

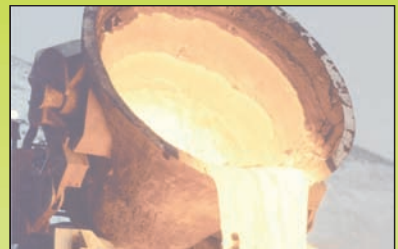
→ Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière



■ Guide calcaire



■ Guide cendres



■ Guide laitier d'aciérie de four électrique



■ Guide laitier haut fourneau



■ Guide matériaux de démolition



■ Guide schiste





SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	2
II. GISEMENT	3
A. Situation	3
A.1. Situation globale	3
A.2. Situation Nationale.....	4
B. Mode d'exploitation et d'élaboration.....	5
III. ENVIRONNEMENT	9
IV. SUIVI QUALITATIF :.....	11
V. DOMAINES ET CARACTERISTIQUES D'EMPLOI - PRECAUTIONS DE MISE EN ŒUVRE....	11
A. Usage des cendres hors ouvrages routiers	11
A.1. Usages dans les ciments.....	11
A.2. Usages dans les bétons :.....	12
A.3. Usages en injection et comblements de cavités :.....	12
A.4. Usages en dépollution et inertage de déchets	12
A.5. Usages en techniques routières et génie civil	12
A.6. Sols.....	15
A.7. Liants.....	15
A.8. Assises de chaussées	15
VI. ANNEXE DIMENSIONNEMENT	26
VII. RÉFÉRENCES NORMATIVES	30
VIII. BIBLIOGRAPHIE.....	31
IX. CONCLUSION.....	32

I. INTRODUCTION

Les cendres volantes de charbon sont les résidus de la combustion d'une matière fossile dans des centrales thermiques en vue de produire de l'électricité. Ces co-produits sont présents en France dans les anciens bassins houillers (essentiellement Nord-Pas-de-Calais, Lorraine et Provence) ou près des ports qui permettent l'importation de charbons.

Elles sont enregistrées sous le n° 10 01 02 de la liste européenne des déchets (liste verte), et ne rentrent pas dans la catégorie des déchets dangereux.

En Lorraine, trois gisements existent : Blénod-lès-Pont-à-Mousson, La Maxe et Saint-Avold. L'importance des stocks, la prise en compte croissante des problématiques de développement et d'aménagement durables ainsi que certaines expériences heureuses dans le passé doivent faire prendre conscience aux Maîtres d'Ouvrage, d'œuvre et aussi aux entreprises de mise en œuvre de la pertinence de ce matériau dans certains cas. Utilisées depuis des décennies en Génie Civil, en techniques routières et en industrie cimentière les cendres volantes font l'objet d'un certain nombre de normes, de spécifications et recommandations d'utilisation tant françaises qu'europpéenne.

Les cendres silico-alumineuses produites par les trois sites lorrains trouvent leur utilisation sous forme de matériaux de terrassement ou de granulats dans les structures routières et comme liant pouzzolanique dans les matériaux traités

La logique à adopter doit être « chaque matériau a une utilisation optimale ». Ce guide se propose de présenter les cendres volantes lorraines ainsi que les usages éprouvés et de définir des précautions d'emploi. Sa principale vocation est de mettre en avant ce co-produit qui par certaines de ses caractéristiques gagne à être mieux connu.

II. GISEMENT

A. SITUATION

A.1. Situation globale

La localisation des principaux sites de production de cendres volantes du quart Nord-Est de la France est la suivante :

Département / Localisation	Producteur	Tranches de production	Production de cendres	Durée d'exploitation de la Centrale	Stock de cendres
Meurthe et Moselle Blénod lès Pont-à-Mousson	EdF	3 x 250 MW	100 000 t/an	jusqu'en 2014	300 kt sur stock interne (silico-alumineuse) 4 Mt sur stock des Hallebois (silico-alumineuse)
Moselle La Maxe	EdF	2 x 250 MW	80 000 t/an	jusqu'en 2015	Stock en bassins difficilement exploitables (silico-alumineuse)
Saint-Avold	LA SNET	1 x 600 MW 1 x 350 MW 1 x 125 MW	} 180 000 t/an 150 000 t/an	2027 2013 2015	} 1 Mt (silico-alumineuse) 600 kt (silico-calciqes)

