourt

Réalisation de couches de forme et de couches de fondation avec des cendres provenant de la centrale de Blénod (Région Est), traitées aux liants hydrauliques (traitement en centrale à 5 % de LHR et 1 % de chaux) (cf. figure **27**).

■ RN 33 Creutzwald (2008-2009)

Réalisation de couches de forme traitées aux liants hydrauliques routiers (5 %) et à la chaux (1 %).

Environ 12 000 tonnes de cendres (Sodeline) utilisées en correcteurs granulométriques avec une proportion de l'ordre de 10 % pour 90 % de sables homométriques (cf. figure **28**).

■ LGV Est Raccordement à l'interconnexion à Claye-Souilly (2004/2005)

Construction d'une voie d'accès au LGV Est, accolée à la voie existante. Réalisation de corps de remblais allégés pour éviter des contraintes de soutènement (rideau de palplanches). Utilisation de cendres provenant de la centrale de Vaires-sur-Marne traitées à la chaux. (exposé technique détaillé dans l'article [C 5 375]).



Figure 28 – Chantier de RN 33 Creutzwald (Crédit Weiler)

■ LGV Est Zone de remblai de Vandières

La construction des remblais de la plate-forme de la LGV Est européenne a également bénéficié d'une variante économique valorisant les cendres volantes, provenant de la centrale thermique voisine, sur un remblai de 300 m de longueur, situé sur la commune de Vandières au niveau du viaduc du canal de la Moselle.

Suivant le maître d'ouvrage RFF, la construction de ce remblai a nécessité 120 000 m³ de cendres volantes, sur un volume total de 200 000 m³.

La base du remblai est composée de matériaux drainants. Les cendres volantes constituent le noyau du remblai, encagé par des limons traités à la chaux, pour garantir une totale imperméabilisation de l'ouvrage, tel que représenté sur la figure 7.

La mise en œuvre des cendres volantes, qui sont des matériaux très volatils, a exigé des précautions particulières. Des protections sont mises en place pour éviter l'envol des cendres, surtout en période sèche. Il faut constamment arroser d'eau les cendres volantes jusqu'au montage du remblai.

Au final, ce remblai a présenté les mêmes caractéristiques de qualité (stabilité, étanchéité) qu'un remblai en matériaux classiques.

■ Déviation de Meaux (2002/2003)

Référence d'un chantier de comblement d'anciennes carrières de gypse nécessaire à la construction de la déviation Sud-Est de Meaux, avec des coulis constitués de cendres provenant de la centrale thermique EDF de Vaires-sur-Marne proche du site (exposé de réalisation détaillé dans l'article [C 5 375]).