

## Cendres volantes

Version d' Avril 2013

1. Définition .....	1
2. Lois, normes, guides .....	1
3. Origine, formation, stockage.....	3
4. Caractéristiques physico-chimiques .....	5
5. Caractéristiques géotechniques .....	11
6. Caractéristiques environnementales .....	11
7. Aspects sanitaires .....	15
8. Usages (Types d'infrastructures).....	16
9. Références bibliographiques .....	19
10. Auteurs et relecteurs.....	23

### 1. Définition

Poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique issues de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composée essentiellement de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la proportion de  $\text{SiO}_2$  réactive, telle que définie et déterminée dans l'EN 197-1, constituant au moins 25% de la masse (norme NF EN 450-1+A1).

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé (norme NF EN 197-1/A3).

Les cendres volantes siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement constituées de dioxyde de silice réactive ( $\text{SiO}_2$  – 25% au minimum) et d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La proportion d'oxyde de calcium réactif ( $\text{CaO}$ ) est inférieure à 10%. Leur teneur en  $\text{CaO}$  libre ne doit pas excéder 1% (norme NF EN 197-1).

Les cendres volantes calciques ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Elles sont essentiellement constituées d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) réactif, de  $\text{SiO}_2$  et d'oxyde d'aluminium. La proportion de  $\text{CaO}$  réactif ne doit pas être inférieure à 10% (norme NF EN 197-1).

### 2. Lois, normes, guides

Les cendres volantes de centrale thermique (CVCT) ne font l'objet d'aucun document réglementaire (arrêté, directive...) spécifique (caractéristiques, usages, manutention ou autre...).

Il n'existe qu'une circulaire datant de 1996 (cf. § 2.2).

#### 2.1. Normes

Les CVCT font l'objet de normes spécifiques. Elles sont aussi concernées par des normes relatives à des produits ou usages dans lesquels elles entrent. Les normes relatives aux cendres volantes sont indiquées dans le tableau 3.1. Les

normes relatives à des produits ou usages incluant des cendres volantes sont indiquées dans le tableau 3.2.

**Tab. 3.1 : Normes relatives aux cendres volantes de centrale thermique**

Code en vigueur	Année	Intitulé	Codes antérieurs correspondant
NF P98-111	1992	Assises de chaussées - Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux	--
NF EN 450-1+A1	2007	Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité	NF EN-450
NF EN 450-2	2005	Cendres volantes pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité	NF EN-450

**Tab. 3.2 : Normes relatives à des produits ou usages incluant des cendres volantes**

Code en vigueur	Année	Intitulé	Codes antérieurs correspondants
NF P 11-300	1992	Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières	--
NF P18-545	2011	Granulats - Éléments de définition, conformité et codification	XP P 18-545
NF EN 197-1/A1	2004	Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	NF EN 197-1
NF EN 197-1/A3	2009	Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	NF EN 197-1
NF EN 206-1/A1	2005	Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité	NF EN 206-1
NF EN 206-1/A2	2005	Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité	NF EN 206-1
NF EN 14227-1	2005	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 1 : mélanges granulaires traités au ciment	NF P98-113 NF P98-116
NF EN 14227-2	2005	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 2 : mélanges traités au laitier	NF P98-106 NF P98-113 NF P98-116
NF EN 14227-3	2005	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 3 : mélanges traités à la cendre volante	NF P98-113 NF P98-116 NF P98-124
NF EN 14227-4	2005	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 4 : cendre volante pour mélanges traités aux liants hydrauliques	NF P98-110 NF P98-112
NF EN 14227-5	2005	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 5 : mélanges traités au liant hydraulique routier	NF P98-113 NF P98-116

## 2.2. Documents administratifs

La [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. Equip. n°1109-96/93 du 10 décembre 1996) a pour objet notamment « de préciser les conditions de valorisation [...] et d'élimination [...] des cendres en provenance des installations de combustion fonctionnant avec du charbon ». Elle ne concerne pas les résidus produits « par lavage des gaz, injection de réactif ou tout autre moyen équivalent », ni les « résidus de combustion dans des lits fluidisés circulants ».

La circulaire indique que l'utilisation des cendres volantes provenant de charbon dans des usages autres que cru de cimenterie, ciment, béton, ne pourra être autorisée « que si leur producteur [...] donne des éléments d'appréciation relatifs à l'impact de tels usages sur l'environnement ».

Dans tous les cas, elle recommande que les caractéristiques physico-chimiques des cendres soient bien connues, soit par des analyses périodiques (« dans l'esprit de l'annexe IV de [la] [circulaire du 9 mai 1994](#) (abrogée en 2011), relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbain »), soit « par une corrélation entre la composition [des charbons utilisés] et celles des cendres produites ».

## 3. Origine, formation, stockage

### 3.1 - Matière première

L'antracite et le lignite (cf. Carles-Gibergues, 1978) n'étant plus utilisés dans les centrales thermiques en France, l'unique matière première des cendres volantes de centrale thermique est la houille. Celle-ci est entièrement issue de l'importation. Dans son appellation courante, le terme « charbon » désigne généralement la houille.

En 2008, la France a importé par voie maritime (terminaux portuaires de Dunkerque, Fos-sur-Mer, Le Havre/Rouen, Saint-Nazaire/Montoir) 22,8 millions de tonnes de charbon (équivalent à 14,2 Mtep – 1 tonne de charbon équivaut à 0,619 Tonne Equivalent Pétrole) provenant principalement d'Australie (26%), des États-Unis (18%), d'Afrique du Sud (15%) et de Colombie (9%) ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Tonne\\_équivalent\\_pétrole](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tonne_équivalent_pétrole); <http://www.insee.fr>).

La houille (ou charbon proprement dit) contient de 65 à 90% de carbone, les autres éléments majeurs étant l'oxygène (O de l'ordre de 10%), l'hydrogène (H de l'ordre de 5%) (Teissié et al., 2001 ; Seames et al., 2002 ; Liu et al., 2004 ; Barbosa et al., 2011). Ces éléments se trouvent essentiellement sous forme d'eau (dite de constitution, présente à moins de 10%), de matière volatile (gaz adsorbés et emprisonnés durant la formation du charbon : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (responsable du grisou), H<sub>2</sub>). La teneur en soufre (S) et azote (N) est de l'ordre du pourcent. Le charbon (matière première) contient aussi une fraction de minéraux issus des roches sédimentées en même temps que la matière organique : grès, schistes, tufs volcaniques... Ces silico-

aluminates (de l'ordre de 10% en masse) expliquent la présence d'éléments majeurs (tels que Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, P, F, Cl, S – présent sous forme de pyrite et sulfates, en teneurs < %) et d'éléments traces (tels que Ba, Sb, Mo, Se, As, Hg, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, en teneurs de l'ordre du mg/kg) (Teissier et al., 2001 ; Barbosa et al., 2011).

### 3.2 - Processus de fabrication

Les trois technologies de combustion applicables au charbon en centrale thermique sont celles :

- du foyer à grille, dans laquelle le charbon est déposé en couche sur une grille traversée par un courant d'air ;

- du foyer à charbon pulvérisé, dans laquelle le charbon, finement broyé, est injecté sous pression dans la chambre de combustion. Avec cette technologie dite « **à flamme** », les particules de charbon sont injectées avec l'air chaud provenant du réchauffeur d'air associé à la chaudière. La température de combustion est comprise entre 1200 et 1700 °C (Blissett & Rowson, 2012);

- du foyer à **lit fluidisé circulant (LFC)**, dans laquelle le charbon, plus grossièrement broyé et mélangé à du calcaire (additif de désulfuration), est maintenu en suspension par de l'air injecté sous la grille. Avec cette technologie, plus récente, les particules de combustible incomplètement brûlées quittant le foyer par sa partie supérieure, sont réinjectées à la base. La combustion (à 900°C et pression atmosphérique) est donc plus complète, réduisant l'empoussièrément.