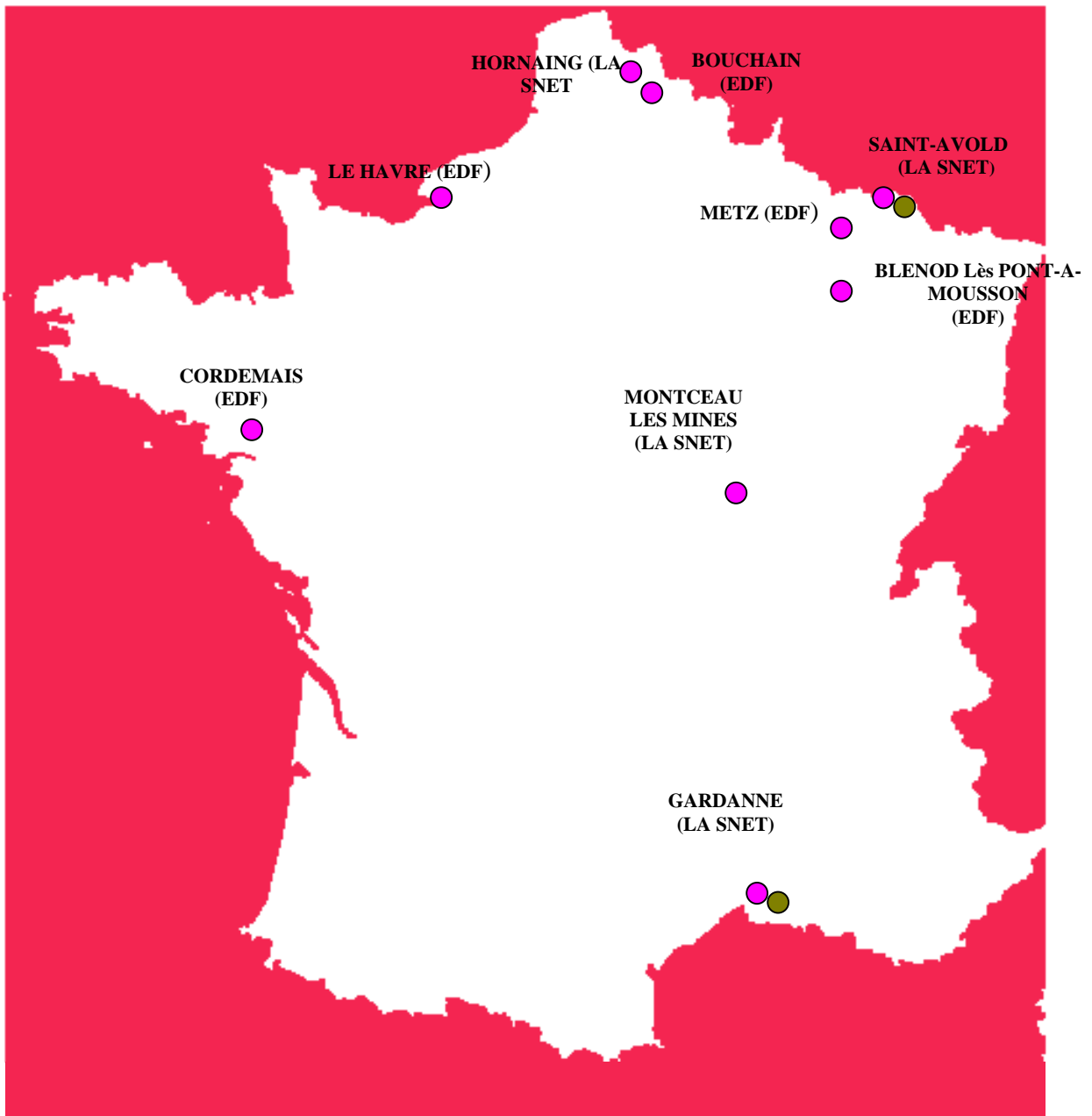


Cendres silico-alumineuses



Cendres silico-calciqes

A.2. Situation Nationale



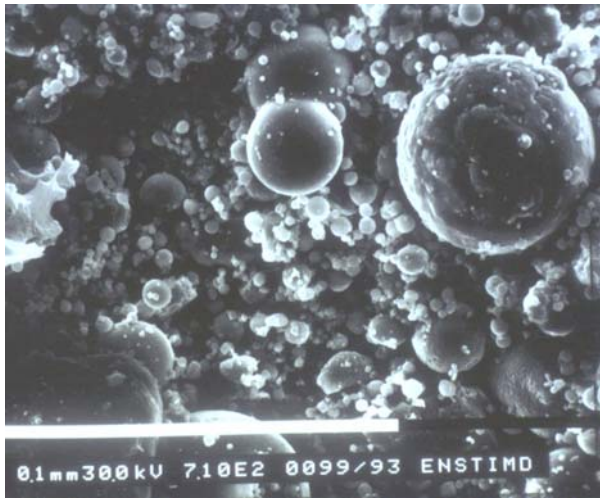
B. MODE D'EXPLOITATION ET D'ÉLABORATION

Les cendres proviennent de la combustion du charbon en centrale thermique. (voir schémas ci-dessous)

La nature des cendres dépend de différents paramètres de production : composition du charbon, type de combustion, système de filtrage et de dépollution des fumées, point de prélèvement.

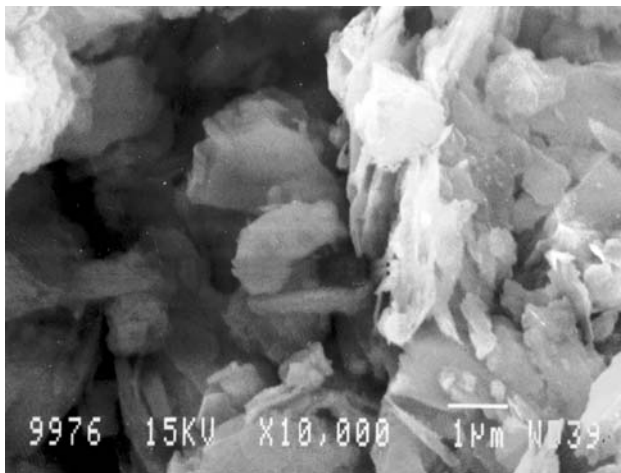
De ces différents paramètres vont découler les caractéristiques de chacun des produits :

- Cendres volantes **silico-alumineuses** qui se présentent sous la forme d'une poudre grise douce au toucher, composée de sphères pleines ou creuses de nature vitreuse et captées au niveau des fumées par des dépoussiéreurs électro-statiques d'où leurs noms.
En usage routier elles sont toujours utilisées sous forme humide.
Les cendres volantes sèches non valorisées dans les ciments et bétons sont humidifiées et mises en stock.



Vue microscopique cendre
silico-alumineuse

- Cendres volantes **silico-calciques** de lit fluidisé circulant de structure très poreuse et qui se présentent sous forme d'une poudre beige très fine et légère, composée d'un assemblage de plaquettes et de fragment alvéolaires. Elles se caractérisent également par une présence de chaux libre plus importante que la famille des silico-alumineuses.



Vue microscopique cendre
silico-calcique

- Cendres (sables) de foyer : pour mémoire, l'objet du présent guide est essentiellement axé sur l'utilisation des cendres volantes de charbon. La nature des cendres de foyer (absence de particules argileuses) et leur taux de passant à la maille de 80 µm généralement modéré, permettent de les assimiler dans la plupart des cas à la classe B5m telle qu'elle est définie dans la norme NF P11-300 de septembre 1992. C'est un matériau pouvant être considéré insensible à l'eau (au sens du terrassement).

Schéma du cycle de production des cendres volantes silico-alumineuses

Les cendres volantes Silico-Alumineuses Production des cendres

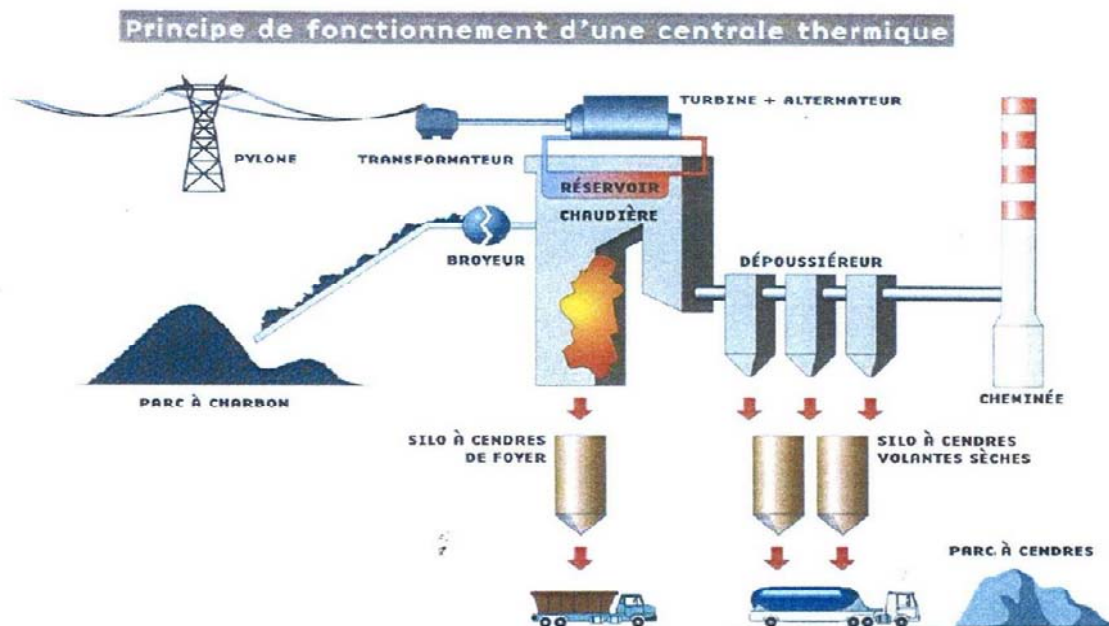
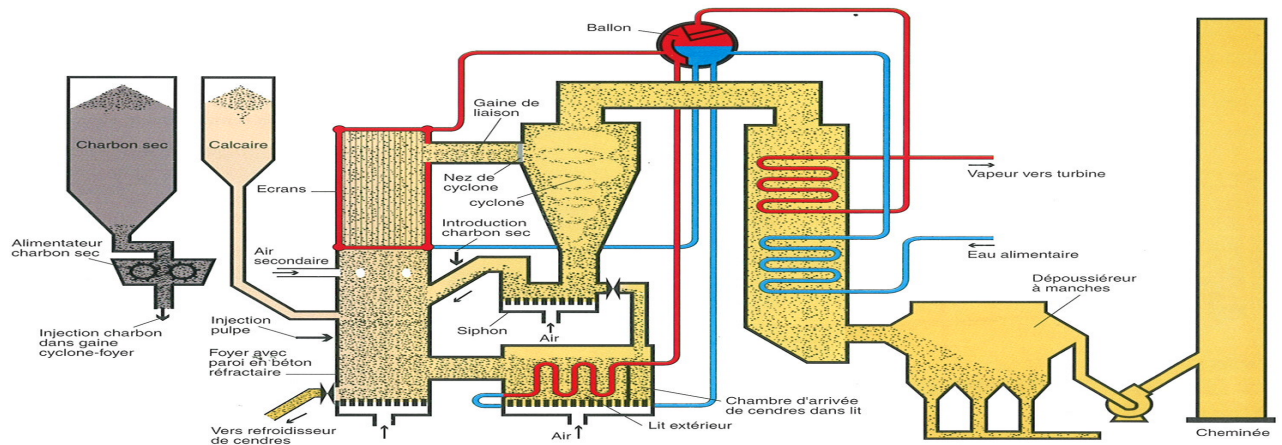


Schéma du cycle de production des cendres volantes silico-calciques

**Chaudière à lit fluidisé
circulant**



Caractéristiques physico-chimiques des cendres volantes de charbon en Lorraine

Les stériles de charbon sont essentiellement constitués de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) sous forme de minéraux silicatés (quartz) et de minéraux phylliteux (argiles)

La finesse de broyage du charbon et les températures dans la flamme modifient la structure minéralogique de ces stériles. La silice libre se retrouve sous la forme de quartz (tridymite ou cristobalite).

