

2023

Les dossiers du géotechnicien

GRANULATS SECONDAIRES

Cendres volantes

(version du 5 juin 2023)



Janssens Benoît

NOTICE : Ce dossier a été réalisé avec comme objectif d'être un ouvrage interactif d'informations. Ainsi, si vous souhaitez compléter des chapitres ou y ajouter des informations complémentaires ou des remarques, voire des commentaires, n'hésitez pas à me les communiquer, via l'adresse e-mail (jbconseils2020@gmail.com) ou via le site internet (<https://jbconseils.be>). Je me ferai un plaisir de les introduire dans une version actualisée du dossier ; d'où l'importance de vérifier la date du document que vous lisez par rapport à la version présente sur le site.

Je vous remercie d'avance de votre coopération.

Benoît JANSSENS

Conseiller géotechnicien indépendant et transmetteur d'informations

Table des matières

1. GENERALITES.....	4
1.1 DEFINITIONS ET CLASSIFICATIONS	4
1.1.1 Définitions générales.....	4
1.1.2 Classifications des cendres volantes	4
2. CENDRES VOLANTES DE CHARBON	7
2.1 GENERALITES	7
2.1.1 Définition et classifications spécifiques	7
2.1.2 Processus de fabrication.....	8
2.1.3 Contextes.....	9
2.2 GESTION ET TRAITEMENT	11
2.2.1 Stockage et transport.....	11
2.2.2 Traitement préalable des cendres volantes brutes	11
2.3 CARACTERISATION DE LA CENDRE VOLANTE SILICEUSE.....	11
2.3.1 Examens visuel et microscopique	11
2.3.2 Analyse chimique et composition minéralogique.....	12
2.3.3 Analyses environnementales normalisées	13
2.3.4 Caractérisation géotechnique normalisée	14
2.3.5 Classification géotechnique.....	16
2.3.6 Etude de comportement	17
2.4 FILIERES DE VALORISATION DE LA CENDRE SILICEUSE DE CHARBON	17
2.4.1 Etats des lieux.....	17
2.4.2 Domaine du génie civil	17
2.4.3 Activités minières	22
2.4.4 Environnement.....	22
2.4.5 Autres voies de valorisation.....	22
2.5 CARACTERISATION DE LA CENDRE VOLANTE CALCIQUE.....	23
2.5.1 Examens visuel et microscopique	23
2.5.2 Analyse chimique et composition minéralogique.....	23
2.5.3 Analyses environnementales	24
2.5.4 Caractérisation géotechnique normalisée	24
2.5.5 Etudes de comportement géomécaniques.....	25
2.6 FILIERES DE VALORISATION DE LA CENDRE VOLANTE CALCIQUE.....	26
2.6.1 Etats des lieux.....	26
2.6.2 Domaine du génie civil	26
2.6.3 Activités minières	27
2.6.4 Environnement.....	27
2.6.5 Autres voies de valorisation.....	27
2.7 CAS PARTICULIER DES CENDRES DE FOYER DE CHARBON	27
2.7.1 Définition	27
2.7.2 Cendre de foyer siliceuse (<i>centrale à charbon pulvérisé</i>)	27
3. CENDRES VOLANTES DE BOIS/BIOMASSE	28
3.1 GENERALITES	28
3.1.1 Définition et classifications.....	28

3.1.2	Processus de fabrication.....	29
3.1.3	Contextes.....	30
3.2	GESTION ET TRAITEMENT	30
3.2.1	Stockage et transport.....	30
3.2.2	Prétraitement des cendres volantes brutes	31
3.3	CARACTERISATION	31
3.3.1	Principales spécificités	31
3.3.2	Examen visuel	31
3.3.3	Compositions chimique et minéralogique.....	31
3.3.4	Analyses environnementales	33
3.3.5	Caractérisation géotechnique.....	34
3.3.6	Etude de comportement	34
3.4	FILIERES DE VALORISATION	34
3.4.1	Etats des lieux.....	34
3.4.2	Domaine agricole.....	34
3.4.3	Domaine du génie civil.....	35
3.4.4	Autres domaines.....	36
3.5	CAS PARTICULIER DES CENDRES DE FOYER DE BOIS/BIOMASSE	37
4.	CAS PARTICULIER DES CENDRES VOLANTES DE PAPIER	38
4.1	GENERALITES	38
4.1.1	Définition et classifications.....	38
4.1.2	Contextes.....	38
4.1.3	Processus de fabrication.....	38
4.2	GESTION ET TRAITEMENT	38
4.2.1	Stockage et transport.....	38
4.3	CARACTERISATION	39
4.3.1	Examen visuel	39
4.3.2	Analyse chimique et minéralogique	39
4.3.3	Analyses environnementales	40
4.3.4	Caractérisation géotechnique.....	41
4.3.5	Etude de comportement	41
4.4	FILIERES DE VALORISATION	42
4.4.1	Etats des lieux.....	42
4.4.2	Domaines agricole et forestier.....	42
4.4.3	Routes et voies ferrées.....	42
4.4.4	Autres domaines.....	42
5.	BIBLIOGRAPHIE	43

1. GENERALITES

1.1 DEFINITIONS ET CLASSIFICATIONS

1.1.1 Définitions générales

Tout processus thermique se caractérise d'une part, par la combustion des composés volatils et du carbone présents sous diverses formes (*hydrocarbures, charbon, houille, lignite, tourbe, bois, biomasse, papier, ordures ménagères, plastique, etc.*) et d'autre part, par la formation d'un résidu solide composé de différents minéraux non brûlés ou néoformés après fusion dans le four ou lors du refroidissement hors du four.

Ce résidu souvent basique appelé *cendre* peut être récupéré sous deux formes distinctes :

- La *cendre de foyer* ou *cendre de fond* ("*bottom ash*") ou *mâchefer* concerne les particules plus lourdes récupérées à la base du foyer, via un dispositif de bassin ou de racloirs ;
- La *cendre volante* ("*fly ash*") se caractérise par des particules légères qui accompagnent la fumée et cristallisent lors de leur ascension piégeant une partie des polluants. Un dispositif de dépoussiérage plus ou moins complexe permet d'en récupérer une bonne partie (80 à 99%) avant d'envoyer la fumée dans l'atmosphère. Une *cendre volante* est donc un *fin résidu solide, basique et issu de deux processus distincts et successifs* : *Un processus de combustion thermique dans un four ou un foyer et un processus de traitement ou d'épuration des fumées*. Elle représente souvent une bonne majorité des cendres produites.

1.1.2 Classifications des cendres volantes

Plusieurs classifications existent. Le présent chapitre reprend les principales.

1.1.2.1 Classification basée sur la nature du combustible

Il existe une certaine diversité de cendres volantes sur base de la nature du combustible utilisé.

- La *cendre volante de centrale à hydrocarbures* est issue d'un processus thermique faisant intervenir un combustible fossile liquide. Ce dispositif génère très peu de cendres, vu la forme liquide et la grande pureté du combustible. De plus, cette centrale tend à disparaître de nos jours. Le présent ouvrage ne reprend pas ce type de cendre volante. Elle peut contenir des substances dangereuses ;
- La *cendre volante de charbon* est issue d'une centrale thermique utilisant un combustible fossile solide (*charbon, anthracite, houille, lignite et tourbe*) pour produire de l'électricité à partir de la vapeur d'eau. C'est le type de cendre la plus abondamment générée dans le monde ;
- La *cendre volante de bois* provient d'un foyer industriel utilisant du bois de tout type (*bois pur ou déchets de bois*) pour produire de la chaleur ou de l'électricité ;

REMARQUE : Il existe également une *cendre volante de bois provenant de foyer domestique* (*feux ouverts et poêle à chaleur chez les particuliers*) mais celle-ci, soit retombe dans le foyer où elle est mélangée à la cendre de foyer, soit est envoyée en l'air. Elle est responsable d'une certaine partie des émissions de gaz à effet de serre et est plus importante en ville.

- La *cendre volante de biomasse* provient d'une centrale de coïncinération utilisant un mélange de matières organiques (*déchets de bois, d'agriculture et alimentaire*) pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Ce type d'installation de faible puissance tend à se développer de nos jours afin de valoriser énergétiquement les différents déchets ;

REMARQUE : Vu les grandes similitudes (*composition, traitement et filières de valorisation*) qui existent avec la cendre volante de bois, ces deux types sont regroupés sous le nom de "*cendre volante de bois/biomasse*".

- La *cendre volante de papier* provient d'un four de papeterie qui reprend les déchets de bois et de papier ainsi que certaines boues du traitement. C'est en réalité une cendre volante de biomasse ;
- La *cendre volante d'incinérateur d'ordures ménagères* également appelée en France, *Résidu d'Épuration des Fumées d'un Incinérateur d'Ordures Ménagères* (REFIOM) est produite dans un incinérateur ou une unité de valorisation énergétique (UVE) qui consiste à brûler les déchets afin de réduire leur volume et de produire de la chaleur et de l'électricité. Sa description n'est pas reprise dans le présent ouvrage. Pour de plus amples informations sur ce type de cendre, le lecteur doit se référer au dossier du géotechnicien "*Sous-produits d'incinérateur*" (*en cours d'élaboration à ce jour*) ;
- La *cendre volante de four de cimenterie* provient de la combustion des différents combustibles utilisés pour alimenter le four à ciment. Le présent ouvrage ne reprend pas ce type de cendre volante.

1.1.2.2 Classification basée sur la présence de substance dangereuse

La cendre volante peut être classée en deux catégories selon la présence ou pas d'une certaine quantité de substances dangereuses comme les métaux lourds, les hydrocarbures, les dioxines et furanes ou encore les éléments radioactifs.

- La *cendre volante non dangereuse* ne contient pas ou peu de substances dangereuses ;
- La *cendre volante dangereuse* contient des substances dangereuses.

Différents textes juridiques et administratifs propres à chaque pays, voire région fixent les valeurs-seuils entre les deux types de cendre volante.

1.1.2.3 Classification selon le Code Européen des déchets (CED)

Le Catalogue Européen des Déchets s'est inspiré des deux précédentes classifications pour établir sa classification dont un des objectifs principaux est de fournir un code EURAL spécifique à chaque déchet recensé afin de pouvoir correctement le définir et l'utiliser au sein des pays-membres de l'Europe.

Toutes les cendres volantes reprises dans cet ouvrage rentrent dans la catégorie 10 01 ("*Déchets provenant de centrales thermiques et autres installations de combustion*").

Tableau 1.I - Classification européenne des cendres volantes : L'astérisque signifie que le déchet contient des substances dangereuses (*source* : CED).

10	Déchets provenant de procédés thermiques
10 01	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion
10 01 02	<i>Cendres volantes de charbon</i>
10 01 03	<i>Cendres volantes de tourbe et de bois non traité</i>
10 01 04*	<i>Cendres volantes et cendres sous chaudières d'hydrocarbures</i>
10 01 13*	<i>Cendres volantes provenant d'hydrocarbures émulsifiés employés comme combustibles</i>
10 01 16*	<i>Cendres volantes provenant de la coïncinération et contenant des substances dangereuses</i>
10 01 17	<i>Cendres volantes provenant de la coïncinération autres que celles visées à la rubrique 10.01.16*</i>
10 01 19	<i>Déchets provenant de l'épuration des gaz autres que ceux repris dans des rubriques précédentes</i>

REMARQUE : La cendre de papeterie est généralement reprise sous le code 10 01 17, étant donné qu'elle résulte d'une coïncinération de biomasse.

1.1.2.4 Classification basée sur la composition chimique de la cendre volante

Cette classification reprise dans la norme européenne EN 197-1 (*composition des ciments*) et américaine ASTM C 618 a été initialement établie pour les cendres volantes de charbon. Elle peut également s'appliquer aux autres types de cendres volantes.

Elle se base notamment sur la composition chimique des cendres volantes et principalement leur teneur en silice réactive, en aluminium et en chaux libre ainsi que sur la nature du matériau brûlé et le type de centrale. Elle permet de déterminer certains comportements du matériau et certaines filières de valorisation.

Trois types existent :

- La *cendre siliceuse* ou *alumino-siliceuse* (**V** en Europe et **F** aux USA - "*pulverized fuel ash*") est issue de la combustion de la houille (72 - 90% de carbone) dans une centrale thermique à charbon pulvérisé (CP). Elle est riche en silice réactive (> 25%) et en alumine mais est pauvre en chaux vive (< 5 à 7 % selon le continent) et en sulfates. De par sa composition proche à celle d'une pouzzolane naturelle, elle possède des propriétés pouzzolaniques fort appréciées. Elle nécessite un agent activant de type clinker Portland ou chaux (*vive ou hydratée*) pour pouvoir réagir et former des composés cimentaires type CSH. Sa couleur est sombre ;
- La *cendre calcique* ou *sulfocalcique* (**W**) est issue de la combustion de la lignite (65 – 72% de carbone) dans une centrale à charbon à lit fluidisé circulant (LFC) ou centrale à "charbon propre". Elle est riche en CaO (> 10 à 20 % selon le continent) et éventuellement en sulfates (*sous forme d'anhydrite*) et contient moins de silice réactive et d'alumine. Elle a des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques, même en absence de tout activant. Elle n'a besoin que d'eau. Bien que similaire à un clinker Portland, elle est cependant peu utilisée dans le domaine des liants en raison de sa teneur parfois élevée en sulfates responsables de la formation d'ettringite secondaire. Sa couleur varie entre le brun et le gris ;

- La **cendre silico-calciq**ue est une cendre volante de composition intermédiaire aux deux précédentes. Elle contient de bonnes quantités de silice réactive et de chaux suite à l'apport initial de calcaire. Vu sa très faible production, elle ne fait pas l'objet d'un chapitre particulier dans le présent dossier.