Les deux technologies les plus courantes aujourd'hui en France sont celle dite à la flamme et celle à lit fluidisé circulant (voir tableau. 4.1). La température plus basse de la technologie LFC permet de limiter la volatilisation des métaux lourds, donc leur teneur dans les fumées.

Les fumées de combustion passent par des dépoussiéreurs électrostatiques (électro-filtres) qui captent la quasi-totalité des cendres volantes. L'addition de filtres à manche permet d'atteindre des rendements de 99,9 % de dépoussiérage des fumées. Une désulfuration secondaire ainsi qu'une dénitrification des fumées peuvent être pratiquées. Les cendres volantes récupérées au bas de trémies de dépoussiérage sont évacuées vers leur lieu de stockage par des sur-presseurs.

Le laps de temps nécessaire à la combustion du charbon, à la fusion (ou la libération des substances minérales par les minéraux à point de fusion élevé), au transport dans le flux gazeux vers les filtres et à la resolidification, n'est que de quelques secondes (Hower, 2012).

Les cendres volantes présentent une forme sphérique et une granulométrie comprise entre 0,1 et 200 microns dont environ 50% sont inférieurs à 30 microns. Elles présentent de façon exceptionnelle des particules de taille pouvant atteindre 500 microns. Les particules de plus de 100 microns sont des agglomérats de particules fines et des résidus de charbon imbrûlé. Les cendres volantes ont une faible densité et une grande surface spécifique. Elles représentent de l'ordre de 90% des résidus de combustion du charbon (François et al., 2006. Meij & te Winkel, 2007 ; Pandey & Singh, 2010, Blisset & Rowson, 2012).

Les cendres lourdes extraites au bas des foyers (dites aussi cendres de foyer, cendres de lit, ou mâchefers) sont évacuées séparément (trémie) et ne sont pas mélangées aux cendres volantes. Elles représentent de l'ordre de 10% de la masse des résidus de combustion, les produits de désulfuration-dénitrification (50% de la taille < à 0,3 micron) n'en représentant que moins de 0,5% (Meij & te Winkel, 2007).

**Tab. 4.1 : Centrales thermiques au charbon en France\***

Centrale thermique de :	Technologie	Opérateur
Blénod-lès-Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle)	Flamme	EDF
Bouchain (Nord)	Flamme	EDF
Cordemais (Loire-Atlantique)	Flamme	EDF
Le Havre (Seine-Maritime)	Flamme	EDF
La Maxe (Moselle)	Flamme	EDF
Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne)	Flamme	EDF
Hornaing (Nord)	Flamme	E.ON France
Saint-Avold, Emile Huchet (Moselle)	LFC	E.ON France
Montceau-les-Mines, Lucy (Saône-et-Loire)	Flamme	E.ON France
Gardanne (Bouches-du-Rhône)	LFC	E.ON France

\* enquête téléphonique réalisée en février 2012

### 3.3 - Préparation éventuelle et stockage

En fonction de leur conformité à la norme NF EN 450-2, les cendres volantes de centrale thermique pourront être utilisables dans la constitution de béton. Elles seront conservées à l'abri de l'humidité dans des silos et transportées à l'abri de la pluie dans des citernes (camion ou wagon). Ce mode de conservation et de transport est le seul adapté aux cendres volantes ayant un pouvoir hydraulique (cendres « silico-calciques » – ou « calciques »- voir infra).

Les cendres non conformes à la norme NF EN 450-2 et non calciques, sont entreposées à l'air libre et éventuellement humidifiées par arrosage pour éviter leur envol sous l'effet du vent. Les cendres humidifiées peuvent être transportées par camion-benne ou wagon. Ces cendres peuvent aussi être acheminées sur leurs aires de stockage – en l'occurrence des bassins de décantation – par voie hydraulique (cendres « liquéfiées »). Présentant une certaine difficulté à se drainer (car hydrophiles), ces cendres peuvent avoir après égouttage des teneurs en eau supérieures à 50% (cf. OFRIR version 1).

## 4. Caractéristiques physico-chimiques

Les cendres volantes de centrale thermique sont généralement constituées d'un mélange de composés minéraux et organiques, issus d'une part du charbon et d'autre part néoformés dans la chaudière et dans le flux gazeux (Hower, 2012). Leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques varient en fonction de la nature du charbon, des conditions de combustion, du type de traitement des fumées, de leur mode de stockage (Pandey et al., 2010).

### 4.1 - Composition élémentaire

Les éléments majeurs des cendres volantes sont Si, Al, Fe (oxydes de fer) et Ca (oxydes), ainsi que Mg, K, Na, S, P et Ti en pourcentages significatifs (cf. Tableau 5.1). L'aluminium dans les CVCT est essentiellement lié à des aluminosilicates insolubles, ce qui limite sa toxicité. Le cation prédominant des CVCT est Ca, suivi de Mg, Na et K (Matti et al., 1980). Les cendres volantes contiennent des macronutriments essentiels tels que P, K, Ca, Mg et S et des micro-nutriments tels que Fe, Mn, Zn, Cu, Co, B et Mo (Pandey & Singh, 2010). Elles sont aussi riches en éléments traces comme, As, Ba, Cd, Cu, Mn, Ni, Zn dont certains (Hg, Co, Cr) sont concentrés dans la fraction la plus fine (Pandey & Singh, 2010 ; Pontes et al., 2010 ; Blissett & Rowson, 2012), et en terres rares comme U, Th, Ce, Nd, Sm, La, Y et Gd (Smolka-Danielowska, 2010).

Le *National Institute of Standards and Technology* (NIST, Gaithersburg, MD, Etats-Unis) propose un matériau de référence standard pour les cendres volantes (SRM<sup>®</sup> 1633b/c – *Constituents Elements in Coal Fly Ash*) issues de houille (*bituminous coal fly ash*) dont les teneurs certifiées (**marquées \***) et non certifiées, sont indiquées dans le tableau 5.1.

La composition chimique (et minéralogique) des cendres volantes peut varier en fonction de la composition du minerai initial, des conditions de combustion, du type de traitement des émissions, des conditions de stockage, ce qui aura des répercussions sur leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques (Meij & te Winkel, 2007 ; Pandey & Singh, 2010). Toutefois, les teneurs rapportées par la plupart des auteurs pour les cendres issues de houille - de pays producteurs ou importateurs (Allemagne, Brésil, Etats-Unis, Japon, Pologne) - ne varient pas de façon significative par rapport à ces valeurs (Ohki et al., 2005 ; Soco & Kalembkiewicz, 2007 ; Blaha et al., 2008 ; Norris et al., 2010 ; Pontes et al., 2010 ; Kashiwakura et al., 2010 ; Smolka-Danielowska, 2010). Pour un pays importateur à partir de plusieurs sources tel que la France, du fait de la rareté des données françaises (Tiruta-Barna et al., 2006), les teneurs proposées par le NIST peuvent donc être considérées comme de ordres de grandeur représentatifs (**cendres volantes siliceuses**). L'étude de Moreno et al. (2005) fournit des intervalles de valeurs (1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles) de plusieurs éléments traces calculés à partir de 23 cendres volantes produites en Europe par des **fours à flamme**. Barbosa et al. (2011) fournissent des données relatives à des cendres volantes récentes issues de **four à lit fluidisé circulant** – LFC (en Allemagne).