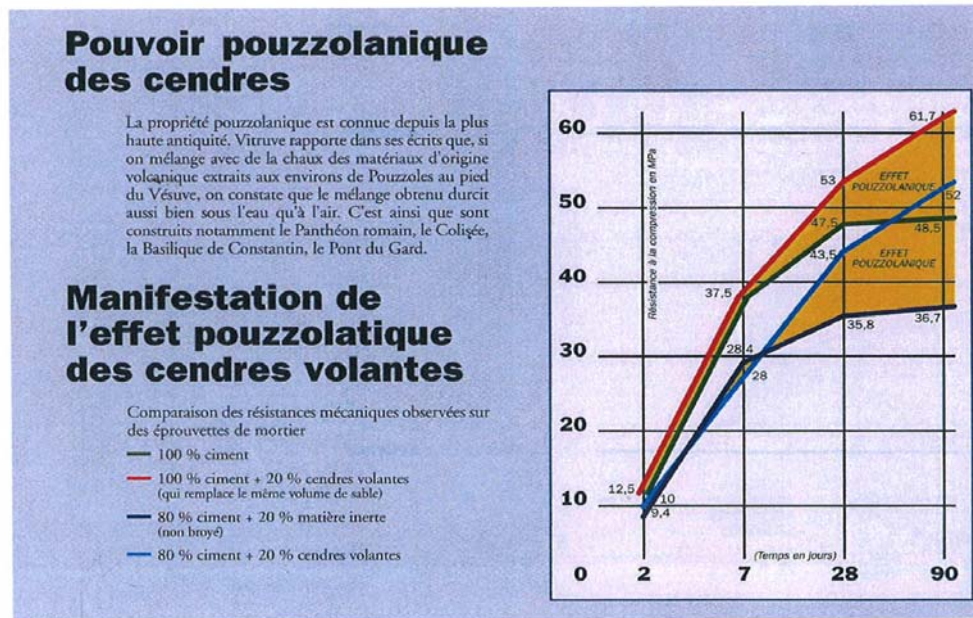
Les autres minéraux donnent naissance à une phase vitreuse renfermant une faible partie cristallisée essentiellement sous forme de mullite

			Cendres silico-alumineuses	Cendres silico-calciques (*)
Chimie	Al ₂ O ₃		41 - 61 %	20 - 24 %
	SiO ₂		21 - 37 %	44 - 58 %
	Fe ₂ O ₃		4 - 13 %	5 - 9 %
	CaO total		0 - 4,9 %	5,2 - 11,3 %
Performance			Pouvoir Pouzzolanique NF EN 14 227 - 4	Pouvoir Pouzzolanique NF EN 14 227 - 4
Minéralogie (diffraction x)			Phyllite Quartz Mullite	Anhydrite Illite mica Quartz
Physique	Masse volumique (t/m ₃)	en vrac sèches non tassées	0,55 à 0,85	0,4 à 0,6
		sèches tassées	0,8 à 1	0,6 à 0,7
		humides	0,95 à 1,2	0,7 à 0,9
	Granulométrie (%)	passant à 315 µ	100	100
		passant à 200 µ	96 à 99	99,9
passant à 80 µ		75 à 90	98	
passant à 45 µ		65 à 75	86	
Surface spécifique blaine (cm ² /g)		2200 - 4000	> 10 000	
Morphologie		micro-billes vitrifiées	plaquettes ou feuillets	
Autre	PH	10	11	
	Porosité	non	oui	

Les caractéristiques cendres silico-alumineuses des trois sites sont identiques, les charbons brûlés étant de la même origine.

(*) Les cendres silico-calciques sont produites exclusivement à Saint-Avoid et sont essentiellement utilisées dans des coulis d'injection et des comblements.

Illustration du pouvoir pouzzolanique des cendres volantes



III. ENVIRONNEMENT

REACH : les cendres volantes de charbon ont été préenregistrées en tant que substance multi-constituant sous les références suivantes :

IUPAC name : Ash (Residues)

EINECS : 268 – 6274

CAS : 62131 – 74 – 8

En l'absence de réglementation précise, plusieurs études ont été menées.

- Une évaluation de l'écotoxicité des cendres de charbon a été réalisée par EdF en 1999 (rapport en annexe). Elle a permis de démontrer en fonction des critères en vigueur lors de cette étude, que les cendres (de fraîche production ou stockées) et leurs lixiviats ne sont pas écotoxiques ni à court, ni à long terme.
- De même, une étude du BRGM concernant l'évolution de la qualité de l'eau autour du remblayage sous la cité du Stock (commune de THIL – 54) pendant 2 ans a conclu de la manière suivante : « Le dispositif de surveillance de la qualité de l'eau en amont et en aval du remblayage a permis d'en suivre l'impact. Les analyses chimiques de prélèvements d'eau réalisées régulièrement pendant deux années, montrent des concentrations toujours inférieures aux tests de lixiviation, ainsi qu'aux valeurs réglementaires pour l'alimentation en eau potable. Dans la zone remblayée, l'eau circule rapidement et la surface de contact avec le matériau de remblayage est faible, ce qui a pour conséquence un relargage négligeable dans l'eau. Après ces deux années de suivi régulier, il apparaît que le remblayage n'a pas modifié la qualité de l'eau du réservoir de Godbrange. »

Cf :

- actes de la journée technique organisée le 30/01/2003 par la CRCIL et le CETE de l'Est <http://www.lorraine-reel.net/> Technologies propres/veille technologique/ Valorisation des co-produits de l'industrie en génie civil : des innovations qui tiennent la route /Les cendres volantes en techniques routières
- Etude BRGM/RP-55730-FR – Rapport final : <http://www.brgm.fr/>



IV. SUIVI QUALITATIF :

Les cendres non commercialisées sous forme sèche sont humidifiées pour simplifier leur manutention et éviter leur l'envol, puis stockées dans des parcs de stockage en terril ou en bassin de décantation. Cet entreposage des surplus depuis des décennies conduit à un volume important de cendres valorisable.

L'humidification des cendres volantes ne modifie pas leurs propriétés pouzzolaniques.

Ces cendres sont essentiellement issues de la combustion de charbons lorrains, les charbons étrangers n'étant brûlés que depuis la fin de l'extraction charbonnière en France (2004).

Une reconnaissance des stocks a été effectuée pour identifier physiquement et chimiquement les cendres, afin d'envisager les différentes voies de valorisation possibles, et de définir, lorsqu'une voie de valorisation est retenue, les zones d'exploitation des sites.