REMARQUE : L'**activité pouzzolanique** peut se définir comme la *capacité des silicates réactifs et aluminates présents dans le matériau à réagir avec la chaux hydratée pour former à terme des complexes CSH* similaire à ceux d'un ciment. Il faut donc que le matériau possède une certaine teneur en silice réactive (et non inerte comme le quartz) et en aluminium.

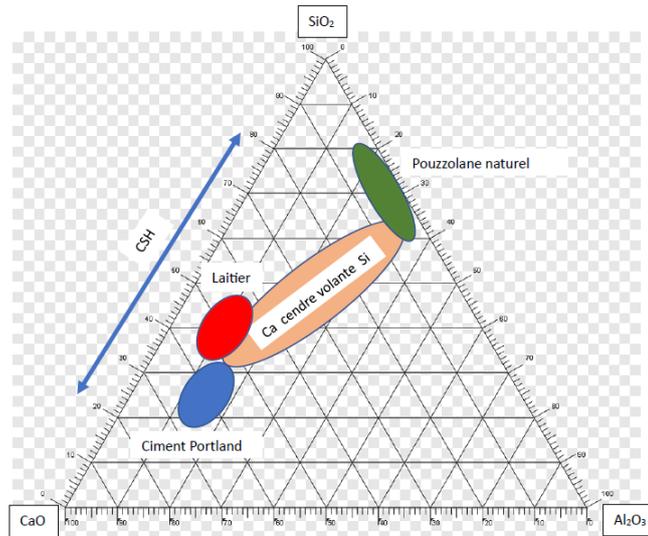


Figure 1.1 : Diagramme ternaire des principaux liants hydrauliques (Source : JB Conseils).

La cendre volante siliceuse a une composition similaire à de la pouzzolane naturelle ou du basalte alors que la cendre volante calcique a une composition similaire au ciment Portland ou au laitier.

1.1.2.5 Classification basée sur la teneur en eau de la cendre volante

La cendre volante peut être présente sous trois formes distinctes de teneur en eau nécessitant une manipulation, une gestion et un transport spécifiques :

- La **cendre volante sèche** est le résultat d'un traitement de dépoussiérage à sec (*dépoussiéreur électrostatique, électro-filtre et filtre à manche*). Elle nécessite des précautions particulières concernant la manipulation, le stockage et le transport, via des contenants hermétiques à l'eau (*silo et citerne*). Elle peut générer un certain nombre de poussières lorsqu'elle est soumise à l'air. Elle intervient principalement dans la fabrication du ciment et du béton ;
- La **cendre volante humide** contient une certaine humidité suite à un traitement à l'eau des fumées (*collecteur à rideaux d'eau*) et/ou le plus souvent à un stockage à l'air libre. La teneur en eau ne doit pas excéder 30 %. Son stockage se fait sous forme de dépôt couvert ou pas et son transport se réalise par contenant ouvert (*benne, bande transporteuse, etc.*). Elle est donc plus facilement manipulable et occasionne moins de poussières. Une cendre volante calcique peut être humidifiée juste avant son application afin de démarrer la prise ;
- La **cendre volante saturée** (> 30 % d'eau) se caractérise par une teneur élevée en eau, suite à son passage à travers un dispositif de dépoussiérage de fumée à l'eau ou à son trempage et conservation dans un bassin. Sa gestion nécessite souvent une opération de séchage préalable afin de pouvoir réduire sa teneur en eau et ensuite de la gérer comme une cendre volante humide. Cette forme ne convient pas pour une cendre volante calcique utilisée pour sa teneur en chaux vive.

REMARQUE : La saturation favorise également la lixiviation de certains éléments solubles et dangereux qui peuvent ainsi être mieux récupérés et peut ainsi modifier la composition minéralogique de la cendre volante. Elle permet également d'augmenter les propriétés pouzzolaniques en présence de cendre calcique.

2. CENDRES VOLANTES DE CHARBON

2.1 GENERALITES

2.1.1 Définition et classifications spécifiques

2.1.1.1 Définitions

a. Famille des roches charbonneuses

Une *roche charbonneuse* se définit comme une *roche sédimentaire détritique carbonée mais aussi comme un combustible solide, foncé, formé par accumulation de débris végétaux en milieu réducteur (marécage) et ayant subi le phénomène de carbonisation ou de carbonification, soit un enfouissement progressif des matériaux associé à la destruction biologique de la matière organique et à l'élimination progressive de l'eau.*

Il existe une classification de cette famille sur base de sa teneur en carbone et en matières volatiles (*sous-famille de la houille*) et donc sur l'évolution de la transformation.

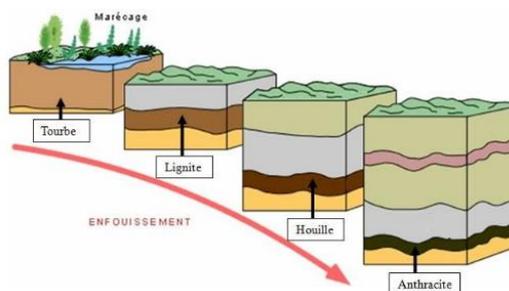


Figure 2.1 : Transformation de la tourbe en anthracite (Source : tpecharbonroyer).

Tableau 2.I - Description des principales roches charbonneuses selon teneur croissante en carbone.

Nom	% C	Teinte	Caractéristiques
Tourbe	< 60	Brune	Sédiment peu compact et formé principalement de mousse et d'eau. Dégage beaucoup de fumées, peu de chaleur et de nombreux résidus.
Lignite	60 - 70	Brun noir	Roche brunâtre à débris ligneux de bois contenant de 30 à 40% d'humidité et de matières volatiles ainsi qu'une teneur élevée en soufre (jusqu'à 8%). Brûle peu (PCI = 10 MJ/kg).
Houille	70 - 92	Noire mate à brillante	Roche légère riche en débris résistants à la compaction tels que les spores, les spicules. Se découpe en cubes selon 3 familles de joints. Brûle bien (PCI = 32 - 39 MJ/kg). La nomenclature est basée sur leur teneur en matières volatiles : <ul style="list-style-type: none"> ➔ Charbon maigre 8 - 12 % ➔ Charbon demi-gras 12 - 20 % ➔ Charbon gras 20 - 33 % ➔ Charbon flambant gras > 33 %
Charbon sub-bitumineux	72 - 76	Noire	Charbon contenant entre 15 et 30 % d'humidité et très peu de soufre. Peut contenir des carbonates (sidérite, calcite). Utilisé en centrale à charbon.
Charbon bitumineux ou charbon mou	76 - 92	Noire	Charbon dense ne contenant pas plus de 20% d'humidité. Peut contenir des teneurs variables en soufre et autres éléments nocifs. Utilisé en centrale à charbon.
Anthracite ou charbon dur	92 - 99	Noire brillante	Charbon dur riche en carbone et pauvre en matières volatiles et en eau. Ne salit pas les mains. Reste solide lors de la carbonisation en chaudière.
Graphite	100	Noire	Terme ultime de la carbonification appartenant au métamorphisme

b. Cendre volante de charbon

Une *cendre volante de charbon* peut se définir comme un *fin résidu issu du dépoussiérage des fumées générées lors de la combustion du charbon (houille, lignite, anthracite) dans une centrale thermique à charbon. Certaines de ces cendres peuvent avoir subi également une longue période de stockage par la suite.*

REMARQUE : Le terme englobe également la cendre volante de centrale thermique à charbon où a été introduit moins de 10 % de bois ou biomasse ainsi que les mélanges cendre volante – cendre de foyer.

Tableau 2.II – Dénomination européenne des cendres volantes de charbon (source : CED).

10	Déchets provenant de procédés thermiques
10 01	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion
10 01 02	<i>Cendres volantes de charbon (charbon pulvérisé)</i>
10 01 19	<i>Déchets provenant de l'épuration des gaz autres que ceux repris dans des rubriques précédentes (cendre volante de centrale à charbon à lit fluidifié circulant)</i>

REMARQUE : Selon la classification européenne, il n'existe pas de cendre volante de charbon contenant des substances dangereuses.

2.1.1.2 Classification spécifique

Si la cendre volante de charbon peut se classer dans les différentes classifications reprises au chapitre 1, il y a lieu de constater que la classification liée à la composition chimique a été spécialement conçue pour ce type de cendre volante. En effet, la composition de la cendre volante dépend des paramètres de combustion et donc du type de la centrale à charbon.

2.1.2 Processus de fabrication

Le principe général d'une centrale thermique à charbon est d'utiliser un combustible fossile de type charbon pour produire de la vapeur par chauffage de l'eau à haute température et pression et d'envoyer cette vapeur sous pression dans une turbine qui, couplée à un alternateur, produit de l'électricité.

Il existe deux grandes familles de centrales thermiques à charbon sur base du processus et du type de charbon utilisé qui vont fournir des cendres volantes distinctes :

- La **centrale thermique à charbon pulvérisé** (CP) ou **centrale à flamme** est l'installation la plus fréquente dans le monde, notamment dans les pays ayant d'importantes réserves de charbon (*Inde, Chine, USA, Allemagne, etc.*), en raison de son rendement élevé. Le processus consiste à laver (élimination des substances minérales non combustibles et réduction de la production de cendres volantes) et broyer finement un combustible relativement riche en carbone et pauvre en soufre avant de le pulvériser en présence d'une quantité adaptée d'air chaud (*combustion parfaite*) dans la chambre à combustion ($T : 1\ 200$ à $1\ 700^{\circ}\text{C}$) où il s'enflamme et libère la chaleur et les impuretés. La cendre de foyer est récupérée, via un bassin d'eau où elle se transforme en sable scoriacé. La cendre volante qui en découle représente 9 % de la masse initiale du combustible pulvérisé et jusqu'à 90 % de la masse totale des cendres produites. La température élevée du four n'exige pas d'apport complémentaire de calcium pour traiter le soufre. La cendre ainsi produite est une **cendre volante siliceuse** également appelée **cendre volante de charbon pulvérisé** ("*pulverised fuel ash*"). Celle-ci peut être de nature silico-calci que si du calcaire est introduit lors des opérations de dépoussiérage des fumées. Par contre, ce type de centrale produit d'importantes quantités de NO_x ;

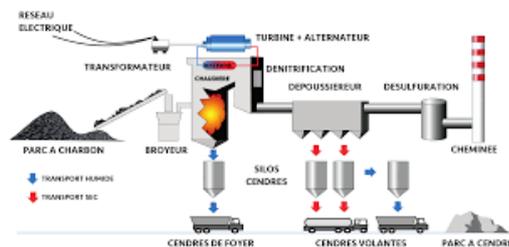


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale à charbon pulvérisé (source : UFCC).

- La **centrale à charbon à brûleur dit "low NO_x" ou supercritique** est une variante de la centrale à charbon pulvérisé dont l'objectif principal est de réduire l'émission de NO_x en réduisant la température de combustion et le surplus d'oxygène. La combustion est moins complète et présente les défauts suivants : 1) Le carbone a tendance à se transformer notamment en HAP dont une faible quantité ne peut être récupérée, via les systèmes de désulfuration (*la cendre volante peut devenir polluée*), 2) Il y a une augmentation de la quantité de combustible non brûlé avec comme conséquences importantes, une perte de rendement de la centrale et une production plus importante de cendre et 3) La cendre contient plus de C (*jusqu'à 30 %*). Ainsi, en raison de sa teneur particulièrement élevée en C et d'un certain risque d'avoir des HAP, ce type de cendre ne peut être valorisée dans les filières classiques ;

- La *centrale à lit fluidisé circulant* (LFC) ou *centrale à charbon propre* est une centrale plus récente et moins puissante qui émet moins de gaz à effet de serre (NO_x) suite à une température plus faible de combustion (*de l'ordre de 850°C*). De par son meilleur rendement thermique, un combustible de plus faible pouvoir thermique comme la lignite peut être utilisé. Cependant, celui-ci contient généralement plus de soufre qui doit être traité par un ajout de calcaire. Le principe consiste à maintenir à une température plus faible, un lit fluidifié composé d'un mélange de charbon grossièrement broyé, de calcaire et d'air très chaud. Les particules de combustible imbrûlé léger quittant le foyer par la partie supérieure sont réinjectées à la base après passage dans un cyclone de recirculation. Le dispositif permet ainsi de réduire la production de cendres volante ainsi que la volatilisation des métaux lourds. Le dioxyde de soufre émis lors de la combustion est capté par le calcaire injecté dans le foyer et précipite sous forme de sulfate de calcium. Les fumées de combustion passent par un dispositif performant de dépoussiérage à sec qui fournit une cendre volante riche en calcium et en sulfate dite *cendre volante calcique*. Les cendres de foyer sont réinjectés dans le processus après une opération de broyage. Ce type de centrale s'adapte très vite au changement de combustible. En France, deux centrales existent : Saint-Avold-Carling (*Lorraine*) et Gardanne (*Provence*).