Concernant des cendres volantes pouvant être issues de déstockage après plusieurs années, on constate que Jambhulkar & Juwarkar (2009) indiquent, pour des cendres issues d'un **dépôt** de 10 hectares (donc de plusieurs années d'existence) en Inde, des teneurs sensiblement différentes pour certains métaux : plus faibles pour Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, plus fortes pour Cd. Les observations de Bednar et al. (2010) pour les cendres volantes d'un dépôt de 60 ans situé aux Etats-Unis vont toutes dans le sens d'une diminution des teneurs par rapport aux valeurs de référence du NIST. Afin de permettre la comparaison avec des cendres de fraîche production, ces teneurs sont indiquées dans le tableau 5.1.

**Tab. 5.1: Composition chimique de cendres volantes de centrale thermique**

Elément (Unité)	NIST, 2004	Tiruta-Barna et al., 2006	Moreno et al., 2005	Barbosa et al., 2011	Jambhulkar & Juwarkar, 2009	Bednar et al., 2010
	"USA"	"France"	"Europe"	LFC	Dépôts	
Al (%)	15,05 ± 0,27					1,86
Ca	1,51 ± 0,06					0,67
Fe	7,78 ± 0,23				1,05 ± 0,02	1,75
Mg	0,482 ± 0,008					0,19
K	1,95 ± 0,03					0,27
Si	23,02 ± 0,08					
Na	0,201 ± 0,003					0,048
S	0,2075 ± 0,0011					
Ti	0,791 ± 0,014					
As (mg/kg)	136,2 ± 2,6	50	40-97	< 0,64		46,9
Ba	709 ± 27	1700	135-323	779 ± 89,9		510
Cd	0,784 ± 0,006	<1	1-2	< 6,4	4,78 ± 0,36	0,272
Cr	198,2 ± 4,7	220	137-172	59,1 ± 10,5	20,25 ± 0,99	33,5
Cu	112,8 ± 2,6	140	73-118	59,6 ± 0,6	21,08 ± 0,49	50
Pb	68,2 ± 1,1	63	59-109	< 19,9	10,75 ± 0,11	20,2
Mn	131,8 ± 1,7	515			449 ± 7,78	88,7
Hg	0,1431 ± 0,0018	0,4	0,2-0,3	< 0,24		0,0279
Ni	120,6 ± 1,8	115	87-144	23,3 ± 15,1	20,2 ± 1,04	34
Se	10,26 ± 0,17		6-13	1,7 ± 0,2		5,44
Sr	1041 ± 0,36	870	384-1647			
Th	25,7 ± 1,3		25-37			1,35
U	8,79 ± 0,36		9-18			
V	295,7 ± 3,6	360	202-278			86,2
Sb*	6		4-8	0,07 ± 0,008		0,145
Br*	2,9					
Ce*	190					
Co*	50	46	30-48			16,9
Cs*	11					
Dy*	17					
Eu*	4,1					
Gd*	13					
Hf*	6,8					
Ho*	3,5					
La*	94					
Lu*	1,2					
Nd*	85					
P*	2300					
Rb*	140					
Sc*	41					
Sm*	20					
Ta*	1,8					
Tb*	2,6					
Tl*	5,9	11				
Tm*	2,1					
W*	5,6					
Yb*	7,6					
Zn*	210	146	123-175	93,9 ± 2,1	40,70 ± 0,66	41,5

La norme NF EN 197-1 distingue deux types de cendres volantes (siliceuses ; calciques), suivant, en particulier leur teneur en chaux (voir tableau. 5.2).

**Tab.5.2 : Dénomination des cendres volantes selon la norme NF EN 197-1**

Teneurs	Cendres volantes	
	Siliceuses (notées V)	Calciques (notées W)
CaO totale (%)	< 10	≥10 (si ≤15 % : il faut SiO <sub>2</sub> ≥ 25 %) (si >15 % : il faut résistance en compression ≥ 10 MPa à 28 jours, suivant la norme EN 196-3)
CaO libre (%)	< 1 (< 2,5 % si expansion ≤ 10 mm suivant la norme EN 196-3 : mélange 30% cendre + 70% CEM 1)	- (expansion ≤ 10 mm suivant la norme EN 196-3 : mélange 30% cendre + 70% CEM 1)
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	> 70	-
Pouvoir liant	Pouzzolanique	Pouzzolanique, voire hydraulique

Les cendres calciques sont issues des centrales à lit fluidisé circulant (LFC). Elles sont aussi appelées « silico-calciques ». Les cendres siliceuses peuvent provenir de centrales à LFC comme de centrales à flamme. Elles sont aussi appelées « silico-alumineuses » (cf. norme NF P98-111).

Le tableau 5.3 fournit la teneur (en oxydes) des principaux constituants des cendres siliceuses et des cendres calciques, d'après Ferrand (1998, cf. OFRIR 1). Ces ordres de grandeurs sont complétés par des valeurs fournies par des références plus récentes (Iyer, 2002 ; Tiruta-Barna et al., 2006).

**Tab. 5.3 : Composition (en oxydes) des cendres volantes siliceuses et calciques.**

Teneurs	CV siliceuses			CV calciques
	Ferrand, 1998	Iyer, 2002	Tiruta-Barna et al., 2006	Ferrand, 1998
SiO <sub>2</sub> (%)	40 à 60	49,9	57	15 à 50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	25 à 35	16,2	28,5	5 à 25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7 à 10	22,3	6,3	5 à 10
CaO (%) ; dont CaO libre	1 à 5 ; ≈ 0,15	4,5	1,7	10 à 50 ; 1 à 30
MgO (%)	≈ 2		1,7	< 5
K <sub>2</sub> O (%)	≈ 5		4,3	/
Na <sub>2</sub> O (%)	< 1		0,5	/
SO <sub>3</sub> (%)	< 1		0,25	5 à 25
Alcalins (%)	≈ 0,30			< 5



La nature minéralogique et chimique des cendres volantes siliceuses leur confère un pouvoir pouzzolanique. La teneur en chaux libre des cendres volantes calciques leur confère un pouvoir hydraulique [OFRIIR1].

**Pouvoir pouzzolanique** : un liant est dit pouzzolanique lorsque son mélange avec de la chaux et de l'eau conduit à la formation de composés stables (prise), qui peuvent agglomérer les constituants d'un mélange.

**Pouvoir hydraulique** : un liant est dit hydraulique si au contact de l'eau, il forme des composés stables y compris dans l'eau (prise), qui sont capables d'agglomérer les constituants d'un mélange (le ciment Portland est un liant hydraulique).

Les cendres volantes qui contiennent plus de 15% de CaO (CVCT calciques) sont constituées de verre d'aluminosilicate de calcium en plus d'importantes proportions de composés de calcium cristallin dont  $C_3A$ ,  $C_4A_3S$ , CS et CaO (Blisset & Rowson, 2012). Celles qui contiennent moins de 10% de CaO (CVCT siliceuses) se composent essentiellement de verre d'aluminosilicate et généralement ne contiennent pas de composés de calcium cristallin.

Vassilev et Vassileva (2007) suggèrent une nouvelle classification des cendres volantes issue de l'étude de 41 cendres volantes européennes. Elle est basée sur un regroupement des principaux oxydes ensemble afin de créer une classification en 4 niveaux et ne concerne pas uniquement les applications pour le ciment (tableau 5.4).