V. DOMAINES ET CARACTERISTIQUES D'EMPLOI - PRECAUTIONS DE MISE EN ŒUVRE

A. USAGE DES CENDRES HORS OUVRAGES ROUTIERS

A.1. Usages dans les ciments

Les différentes qualités de ciments définies par la norme EN 197 - 1 sont obtenues par broyage fin du clinker (ciment sorti du four avant broyage) avec 35 % au maximum de constituants secondaires : cendres silico-alumineuses, fillers calcaires, laitiers de hauts-fourneaux

Les cendres silico-alumineuses sont également incorporées dans le « cru » (matière première) comme constituant principal, en tant que correcteur d'aluminium, silice et fer, en substitution des argiles.

A.2. Usages dans les bétons :

Les normes européennes EN 450-1 et NF EN 206 fixent les conditions d'emplois des cendres volantes silico-alumineuses comme composant des diverses catégories de bétons : bétons prêts à l'emploi, préfabriqués, ouvrages d'art, bétons compactés au rouleau,...

Les cendres peuvent venir en substitution partielle du ciment et augmenter les performances techniques des ouvrages :

- Amélioration de la maniabilité
- Diminution de la chaleur d'hydratation et de la fissuration de retrait
- Augmentation de la résistance à long terme grâce à la pouzzolanité, réaction de « prise » de la silice calcinée en présence de chaux et d'eau.
- Durabilité et résistance aux agressions chimiques et climatiques
- Inhibition de l'alcali réaction (pathologie des bétons)
- Réduction de la réaction sulfatique interne

Les cendres sont également employées comme correcteur granulométrique des sables pour satisfaire à la norme P 18-545 (granulats pour bétons hydrauliques)

Elles permettent également de réduire le bilan carbone des bétons.

A.3. Usages en injection et comblements de cavités :

Les travaux d'injection sont extrêmement divers et variés tant par leur domaines d'application que par les produits employés. Ils consistent généralement à pomper un coulis qui doit faire prise une fois en place. Les cendres y trouvent traditionnellement un emploi important, surtout par les comblements de cavités.

A.4. Usages en dépollution et inertage de déchets

L'inertage des déchets s'effectue par le piégeage des métaux lourds dans des procédés de prises pouzzolaniques.

Les capacités de prise hydraulique des cendres volantes activées par l'adjonction d'un réactif présentent un intérêt économique non négligeable vu leur faible coût.

A.5. Usages en techniques routières et génie civil

Pour cet usage seules sont concernées les cendres silico-alumineuses disponibles sur les trois sites lorrains.

Les cendres volantes silico-alumineuses sont classées selon la norme NF P 11-300 dans la famille F2. Elles sont assimilables dans leur comportement géotechnique à un sol de classe A1 sensible à l'eau.

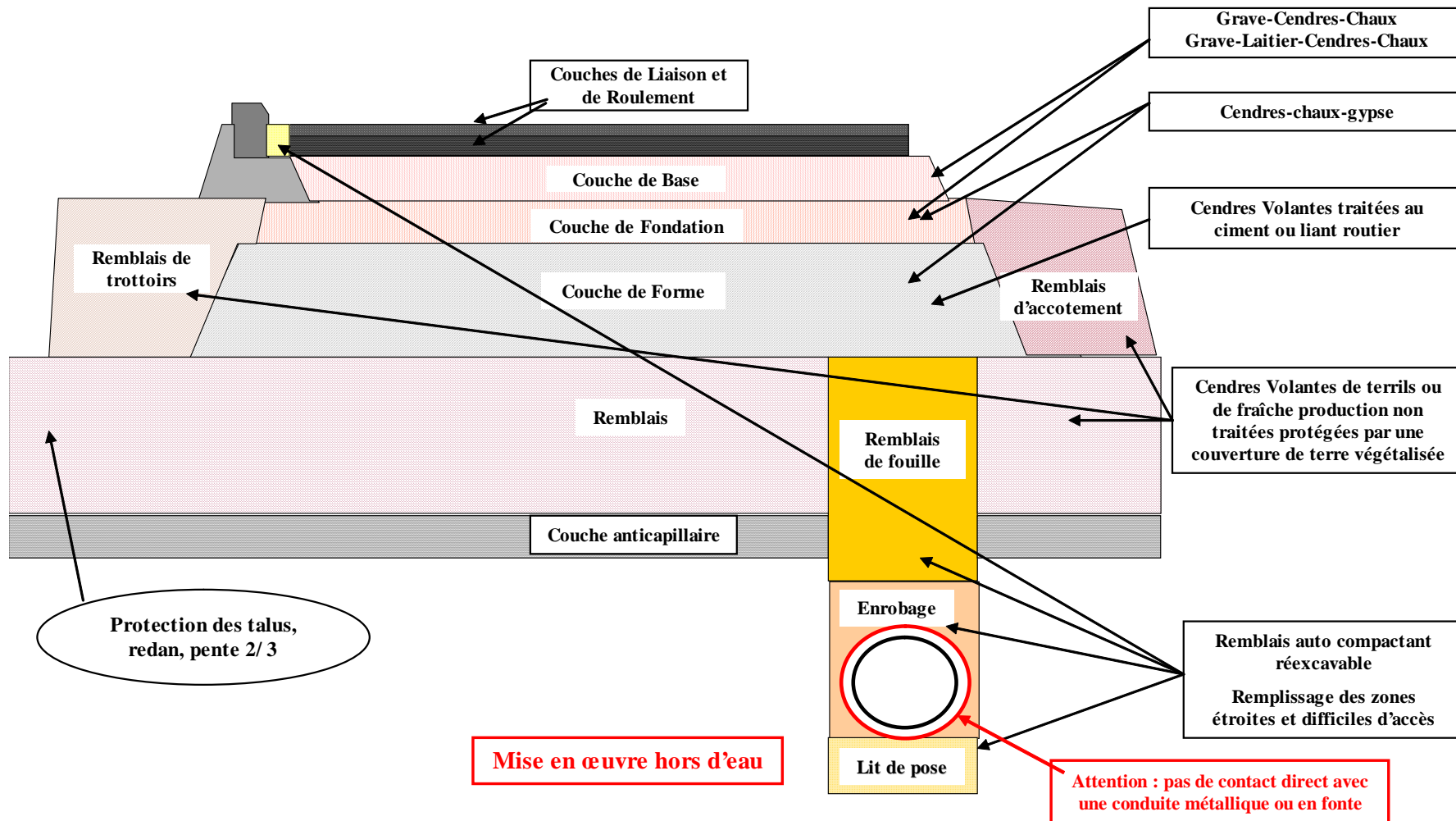


Les cendres de centrales au charbon sont largement utilisées depuis des décennies dans toutes les couches des structures routières, c'est-à-dire en allant du bas vers le haut

- ❖ Les assainissements et traitements de sols
- ❖ Les remblais
- ❖ Les assises de chaussées
- ❖ Les chaussées en béton

Dans ces différentes structures, les cendres ont un rôle de liant ou de granulat.

Utilisation des Cendres Volantes en technique routière
Coupe type de chaussée



A.6. Sols

a) Remblais :

Les cendres volantes sont légères (après compactage : de 30 à 50% plus légères que d'autres matériaux classiques). Elles sont appréciées pour constituer des remblais, en particulier sur des sols compressibles. Elles peuvent être utilisées seules ou bien comme matériaux complémentaire pour assécher un déblai humide à remettre en remblai. Elles se mettent en place facilement, en étant répandues en couches de 50cm d'épaisseur au moyen d'un bouteur léger à chenilles, puis compactées avec quelques passes d'un compacteur à pneus lourd.

Du fait de leur sensibilité à l'eau, il faudra s'opposer à toute absorption d'eau par la base de l'ouvrage, et veiller à apporter une protection de surface.

b) Couches de forme :

Les cendres volantes traitées aux liants hydrauliques constituent un matériau de classe mécanique 3 et d'indice de protection au gel élevé permettant d'obtenir des solutions de plateforme PF 2 ou PF 4 très économiques

A.7. Liants

La norme française NF P15-108 traite de la préparation des liants routiers en général. Additivées de chaux ou de ciment, les cendres volantes silico-alumineuses constituent un excellent liant hydraulique à prise lente utilisé pour traiter les graves et réaliser des couches de forme. L'ajout de gypse permet d'augmenter les résistances à court terme.