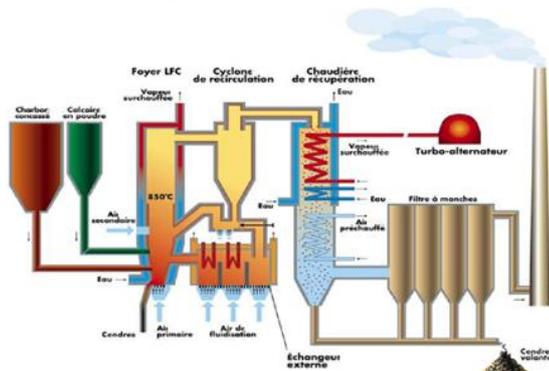


Figure 2.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale à lit fluidifié circulant (source : Semantic Scholar).

D'autres sous-produits industriels comme le gypse de désulfuration et les produits de lavage sont également générés dans une centrale thermique. Le tableau ci-dessous reprend une répartition moyenne des teneurs de ces différents sous-produits industriels.

Tableau 2.III - Principaux types et teneurs des sous-produits industriels issus d'une centrale thermique (source : ECOBA – 2002).

Nature	Teneur moyenne
Cendres volantes	69 %
Cendres de foyer	13 %
Gypse de désulfuration	17 %
Produits de lavage	1 %

Ainsi, la cendre volante est le sous-produit industriel le plus abondant au sein d'une centrale thermique à charbon.

2.1.3 Contextes

2.1.3.1 Contexte historique

L'histoire des cendres volantes de charbon est intimement liée à l'histoire des centrales thermiques à charbon dont les premiers modèles sous forme de centrale à charbon pulvérisé ont vu le jour à la fin du 19^{ème} siècle. La première centrale en Belgique remonte à 1929 (*Mol*).

Par la suite, elles se sont développées afin d'avoir une puissance de plus en plus importante (*de quelques dizaines de MW au milieu du 20^{ème} siècle à 1 000 MW actuellement*) et de pouvoir ainsi rester concurrentiel par rapport aux centrales nucléaires. Cela a eu comme conséquence d'augmenter la production des cendres (*volantes et de foyer*) et leur stockage à défaut de filières de valorisation.

Toutefois, ce modèle émet d'importantes quantités de gaz à effet de serre. C'est pourquoi dans les années 1980, a été développé la technologie du lit fluidisé circulant (LFC) qui permet de réduire l'émission de certains gaz (NO_x , SO_2 et SO_3). Cependant, leur puissance actuelle (*300 – 400 MW*) ne leur permet pas de concurrencer les centrales à charbon pulvérisé et les centrales nucléaires.

2.1.3.2 Contexte juridique

En Europe, la cendre volante de charbon est considérée comme un déchet non dangereux. Depuis quelques années, certains pays (*France*) souhaitent faire sortir ce matériau du statut de déchet.

2.1.3.3 Contexte économique

Si la production de cendres volantes de charbon tend à diminuer dans le temps, elle reste néanmoins encore très importante, tout comme les stocks anciens. Aux USA, elle constitue le deuxième déchet le plus produit derrière les ordures ménagères avec une production de 123 millions de tonnes en 2005. La production annuelle mondiale est estimée à 400 millions de tonnes.

Plusieurs associations sont liées à ces matériaux et peuvent fournir des informations supplémentaires.

- **ACAA** : *American Coal Ash Association* ;
- **ACOPA** : *Association européenne des producteurs de cendres volantes* ;
- **CCUJ** (*Center for Coal Utilization – Japon*) ;
- **IEA** (*International Energy Association*) *Coal Research* ;
- **UFCC** : *Union Française des Cendres de Charbon*.

2.1.3.4 Contexte environnemental

Les centrales thermiques à charbon pulvérisé ont un impact environnemental non négligeable (*émission de gaz à effet de serre, métaux lourds, dioxines et furanes et d'éléments radioactifs*), malgré la présence de processus complexe de traitement des fumées. C'est pourquoi de nombreux pays européens ont décidé de réduire, voire de supprimer leur présence. Toutefois, d'autres pays dont certains pays européens (*USA, Chine, Japon, Australie, Allemagne, etc.*) ont décidé de poursuivre, voire d'augmenter leur exploitation.



Figure 2.4 : Vue de la centrale d'Hazelwood (*Australie*) considérée comme la plus polluante au monde (*internet*).

En termes de valorisation, des pays comme la Belgique, l'Allemagne et la Hollande valorisent les nouvelles cendres volantes de centrale à charbon pulvérisé à plus de 95 %, notamment dans le ciment ; ce qui permet de préserver les ressources naturelles, de réduire les émissions de gaz (*1 t de cendre volante comme additif du béton économise 1 tonne de CO₂*) et de contribuer ainsi à protéger durablement l'environnement.

Bien que le risque de pollution soit relativement faible, un guide français d'acceptabilité environnementale pour une application des cendres volantes en domaine routier a été rédigé par le SETRA.

2.1.3.5 Contexte scientifique et perspectives d'avenir

Si le terme *cendre volante de charbon* a été créé vers 1937 par l'industrie, les premières recherches concernant sa valorisation dans le ciment en tant que pouzzolane remonte à 1914.

Aux USA, les premiers chantiers d'insertion de cendre volante de charbon dans du béton remonte à 1947 et concerne notamment le béton de masse du barrage *Hungry Horse* dont la construction a utilisé 120 000 tonnes de cendres volantes dans les 2,3 millions de tonnes de béton.

En 1949, l'ASTM publie le recensement de l'état de la pratique dans ce domaine (*H.S Meissner – "Pozzolans used in Mass Concretes"*). La première norme ASTM sur les cendres volantes date de 1954.

En France, les recherches sur la valorisation des cendres volantes, notamment dans le ciment aboutissent en 1951 à l'élaboration d'un ciment spécifique (*50% clinker Portland – 50% mélange laitier / cendre volante*) breveté par **Fouilloux** sous le nom de *ciment pouzzolano-métallurgique*, ainsi qu'à la première norme française à ce sujet en 1964.

Par la suite, de nombreuses études ont été réalisées sur les cendres volantes, notamment à deux niveaux : 1) la recherche de nouvelles voies de valorisation (*agriculture, routes et autres domaines du génie civil*), notamment en ce qui concerne la cendre volante calcique et les anciens stocks de cendres volantes et 2) une meilleure compréhension de leur rôle dans les différents processus de prise du ciment et ce, généralement en présence d'une grande multitude de sous-produits industriels. Ce dernier point aboutira en outre à l'apparition en 1995 de la norme EN 450 "*cendre volante dans le béton*" qui fixe les exigences en termes de propriétés applicables et à son agrément technique en qualité d'additif du béton en 1996.

2.2 GESTION ET TRAITEMENT

2.2.1 Stockage et transport

Selon sa teneur en eau, la cendre volante est manipulée, stockée et transportée différemment :

- La *cendre volante sèche* (W proche de 0%) se présente sous forme d'une fine poudre pulvérulente qui nécessite un stockage et un transport, via des contenants hermétiques à l'eau (*silo et citerne*) et à l'air. Elle peut générer un certain nombre de poussières lorsqu'elle est soumise à l'air, d'où des précautions supplémentaires à prendre à ce sujet ;
- La *cendre volante humide* ($W < 30\%$) est stockée sur un tas couvert ou non (*terril*). En cas de stock couvert, un arrosage est organisé afin de réduire la dispersion de poussière. Son transport se fait par contenant ouvert (*benne, bande transporteuse, etc.*). Elle est plus facilement manipulable et occasionne moins de poussières. La cendre volante calcique peut être humidifiée avant sa mise en œuvre ;
- La *cendre volante saturée* est stockée en bassin et nécessite souvent une opération préalable de séchage avant de pouvoir la transporter en benne tout en réduisant son poids.

Le bon de livraison doit mentionner la teneur en eau au départ de la centrale.

En ce qui concerne les précautions à prendre, vu son caractère basique, des risques de blessure à la peau et aux yeux existent. De plus, il ne faut pas négliger la présence de silice cristalline (*ex. tridymite, cristobalite*) qui peuvent présenter des risques respiratoires à terme pour les personnes les manipulant ainsi que les personnes vivant à proximité des sites de manutention.

2.2.2 Traitement préalable des cendres volantes brutes

Les éventuels traitements préalables à réaliser sur une cendre volante consistent en un séchage de la fraction saturée, l'élimination des matières indésirables (*métaux ferreux et non ferreux, imbrûlés notamment en cas d'ajout de biomasse lors de la combustion*) et une opération de calibrage par concassage/criblage.

2.3 CARACTERISATION DE LA CENDRE VOLANTE SILICEUSE

Les caractéristiques d'une cendre volante siliceuse (*centrale à charbon pulvérisé*) dépendent fortement des paramètres du combustible (*origine, teneur en matières volatiles, en fractions résiduelles de matières organiques, en cendres et en imbrûlés, granulométrie, etc.*), des paramètres de combustion de la centrale (*température, pression, air, etc.*) et de la teneur en eau de la cendre lié aux modes de refroidissement et de conservation.

Cette caractérisation passe plusieurs étapes dont certaines sont normalisées.

2.3.1 Examens visuel et microscopique

La cendre volante siliceuse de charbon se présente à l'état sec sous forme d'une poudre fine, pulvérulente, douce au toucher (*analogue au ciment*) et composée principalement de fines particules sphériques (0,5 à 400 microns), amorphes à vitreuses et parfois transparentes. Le diamètre moyen est de 30 microns. Elle est considérée comme un filler.

La couleur varie entre le gris et le noir selon la quantité de carbone non brûlé et la nature du combustible d'origine (*la houille donne une cendre plus foncée*).

Le refroidissement brutal lors de l'ascension des fumées et hors de la chambre de combustion (*de 1 400 à quelques °C en très peu de temps*) entraîne une solidification des particules en suspension et du gaz sous forme d'éléments sphériques qui emprisonnent également les gaz et les polluants. Ce refroidissement rapide est également responsable de l'aspect vitreux (*absence de cristallisation*) et de la présence de propriétés pouzzolaniques. Un refroidissement plus lent donne lieu à l'apparition d'une certaine cristallisation mais aussi à une diminution des propriétés pouzzolaniques du matériau.

L'examen microscopique montre que le cœur des sphères est, soit solide, soit creux et rempli de gaz piégé lors du refroidissement, Ce gaz peut s'échapper par la suite et donner lieu à une cloque ou excroissance. De même, certaines sphères (*cénosphères*) sont composées en réalité d'un assemblage de plusieurs petites sphères (*plérosphères*). D'autres grains ont une forme plus irrégulière et une couleur plus foncée. Il s'agit généralement de charbon imbrûlé.

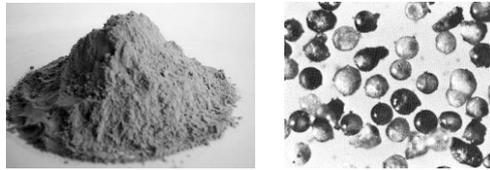


Figure 2.5 : Détails visuel et au microscope d'une cendre volante siliceuse (source : AC Presse et Huet et al. (1981)).

2.3.2 Analyse chimique et composition minéralogique

2.3.2.1 Analyse chimique

La cendre volante siliceuse de charbon est composée principalement de SiO_2 (*silice réactive*), Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO (*chaux*) et SO_3 dont les teneurs varient d'un lot à l'autre selon la composition du combustible et le dispositif de combustion. Il reste toujours quelques pourcents de combustibles non brûlés (5 à 10%).

Le tableau ci-dessous reprend la composition chimique de quelques combustibles utilisés en centrale à charbon et de deux types de cendres volantes.

Tableau 2.IV - Composition chimique moyenne selon des associations des cendres volantes.

% (NC : valeur non communiquée)	Combustibles			Cendres volantes		
	Anthracite	Charbon bitumeux	Lignite	Cendre siliceuse	Cendre calco- siliceuse	Cendre calcaïque
SiO_2	47 - 68	7 - 68	6 - 45	20 - 76	40 - 60	5 - 50
Al_2O_3	25 - 43	4 - 39	4 - 35	5 - 40	20 - 30	1 - 28
Fe_2O_3	2 - 10	2 - 44	1 - 18	2 - 27	4 - 15	1 - 10
CaO total	0 - 4	1 - 36	2 - 50	0,1 - 20	5 - 30	10 - 50
Chaux vive	NC	NC	NC	< 5 %	NC	1 - 30
SO_3	0 - 1	0 - 32	6 - 30	< 15	NC	5 - 34
K_2O	--	0 - 4	0 - 2	< 8	NC	< 9
MgO	0 - 1	0 - 4	3 - 12	< 15	NC	< 5
TiO_2	NC	NC	NC	< 6	NC	0 - 9,2
Na_2O	--	0 - 3	0 - 11	< 6	NC	< 2
P_2O_5	NC	NC	NC	< 10	NC	< 1,1
MnO	NC	NC	NC	< 0,08	NC	< 0,07
Chlore	NC	NC	NC	< 0,07	NC	NC
Perte au feu	NC	NC	NC	0,7 - 9,8	NC	7 - 16
% Corganique	93 - 97	75 - 90	50 - 60	Très faible	NC	NC
Pouvoir calorifique (kJ/kg)	33 500 - 34 900	32 000 - 37 000	< 25 110	---	---	---

REMARQUE : La *chaux vive* est la chaux présente sous la forme CaO tandis que la *chaux libre* regroupe la chaux vive et la chaux éteinte ou hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

2.3.2.2 Analyse minéralogique

Le combustible de départ est généralement constitué de carbone et d'impuretés minérales ($\pm 10\%$) présentes principalement sous forme de silice cristallisée (*quartz*) et d'argiles dont la kaolinite issue de la précipitation d'alumine et de silice dans la tourbe (*milieu acide*) est bien représentée.