**Tab.5.4 : Classification selon la composition des CVCT** (d'après Vassilev et Vassileva, 2007)

Oxydes (%)	Cendres volantes			
	Sialic	Calsialic	Ferrisialic	Ferricalcsialic
$SiO_2 + Al_2O_3 + K_2O + TiO_2 + P_2O_5$	> 77	< 89	< 89	< 77
$CaO + MgO + SO_3 + Na_2O + MnO$	< 11,5	> 11,5	< 11,5	> 11,5
$Fe_2O_3$	< 11,5	< 11,5	> 11,5	> 11,5

## 4.2 - Composés organiques

La plupart des fours produisent des cendres volantes à faible teneur en carbone (Hower, 2012). La combustion du charbon par les techniques à flamme et à LFC est quasi complète et ne laisse que de l'ordre de 5% de carbone résiduel dans les cendres volantes (Meij & te Winkel, 2007 ; Bednar et al., 2010). Ainsi, malgré la présence de chlore et de fluor dans le charbon, cette combustion permet de prévenir la formation de **dioxines et furanes**. De plus, la présence de  $SO_3$ , formé à partir du  $SO_2$  libéré en grande quantité par la combustion, agit comme un inhibiteur de formation des dioxines (Meij & te Winkel, 2007). Meij et te Winkel (2001) donnent des valeurs inférieures au picogramme I-TEQ par gramme de cendres volantes issues de four à flamme.

L'intensité de combustion (déterminée par la température, le temps de séjour dans la chaudière et le ratio combustible/air) permet aussi de prévenir la formation de **HAP** (conversion quasi intégrale de C en CO<sub>2</sub>).

Le principe de fonctionnement des brûleurs à faible émission de NOx (utilisant le procédé dit « *low NOx* ») consiste à maintenir la température et le surplus d'oxygène aussi bas que possible. Leur réglage limite la formation de NOx tout en permettant un fort taux de conversion du carbone en CO<sub>2</sub>.

Toutefois, le procédé *low-NOx* peut conduire à une augmentation du taux d'**imbrûlé** (*LOI*), ce qui réduit la qualité des cendres volantes (Blisset & Rowson, 2012). Les brûleurs à faible émission de NOx peuvent en effet occasionnellement conduire à un taux significatif de carbone imbrûlé (10 à 30%) qui, par exemple aux Etats-Unis aboutit à des cendres volantes hors spécifications (c'est-à-dire de classe ni F, ni C, selon la norme ASTM C618 (Cetin et al., 2012)).

Les conditions de combustion des brûleurs à faible émission de NOx (faible température, faible taux d'oxygène) peuvent causer la formation de HAP. La formation de HAP est de quelques microgrammes par mètre cube, dont 50% sont captés par le système de désulfuration des fumées (Meij & te Winkel, 2007). Les résidus de désulfuration des fumées ne sont pas mélangés aux cendres volantes.

L'emploi de combustible non charbonneux peut aussi conduire à des cendres volantes à forte teneur en carbone (Hower, 2012). Le carbone étant absorbant, la norme ASTM C618 (*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*) limite à 6% la perte au feu des cendres volantes destinées à l'emploi dans les ciments Portland (Hower, 2012).

### 4.3 - Caractéristiques minéralogiques

Les cendres volantes sont constituées principalement d'une **phase vitreuse amorphe** (SiO<sub>2</sub>), et de quelques phases cristallines. Les **phases cristallines** sont essentiellement mullite (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), quartz (SiO<sub>2</sub>), magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), opaline (SiO<sub>2</sub>), hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), chaux (CaO), chlorite ((Mg,Fe)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·(Mg,Fe)<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub>), feldspaths (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ; NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) et spinels (FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), et leur proportion varie en fonction de la minéralogie du minerai (Moreno et al., 2005 ; Kutchko & Kim, 2006). Les spinels sont courants dans les cendres volantes issues de charbon riche en Fe, tandis que la chaux et les sulfates, se trouvent dans les cendres volantes issues de charbon riche en Ca (Hower, 2012).

Le refroidissement des particules dans les gaz d'extraction, leur confère une forme sphérique. Leur diamètre est compris entre 0,01 et 100 microns. Certaines sont solides ou creuses (les céosphères). D'autres sont remplies de particules amorphes (plerosphères) (Pandey & Singh, 2010 ; Hower, 2012)

L'hydratation des cendres volantes conduit à la formation de **minéraux secondaires** : portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>), calcite (CaCO<sub>3</sub>), gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), ettringite (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3 CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O), brucite (Mg(OH)<sub>2</sub>) (Tiruta-Barna et al., 2010). La littérature scientifique est très pauvre concernant les données relatives à la minéralogie des éléments traces (Tiruta-Barna et al., 2010).

L'ettringite montre une forte capacité de piégeage des métalloïdes tels que As, Cr, Sb dans sa trame, toutefois compte tenu de la cinétique de formation de l'ettringite, celle-ci a un effet uniquement à long terme (Izquierdo & Querol, 2012).

Certaines particules des cendres volantes sont **magnétiques**, elles se trouvent principalement dans les fractions inférieures à 63 microns (Blaha et al., 2008). Les principaux minéraux de la fraction **non magnétique** des cendres volantes sont le quartz et la mullite. Outre ces minéraux, la fraction magnétique contient de la magnétite, formée principalement pendant la combustion à partir de la pyrite contenue dans le minerai, et de l'hématite. La teneur en fer est logiquement plus importante dans la fraction magnétique (23 à 66%) que dans l'autre (moins de 23%). La fraction magnétique est enrichie en Co, Ni et Mn, et la fraction non magnétique, en K, Al et Ca (Kukier et al., 2003, Lu et al., 2009).

## 5. Caractéristiques géotechniques

### 5.1 - Granularité

Le matériau se présente sous la forme d'une poudre dont la granulométrie est comprise entre 0,5 et 315 microns (les plus grosses particules sont agglomérées et ou des imbrulés (cf Section 4.2).

Pour que les cendres siliceuses soient utilisables en technique routière, leurs passants à 40  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$  (cf. XP P 18-540 et X 11-640) doivent être respectivement supérieurs à 40 % et 70 % (cf. NF P 98-116).

La finesse Blaine (surface spécifique) est élevée puisqu'elle est en général supérieure à 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  (ce qui n'est pas éloigné des ciments classiques) et même supérieure à 1000  $\text{m}^2/\text{kg}$  dans le cas de certaines cendres de LFC.

### 5.2 - Classification géotechnique

La norme NF P 11-300 prend uniquement en compte les cendres volantes « silico-alumineuses » (c'est à dire siliceuses). Elle les classe dans la gamme des sous-produits industriels, catégorie **F2** « Cendres volantes silico-alumineuses de centrales thermiques » (SETRA & LCPC, 2000). Du point de vue géotechnique, il est d'usage de les assimiler à la classe **A1**, compte tenu de leur comportement (sans ajout d'activant ni de chaux), en tant que matériau de remblai. Leurs paramètres considérés comme significatifs pour le réemploi par la norme sont d'une part le rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau à l'optimum Proctor normal, et d'autre part leur valeur d'IPI à la teneur en eau normale.

## 6. Caractéristiques environnementales

### 6.1 - Acceptabilité environnementale

La solubilité des éléments contenus dans les CVCT est étroitement liée aux phases auxquelles ils sont liés et aux conditions auxquelles ils sont exposés (notamment de pH) (Blissett & Rowson, 2012).