Les cendres silico-calciques, trouvent des débouchés intéressants pour traiter et stabiliser les sols en vue d'obtenir une portance immédiate pour la circulation des camions et des engins de chantier

A.8. Assises de chaussées

Les cendres volantes peuvent être utilisées comme matériaux traités aux liants hydrauliques :

- En cendres volantes traitées au ciment ou chaux-gypse en couche de fondation
- En graves traitées cendres-chaux en couche de fondation et couche de base

Ces mélanges sont appréciés pour leur masse volumique généralement plus faible et leur prix de revient économique.



UTILISATION DANS LES CIMENTS

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production	selon NF EN 197-1 "Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants"	*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 * Ajout en tant que correcteur granulométrique * Ajout en tant que correcteur des paramètres Silice/Alumine/Fer	CEM II CEM IV CEM V

UTILISATION DANS LES BETONS

<i>PRODUITS</i>	<i>CLASSIFICATION</i>	<i>USAGES</i>	<i>REFERENCES</i>
Cendres Volantes silico-alumineuse sèche	selon EN 450 - Cendres volantes selon XP P 18-545 -Granulats pour bétons hydrauliques	* Intégration en tant que substitution de ciment * Intégration en tant que granulats (composant principal ou correcteur granulaire) * Inhibition du phénomène d'alcali-réaction * Réduction du phénomène de réaction sulfatique interne	Bétons fabriqués sur chantiers BPE (Bétons prêts à l'emploi) Bétons pour préfabrication Bétons de chaussée Bétons autoplaçants (plus de 40 millions de tonnes valorisées)

Précautions d'emploi :

Se référer à la norme NF EN 206-1 " BETONS : Spécification, performances, production et conformité"

UTILISATION EN INJECTION ET COMBLEMENT DE CAVITES

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
<p>Cendres Volantes SILICO-CALCIQUES SILICO-ALUMINEUSES sèches ou humides traitées avec un liant hydraulique</p>		<p>* Comblement de vides</p> <p>* Remblayage d'anciennes galeries de mines</p> <p>* Comblement de l'espace annulaire derrière les voussoirs des tunnels</p> <p>* Coulage de parois moulées étanches</p>	<p>Région parisienne : anciennes exploitations de gypse</p> <p>Mines de fer : remblayage sous la commune de THILL (54)</p> <p>Mines de charbon : remblayage des puits de mines des Houillères du Bassin de Lorraine(57) et des Saarbergwerke (D) : 400 000 tonnes</p> <p>Mines de potasse d'Alsace</p> <p>Tunnels du Lötschberg (CH),</p> <p>Méto parisien, métros de Rennes, Copenhague, Lyon, Lille</p> <p>THANN (68): Confinement d'un teruil de déchets chimiques pour l'isoler de la nappe phréatique (3500 m sur une profondeur de 16 à 30 m) (chantier SITA/SOLETANCHE-BACHY)</p>



UTILISATION EN DEPOLLUTION ET INERTAGE DE DECHETS

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes SILICO-CALCIQUES SILICO-ALUMINEUSES Traitées aux liants hydrauliques		Inertage de déchets	Brevet GLEIZE SITA

UTILISATION EN REMBLAIS D'ASSAINISSEMENT OU DE FAIBLE LARGEUR

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production non traitées	selon NF P 11-300 sols de classe F2 assimilables dans leur comportement à des sols de classe A1	Lit de pose, enrobage et partie inférieure de remblais Hors d'eau et hors présence de nappe phréatique Objectif de densification q4 1,2 W _{OPN} ? w _n ? 1,3 W _{OPN} 4 < IPI ? 10 Difficultés de compactage	
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production traitées en matériaux auto-compactants	selon NF P 11-300 sols de classe F2 Remblai auto-compactant réexcavable	Enrobage et remblais de tranchées Tout remblai technique difficile d'accès et tranchées encombrées Portance : IPI ? 10 à 24 heures à 20°C Essai pénétrométrique PANDA : Rp > 2 Mpa à 1 jour Masse Volumique Apparente : MVA = 1,60 à 1,70 t/m ³	Ville de Metz (57) Comblement tunnel d'Auboué (54) Metz - Zone Euromoselle (57)

Précautions d'emploi (cas des remblais auto-compactant)

Délai d'utilisation : 4 heures à compter de la fin du remplissage de la bétonnière jusqu'au déchargement

Tuyaux PVC et grès : calage au moyen de cavaliers spécifiques pour éviter le soulèvement des tuyaux

Tuyaux béton : sans calage, le premier remplissage ne doit pas dépasser la moitié du tuyau diminuée d'une cote égale à 10% du diamètre nominal de la canalisation

Remblai proprement dit : couche supérieure à 15 cm

Pas de contact direct avec des conduites métalliques ou en fonte

UTILISATION EN REMBLAIS ROUTIERS

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production non traitées	selon NF P 11-300 sols de classe F2 assimilables dans leur comportement géotechnique à des sols de classe A1	Corps de remblai protégé par un écran anti-capillaire Hors zones humides et inondables Faible masse volumique (utilisation sur sols compressibles) Hauteur ? 5 m Mise en œuvre par méthode du remblai excédentaire Angle de frottement de 35° à 40° Mise en œuvre sous une large plage de teneurs en eau (Proctor "plat")	Rocade de Pont-à-Mousson A31 - Echangeur Custines

Précautions d'emploi :

On se référera au GTR92 et aux préconisations propres aux matériaux F2/A1

Extraction : préférer extraction frontale

Transport : bâchage des camions, utilisation de bennes grands volumes ou équipées de ridelles (faible densité)

Régalage : engin à chenilles évitant au compacteur de s'enfoncer dans le matériau foisonné.

Pré compactage : engins à pneus exclusivement, compactage par vibration interdit

Humidification : prévoir arrosage si cendres sèches ou en cas de fortes chaleurs

Mise en œuvre par la méthode du remblai excédentaire (surlargeur de l'ordre du mètre à retailler après achèvement du remblai).

Talus : pente des talus à 2/3. Protection par une couverture de terre végétale ou granulaire (redents sur les pentes pour éviter le glissement et assurer l'accrochage)

Interruption de la mise en œuvre en cas de fortes pluies, intenses ou prolongées (changement de consistance brutal du matériau si excès d'eau).

Danger potentiel si circulation sur cendres très humides (glissement ==> perte d'adhérence des engins)

En phase de construction des remblais, assurer la protection contre les eaux météoriques (profil d'arase permettant l'évacuation des eaux vers un exutoire approprié, ne favoriser aucune rétention en surface)