Après fusion à haute température ($1\,400^\circ\text{C}$) et un brutal refroidissement, la majorité (50 à 80 %) des éléments apparaissent sous forme amorphe ou vitreuse alors que le reste est sous forme de minéraux résiduels qui n'ont pas connu de fusion ou de minéraux néoformés lors du refroidissement de la "lave". La répartition des différentes formes dépend de la vitesse de refroidissement. La cendre volante siliceuse est donc un mélange de minéraux initiaux imbrûlés, d'éléments néoformés et d'une phase gazeuse piégée.

Tableau 2.V – Principales phases minéralogiques présentes dans une cendre volante siliceuse de charbon observées par diffraction des rayons X (Source : Wang – 2011).

Famille de minéraux	Minéraux	Ancien	Néoformé
Silicates	Quartz (SiO_2)	x	
	Opaline (SiO_2)		x
	Mullite (<i>silicate d'aluminium</i>)		x
	Feldspaths ((K-Na). $AlSi_3O_8$)	x	
	Chlorite		x
Argiles	Illite		
	Kaolinite	x	x
Sulfures	Pyrite (FeS)	x	
	Marcassite (FeS)	x	
Sulfates	Anhydrite ($CaSO_4$)		
Carbonates	Dolomite ((Ca,Mg) CO_3)		x
	Ankérite		x
	Chaux (CaO)		x
	Calcite ($CaCO_3$)		x
	Sidérite		x
Oxydes	Hématite (Fe_2O_3)	x	
	Magnétite (Fe_3O_4)		x

Certaines particules magnétiques se retrouvent dans les fractions inférieures à 63 μm .

2.3.3 Analyses environnementales normalisées

Une campagne environnementale approfondie de ce matériau réalisée en France en 2015 dans le cadre de l'élaboration du guide d'application "Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé" (CEREMA – 2019), a permis de déterminer les valeurs-critères reprises ci-dessous.

Tableau 2.VI – Valeurs limites pour tout matériau alternatif élaboré à base de cendre volante de charbon (source : CEREMA – 2019).

Polluant	France (NF EN 12457-2 ou 4)		
	Usage type 1 (revêtu)	Usage type 2 (recouvert)	Usage type 3 (non revêtu et non recouvert)
Analyse de lixiviation (exprimée en mg/kg MS)			
As	0,7	0,6	0,6
B	50	25	25
Cr total	4	2	0,6
Cr VI ¹	1,2	0,6	---
Mo	4,8	2,4	0,6
Sb	0,4	0,2	0,08
Se	0,5	0,3	0,1
Fluorures	60	30	13
Sulfates	10 000	5 000	1 300
Analyse en contenu total			
COT	60 000 mg/kg MS ²		
HAP	50 mg/kg MS ³		
Dioxines et furanes	10 ng I-TEQ _{OMS,2005} / kg MS ⁴		
¹ Si la valeur en Cr VI est supérieure à celle du Cr total, la valeur Cr total est considérée. Par contre, si Cr total < 0,6 mg/kg MS, la valeur de Cr VI ne doit pas être déterminée. ² Si la teneur en COT dépasse 60 000 mg/kg MS, il est possible de la déduire à partir de la teneur en carbone élémentaire. ³ La mesure HAP reprend 16 congénères selon US EPA. ⁴ Lorsque la concentration d'un congénère est inférieure à la limite de quantification, alors elle est considérée comme nulle dans le calcul cumulé.			

De manière générale, la cendre volante siliceuse de charbon présente les aspects environnementaux suivants :

- Elle se caractérise par une *faible teneur en matières solubles* (2 à 4%) ; ce qui signifie qu'il y a peu de risque pour l'environnement à ce sujet ;
- Elle peut contenir une *certaine quantité d'éléments magnétiques et radioactifs* ;
- Elle peut contenir une *certaine teneur en hydrocarbures* qui sont, soit des imbrûlés, soit issus d'un procédé incomplet de la combustion ;
- Elle peut contenir des *toxines* et des *furanes* ;
- Le *pH*, bien que variable (*entre 4,5 et 12*) est souvent élevé (*proche de 10*) et empêche, de ce fait, la lixiviation des métaux lourds. Toutefois, cette propriété peut être perdue en présence d'un sol acide ou au contact avec une eau chaude sous pression ;
- Parmi les métaux lourds, le *mercure* (*matière très volatile généralement présente entre 0,1 et 1 ppm*) et le *thallium* semblent poser problème ;
- *Le comportement des métaux lourds lors de la formation des différents minéraux est complexe*. Peu d'articles scientifiques existent à ce sujet. Ainsi, il semblerait que l'ettringite secondaire qui se forme postérieurement capte certains métaux lourds (*As, Cr, Sb*) dans sa structure minéralogique ;

2.3.3.1 Essais de lixiviation

L'essai de lixiviation libre en premier lieu, des sels (*KCl, NaCl, BaCrO₄ et CaSO₄.H₂O*), ensuite des sulfates, du chrome, de l'arsenic et du vanadium, voire du bore et du fluor.

2.3.3.2 Analyse sur solide

L'analyse environnemental sur solide porte principalement sur les teneurs en carbone organique, en hydrocarbures, en dioxines et en furanes.

2.3.3.3 Etudes d'écotoxicité

Les quelques études toxicologiques réalisées sur une cendre volante siliceuse montrent que les résultats dépendent largement des conditions d'obtention des éluats, de la composition chimique et de la granulométrie des cendres volantes. Les effets sur les bio-indicateurs sont attribuables au pH des lixiviats autant qu'à la biodisponibilité des métaux (*Ofrir – 2013*). Cependant, les lixiviats ne sont généralement pas écotoxiques à court et à moyen terme.

2.3.4 Caractérisation géotechnique normalisée

Les principales normes européennes spécifiques aux cendres volantes siliceuses sont les suivantes : EN 450-1 (*cendres pour béton : définition, spécifications et critères de conformité*), EN 450-2 (*cendres pour béton : Evaluation de la conformité*), EN 451-1 (*Méthode d'essai des cendres volantes : Détermination de la teneur en oxyde de calcium libre*) et EN 451-2 (*Méthode d'essai des cendres volantes : Détermination de la finesse par tamisage humide*).

2.3.4.1 Principales spécificités

Une spécificité importante des cendres volantes est leur grande variabilité d'une production à l'autre.

Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques des cendres volantes siliceuses.

Tableau 2.VII – Principales caractéristiques géotechniques d'une cendre volante (silico-alumineuse).

	Type d'essai	Valeurs	Commentaires et [critères CCT Qualiroutes]
Paramètres géométriques	Analyse granulométrique	0 – 400 μm	Filler
	Surface spécifique	2 200 et 5 000 cm^2/gr	Valeur similaire à celle du clinker
	Equivalent en sable	12 - 30	
	Forme des grains	Forme arrondie	Compactage plus facile
Paramètres physiques	Masse volumique absolue	1,9 – 2,4 t/m^3	Eléments légers
	Masse volumique en vrac	0,4 – 1,1 t/m^3	
	Indice des vides	1,1 – 4,3	
	Teneur en eau	Variable selon le mode de stockage (0 – 50%)	Peut influencer certains comportements
	Perméabilité	$10^{-5} \text{ l}/\text{m}^2.\text{s}$	Similaire à la perméabilité d'un limon
Paramètres chimiques	Angle de frottement interne	< 20° si non compactée 30 – 40° si compactée	Matériau pulvérulent
	Cohésion	0	
	Type générale	Présence de réactions pouzzolaniques	
Paramètres chimiques	Imbrûlés <i>Perte au feu à 1 000°C</i> <i>Perte au feu à 550°C</i>	1,4 - 6 % 4 – 4,5 %	Réduit l'effet de prise et diminue propriétés mécaniques du béton [$\leq 7\%$]
	SO_4^-	0 – 2 %	Réduit l'effet de prise et risque de formation d'ettringite secondaire [$\leq 1,5\%$ (<i>exprimé en SO_3</i>)]
	SiO_2 réactive	50 – 70 %	Favorise les réactions pouzzolaniques en présence d'un activateur
	CaO totale CaO libre	0 – 12 % < 5 %	Pauvre en chaux vive
	pH	$\cong 10$ (<i>milieu basique</i>) 4,5 à 12 (<i>Ofrir, 2015</i>)	Influence la solubilité de certains métaux lourds

2.3.4.2 Paramètres géométriques

a. Analyse granulométrique

Les principales remarques concernant la granulométrie sont :

- La cendre volante siliceuse de charbon peut être considérée comme un *filler* ;
- La valeur D_{max} est généralement comprise entre 100 et 400 μm ;
- Le fuseau granulométrique est généralement moins étalé qu'un filler classique (*Huet et al. (1981)*) et comporte moins de particules fines.

REMARQUE : Certains cahiers des charges routiers spécifient des valeurs de passant à certains tamis de référence pour certaines applications comme notamment les tamis de 40, 50 et 80 μm .

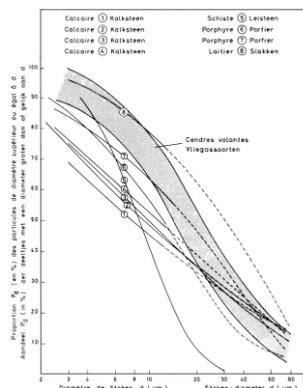


Figure 2.6 : Comparaison des courbes granulométriques de cendres volantes siliceuse de charbon (*fuseau grisâtre*) avec d'autres fillers (*Source : Huet et al. (1981)*).

b. Forme des grains

Les grains d'une cendre volante de charbon ont une forme sphérique, contrairement à la majorité des fillers issus du concassage de roches qui ont une forme anguleuse.

c. Surface spécifique (finesse des grains)

La cendre volante siliceuse de charbon se caractérise par une valeur comprise entre 2 200 et 5 000 cm²/gr. Cette valeur est généralement plus faible que celle d'un filler naturel (16 900 et 22 200 cm²/gr) mais du même ordre de grandeur que celle d'un ciment. Cela s'explique par une teneur plus faible en particules fines et la forme arrondie des grains.

2.3.4.3 Paramètres physiques

a. Masses volumiques et indice des vides

- La *masse volumique absolue* d'une cendre volante siliceuse de charbon varie entre 1,9 et 2,4 t/m³. Cette variabilité est liée à la composition chimique de la cendre. Les valeurs élevées correspondent à une cendre volante plus riche en Fe₂O₃ ;
- La *masse volumique en vrac* varie entre 0,4 et 1,1 t/m³. La cendre volante siliceuse de charbon peut être considérée comme un matériau léger ;
- L'*indice des vides* est généralement élevé avec une valeur comprise entre 1,1 et 4,3. Pour information, un filler calcaire a une valeur de 1,1.

b. Teneur en eau

La teneur en eau peut varier de 0 (*cendre sèche*) à 50% (*cendre saturée*).

2.3.4.4 Paramètres chimiques

- La *perte au feu* : La cendre volante siliceuse de charbon contient toujours de fines particules de combustible imbrûlé qui sont entraînées avec la fumée. Ces éléments jouent un rôle important dans le comportement de la cendre volante puisque elles ont généralement des surfaces spécifiques plus élevées. Cela entraîne notamment un ajout complémentaire d'eau lors de la fabrication du béton qui se traduit par une diminution de ses propriétés mécaniques (*résistances à la compression et aux cycles gel – dégel, ...*). La teneur en imbrûlés varie entre 1 et 6 % mais une valeur plus élevée peut être obtenue en cas de mauvais fonctionnement de la centrale à charbon ;
- Le *pH* peut être très variable (4,5 – 12) et dépend de la teneur en soufre du minerai et en hydroxydes et carbonates de calcium et de magnésium (*processus*). La cendre ayant un rapport Ca/S < 2,5 tend à être acide alors que celle dont le rapport Ca/S dépasse 2,5 est plutôt alcaline. Ce rapport a donc une influence prépondérante sur la lixivabilité de la cendre volante.

2.3.4.5 Autres paramètres

a. Activité pouzzolanique

L'*activité pouzzolanique* est l'*aptitude de certains matériaux dépourvus de propriétés hydrauliques, à fixer à terme la chaux hydratée ou portlandite en présence d'eau pour donner un liant hydraulique analogue au clinker Portland type CSH*.



Ce pouvoir pouzzolanique comporte deux actions : 1) la fixation de la chaux par l'enveloppe vitreuse de la cendre siliceuse et 2) le durcissement.