Le **pH** des cendres volantes varie de 4,5 à 12,0 en fonction de la teneur en soufre du minerais (qui dépend de son origine) et de leur teneur en hydroxydes et carbonates de calcium et de magnésium (influencée par le procédé) (François et al., 2006 ; Jambhulkar & Juwarkar, 2009 ; Pandey & Singh, 2010). Les cendres ayant un rapport Ca/S inférieur à 2,5 génèrent des percolats acides, celles dont le Ca/S est supérieur produisent des percolats alcalins (Anisworth & Rai, 1987 ; Pandey & Singh, 2010), c'est le cas de l'échantillon de référence du NIST (Ca/S = 7,5). Ceci, via l'effet sur le pH, exerce une influence prépondérante sur la lixivabilité des cendres volantes (Izquierdo & Querol, 2012). Lors d'essais en colonne poussés à des taux V/V0  $\cong$  50 ; 75 et 3000, le pH de cendres volantes siliceuses de fraîche production (11,5-12,5) décroît jusqu'à 10 ; 9 et 8 respectivement (Rakotoarisoa, 2003). La capacité de neutralisation acide des deux cendres étudiées par Rakotoarisoa (2003) était de 0,3 à 1,5 meq H<sup>+</sup>/g.

La **solubilité** minimum de Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, U, Zn est observée dans la zone de pH 7-10, tandis que les espèces oxy-anioniques (As, Cr, Se, V, W) ont leur maximum de solubilité dans cette zone. En présence de Ca, la solubilité de As et V est réduite (Izquierdo & Querol, 2012).

La **lixiviation** des CVCT libère en premier lieu des sels (KCl, NaCl, BaCrO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) (Tiruta-Barna et al., 2010). Barbosa et al. (2009) constatent une faible lixivabilité (protocole d'essai de la norme EN 12457-2) des éléments traces contenus dans une cendre volante issue de four à lit fluidisé (LFC) : (As, Cd, Hg, Ni, Pb et Zn sont tous inférieurs aux limites de détection ; Cu = 0,9 mg/kg de MS ; Zn = 0,73 mg/kg de MS). La seule lixiviation notable est celle du Cr (1,7 mg/kg de MS) dont 1,3 mg/kg est sous forme Cr(VI). Lapa et al. (2007) font le même constat : Cr = 1,6 mg/kg, dont Cr(VI) = 1,1. Ces observations sont similaires à celles de Rakotoarisoa (2003) pour deux cendres volantes siliceuses (origines EDF et SNET) : après une période de lixiviation de 30 jours en batch (tests à L/S = 1 et 10 L/kg), une très faible quantité de Cr s'avère solubilisée (de l'ordre de 1 mg/kg, soit 1 à 1,8% de la teneur totale), la majorité l'étant sous forme Cr(VI). Avec le protocole de la norme NEN 7343, les concentrations en Pb, Cd, As, Cu, Ni, Hg, Zn et Sb sont inférieures aux valeurs limites de mise en décharge des déchets inertes fixées dans la Décision 2003/33/EC (Barbosa et al., 2011).

Les **extractions séquentielles** en 5 étapes (i) hydrosoluble ; (ii) acido-soluble (pH 5) et difficilement mobilisable ; (iii) oxydée ; (iv) difficilement réductible ; (v) résiduelle, réalisées par Soco & Kalembkiewicz (2007) indiquent que les métaux Cu (teneur = 35 mg/kg) et Zn (teneur = 93 mg/kg) se trouvent essentiellement sous formes réduite (42%), oxydée (31%) et résiduelle (24%) pour Cu, et oxydée (42%), résiduelle (30%) et réduite (25%) pour Zn. Les fractions solubles de Cu et Zn dans les conditions environnementales courantes (c'est-à-dire dans l'eau) ne sont que de l'ordre de 3 % (Soco & Kalembkiewicz, 2007).

Les extractions séquentielles en 5 étapes (i) hydro-soluble ; (ii) échangeable ; (iii) liée aux carbonates ; (iv) liée aux silicates ; (v) résiduelle, réalisées par Norris et al. (2010) à partir de l'échantillon standard NIST 1633b, indiquent aussi une très faible fraction hydrosoluble pour tous les éléments sauf Ca (14%). Le tableau 7.1 indiquent les principales valeurs significatives fournies par Norris et al. (2010), c'est-à-dire les fractions hydrosolubles de chaque élément, leur fraction prédominante, et lorsque celle-ci est la fraction résiduelle, la seconde fraction la plus importante. Il ressort que les fractions prédominantes sont *résiduelle* (pour Ba, Ca, Mg, Na et Sr) et

liée aux silicates (Al, Be, Cr, Co, Fe, K, Mn, Ni, V et Zn) et que la fraction échangeable est très minoritaire.

**Tab. 7.1 : Fractions extraites (% de la teneur totale), d'après Norris et al., 2010.**

Étapes	1	2	3	4	5
Éléments	Hydrosoluble (%)	Echangeable (%)	Liée aux carbonates (%)	Liée aux silicates (%)°	Résiduelle (%)
Al	0,16			88	
Ba	0,29		27		73
Be	0,87			78	
Ca	14		23		51
Cr	0,08			83	
Co	0,3			83	
Fe	0,09			87	
K	0,91			81	
Mg	0,56		10		96
Mn	0,17			89	
Na	2,5			15	73
Ni	0,21			93	
Sr	2,6		26		65
V	0,61			72	
Zn	0,34			77	

## 6.2 - Effets sur les écosystèmes - Ecotoxicité

Les conditions d'obtention des éluats de cendres volantes ont une grande influence sur les réponses des tests d'écotoxicité, mais ces réponses sont en général cohérentes avec les analyses chimiques (Stiernström et al., 2011). Selon Barbosa et al. (2011), les effets sur les bio-indicateurs sont attribuables au pH des lixiviats (produits par EN 12457-2) autant qu'à la biodisponibilité des métaux.

Pour un éluat produit selon la norme EN 12457-2, Barbosa et al. (2009) indiquent un faible niveau d'écotoxicité de cendres volantes issues de **four à lit fluidisé** (installation pilote) : pour *Daphnia magna* (inhibition de la mobilité),  $EC_{50}$  48h > 95% v/v (volume de lixiviat/volume total, c-à-d dilution) ; pour *Vibrio fischeri* (inhibition de la luminescence),  $EC_{50}$  30min > 99 % v/v. La granulométrie des cendres testées est : 82% (en masse)  $\leq$  10 microns ; 18% de dimension 10-40 microns (Barbosa et al., 2009). Une fraction plus grossière des mêmes cendres (échantillon 2 : 70%  $\leq$  40 microns ; 30% de dimension 40-200 microns) montre une certaine toxicité vis-à-vis de *Daphnia magna* ( $EC_{50}$  48h = 10%) et de *Vibrio fischeri* ( $EC_{50}$  30min = 24 %), leur éluat contient 1,7 mg/kg de Cr (Lapa et al., 2007). Karuppiah & Gupta (1997) identifient une corrélation entre la toxicité (*Vibrio fischeri*  $EC_{50}$  variant de 34 % à > 100% (c-à-d concentration du lixiviat) en fonction de la concentration en métaux) et la concentration en éléments traces et métaux (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni, Zn) des éluats. Les caractéristiques des lixiviats des deux échantillons testés par Barbosa et al. (2009) sont fournies dans le tableau 7.2.