Mise en œuvre hors zone inondable

UTILISATION EN COUCHE DE FORME

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production traitées au ciment ou au liant routier	selon GTS (Guide de Traitement de Sols) et normes sols traités Classe mécanique 3, 4 ou 5 Dosage en liant de 5 à 7 % selon NF EN 14227-3 : CV 5 Spécifications cendres selon NF EN 14227-4 : Teneur en carbone <10 % (NF EN 196-2) Teneur en SO3 <4% (NF EN 196-2)	Couche de Forme traitée Circulation sur couche traitée si Rc ? 1 MPa Résistance au gel satisfaisante si Rtb > 0,25 MPa Protection thermique Qng : coefficient An = 0,17 (°C.jour) ^{1/2} /cm En fonction de l'épaisseur, obtention d'une plate-forme PF2, PF3 ou PF4	Liaison A31-RN4-Bd des Aiguillettes Carrefour de la Toulouse Aéroport Louvigny(57) - Taxiway RN61-Sarreguemines(57)
Cendres Volantes de terrils ou de fraîche production traitées chaux-gypse	selon norme NF EN 14227-3 CV5 Compositions selon NF EN 14227 -3 91% CV + 4% chaux vive + 5% gypse 90% CV + 5% chaux éteinte + 5% gypse Spécifications cendres selon NF EN 14227-4 : Teneur en carbone <10 % (NF EN 196-2) Teneur en SO3 <4% (NF EN 196-2)	Couche de Forme traitée Circulation sur couche traitée si Rc ? 1 MPa Résistance au gel satisfaisante si Rtb > 0,25 MPa Protection thermique Qng : coefficient An = 0,17 (°C.jour) ^{1/2} /cm En fonction de l'épaisseur, obtention d'une plate-forme PF2, PF3 ou PF4	Déviation de Malzéville (54)
Sols traités à la cendre volante	Selon norme NF EN 14227- 3 CV 3	Utilisation d'un prémélange cendres volantes + chaux pour traiter un matériau graveleux (liant Sib Activ)	Usine Smart à Hambach (57) Polyglas - Europort Saint-Avold (57)

... / ... suite – précaution d'emploi

Précautions d'emploi :

Cas des cendres-ciment, cendres -liant hydraulique, cendres -chaux-gypse

Fabrication en centrale de malaxage :

La faible densité et la finesse du matériau implique une baisse des cadences de fabrication.

Par exemple, une centrale de débit nominal 400t/h aura un rendement effectif de 150 à 200 t/h.

Doseurs : trémies équipées de grilles pour écrêtage, émotteurs, plaques téflon, vibreurs supplémentaires.

Du personnel complémentaire est nécessaire pour veiller au bon écoulement des cendres et au nettoyage.

Fabrication des cendres traitées à la teneur en eau OPM +2 à 3% afin de prévenir du séchage avant mise en œuvre

Restrictions normatives our le dosage des cendres-chaux-gypse

Les dosages en chaux vive doivent être inférieurs à 5%, en chaux éteinte à 6% et en gypse à 7%, ceci afin d'éviter des gonflements du mélange dus à la formation d'ettringite.

Transport

Bâchage des camions, utilisation de bennes grands volumes ou équipées de ridelles (faible densité).

Traitement en place des cendres :

Pré compactage des cendres volantes avant épandage du liant pour éviter l'accumulation du liant dans les ornières et assurer la traficabilité de l'épandeur et du malaxeur

Mise en œuvre

Régalage par engin à chenilles évitant au compacteur de s'enfoncer dans le matériau foisonné. Pré compactage au cylindre afin d'assurer la traficabilité des engins de compactage. Compactage par engins à pneus exclusivement, compactage par vibration interdit. Humidification si cendres sèches ou en cas de fortes chaleurs.

Protection superficielle

Quand le chantier le permet, on favorise une mise en œuvre simultanée de la couche de fondation (matin par exemple) et de la couche de base (après-midi)
Sinon, protection par enduit de cure nécessaire sur la couche de fondation à la fin de chaque journée de mise en œuvre. Avant enduit, un cloutage peut s'avérer nécessaire pour assurer un bon accrochage de l'émulsion.

UTILISATION EN ASSISES DE CHAUSSEES

PRODUITS	CLASSIFICATION	USAGES	REFERENCES
Cendres Volantes / chaux-gypse Cendres Volantes / Ciment	selon norme NF EN14227-3 CV5 Compositions selon NF EN14227-3 91% CV + 4% chaux vive + 5% gypse 90% CV + 5% chaux éteinte + 5% gypse Spécifications cendres selon NF EN 14227-4 : Teneur en carbone <10 % (NF EN 196-2) Teneur en SO3 <4% (NF EN 196-2)	Couche de Fondation de chaussées tous trafic Catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves : chaussées de type 11	Liaison A31-RN4-Bd des Aiguillettes + Carrefour de la Toulouse à Laxou RD40d - Ecluse Clévant à Frouard (54) RD400 à Saint Nicolas-de-Port (54) RN33 - Déviation Carling (57) RN333 - Dév. Huidivillers Vitrimont (54) A31 - Echangeur Custines (54) RD400 - Continuité autoroutière A31/RN4 Laxou (54) RD955 - Déviation Liocourt (57) RD999 ARS LAQUENEXY (57) RD910 LUPPY-BECHY (57)
Graves-Cendres-Chaux Graves-Cendres-Ciment	selon norme NF EN14227-3 CV1 et CV2 Dosage liant (CV+CaO) selon NF EN14227-3 4 à 13% CV + 2 à 3% chaux éteinte 8,5 à 12% CV + 1,4 à 2,1% chaux vive Spécifications cendres selon NF EN 14227-4 : Teneur en carbone <10 % (NF EN 196-2) Teneur en SO3 <4% (NF EN 196-2)	Couches de Fondation et de Base tous trafic Catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves : chaussées de type 3, 10 et 12	Giratoire RD910 - Louvigny (57) Carrefour de la Toulouse à Laxou (54) RD400 à Saint Nicolas-de-Port (54) RN33 - Déviation Carling (57) RN333 - Dév. Huidivillers Vitrimont (54) A31 - Echangeur Custines (54) RD400 - Continuité autoroutière A31/RN4 Laxou (54) RD955 - Déviation Liocourt (57) RD999 ARS LAQUENEXY(57) RD910 LUPPY-BECHY(57)
Graves-Laitier-Cendres volantes-Chaux	selon norme NF EN14227-3 CV1 et CV2 Dosage liant (Laitier+CV+CaO) : 13 à 17 % (50/50 laitier et CV) + 1 % chaux vive (activant) Spécifications cendres selon NF EN 14227-4 : Teneur en carbone <10 % (NF EN 196-2) Teneur en SO3 <4% (NF EN 196-2)	Couches de Fondation et de Base tous trafic Comportement intermédiaire entre la grave-laitier et la grave-CV-chaux	

Précautions d'emploi :

Cas des cendres-ciment, cendres -liant hydraulique, cendres -chaux-gypse

Fabrication en centrale de malaxage :

La faible densité et la finesse du matériau implique une baisse des cadences de fabrication.

Par exemple, une centrale de débit nominal 400t/h aura un rendement effectif de 150 à 200 t/h.

Do-seurs : trémies équipées de grilles pour écrêtage, émotteurs, plaques téflon, vibreurs supplémentaires.

Du personnel complémentaire est nécessaire pour veiller au bon écoulement des cendres et au nettoyage.

Fabrication des cendres traitées à la teneur en eau OPM +2 à 3% afin de prévenir du séchage avant mise en œuvre

Restrictions normatives pour le dosage des cendres-chaux-gypse

Les dosages en chaux vive doivent être inférieurs à 5%, en chaux éteinte à 6% et en gypse à 7%, ceci afin d'éviter des gonflements du mélange dus à la formation d'ettringite.

Transport

Bâchage des camions, utilisation de bennes grands volumes ou équipées de ridelles (faible densité).

Traitement en place des cendres :

Pré compactage des cendres volantes avant épandage du liant pour éviter l'accumulation du liant dans les ornières et assurer la traficabilité de l'épandeur et du malaxeur

Mise en œuvre

Régalage par engin à chenilles évitant au compacteur de s'enfoncer dans le matériau foisonné. Pré compactage au cylindre afin d'assurer la traficabilité des engins de compactage. Compactage par engins à pneus exclusivement, compactage par vibration interdit. Humidification si cendres sèches ou en cas de fortes chaleurs.

Protection superficielle

Quand le chantier le permet, on favorise une mise en œuvre simultanée de la couche de fondation (matin par exemple) et de la couche de base (après-midi) Sinon, protection par enduit de cure nécessaire sur la couche de fondation à la fin de chaque journée de mise en œuvre. Avant enduit, un cloutage peut s'avérer nécessaire pour assurer un bon accrochage de l'émulsion.