La réaction pouzzolanique se poursuit pendant une très longue durée (*supérieure à 2 ans*). L'élévation de la température du milieu ambiant et l'augmentation de la finesse des particules accélèrent le phénomène.

REMARQUE : Des recherches sont menées pour augmenter la surface spécifique de la cendre, via un traitement thermique violent de fusion/trempe.

En France, le pouvoir pouzzolanique est déterminé par la norme NF P98-111 "Essai de réactivité des cendres silico-alumineuses à la chaux".

2.3.5 Classification géotechnique

La France classe la cendre volante siliceuse dans la catégorie **F2** de la classification GTR et assimile son comportement à la classe **A1** sans ajout de liant ou d'activant.

2.3.6 Etude de comportement

2.3.6.1 Etude Proctor

Le courbe Proctor normal donne généralement une valeur optimale de masse volumique proche de 1,1 à 1,3 t/m³ (*matériau léger*) pour une teneur en eau comprise entre 20 et 35 %. De plus, la courbe est relativement plate ; ce qui signifie que le matériau peut se mettre en œuvre dans une gamme assez large de teneur en eau (*Ofrir – 2013*).

2.3.6.2 Courbe IPI

Une teneur en eau excessive provoque une perte brutale de portance.

2.4 FILIERES DE VALORISATION DE LA CENDRE SILICEUSE DE CHARBON

2.4.1 Etats des lieux

De par ses **propriétés pouzzolaniques**, les principales filières de valorisation de la cendre volante siliceuse sont la composition de liant hydraulique et de béton. Les autres applications minoritaires concernent le domaine routier, certains matériaux de construction, l'industrie extractive, l'environnement et l'agriculture. Cependant, un des freins à sa valorisation est la **présence d'une certaine variabilité de ses caractéristiques d'une production à l'autre**.

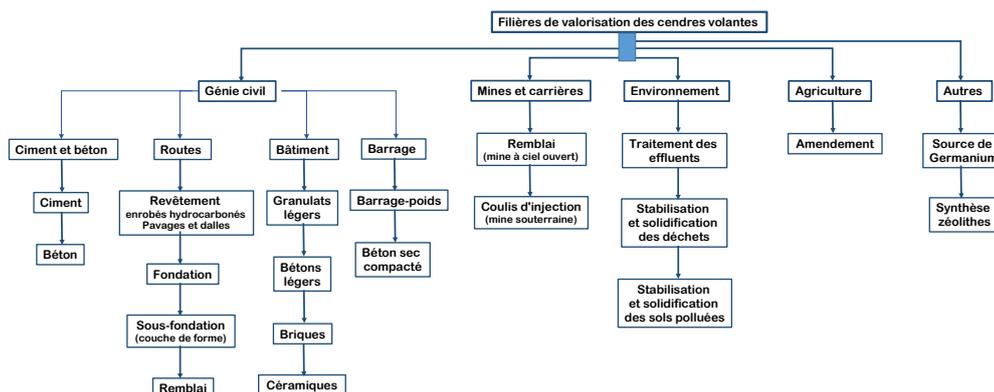


Figure 2.7 : Principales filières de valorisation des cendres volantes siliceuses de charbon (*source : internet*).

REMARQUE : Les applications où la cendre volante siliceuse de charbon est présente sous forme libre doivent faire l'objet d'analyses environnementales approfondies au contraire des applications liées.

2.4.2 Domaine du génie civil

2.4.2.1 Ciment et autres liants hydrauliques

La cendre volante siliceuse de charbon peut se substituer partiellement au clinker Portland (*jusqu'à 50 %*) de deux manières différentes :

- La **fabrication du cru** en remplacement de l'argile déficitaire dans certaines régions puisqu'elle apporte la silice, l'alumine et le fer et qu'elle est déjà broyée. De plus, le combustible non brûlé présent constitue un apport complémentaire de combustible lors de la cuisson du cru ;
- La **fabrication du ciment composé** ou **LHR** (*jusqu'à 30 à 35 %*) lors du broyage final du mélange clinker - gypse - constituants secondaires éventuels. Le passage dans le broyeur permet d'augmenter leur réactivité et d'obtenir un mélange homogène. De plus, les particules de combustible imbrûlé favorisent le broyage et augmentent le rendement du broyeur. Les ciments qui en découlent sont les ciments CEM II-V et B-M (*à cendres volantes*), CEM IV (*ciment pouzzolanique*) et CEM V (*ciment composé*).

REMARQUE : Il est possible de réaliser un ciment géopolymère en incorporant un activateur chimique (*silicate de soude ou verre fondu*) à la cendre volante siliceuse.

Les principales caractéristiques importantes d'une cendre volante pour une application en ciment sont :

- Le **pourcentage d'imbrûlés** (*perte au feu*) doit être inférieur à 7% ;
- La **teneur en ions SO₄** (*exprimée en SO₃*) doit être inférieure à 1,5% afin d'éviter tout risque de gonflement ultérieur lié à la formation d'ettringite secondaire ;
- La **teneur en chaux libre** : Une valeur détectable permet de valoriser la cendre volante comme liant.

2.4.2.2 Béton

La cendre volante siliceuse peut être ajoutée dans différents types de bétons (*bétons préfabriqué, prêt à l'emploi, ouvrages d'art, BSC, ...*) comme filler d'apport à raison de 40 à 100 kg/m³, soit à l'état sec, soit à l'état humide, pour autant qu'elle soit conforme à la norme NBN EN 450 "cendre volante dans le béton".

Un béton contenant des cendres volantes, soit dans le ciment, soit à l'état pur offre de nombreux avantages.

- L'*amélioration du fuseau granulométrique* du mélange. La cendre peut ainsi remplacer une partie du sable et rendre le mélange plus compact et donc plus résistant à long terme ;
- Une *diminution de la demande en eau à ouvrabilité égale du béton* (*fluidité et plasticité*) lors de sa mise en œuvre. Cela permet de diminuer le ressuage, d'augmenter l'imperméabilité et par conséquent la durabilité ;
- Une *meilleure maniabilité du béton frais* par augmentation de la plasticité, réduction de la quantité d'eau nécessaire à l'ouvrabilité, la forme sphérique des grains. Cela facilite le pompage ;
- Un *meilleur compactage du béton frais* suite à la présence des grains arrondis et lisse ;
- Un *temps de prise plus long* dû à la présence d'une inertie plus lente ;
- Une *faible chaleur d'hydratation initiale* réduit le risque de fissuration du béton à âge précoce. Ce type de ciment convient pour le bétonnage de grande masse et/ou par temps chaud ;
- Un *meilleur aspect de la surface après décoffrage* ;
- Un *retrait hydraulique moindre* ;
- Un *allègement du béton préfabriqué* si le dosage en cendre volante est supérieur à 7 % ;
- Une *bonne résistance à long terme*. La résistance à court terme est généralement moindre que celle développée par un ciment classique mais elle devient plus élevée à long terme en raison des propriétés pouzzolaniques de la cendre volante siliceuse (*voir paragraphe ci-dessous*) ;
- Une *certaine imperméabilité* ;
- Une *meilleure résistances aux eaux pures et aux eaux sulfatées* ;
- Une *bonne résistance aux phénomènes alcali-granulats et à la corrosion chimique* grâce notamment à la formation de phases minérales plus compactes (*notamment les CSH*) mais aussi grâce à une porosité plus fine ;
- Une *meilleure résistance au feu et aux chocs thermiques*.

Par contre, la *résistance au gel – dégel* d'un béton semble être plus faible.

L'amélioration de ces caractéristiques est d'autant plus marquée que la cendre volante est fine. Ainsi, un critère important pour juger son efficacité dans un béton est la finesse des grains de la cendre volante. Ce paramètre influence de manière déterminante la réactivité pouzzolanique, la rhéologie et l'activité des fines. La composition minéralogique joue également un rôle plus important que la composition chimique.

Le béton contenant des cendres volantes se caractérise par une amélioration à long terme de ses résistances. En effet, la cendre volante commence à développer ses propriétés pouzzolaniques après quelques temps (*de 7 jours à quelques mois*). Une expérience chinoise a montré qu'un béton contenant 70 % de cendre volante a atteint des résistances de 20 MPa à 3 jours et de 50 MPa à 28 jours.



Figure 2.8 : Influence des cendres volantes et manifestation de l'effet pouzzolanique sur la résistance d'un béton (Source : Courard (2011)).

Toutefois, il existe des cas où la cendre volante (*taux de substitution proche de 50 %*) n'a pas développé les réactions pouzzolaniques attendues. En effet, la réaction pouzzolanique n'est possible que lorsque l'alcalinité de l'eau interstitielle où vont avoir lieu les réactions chimiques atteint une certaine valeur. Ce critère est obtenu grâce à la libération d'une quantité suffisamment importante d'hydroxydes de calcium lors de l'hydratation du ciment. A ce moment, la cendre volante se dissout et libère également de la silice qui réagit alors avec la chaux hydratée. Les réactions se font dans un premier temps à proximité des grains de cendres volantes et tendent par la suite à se propager, fermant ainsi les pores, réduisant la capillarité et ne permettant pas d'atteindre l'alcalinité minimale requise.

De plus, la présence d'impuretés dans la cendre volante comme la matière organique tend à retarder le processus d'hydratation du ciment. Celles-ci semblent retarder la nucléation et la cristallisation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De plus, elles tendent à adhérer aux particules de clinker en les empêchant de réagir. Une fois cette période d'induction terminée, l'hydratation s'accélère car la cendre volante constitue des surfaces supplémentaires pour la précipitation de produits.

D'autre part, une faible teneur en alcalins permet d'éviter tout risque de réaction alcali-granulats en cas d'utilisation dans un béton.

La cendre volante siliceuse de charbon convient particulièrement bien pour certains types de béton :

- Le **béton injecté** ou **coulis** : Le remplacement partiel du ciment (*aux effets de prise à court terme*) par de la cendre volante siliceuse volante (*aux effets pouzzolaniques à long terme*) associée à un fluidifiant permet de pouvoir incorporer une quantité plus importante d'eau de gâchage en vue d'obtenir une plus grande fluidité et ouvrabilité du mélange. Le matériau acquiert ses résistances à terme grâce à ses propriétés pouzzolaniques, même en présence d'eau séléniteuse ;
- Le **béton moussé** ou **béton léger** : La cendre volante siliceuse de charbon peut être allégée en usine selon différents procédés (*frittage, hygrothermie et liaison à froid*) afin d'offrir un granulats léger. Si ce granulats offre une densité plus faible, il présente deux inconvénients : 1) Des **demandes généralement plus importantes en ciment et en eau** favorisent les phénomènes de fluage et de retrait et diminuent l'ouvrabilité et la valeur du module élastique et 2) une **carbonatation plus rapide**.

2.4.2.3 Route

La cendre volante siliceuse de charbon peut être utilisée dans toutes les couches d'une structure routière (*revêtement, fondation, sous-fondation et remblai*).

REMARQUE : La valorisation en domaine routier nécessite un tonnage important et une constance dans la qualité.

a. Revêtement hydrocarboné (filler d'apport)

La cendre volante siliceuse joue le rôle de filler d'apport au même titre que le filler calcaire. Toutefois, une étude au CRR (*Huet et al. (1981)*) a montré que l'adhésivité du bitume sur la cendre volante siliceuse de charbon est généralement plus faible que celle observée sur un filler calcaire ou un filler porphyre.

Elle répond souvent aux différents critères requis pour ce type d'application comme la courbe granulométrique, les masses volumiques relative et apparente après sédimentation dans le toluène, le pourcentage de vides à l'état sec compacté, la sensibilité à l'eau, la composition chimique et le gonflement. Toutefois, il faut s'assurer de leur constance en termes de qualité par des contrôles fréquents.

En présence de CaO et de CaSO_4 dans la cendre volante, il faut protéger le filler de toute humidité afin d'empêcher la production de réactions pouzzolaniques préjudiciables à l'enrobage.

L'emploi d'un granulats léger à base de cendre volante siliceuse de charbon dans un revêtement bitumineux ou une grave-bitume se traduit généralement par une absorption plus importante du liant bitumineux.

b. Fondation

Dans le passé, la cendre volante siliceuse de charbon a été couramment employée comme matériau granulaire (*sableux*) dans des mélanges avec ou sans granulats complémentaire, du ciment, du laitier, de la chaux, du gypse. Ces derniers éléments jouent le rôle d'activateur.