**Tab. 7.2 : Caractéristiques des lixiviats des cendres volantes de LFC** (d'après Barbosa et al., 2009)

Paramètres	Lixiviat 1	Lixiviat 2
pH	7,6	6,8
Conductivité (microS/cm)	1660	1472
Fraction soluble - TDS (mg/kg)	20 619	23 511
DCD (mg/kg)	97	97
Indice Phénol (mg/kg)	< 0,52	< 0,52
Cyanures libres (mg/kg)	< 0,14	< 0,14
Eléments (mg extrait/kg de MS)		
As	< 0,03	< 0,03
Cd	< 0,34	< 0,34
Cr	1,7	< 0,53
Cr(VI)	1,3	< 0,53
Cu	0,89	< 0,43
Hg	< 0,01	< 0,01
Ni	< 0,66	5,3
Pb	< 1,0	< 1,1
Zn	0,73	7,8
Fe	< 0,63	< 0,63
Al	< 3,6	< 3,6

Meij & te Winkel (2007) font remarquer qu'une part importante des recherches sur la toxicité des CVCT, ne précise pas de quel procédé de production, ni de quelle partie de la centrale thermique, elles sont issues.

**CE<sub>50</sub>** : Concentration Efficace médiane, concentration où 50% de la population présente une réponse après une durée d'exposition donnée.

### 6.3 - Suivi environnemental

Deux lysimètres de 20 m<sup>3</sup> de cendres siliceuses (EDF et SNET) compactées à 1,1 et 1,2 tonne/m<sup>3</sup> (conditions d'un remblai) ont montré que les principales espèces lixiviées étaient les sulfates, Cr(VI), As et V (Rakotoarisoa, 2003). Les cendres prélevées après 42 mois d'exposition à la pluie (L/S finaux de 2,7 et 2,8 L/kg respectivement) ont montré que seul l'arsenic présentait une diminution sensible de sa teneur totale : de 26 à 16 mg/kg ; et de 50 à 21 mg/kg respectivement, c'est-à-dire des pertes de 40 à 60% de la masse initiale. La teneur en Cr, pour la première cendre est restée inchangée (190 mg/kg) ; pour la seconde elle n'a baissée que de 5% environ (220 à 207 mg/kg) ; conformément aux résultats de lixiviation en batch (Rakotoarisoa, 2003).

## 7. Aspects sanitaires

### 7.1 - Vecteur Air

Les cendres volantes de centrale thermique contiennent de la silice cristalline (ex. tridymite, cristobalite) à prendre en compte vis-à-vis des risques respiratoires pour les personnes les manipulant. Cela peut concerner aussi les personnes vivant à proximité des sites de manutention (François et al., 2006).

Le [décret 97-331 du 10 avril 1997](#), 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<sup>3</sup> pour le quartz ;
- 0,05 mg/m<sup>3</sup> pour la cristobalite et la trydimite.

### 7.2 - Vecteur Eau

Seule une référence japonaise fournit des informations spécifiquement relatives aux concentrations dans des lixiviats de CVCT. Au Japon, le bore, le fluor et l'arsenic sont considérés comme les éléments les plus dangereux des lixiviats de CVCT, les concentrations des lixiviats étant souvent au dessus des seuils réglementaires fixés dans la *Soil Contamination Protection Law* (2003.2.15). Les teneurs en arsenic peuvent atteindre plusieurs dizaines de ppm (Kashiwakura et al., 2010).

### 7.3 - Radioactivité

A partir de références relatives au charbon de différents pays (Brésil, Canada, Etats-Unis, Japon, Pologne) Smolka-Danielowska (2010), indique que le charbon contient en moyenne 1 mg/kg d'Uranium et 3 mg/kg de Thorium. Du fait, soit de leur température de vaporisation, soit de leur condensation sur les particules charbonneuses au niveau des filtres électrostatiques, l'enrichissement relatif des cendres volantes par rapport au charbon est nul ou très faible concernant ces éléments (Meij & te Winkel, 2007). La radio-activité de 24 échantillons de cendres volantes étudiés par Smolka-Danielowska (2010) en Silésie (Pologne) dépend ainsi surtout des radionucléides U-238 (12\* à 79 Bq.kg<sup>-1</sup>), Th-232 (34 à 141\*\* Bq.kg<sup>-1</sup>) et K-40 (377 à 795\*\*\* Bq.kg<sup>-1</sup>). Kovler et al. (2005), identifient Ra-226 (≈ 200 Bq.kg<sup>-1</sup>), Th-232 (≈ 200 Bq.kg<sup>-1</sup>) et K-40 (≈ 130 Bq.kg<sup>-1</sup>) comme radionucléides majeurs des cendres volantes. En outre, malgré une teneur en Ra-226, plus de 3 fois supérieure dans les cendres volantes que dans le ciment Portland CEM I 52,5N, le taux d'exhalation du Radon des cendres volantes est beaucoup plus faible (0,01 μBq.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> contre 0,14 μBq.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>). Les autres radionucléides identifiés dans les cendres volantes sont Ra-228, Pb-210, Ru-222 et Ru-220 (Pandey & Singh, 2010).

Valeurs repères :

\*  $12 \text{ Bq.kg}^{-1}$  est la radioactivité naturelle typique de l'eau de mer.

\*\*  $130 \text{ Bq.kg}^{-1}$  est la radioactivité naturelle typique du corps humain, principalement due à K-40.

\*\*\* $1000 \text{ Bq.kg}^{-1}$  est la radioactivité naturelle typique des granites.

## 8. Usages (Types d'infrastructures)

Les cendres volantes sont utilisées pour de nombreuses applications, soit seules, soit mélangées à d'autres constituants. L'addition de cendres volantes au ciment Portland améliore sa maniabilité (Barbosa et al., 2011). Elles peuvent rentrer dans la composition de **ciments**, conformément à la NF P 15-301, de juin 1994, de **liants hydrauliques routiers** (conformément à la NF P 15-108, de décembre 2000), de **bétons** (conformément la NF EN 450-1) ainsi que dans de nombreux produits brevetés avec des utilisations diverses et notamment le remblaiement de tranchées (produits auto-compactants), le comblement de cavités ainsi que de produits auto-nivelants.

### 8.1 – Utilisation des CVCT siliceuses (classiques)

#### 8.1.1 - Utilisation en terrassement

Les CVCT siliceuses ont souvent été utilisées pour l'élaboration de remblais, en particulier sur des sols compressibles. En vrac et humides, ces cendres présentent une masse volumique de l'ordre de  $1 \text{ t/m}^3$ . Après compactage sous l'énergie du Proctor normal, on obtient une masse volumique sèche comprise entre 1 et  $1,3 \text{ t/m}^3$ , la teneur en eau optimale variant de 20 à 35 %, ce qui reste sensiblement moins dense que les sols. Les courbes Proctor sont relativement plates, ce qui permet de mettre en œuvre le matériau sous une palette de teneurs en eau large. Cependant, un excès d'eau peut conduire à une perte importante de la portance immédiate.

Les CVCT présentent une forte capacité de rétention de l'eau : leur humidité résiduelle après ressuyage à pression normale est de 26-27%. Leur perméabilité, compactées à l'OPN est de l'ordre de  $10^{-6} - 10^{-7} \text{ m/s}$  (Tiruta-Barna et al., 2010). Des essais sur colonnes et sur carottes montrent que la dispersivité hydraulique au sein des cendres compactées est très faible (Rakotoarisoa, 2003).

Compte tenu de leur caractère hydrophile, les cendres en remblais ne doivent pas être au contact immédiat de l'eau (pas de remblais en zone inondable). Pour éviter les remontées d'eau, il est préférable d'établir un soubassement perméable à l'aide une couche de matériau peu fragmentable et peu dégradable (les classes D21 ou D31 selon la norme NF P 11-300 conviennent). Cette isolation du remblai pouvant s'avérer indispensable sur certains sites, alors que le drainage s'avère inopérant. Dans le cas de remblais de faible hauteur (saturation plus rapide du volume, sensibilité au gel accrue due à une importante présence d'eau), des problèmes de stabilité ont été rencontrés. Il est donc préférable de privilégier des remblais de grande masse.