Couche de base :

Les graves-cendres-chaux ne posent pas de problèmes spécifiques de mise en œuvre par rapport à un autre type de grave traitée aux liants hydrauliques.

Précautions particulières toutefois sur le contrôle des teneurs en eau et en cas de pluie.

Réalisation d'un enduit de cure gravillonné à la fin de la mise en œuvre, comme pour tout matériau traité au liant hydraulique.

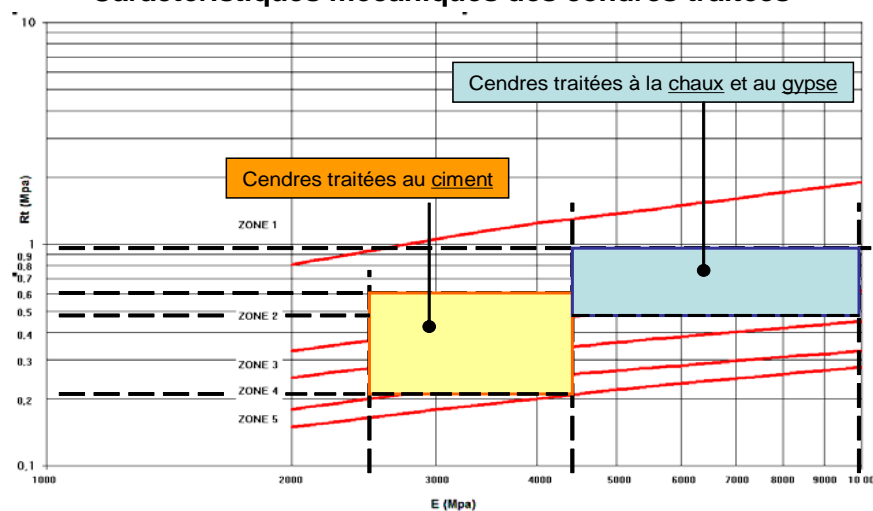
Préfixuration obligatoire

Vigilance quant à l'étanchéité des couches de roulement pour éviter des désordres des couches inférieures dans le temps

VI. ANNEXE DIMENSIONNEMENT

DIMENSIONNEMENT DES COUCHES DE FORME

Caractéristiques mécaniques des cendres traitées



Classe mécanique suivant le mode de traitement

Traitement en place	Traitement en centrale	Classe mécanique selon le mode de traitement
Zone 1		1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zones 4 et 5	5

Classe de l'arase		AR1		AR2		
		Épaisseur de matériau de couche de forme				
Classe mécanique du matériau de couche de forme	3	*	30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
	4	30 cm	35 cm	45 cm **	30 cm	35 cm
	5	35 cm	50 cm **	55 cm **	35 cm	45 cm
Classe de plateforme obtenue		PF2	PF3	PF4	PF3	PF4

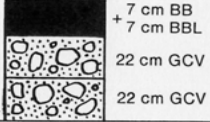
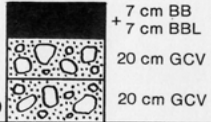
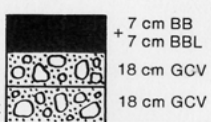
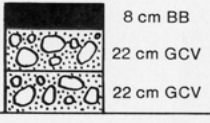
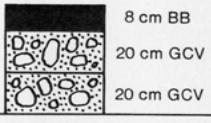
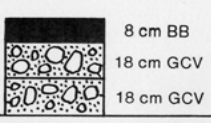
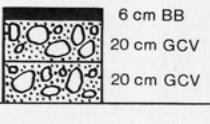
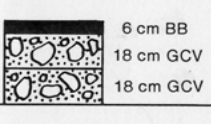
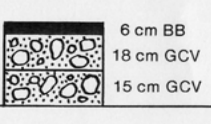
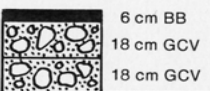
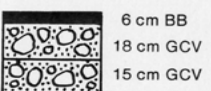
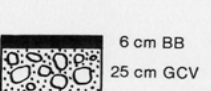
→ Classe de la plateforme suivant :

- Classe d'arase
- Épaisseur couche de forme
- Classe mécanique du matériau

Chaussée du type 3

Couche de base : *grave - cendres volantes - chaux**

Couche de fondation : *grave - cendres volantes - chaux**

	PF ₁	PF ₂	PF ₃
T ₀	 <p>+ 7 cm BB + 7 cm BBL 22 cm GCV 22 cm GCV</p>	 <p>+ 7 cm BB + 7 cm BBL 20 cm GCV 20 cm GCV</p>	 <p>+ 7 cm BB + 7 cm BBL 18 cm GCV 18 cm GCV</p>
T ₁	 <p>8 cm BB 22 cm GCV 22 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 20 cm GCV 20 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 18 cm GCV 18 cm GCV</p>
T ₂	 <p>6 cm BB 20 cm GCV 20 cm GCV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 18 cm GCV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 15 cm GCV</p>
T ₃	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 18 cm GCV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 15 cm GCV</p>	 <p>6 cm BB 25 cm GCV</p>

1. Matériaux

BB et BBL : conformes à la *Directive pour la réalisation des couches de surface de chaussées en béton bitumineux* (sept. 1969).

GCV : conforme à la *Recommandation pour la réalisation des assises de chaussées en graves-cendres volantes-chaux** (en préparation).

2. Le tableau présente les structures nominales (en cm) au bord droit (côté rive) de la voie la plus chargée de la chaussée. Le profil en travers de la chaussée est établi conformément aux indications du chapitre F de la notice d'utilisation du catalogue. En aucun point l'épaisseur nominale d'une couche de grave-cendres volantes-chaux ne doit être inférieure à 15 cm.

3. Dans la cas d'un trafic T₁, si la vérification au gel-dégel conduit à une structure (T₀, PF₁), on pourra utiliser les structures de substitution suivantes :

a : 8 cm BB / 25 cm GCV / 22 cm GCV

b : 8 cm BB / 25 cm GCV / 20 cm GCV

e : 8 cm BB / 22 cm GCV / 18 cm GCV

(cf. chapitre E, *Vérification au gel-dégel*, § 3, de la notice d'utilisation du catalogue).

N.B. : L'abaque gel relatif à cette planche de structures se trouve au verso.

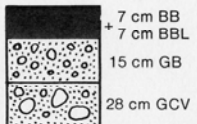
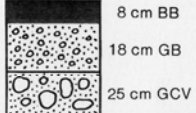
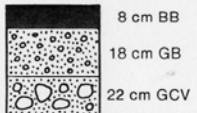
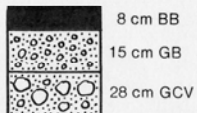
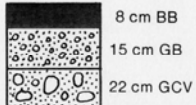
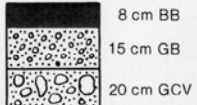
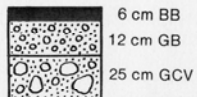
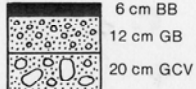
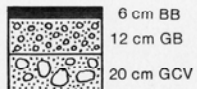
* Cette planche de structures n'est applicable qu'aux cendres volantes silico-alumineuses. Pour les graves-cendres volantes sulfocalciques (lignite), on adoptera, à titre provisoire, les mêmes épaisseurs que celles mentionnées dans la planche 1.

Chaussée du type 3

Chaussée du type 10

Couche de base : *grave - bitume*

Couche de fondation : *grave - cendres volantes -*

	PF ₁	PF ₂	PF ₃
T ₀	 <p>7 cm BB 7 cm BBL 15 cm GB 28 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 18 cm GB 25 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 18 cm GB 22 cm GCV</p>
T ₁	 <p>8 cm BB 15 cm GB 28 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 15 cm GB 22 cm GCV</p>	 <p>8 cm BB 15 cm GB 20 cm GCV</p>
T ₂	 <p>6 cm BB 12 cm GB 25 cm GCV</p>	 <p>6 cm BB 12 cm GB 20 cm GCV</p>	
T ₃	 <p>6 cm BB 12 cm GB 20 cm GCV</p>		

1. Matériaux

BB et BBL : conformes à la *Directive p couches de surface de chaussée* (sept. 1969).