- Le **mélange cendre volante – chaux** (*teneur en chaux comprise entre 3 et 30% avec un optimum compris entre 15 et 20%*) se caractérise par l'emploi de cendre volante unique comme granulats, l'apparition de véritables résistances seulement 14 à 28 jours après le mélange et la stabilisation des résistances après plus d'un an. Ce manque de résistance à court terme freinant la mise en circulation et la demande importante en chaux ont été les principaux arguments pour ne plus utiliser ce mélange ;

- Le *mélange cendre volante – chaux* (4 - 5 %) – *gypse* (3 – 10 % avec un optimum vers 5 %) : Le gypse joue le rôle d'accélérateur de prise et permet d'obtenir les premières résistances mécaniques dès le 7^{ème} jour sans modifier les valeurs de résistance à long terme tout en veillant à éviter le risque de formation d'ettringite. Cette technique a été très utilisée dans la région du Nord-Pas-de-Calais durant les années 1970 - 1980. Sa mise en œuvre est assez délicate car des phénomènes de feuilletage sont susceptibles d'apparaître en surface et venir ainsi diminuer l'adhésion de la couche sus-jacente. Pour ce faire, l'emploi d'un compacteur à pneus, l'enlèvement de la partie supérieure de la couche et la mise en œuvre de la couche sus-jacente avant la prise ($\pm 4 h$) sont des opérations à réaliser impérativement ;
- Le *mélange grave – cendre volante – chaux vive* est permis en fondation en France pour autant que la valeur de résistance à la traction directe après 360 jours soit supérieure à 1,5 MPa. Cette fondation est considérée comme semi-rigide ;
- Le *mélange grave 0/20 – cendre volante – chaux éteinte* (de l'ordre de 15%) présente une prise lente (moins lente toutefois que celle obtenue avec un laitier). Le démarrage de la prise est de l'ordre de 10 jours mais les performances acquises au bout d'une année peuvent être très élevées ($R_{c1an} = 20 MPa$). Les conditions de mise en œuvre (*teneur en eau, délai de compactage, couche de protection contre la dessiccation, etc.*) jouent un rôle très important dans l'évolution des caractéristiques du matériau final ;
- Le *mélange grave – cendre volante – chaux – laitier* : La chaux est utilisée comme activant. Ce mélange est utilisé en fondation et comme couche de base. Il est considéré comme semi-rigide ;
- Le *béton sec compacté* (BSC) : Une expérience en Inde (*barrage du Ghatghar*) a montré qu'il était possible d'obtenir un BSC de bonne qualité avec 50 à 70 % de taux de substitution ;
- Le *béton moussé* présente une légèreté telle qu'il peut être utilisé dans certains cas (*sol de très faible portance*). La cendre volante peut se substituer au liant à raison de 20 à 30 %. Ce type de béton présente une faible résistance à l'abrasion ;

c. Sous – fondation stabilisée

La cendre volante siliceuse de charbon ne peut être valorisée en couche de forme (*France*) ou en sous-fondation que dans une application liée en raison des risques liés au drainage. Cela s'applique aux graves traitées (*France*) et aux sols stabilisés. Le mélange s'opère en centrale et le transport s'effectue par camion bâchée.

L'ajout de la cendre volante à la chaux lors d'une stabilisation permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques à long terme. Le dosage est généralement compris entre 10 et 25 %.

d. Remblai

La cendre volante siliceuse peut être utilisée dans un remblai, soit comme matériau granulaire humide éventuellement accompagnée de cendres de foyer et d'un gravillon, soit comme liant. Plusieurs applications existent donc.

d.1 Remblai classique et remblai léger non liés

La cendre volante humide peut être utilisée en masse lorsque les matériaux naturels font défaut à proximité ou sont de qualité insuffisante. La légèreté de la cendre volante est appréciée pour un remblai en sol compressible ou derrière une culée d'ouvrages d'art.

Sa mise en œuvre est aisée. L'épaisseur maximale des couches est de l'ordre de 40 à 50 cm. La réalisation de quelques passes au moyen d'un compacteur lourd à pneus est recommandée. Le compacteur vibrant a tendance à générer de brutales pertes de portance. Une fois compactée, elle possède des valeurs de cisaillement similaires à celles d'un sol classique. De plus, il faut être attentif à deux aspects :

- *La présence d'un excès d'eau génère une perte subite de portance*. La cendre volante siliceuse de charbon ne peut être utilisée en zone inondable ou en présence d'une nappe phréatique superficielle. Dans les autres cas, elle doit être préservée de toute venue excédentaire d'eau. C'est pourquoi il y a lieu de prévoir la mise en place d'une couche de drainage en partie inférieure et latérale et d'une couche liée au sommet. De même, l'emploi d'un compacteur vibrant peut faire remonter l'eau dans le matériau et conduire à sa perte de portance ;
- *Le matériau est très sensible au ravinement*, notamment dans les flancs d'un remblai. Un bon compactage sur le talus est nécessaire (*compactage par surlargeur*), tout comme la mise en place rapide

d'une couche de protection composée, soit d'un matériau étanche, soit d'un couvert végétal bien développé.

Toutefois, quelques problèmes de stabilité ont été rencontrés dans des remblais de faible hauteur (*saturation plus rapide du volume, sensibilité au gel accrue due à une importante présence d'eau*). Il est donc préférable de privilégier les remblais de grande masse (*Ofrir (2013)*).

Une étude de relargage des polluants doit être réalisée en présence d'un massif avoisinant acide et/ou en présence d'eau.

d.2 Remblai en sol traité (liant)

L'ajout de cendre volante siliceuse de charbon à de la chaux et au ciment peut améliorer considérablement les caractéristiques de portance du sol, qu'il soit sablonneux (*rôle supplémentaire de filler*) ou argileux. Dans ce dernier cas, il convient d'ajouter plus de chaux afin de garantir l'efficacité des réactions chaux – sol (*à court terme*) et chaux – cendre volante (*à long terme*).

d.3 Matériau autocompactant réexcavable (MAR)

La cendre volante siliceuse peut entrer dans la composition d'un MAR, selon une teneur relativement faible car le MAR, notamment de type 1 et 2 ($R_{C90j} \leq 2 \text{ MPa}$) doit pouvoir conserver de faibles valeurs de résistance à terme. Trop de réactions pouzzolaniques sont malvenues.

Elle doit répondre aux critères chimiques et électrochimiques d'acceptation du matériau de remblai vis-à-vis des impétrants (*résistivité, pH, teneur en sels solubles*).

2.4.2.4 Bâtiment

a. Fondation en béton

Outre sa valorisation dans les bétons classiques, la cendre volante de charbon a été utilisée à raison de 120 kg/m³ avec 180 kg/m³ de ciment pour former les fondations des tours Castor (92 m de haut) et Pollux (130 m de haut) à Frankfurt (Allemagne (1997)).

b. Colonnes en béton

Une cendre volantes de charbon a été utilisée à raison de 120 kg/m³ avec 420 kg/m³ de ciment et 35 kg/m³ de fumée de silice pour former les colonnes des tours Castor (92 m de haut) et Pollux (130 m de haut) à Frankfurt (Allemagne). La résistance moyenne à la compression après 90 jours équivaut à 130 MPa.

c. Tuyaux en béton

La cendre volante confère au tuyau en béton, une meilleure résistance aux ions sulfates et aux acides faibles. Pour la préfabrication, l'emploi de cendre volante aux grains cylindriques permet d'obtenir des angles et arêtes plus nets et de plus belles surfaces.

d. Granulats légers

La cendre volante siliceuse de charbon peut être allégée en usine selon différents procédés (*frittage, hygrothermie et liaison à froid*) afin d'offrir un granulats léger. Si ce granulats offre une densité plus faible et une bonne résistance thermique, il présente trois inconvénients : 1) Une **demande plus importante en ciment et en eau** qui favorisent les phénomènes de fluage et de retrait et diminuent l'ouvrabilité et la valeur du module élastique, 2) une **carbonatation plus rapide** et 3) une **moins bonne isolation acoustique**.

e. Béton aéré et béton moussé

La cendre volante peut être utilisée comme matériau de remplacement partiel ou total du sable et une partie (jusqu'à 30%) du liant (*chaux, ciment Portland*) dans la fabrication de **béton aéré autoclavé**. Le retrait, le fluage ainsi que les résistances sont similaires. Ce béton est par contre plus résistant au passage de la chaleur (*augmentation de 15 à 40%*), suite au caractère amorphe des cendres volantes.

Le **béton moussé**, semblable au béton aéré par ses constituants, présente des caractéristiques différentes : moins résistant, retrait et fluage importants. Il fait prise à température ambiante et peut être mis en place *in situ*. Son isolation thermique excellente lui permet d'être employé sur les sols, les toitures et même les murs. Sa légèreté fait qu'il est également utilisé dans certains cas (*sol de faible portance*) ou pour remplir des vides. Les cendres volantes peuvent se substituer au liant à raison de 20 à 30%.

f. Briques

Une cendre volante siliceuse de charbon a été utilisée en remplacement partiel à total du sable et remplacement partiel de la chaux dans la fabrication de briques poreuses et légères utilisées principalement pour l'isolation.

Toutefois, plusieurs inconvénients ont été observés :

- La brique prend des *teintes de gris* ;
- La brique est *plus sensible aux efflorescences* ;
- La brique présente des *résistances plus faibles et notamment aux cycles gel – dégel*.

Par contre, elle présente de bonnes qualités d'isolation thermique liées au caractère amorphe des grains.

g. Céramique (tuiles, tuyaux, ...)

La cendre volante a la même composition chimique que l'argile, principal constituant des céramiques mais pas la même structure moléculaire, la forme des particules et surtout la rhéologie. Des adaptations dans le processus de fabrication doivent être réalisées.

Les principales applications sont :

- Des *produits céramiques issus du processus classique* ("wet method") ;
- Des *produits céramiques à haute teneur en cendres volantes* (jusqu'à 70%) utilisant une méthode semi-sèche ainsi que des liants facilitant la formation et le séchage de produits finis ;
- Des *produits ultra-légers* tels que des matériaux d'isolation et réfractaires.

2.4.2.5 Barrage

En raison de leur *faible température d'hydratation* lors de la prise, la cendre volante a été utilisée pour la première fois dans le béton du barrage-poids *Hungry Horse Dam (USA (1948))*. La Chine a construit dans les années 1980, un grand nombre de barrages de ce type afin de pouvoir évacuer une bonne partie de leur production. En France, le barrage hydroélectrique de Puylaurent (*Lozère (1993-1995)*) a utilisé 10 000 t de cendres volantes dans 80 000 m³ de béton. Toutefois, cette application est moins utilisée depuis 2000.

Elle est également utilisée dans les barrages en béton sec compacté.

2.4.3 Activités minières

La cendre volante siliceuse peut être utilisée dans un coulis destiné à remblayer d'anciennes exploitations minières à ciel ouvert ou des galeries souterraines et à faire prise par la suite. Ainsi, l'Allemagne comble une partie de ses mines de sels. Une étude environnementale préalable est nécessaire.

2.4.4 Environnement

La cendre volante peut être utilisée pour les applications suivantes :

- Le *traitement des eaux usées* : Elle possède de bonnes propriétés d'absorption qui lui permettent de récupérer ou d'éliminer certains polluants comme les composés inorganiques ou des composés organiques souvent non biodégradables. Kanbouchi et al. (2007) ont notamment étudié le traitement d'eau chargée en colorants issus de l'industrie textile. L'efficacité du traitement (50-80 %) est fortement influencée par la teneur en DCO des colorants (*comprise entre 30 et 60 %*) ;
- La *neutralisation et la stabilisation des déchets* : Certains déchets sont traités avec un mélange cendre volante – activant (*chaux, gypse, ciment*) en présence d'eau afin d'obtenir un solide dur à terme suite aux réactions pouzzolaniques. Dans certains cas, des silicates solubles sont également ajoutés afin de rendre certains ions insolubles (*Cd, Ni et Zn*). L'efficacité de tels traitement est vérifiée par des essais de lixiviation ;
- La *neutralisation et la stabilisation des sols pollués par les métaux lourds* de par leur propriétés pouzzolaniques et de la prise en présence d'un réactif.

2.4.5 Autres voies de valorisation

Les autres voies de valorisation dans les domaines autres que celui du génie civil sont :

- L'*agriculture* : La cendre volante siliceuse de charbon améliore la structure d'un sol lourd, régularise l'humidité en modifiant la capillarité, la perméabilité et la porosité du sol et active le développement microbien ;

- La *récupération de germanium et produits radioactifs* : Certaines cendres volantes siliceuses de charbon peuvent contenir du germanium récupérable. Ainsi, la principale source dans le monde est la Chine qui le récupère dans la cendre volante de charbon (Pirard (2015)). De plus, certaines cendres volantes issues de charbon à caractère uranifère fort contiennent des produits radioactifs tels l' U^{238} . Des recherches démarrées en 1970 et relancées en 2000 en Chine, en Afrique du Sud et en Hongrie ont montré qu'il est possible de récupérer plusieurs centaines de grammes par jour d'uranium au moyen d'une lixiviation accélérée à l'acide sulfurique (*Radioactivité Naturelle technologiquement Renforcée (2009)*) ;
- La *synthèse des zéolithes*.

2.5 CARACTERISATION DE LA CENDRE VOLANTE CALCIQUE

Les caractéristiques d'une cendre volante calcique (*centrale à charbon à lit fluidifié circulant*) dépendent fortement des paramètres du combustible utilisé, de la teneur en calcium introduit dans le four, des paramètres de combustion de la centrale et du mode d'extraction des cendres hors du foyer.

La caractérisation passe plusieurs étapes dont certaines sont normalisées.

2.5.1 Examens visuel et microscopique

La cendre volante calcique de charbon se présente sous forme d'une poudre plus fine (0,5 à 100 microns) composée principalement de plaquettes et de fragments alvéolaires microscopiques liés au refroidissement plus lent au sein du lit fluidifié.