L'utilisation de compacteurs à pneus est recommandée (Figure 1), l'utilisation de compacteurs vibrants pouvant conduire à de brutales pertes de portance. Pour éviter le ravinement, il faut veiller au bon compactage des flancs (la meilleure solution est d'opérer par sur-largeurs) et à leur protection (terre végétale ensemencée).

Dans le cadre d'une utilisation en remblai, le matériau devra satisfaire aux spécifications définies dans la norme A 05-252 de 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 matériau de remblai", à savoir résistivité, pH et teneur en sels solubles.



**Figure 1 : Exemple d'utilisation en terrassement**

(d'après PREDIS Nord-Pas-de-Calais: Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels, *in* OFRIR1)

### 8.1.2 - Utilisation en couche de forme

Les fonctions de la couche de forme sont multiples (assurer le compactage des couches supérieures, assurer la traficabilité des engins approvisionnant les matériaux de construction de la chaussée, résister au gel,...). Certaines de ces conditions ne permettent d'envisager les cendres volantes qu'avec un traitement aux liants hydraulique ou une activation calcique (alors que des cendres de foyer, c'est-à-dire la fraction 0-2 mm, ont souvent été utilisées). Certaines couches de forme en cendres volantes traitées à la chaux et au gypse ont déjà été réalisées, technique également utilisée en couche de fondation (cf. utilisation en structure de chaussée).

### 8.1.3 - Utilisation en couche de chaussée

La masse volumique de la phase vitreuse amorphe des CVCT, inférieure à  $1\text{g.cm}^{-3}$ , permet leur usage en tant que filler de faible densité (Hower, 2012).

Trois grands types de formulation sont à ce jour à répertorier en structure de chaussée : les Graves Cendres Volantes Chaux, les Grave Laitier Cendres Volantes Chaux, et les Cendres Volantes Traitées à la Chaux et au Gypse.

#### **8.1.3.1 – Graves Cendres Volantes Chaux (GCV : NF EN 14227-1,2,5, de février 2005)**

Cette technique est utilisée en couche de fondation et/ou couche de base. La chaux est utilisée comme activant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA & LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe 3 et des résistances en traction directe à 360 jours supérieures à 1,5 MPa.

Le catalogue des structures type de chaussées neuves pour le réseau routier national (SETRA & LCPC, 1998) prend en compte ce matériau dans le cadre de structures semi-rigides (GCV/GCV).

#### **8.1.3.2 - Graves Laitier Cendres Volantes (GLCV : NF EN 14227-1,2,5, de février 2005)**

Cette technique est utilisée en couches de fondation et/ou couches de base. La chaux est utilisée comme activant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA & LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe 3.

Des fiches régionales complémentaires au catalogue de structures type de chaussées neuves pour le réseau routier national (SETRA & LCPC, 1998) ont été réalisées pour des structures semi-rigides (GLCV3/GLCV3) et pour des structures mixtes (Grave Bitume 3/ GLCV3).

#### **8.1.3.3 - Cendres Volantes Traitées à la Chaux et au Gypse (NF EN 14227-3, de février 2005)**

Cette technique est parfois utilisée en couche de fondation (dans le cas de structures semi-rigides ou inverses). La cendre volante y joue à la fois le rôle de granulat et de liant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA & LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe 2. Les formulations habituellement rencontrées sont :

- 91 % de cendres volantes + 4 % de chaux vive + 5 % de gypse ;
- 90 % de cendres volantes + 5 % de chaux éteinte + 5 % de gypse.

Les proportions indiquées dans les normes (moins de 5% de chaux vive ; moins de 6% de chaux éteinte ; moins de 7% de Gypse) sont destinées à obtenir à la fois une résistance au jeune âge intéressante et à éviter des gonflements du mélange dus à la formation d'ettringite.

Cette technique a été très utilisée dans les années 1970-1980 dans la région Nord-Pas-De-Calais (Figure 2). Sa mise en œuvre nécessite une organisation de chantier parfois difficile pour éviter des phénomènes de feuilletage susceptibles d'apparaître en partie supérieure de la couche (ce feuilletage entraînant un décollement avec la couche supérieure qui accélère le vieillissement de la chaussée). Pour éviter de tels phénomènes, il est préférable d'utiliser des compacteurs à pneus, si possible d'enlever les cm supérieurs après compactage, et surtout d'appliquer la couche supérieure (en matériaux non traités ou traités aux liants hydrauliques) avant la prise du matériau (un délai de 4 heures est un maximum).



Figure 2 : Mise en œuvre de Cendre-Volante-Chaux-Gypse (in OFIR1)

## 8.2 - Utilisation des CVCT calciques (de LFC)

Le pouvoir hydraulique de ces cendres permet leur valorisation en tant que liant. En structure de chaussée, ces cendres volantes sont employées comme constituant d'un liant pour traitement de sol, de sables ou de graves (d'un ciment, conformément à la norme NF EN 197-1, ou d'un liant hydraulique conformément à la NF P 15-108) ou d'un mélange lié. Ces produits font l'objet de brevets ou d'appellations commerciales protégées.

## 9. Références bibliographiques

- Anisworth C.C., Rai D., 1987. Chemical characterization of fossil fuel waste, EPRI EA-5321, Electric Power Res. Inst., Palo Alto.
- ASTM C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcinated natural possolan for use in concrete, 1er Janvier 2012.
- Barbosa R., Lapa N., Boavida D., Lopes H., Gulyurtlu I., Mendes B., 2009. Co-combustion of coal and sewage sludge: Chemical and ecotoxicological properties of ashes, *Journal of Hazardous Materials* 170, pp. 902-909.
- Barbosa R., Lapa N., Lopes H., Gulyurtlu I., Mendes B., 2011. Stabilization/solidification of fly ashes and concrete production from bottom and circulating ashes produced in a power plant working under mono and co-combustion conditions, *Waste Management* 31, pp. 2009-2019.
- Bednar A.J., Chappell M.A., Seiter J.M., Stanley J.K., Averett D.E., Jones W.T., Pettway B.A., Kennedy A.J., Hendrix S.H., Steevens J.A., 2010. Geochemical investigation of metal release from submerged coal fly ash using extended elutriate tests, *Chemosphere* 81, pp. 1393-1400.
- Blahu U., Saptoka B., Appel E., Stanjek H., Rösler W., 2008. Micro-scale grain-size analysis and magnetic properties of coal-fired power plant fly ash and its relevance