GB : conforme à la *Directive p assises de chaussées en graves* (sept. 1972).

GCV : conforme à la *Recommandat des assises de chaussées en g chaux** (en préparation).

2. Le tableau présente les structures nomir droit (côté rive) de la voie la plus chargée c en travers de la chaussée est établi conform du chapitre F de la notice d'utilisation d En aucun point, l'épaisseur nominale d'inférieure à :

- 12 cm GB
- 15 cm GCV

3. Dans le cas (T₃, PF₁), il est possible d' *superficiel*** à la couche de béton bitum porter à 18 cm l'épaisseur de la couche de

N.B. : L'abaque gel relatif à cette planche c au verso.

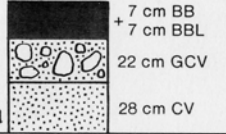
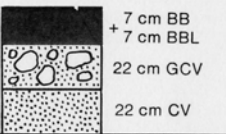
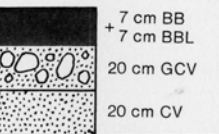
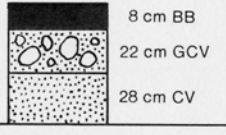
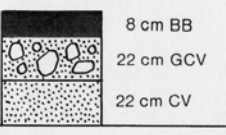
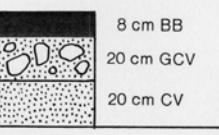
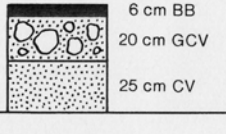
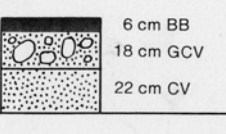
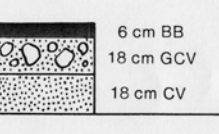
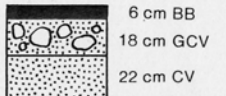
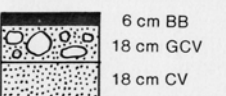
* Cette planche de structures n'est applicable s silico-alumineuses. Pour les graves-cendres (lignite), on adoptera, à titre provisoire, les celles mentionnées dans la planche 9.

** Directive pour la réalisation des enduits supe

Chaussée du type 11

Couche de base : *grave - cendres volantes - chaux**

Couche de fondation : *cendres volantes - chaux - gypse**

	PF ₁	PF ₂	PF ₃
T ₀	 <p>7 cm BB + 7 cm BBL 22 cm GCV 28 cm CV</p> <p>a</p>	 <p>7 cm BB + 7 cm BBL 22 cm GCV 22 cm CV</p> <p>b</p>	 <p>7 cm BB + 7 cm BBL 20 cm GCV 20 cm CV</p> <p>c</p>
T ₁	 <p>8 cm BB 22 cm GCV 28 cm CV</p>	 <p>8 cm BB 22 cm GCV 22 cm CV</p>	 <p>8 cm BB 20 cm GCV 20 cm CV</p>
T ₂	 <p>6 cm BB 20 cm GCV 25 cm CV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 22 cm CV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 18 cm CV</p>
T ₃	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 22 cm CV</p>	 <p>6 cm BB 18 cm GCV 18 cm CV</p>	voir planche 3

1. Matériaux

BB et BBL : conformes à la *Directive pour la réalisation des couches de surface en béton bitumineux* (sept. 1969).

GCV : conforme à la *Recommandation pour la réalisation des assises de chaussées en graves-cendres volantes-chaux** (en préparation).

CV : mélange de cendres volantes, chaux vive (selon prescriptions de la *Recommandation GCV*) et de gypse (granularité 0/5, teneur en SO₃ supérieure à 42 %) selon les proportions suivantes :
91 % de cendres volantes
4 % de chaux vive
5 % de gypse

2. Le tableau présente les structures nominales (en cm) au bord droit (côté rive) de la voie la plus chargée de la chaussée. Le profil en travers de la chaussée est établi conformément aux indications du chapitre F de la notice d'utilisation du catalogue. En aucun point l'épaisseur nominale d'une couche ne doit être inférieure à :

- 15 cm GCV
- 18 cm CV

3. Dans les cas d'un trafic T₁, si la vérification au gel-dégel conduit à une structure (T₀, PF_j), on pourra utiliser les structures de substitution suivantes :

a : 8 cm BB/ 25 cm GCV/ 28 cm CV

b : 8 cm BB/ 25 cm GCV/ 25 cm CV

e : 8 cm BB/ 22 cm GCV/ 22 cm CV

(cf. chapitre E, *Vérification au gel-dégel*, § 3, de la notice d'utilisation du catalogue).

N.B. : L'abaque gel relatif à cette planche de structures se trouve au verso.

* Cette planche de structures n'est applicable qu'aux cendres volantes silico-alumineuses.



VII. RÉFÉRENCES NORMATIVES

NFP 98 111	Assise de chaussées : essais de réactivité des cendres silico-alumineuses à la Chaux
NFP 98 114-2	Assise de chaussées : méthodologie d'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques. STLH
NFP 98 115	Assise de chaussées : exécution des corps de chaussée – Constituants, composition des mélanges et formulation Exécution et contrôle
NFP 98 128	Assise de chaussées : Bétons compactés routiers et graves hydrauliques à hautes performance. Définition Composition Classification
NF EN 450- 1 et 2	Cendres volantes pour bétons
NF EN 14227 – 1	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 1 : Mélanges granulaires traités au ciment
NF EN 14227 – 2	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 2 : Mélanges traités au laitier
NF EN 14227 – 3	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 3 : Mélanges traités à la cendre volante
NF EN 14227 – 4	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 4 : Cendre volante pour mélanges traités aux liants hydrauliques
NF EN 14227 – 5	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 5 : Mélanges traités au liant hydraulique routier
NF EN 14227 – 13	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 13 : Sol traité au liant hydraulique routier
NF EN 14227 – 14	Mélanges traités aux liants hydrauliques Partie 14 : Sol traité à la cendre volante



VIII. BIBLIOGRAPHIE

- A. Jarrige. Eyrolles (1971) Les cendres volantes – propriétés – applications industrielles
- P . Andrieu, J.H. Colombel (1976) Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°83
Utilisation des cendres volantes en technique routière
- D. Ferrand (1998) Thèse Université de Montpellier II
Cendres volantes de lit fluidisé circulant, charbon : cortèges
minéralogiques, traitement thermique et matériaux néoformés
- M. Allonge, M. Vivier (1966) Utilisation des cendres volantes en techniques routières
Groupe d'étude du Nord-Pas-de-Calais
- Comité Technique AIPCR des terrassements (1997)
Drainage, couche de forme, matériaux légers pour remblais
- Prédis du Nord-Pas-de-Calais (1996)
- Etude BRGM/RP-55730-FR – Rapport final (2007)

Sites Internet

www.surschiste.com
www.flyash.info
www.lorraine-reel.net
www.brgm.fr



IX. CONCLUSION

L'utilisation des cendres volantes de charbon contribue à économiser de l'énergie en réduisant la demande en ressources naturelles et en matériaux habituels utilisés dans les bétons ou la route tels que la chaux, le ciment dont la production nécessite de grosses consommations d'énergie.

Chaque tonne de cendre volante utilisée pour remplacer du ciment, économise l'équivalent d'un baril de pétrole à importer, ou la production d'environ une tonne de CO₂.

L'utilisation des cendres volantes s'inscrit dans une politique de développement durable.