La couleur varie entre le brun et le gris et dépend de la quantité de carbone non brûlé et du combustible d'origine (*la lignite fournit une couleur plus brunâtre*).



Figure 2.9 : Détails visuel et microscopique d'une cendre volante calcique (Sources : AC Presse et Ayriinhac (2005)).

2.5.2 Analyse chimique et composition minéralogique

2.5.2.1 Analyse chimique

La composition du combustible et de ses impuretés est responsable de la grande variabilité de composition mesurée d'un lot à l'autre.

Selon le Tableau 2.IV, la cendre volante calcique de charbon se distingue d'une cendre volante siliceuse par une teneur plus élevée en chaux total, en chaux libre et en sulfates. Les teneurs en silice et en aluminium sont moindres. *Elle a une composition similaire au ciment Portland ou au laitier de haut -fourneau et dispose donc de propriétés hydrauliques plutôt que pouzzolanique. De plus, elle peut contenir une teneur plus ou moins élevée en sulfates.*

Il reste toujours quelques pourcents de combustibles non brûlés (5 à 10%).

2.5.2.2 Analyse minéralogique

La composition minéralogique d'une cendre volante calcique est très différente de celle d'une cendre volante siliceuse pour 5 raisons : 1) Le combustible de départ est généralement plus pauvre en carbone mais plus riche en soufre, 2) Le processus de la centrale à lit fluidisé permet de mieux éliminer les impuretés, 3) Du calcaire est ajouté en vue de traiter le soufre, 4) La température de combustion est plus faible et empêchent la fusion d'un grand nombre de minéraux existants et 5) la période de refroidissement est plus longue et permet le développement d'une certaine cristallisation.

Ainsi, une cendre volante calcique tend à avoir un plus grand nombre de phases minérales. Certains auteurs (Vassilev (1995)) citent la présence de 55 minéraux dans la cendre volante calcique.

Ces différents minéraux peuvent être répertoriés en trois catégories :

- Les *minéraux initiaux réfractaires* parmi lesquels sont présents le quartz, la kaolinite et les autres argiles inertes aux températures du four, les micas et chlorites, les feldspaths, l'apatite et l'anhydrite ;
- Les *minéraux néoformés dans le four*, à savoir :
 - La *métakaolinite* (kaolinite déshydroxylé) et autres argiles déshydroxylés (perte des OH à partir de 600°C). Ce phénomène est responsable des valeurs élevées de surface spécifique ;
 - L'*hématite* provient de la décarbonatation de la sidérite ($2 FeCO_3 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 2CO_2 \nearrow$) et de la destruction de la pyrite ($2 FeS + 3/2 O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + SO_2$) ;
 - L'*anhydrite* provient de la libération du soufre contenu dans la pyrite, la matière organique et le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 + 2 H_2O \nearrow$) ;
 - La *périclase* est liée à la décarbonatation de la dolomie ($MgCa (CO_3)_2 \rightarrow MgO + CaO + 2CO_2 \nearrow$) ;
 - La *chaux vive* est issue de la décarbonatation de la calcite ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \nearrow$) et de la dolomie (voir ci-dessus) ;
 - La *gélhénite* apparaît en présence d'une quantité suffisante de kaolinite et de calcite.
- Les *minéraux formés lors du stockage des cendres en tas* suite à des conditions de température plus faible et à des phénomènes d'hydratation de la chaux. Il s'agit principalement de la portlandite ($Ca(OH)_2$), la calcite ($CaCO_3$), le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), la brucite ($Mg(OH)_2$) et l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$).

2.5.3 Analyses environnementales

La cendre volante calcique se caractérise par une faible teneur en matières solubles (2 à 4%) ; ce qui signifie qu'il y a peu de risque pour l'environnement à ce sujet. Par contre, elle peut contenir des métaux lourds.

2.5.3.1 Essais de lixiviation

La cendre volante calcique se caractérise par une faible lixiviation des éléments en trace, à l'exception de celle du Cr.

2.5.3.2 Analyse sur solide

L'analyse environnemental sur solide porte principalement sur les teneurs en carbone organique, en hydrocarbures, en dioxines et en furanes.

2.5.3.3 Etudes d'écotoxicité

Les quelques études réalisées sur la cendre volante calcique indiquent un faible niveau d'écotoxicité (Ofrir (2013)).

2.5.4 Caractérisation géotechnique normalisée

2.5.4.1 Principales spécificités

Une propriété importante des cendres volantes calciques est leur variabilité d'une production à l'autre.

La cendre volante calcique n'est pas reprise dans les normes pour ciment (EN 197) et pour béton (EN 450).

Tableau 2.VIII – Principales caractéristiques des cendres volantes calciques.

	Type d'essai	Valeurs	Commentaires et critères CCT Qualiroutes
Paramètres géométriques	Analyse granulométrique	0 – 400 μm	Définition comme filler
	Surface spécifique	9 000 – 11 000 cm^2/gr	Valeur relativement élevée
	Forme des grains	Forme angulaire (<i>plaquettes et feuillets</i>)	Déplacement et compactage plus difficiles
Paramètres physiques	Masse volumique absolue Masse volumique en vrac Indice des vides	2,5 – 2,9 t/m^3 0,4 – 1,1 t/m^3 1,1	Éléments plus lourd suite à la présence de calcaire
	Teneur en eau	Variable selon le mode de stockage (0 – 50 %)	Annule certaines réactions avec la chaux vive
Paramètres chimiques	Type générale	Présence de réactions hydrauliques et sulfatiques	
	CaO libre	1 – 30 %	Favorise certaines réactions
	SO_4^-	5 – 34 %	Risque de formation d'ettringite secondaire
	pH	11	Milieu basique

2.5.4.2 Paramètres géométriques

a. Analyse granulométrique

La cendre volante calcique de charbon peut être considérée comme un *filler* dont la valeur D_{max} est généralement inférieure ou égale à 100 μm .

b. Surface spécifique (finesse des grains)

La surface spécifique d'une cendre volante calcique est plus élevée que celle d'une cendre volante siliceuse.

c. Forme des grains

La forme des grains est généralement rectangulaire et nécessite souvent un compactage plus dynamique.

2.5.4.3 Paramètres physiques

a. Teneur en eau

Selon le mode de récolte, la teneur en eau peut varier de 0 (*cendre sèche*) à 50% (*cendre saturée*). Toutefois, afin de préserver le potentiel de réaction d'hydratation de la chaux vive, il importe de les conserver au maximum à l'état sec.

b. Masses volumiques et indice des vides

- La *masse volumique absolue* est de l'ordre de 2,9 t/m^3 suite à la présence de calcium ;
- La *masse volumique en vrac* est de l'ordre 1,1 t/m^3 , soit une valeur proche d'un filler calcaire ;
- L'*indice des vides* est de l'ordre de 1,1, soit une valeur équivalente à celle d'un filler calcaire.

2.5.4.4 Paramètres chimiques

La cendre volante calcique se caractérise par les caractéristiques chimiques suivantes :

- La *teneur en chaux libre* (CaO libre) est très variable avec une valeur comprise entre 1 et 30 %. Cela signifie qu'une cendre volante riche en chaux libre peut intervenir comme un liant aérien ;
- La *teneur en sulfates* peut varier entre 5 et 34 %. Une cendre volante calcique riche en sulfates présente d'importants risques de formation d'ettringite secondaire (*minéral gonflant*) en présence de ciment.

2.5.5 Etudes de comportement géomécaniques

Néant

2.6 FILIERES DE VALORISATION DE LA CENDRE VOLANTE CALCIQUE

2.6.1 Etats des lieux

La cendre volante calcique de charbon est marquée par une certaine teneur en chaux vive mais aussi en sulfate et anhydrite qui se caractérisent par l'apparition de **gonflements ultérieurs** (*ettringite secondaire et grains de chaux hydratée*). C'est pourquoi de nombreuses filières de valorisation des cendres volantes siliceuses de charbon ne conviennent pas pour ce type de cendre volante ou nécessitent des mesures particulières (*encadré rouge*).

Ainsi, des dispositifs permettent d'éteindre la chaux vive (*par exemple, immersion quelques jours avant prise*) présente dans la cendre avant de l'incorporer dans le ciment (*Ayrinhac (2005)*).

Les principales filières sont : 1) Le remplissage de vides (*aériens ou souterrains*) liés à l'extraction minière, la stabilisation des matières polluées et l'agriculture. Plus de 25 % du volume partent toutefois en stock.

De plus, un autre frein à sa valorisation est la **présence d'une certaine variabilité d'une production à l'autre**.

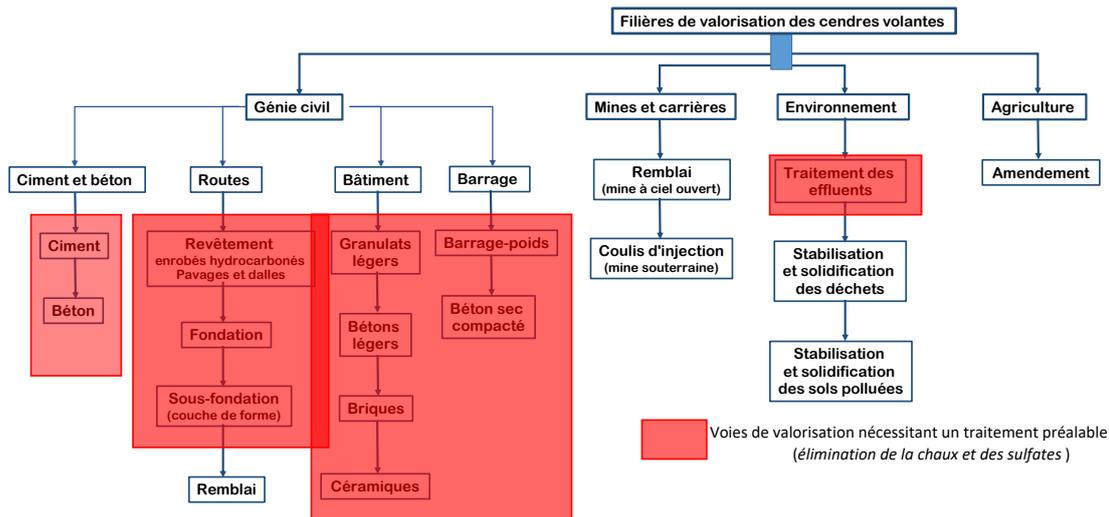


Figure 2.10 : Principales filières de valorisation des cendres volantes (source : internet).

2.6.2 Domaine du génie civil

2.6.2.1 Ciment et autres liants hydrauliques

La cendre volante calcique est peu utilisée dans la fabrication du ciment sauf si les teneurs en chaux et anhydrite sont relativement faibles et contrôlées.

Elle peut intervenir dans la composition des ciments CEM II/A-W (*entre 6 et 20% de cendre volante calcique W*) et CEM II/B-W (*entre 21 et 35% de cendre volante calcique*).

2.6.2.2 Béton

La cendre volante calcique peut être incorporée dans certains bétons pour autant que ses teneurs en chaux vive et en anhydrite soient relativement faibles et contrôlées. Cette filière de valorisation est assez rare.

2.6.2.3 Route

La cendre volante calcique de charbon n'est pas autorisée dans le CCT QUALIROUTES pour les principales applications en domaine routier (*revêtement, fondation, sous-fondation et remblai*).

Néanmoins, elle peut être utilisée dans les quelques applications suivantes :

- Le *traitement de sol* permet d'utiliser une cendre volante calcique riche en chaux et pauvre en sulfate comme composant d'un liant. Elle fait l'objet de brevets ou d'appellations commerciales protégées ;
- La *fabrication de granulats synthétiques* suite à la présence d'une certaine teneur en chaux vive.

2.6.2.4 Construction

a. Brique

Une société américaine a mis au point une brique pouvant contenir jusqu'à 50 % de cendre volante calcique (*Wikipedia*).

2.6.3 Activités minières

La cendre volante calcique est appréciée pour combler des vides aériens et souterrains. De plus, elle permet de réduire la toxicité des eaux de ruissellement lorsqu'elle est mélangée à des déchets solides de charbon.

2.6.4 Environnement

La cendre volante calcique est utilisée dans le traitement de certaines eaux polluées suite à sa basicité et à son caractère hydrophile.

La cendre volante calcique riche en chaux vive permet de solidifier et d'inertiser certains déchets solides et sols pollués tout en réduisant la lixiviation de certains polluants.

2.6.5 Autres voies de valorisation

- **L'agriculture** : La cendre volante calcique de charbon peut être utilisée comme amendement agricole, soit seule, soit en compagnie d'autres sous-produits industriels. Cependant, cette filière est de moins en moins utilisée en raison des nombreuses contraintes environnementales. Seules, les USA, la France, l'Allemagne et la Finlande utilisent encore cette filière de valorisation.

2.7 CAS PARTICULIER DES CENDRES DE FOYER DE CHARBON

2.7.1 Définition

La *cendre de fond*, *cendre sous chaudière* ou encore *mâchefer de foyer de charbon* se définit comme un *résidu relativement grossier issu de la combustion au sein d'une centrale thermique et récupéré dans le fond du foyer à charbon*. Sa taille et son poids font en sorte qu'il est déposé au pied du foyer où elle est récoltée souvent dans un bassin d'eau.