- for environmental magnetic pollution studies, *Atmospheric Environment* 42 (36), pp. 8359-8370.
- Blissett R.S., Rowson N.A., 2012. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash, *Fuel, in press* (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112002335?via%3Dihub>)
- Carles-Gibergues A., 1978. Propriétés hydrauliques des cendres volantes sulfo-calciques de Gardanne, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 93, pp. 5-8.
- Cetin B., Aydilek A.H., Guney Y., 2012. Leaching of trace metals from high carbon fly ash stabilized highway base layers, *Resources Conservation and Recycling* 58, pp. 8-17.
- Circulaire n° 96-85 du 11/10/96 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. Equip. n°1109-96/93 du 10 décembre 1996.
- Ferrand D., 1998. Cendres volantes de lit fluidisé circulant, Charbon : cortèges minéralogiques, traitement thermique et matériaux néoformés, Thèse de l'Université de Montpellier II.
- François D., Pihl K.A., Loorents K.J., Eighmy T.T., van der Sloot H.A., Volatier L., Delolme C. Hjelmar O., 2006. Methodology for assessing alternative materials for road construction. *Deliverable n° 16 of the SAMARIS project*, Contract n° GRD2/2000/30228, Mars 2006, 95 p. + annexes.
- Hower J.C., 2012. Petrographic examination of coal-combustion fly ash, *International Journal of Coal Geology* 92, pp. 90-97.
- Iyer, R., 2002. The surface chemistry of leaching coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials* B93, pp. 321-329.
- Izquierdo M., Querol X., 2012. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview, *International Journal of Coal Geology* 94, pp. 54-66.
- Jambhulkar H.P., Juwarkar A.A., 2009. Assessment of bioaccumulation of heavy metals by different plant species grown on fly ash dump, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72 (4), pp. 1122-1128.
- Karuppiah M., Gupta G., 1997. Toxicity of metals in coal combustion ash leachate, *Journal of Hazardous Materials* 56, pp. 53-58.
- Kashiwara S., Ohno H., Matsubae-Yokoyama K., Kumagai Y., Kubo H., Nagasaka T., 2010. Removal of arsenic in coal fly ash acid washing process using dilute H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solvent, *Journal of Hazardous Materials* 181 (1-3), pp. 419-425.
- Kovler K., Perevalov A., Steiner V., Metzger L.A., 2005. Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation, *Journal of Environmental Radioactivity* 82, pp. 321-334.
- Kukier U., Ishak C.F., Summer M.E., Miller W.P., 2003. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions, *Environmental Pollution* 123 (2), pp. 255-266.

- Kutchko B.G., Kim A.G., 2006. Fly ash characterization by SEM-EDS, **Fuel** 85, pp. 2537-2544.
- Lapa N., Barbosa R., Lopes M.H., Mendes B., Abelha P., Gulyurtlu I., Santos Oliveira J., 2007. Chemical and ecotoxicological characterization of ashes obtained from sewage sludge combustion in a fluidised-bed reactor, **Journal of Hazardous Materials** 147, pp. 175-183.
- Liu G., Zhang H., Gao L., Zheng L., Peng Z., 2004. Petrological and mineralogical characterizations and chemical composition of coal ashes from power plants in Yanzhou mining district, China, **Fuel Processing Technology** 85, pp. 1635-1646.
- Lu S.G., Chen Y.Y., Shan H.D., Bai S.Q., 2009. Mineralogy and heavy metal leachability of magnetic fractions separated from some Chinese coal fly ashes, **Journal of Hazardous Materials** 169 (1-3), pp. 246-255.
- Matti S.S., Mukhopadhyay T.M., Gupta S.K., Banerjee S.K., 1990. Evaluation of fly ash as a useful material in agriculture, **J. Ind. Soc. Soil Sci.** 38, pp. 342-344.
- Meij R., te Winkel H., 2001. Health aspects of coal fly ash, International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, Proceedings of the international symposium, 7 p..
- Meij R., te Winkel H., 2007. The emission of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations, **Atmospheric Environment** 41, pp. 9262-9272.
- Moreno N., Querol X., Plana F., Andres J.M., Janssen M., Nugteren H., Janssen-Jurkovicova M., Jones R., 2005. Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion flyashes, **Fuel** 84, pp.1351-1363.
- National Institute of Standards and Technology (NIST), 2004. Certificate of Analysis – Standard Reference Material® 1633b – Constituents Elements in Coal Fly Ash, 5 p.
- Norris P., Chen C.W., Pan W.P., 2010. A technique for sequential leaching of coal and fly ash resulting in good recovery of trace elements, **Analytica Chimica Acta** 663, pp. 39-42.
- Ohki A., Nakajima T., Sakaguchi Y., Iwashita A., Takanashi H., 2005. Analysis of arsenic and some other elements in coal fly ash by X-ray photoelectron spectroscopy, **Journal of Hazardous Materials** B119 (1-3), pp. 213-217.
- Pandey V.C., Singh N., 2010. Impact of fly ash incorporation in soil systems, **Agriculture, Ecosystems and Environment** 136 (1-2), pp. 16-27.
- Pontes F.V.M., Mendes B.A., de Souza E.M.F., Ferreira F.N., da Silva L.I.D., Carneiro M.C, Monteiro M.I.C., de Almeida M.D., Neto A.A., Vaitsman D.S., 2010. Determination of metals in coal fly ashes ultrasound-assisted digestion followed by inductively coupled plasma optical emission spectrometry, **Analytica Chimica Acta** 659 (1-2), pp. 55-59.
- PREDIS Nord-Pas-de-Calais, 2002. Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels, Juillet 2002.
- Rakotoarisao Z., 2003. Prédiction du comportement environnemental des résidus de procédés thermiques (RPT) utilisés comme matériaux de travaux publics, *Thèse*

de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 210 p. + annexes.

- Seames W.S., Sooroshian J., Wendt J.O.L., 2002. Assessing the solubility of inorganic compounds from size-segregated coal fly ash aerosol impactor samples, ***Aerosol Science*** 33, pp. 77-90.
- SETRA & LCPC, 1998. Guide d'application des normes pour le réseau routier national.
- SETRA & LCPC, 2000. Guide technique D 9233. Réalisation des remblais et des couches de forme.
- Soco E., Kalembkiewicz J., 2007. Investigation of sequential leaching behaviour of Cu and Zn from coal fly ash and their mobility in environmental conditions, ***Journal of Hazardous Materials*** 145 (3), pp. 482-487.
- Smolka-Danielowska D., 2010. Rare earth elements in fly ashes created during the coal burning process in certain coal-fired power plants operating in Poland – Upper Silesian Industrial Region, ***Journal of Environmental Radioactivity*** 101, pp. 965-968.
- Stiernström S., Hemström K., Wik O., Carlsson G., Bengtsson B.-E., Breitholtz M., 2011. An ecotoxicological approach for hazard identification of energy ash, ***Waste Management*** 31, pp. 324-352.
- Teissié J., de Bourgues D., Bautin F. 2001. Le charbon, Société Française de Chimie, 28 p. (<http://sfp.in2p3.fr>)
- Thijs M., 1984. Etat des connaissances relatives à l'utilisation en remblais routiers de cendres volantes de fraîche production provenant d'une ou plusieurs centrales, CR 21/84.
- Thijs M., 1990. Chantier pilote en cendres volantes provenant de la combustion de charbon broyé sur la N1 à Vilvorde, CR 31/90.
- Tiruta-Barna L., Rakotoarisoa Z., Méhu J., 2006. Assessment of multi-scale leaching behaviour of compacted coal fly ash, ***Journal of Hazardous Materials*** B137, pp. 1466-1478.
- Vassilev S.V., Vassileva C.G., 2007. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour, ***Fuel*** 86, pp. 1490-1512.

## 10. Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Patrice Garnier (LRPC Lille)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseau (LCPC), François de Larrard (LCPC), Michel Legret (LCPC), Guillaume Gay (INERIS) , Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Patrice Piantone (BRGM), Benoit Schnuriger (INERIS)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Delphine Chevalier (SETRA), Pierre Dupont (SETRA), Frédéric Leray (Ministère de l'équipement), Christine Leroy (Mairie de Paris), Jacques Pérème (UNPG / HOLCOM), Patrice Piantone( BRGM)
Auteurs OFRIR2	Denis François (IFSTTAR)
Relecture d'experts OFRIR2	Céline Chouteau (CETE Nord-Picardie), Guillaume Gay (INERIS)
Relecture bureau	Laurent Château (ADEME), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	avril 2013