2.7.2 Cendre de foyer siliceuse (centrale à charbon pulvérisé)

2.7.2.1 Stockage et traitements éventuels

La cendre de foyer siliceuse d'une centrale à charbon pulvérisé représente environ 10 % de la masse de résidu solide de combustion.

La cendre refroidie dans le bassin est ensuite extraite à l'état humide et transférée vers une zone de stockage à l'air libre. Elle peut éventuellement subir des opérations de concassage et de criblage.

2.7.2.2 Caractérisation

La cendre de foyer siliceuse se présente sous forme d'un sable plus ou moins scoriacé (*refroidissement brutal*) de granulométrie comprise entre 30 microns et 30 mm avec parfois quelques rares éléments pouvant atteindre 100 mm de diamètre. Le diamètre moyen est de 0,5 mm. Il peut s'agir d'un *sable* ou d'une *grave*.

2.7.2.3 Valorisation

La majorité des cendres de foyer est généralement mélangée aux cendres volantes pour en faire un granulats plus grossier alors qu'une minorité est valorisée seule dans l'application suivante :

- Un *sable de substitution pour fond de coffre ou piste provisoire*. Il est aisé à mettre en œuvre et est non gélif en principe.

3. CENDRES VOLANTES DE BOIS/BIOMASSE

PREAMBULE : Etant donné que la cendre volante de bois présente d'importantes similitudes avec la cendre volante de biomasse, les deux types de cendres volantes sont repris dans le présent ouvrage sous le terme global de **cendre volante de bois/biomasse**. Une distinction entre les deux types de cendres est faite lorsque cela s'avère nécessaire.

Le développement de la filière biomasse comme combustible a conduit à une croissance importante du nombre de chaufferies à biomasse (*nombre multiplié par 10 entre 1994 et 2001*) qui produisent de l'énergie renouvelable mais aussi une certaine quantité de cendres (*de 0,5 à 10 % du volume entrant*). A titre d'exemple, une grosse installation (8 MW) produit en moyenne 600 tonnes de cendres par an.

3.1 GENERALITES

3.1.1 Définition et classifications

3.1.1.1 Définition

a. Biomasse

La **biomasse** peut se définir comme l'*ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie*. Elle comprend notamment les déchets à base de bois non pollués ou de liège, les déchets agricoles, forestiers ou résultant d'une transformation en aliments ainsi que les déchets alimentaires. La biomasse peut être utilisée, soit directement (*bois énergie*), soit après méthanisation de la matière organique (*biogaz*), soit après une transformation chimique (*biocarburant*).

REMARQUE : Les déchets végétaux issus de la pâte vierge et de la production du papier à partir de pâte sont également considérés comme de la biomasse mais sont traités séparément dans le chapitre suivant.

Les ressources en biomasse sont variées et peuvent être rangées en plusieurs filières selon leurs origines :

- La **biomasse bois** regroupe les produits issus du déboisement et de l'entretien de la forêt (*bois bûche, plaquettes forestières, billons, rondins, ...*) et les produits connexes de l'industrie du bois (*copeaux, sciures, écorces, ...*). Il s'agit de déchets proches du déchets de bois. Elle distingue 2 catégories :
 - La **biomasse de bois non traité** comprend les déchets non pollués de palettes, les résidus non pollués de démolition et de vieux meubles, des panneaux de rive et des croûtes de sciage ;
 - La **biomasse de bois traité** comprend l'ensemble des produits connexes à l'industrie du bois et ayant fait l'objet d'ajout d'additifs souvent chimiques. Cette biomasse peut être dangereuse en termes juridiques.
- La **biomasse agricole** comprend :
 - Les déchets issus des cultures normales (*céréales, vignes, vergers, oliviers, fruits et légumes, ...*) ;
 - Les déchets issus des cultures dédiées regroupent les taillis à courte rotation (*eucalyptus, robinier, peuplier, saule, ...*) et les taillis à très courte rotation (*miscanthus, cynara et switch grass*). Il s'agit de cultures intensives d'arbres à croissance rapide destinés à fournir rapidement de la biomasse énergétique ;
 - Les produits issus du nettoyage de terres agricoles ;
 - Les déchets issus de l'élevage (*fumier, lisier, litières, fientes, ...*).

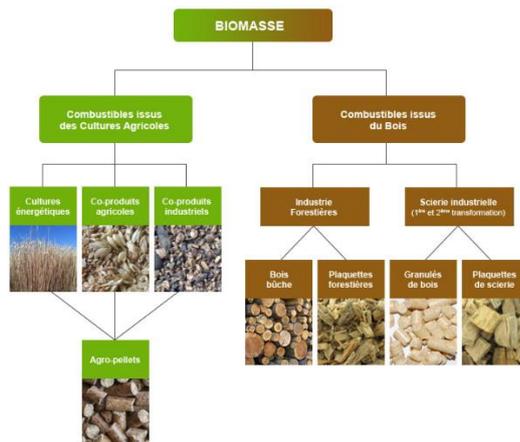


Figure 3.1 : Classification des biomasse de bois et agricole (source : internet).

- La **biomasse de déchets** comprend :
 - Les déchets organiques des ménages (fractions fermentescibles des ordures ménagères (FFOM), papier, carton, déchets verts, ...)
 - Les déchets issus de l'industrie comme les déchets issus de silos, de cosmétologie, de l'agro-alimentaire (coques de fruits, tourteaux d'oléagineux, ...) et de distillerie (pulpes, ...)
 - Les déchets industriels banals (papiers, cartons, bois, déchets putrescibles, ...)
 - Les surplus agricoles non utilisés par l'alimentation (humaine ou animale).

b. Cendre volante de bois/biomasse

La **cendre volante de bois/biomasse** se définit comme un *fin résidu issu de la combustion du bois dans un foyer à bois ou de biomasse (bois énergie) dans une unité de coïncinération et récupéré via un dispositif de dépoussiérage.*

Tableau 3.I - Classification européenne d'une cendre volante de bois/biomasse (source : CED).

10	Déchets provenant de procédés thermiques
10 01	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion
10 01 03	Cendres volantes de tourbe et de bois non traité
10 01 16*	Cendres volantes provenant de la coïncinération et contenant des substances dangereuses
10 01 17	Cendres volantes provenant de la coïncinération autres que celles visées à la rubrique 10.01.16*

La cendre de bois/biomasse représente entre 0,5 à 5 % (10 % si de la paille est brûlée) du poids initial du matériau selon la nature utilisée du bois et de la biomasse, ainsi que de la température atteinte.

3.1.1.2 Classification spécifique

La cendre volante de bois/biomasse peut se classer dans les différentes classifications du chapitre 1. Toutefois, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- Etant donné de nombreuses **similitudes** en termes notamment de composition, la cendre volante de bois peut être assimilée à de la cendre volante de biomasse ;
- La **dangerosité d'une cendre volante est principalement liée à deux paramètres** :
 - **La nature du combustible** : Un bois pur, une biomasse non traité (plaquettes forestières, écorces, déchet alimentaire, etc.) génère peu ou pas de substances dangereuses. Par contre, un déchet de bois (palettes, planche traitée, pellets, etc.) contient souvent des substances dangereuses qui se libèrent dans les fumées ;
 - **Les caractéristiques de la combustion** : La combustion de la matière organique à faible température et/ou en absence d'une certaine quantité d'air donne lieu à la formation d'hydrocarbures, de dioxines et de furanes, à l'inverse d'une combustion complète à haute température et en présence d'une certaine quantité d'air qui détruit tout le carbone.

IMPORTANT : La nature du combustible et les paramètres de combustion sont donc les paramètres importants pour définir les filières de valorisation car une cendre volante dangereuse ne peut qu'être éliminée.

3.1.2 Processus de fabrication

Le principe général d'un foyer à bois ou d'une installation de coïncinération thermique utilisant de la biomasse est d'utiliser du bois ou de la biomasse pour produire, soit de la chaleur, soit de l'électricité, via de la vapeur sous pression et un alternateur. La température dans le foyer varie entre 500 et 1 100°C.

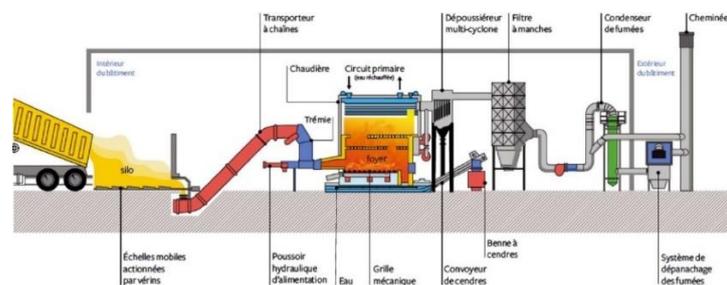


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse (source : centrale de Mont-Saint-Agnan en France). L'ensemble du dispositif de dépoussiérage des fumées n'est pas toujours présent ou est incomplet.

Il existe en réalité trois types de foyers qui fournissent des proportions différentes de cendres de foyer et de cendres volantes :

- Le *foyer à grille* génère une forte proportion de cendre de fond (60 à 90 %) et une faible quantité de cendre volante grossière ;
- Le *foyer de type Spreader Stoker* consiste à projeter les éléments combustibles. Il produit également une forte proportion de cendres de fond (70 – 90 %) et une faible proportion de cendres volantes ;
- Le *foyer à lit fluidisé* fonctionne comme un central à charbon à lit fluidisé circulant. Elle produit une forte proportion de cendres volantes légères (70 – 90 %) à l'inverse des deux autres types de foyer.

REMARQUE : Les petites installations (< 2 MW) ne disposent généralement pas d'un dispositif complexe de dépoussiérage et de traitement des fumées, si bien que les cendres volantes grossières sont souvent mélangées aux cendres de fond dans le bassin d'eau. Cela permet aussi de limiter le risque d'incendie dans ces petites installations. De ce fait, il n'y a quasiment pas de cendres volantes à valoriser dans les foyers à grille et de type Spreader Stoker.

3.1.3 Contextes

3.1.3.1 Contexte historique

L'histoire des cendres de bois/biomasse est intimement liée à l'histoire des foyers de bois.

Depuis longtemps, l'homme a utilisé le bois comme source de chaleur chez lui, puis dans certaines entreprises. Cependant, ce mode de chauffage est de plus en plus controversé en raison du dégagement de produits toxiques (*particules fines, dioxines, furanes et HAP*), notamment dans les villes où ces fumées ont tendance à se concentrer.

3.1.3.2 Contexte juridique

La gestion et le devenir des cendres de bois/biomasse sont régis par les différents pays ou régions.

a. Wallonie

Les principaux documents liés à la gestion des cendres de bois en Wallonie sont :

- L'*AGW du 14 juin 2001* favorisant la valorisation de certains déchets permet de valoriser les cendres de bois non dangereuses (*codes 10 01 01 et 10 01 03*) selon l'article 13 (*gestion des déchets non repris dans la liste des déchets de l'annexe I*) en s'inspirant du cas des cendres volantes issues de centrale thermique à charbon (*comptabilité et valorisation en ciment, béton et filler*) ;
- L'*AR du 28 janvier 2013* relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des engrais, des amendements du sol et des substrats de culture d'application.

Par contre, la valorisation forestière n'est pas autorisée par le Code forestier (*Circulaire n° 2633 visant à la réglementation des amendements en forêts soumises*).

3.1.3.3 Contexte économique

La société belge MINEREC (*Hoogstraten*) valorise les cendres de biomasse.

3.1.3.4 Contexte scientifique et perspectives d'avenir

Plusieurs projets de recherche ont étudié les caractéristiques des cendres de bois pour mieux les valoriser :

- Le projet *Recash* (*GB, Finlande, Suède, etc.*) a montré qu'une cendre issue d'un bois de démolition ne peut être valorisée en agriculture en raison du risque plus important de pollution ;
- Le projet *EcoBiogaz* a montré que la cendre de bois est plus intéressante en termes de matières utiles à l'agriculture (*CaO, MgO, K₂O et P₂O₅*) que la cendre de biomasse ;
- Le projet *Biorefine* (2016) ;
- Le projet *Waloscrap* (*x - 2016*).

3.2 GESTION ET TRAITEMENT

3.2.1 Stockage et transport

Selon sa teneur en eau, la cendre volante de bois/biomasse est stockée et transportée différemment :

- La *cendre volante sèche* nécessite un stockage et un transport, via des contenants hermétiques à l'eau (*sac plastique, silo et citerne*). Elle peut générer un certain nombre de poussières lorsqu'elle est soumise à l'air. C'est toutefois la forme la plus fréquente ;

- La *cendre volante humide* est stockée en benne ou sur un tas couvert ou non (*terril*). En cas de stockage couvert, un arrosage artificiel est organisé afin de réduire la dispersion de poussière. Son transport se fait par contenant ouvert (*benne, bande transporteuse, etc.*). Elle est donc plus facilement manipulable et occasionne moins de poussières ;

Le bon de livraison doit mentionner la teneur en eau au départ de la centrale.

En ce qui concerne les précautions à prendre, vu son caractère basique, des risques de blessure à la peau et aux yeux existent. De plus, il ne faut pas négliger la présence de silice cristalline (*ex. tridymite, cristobalite*) qui peuvent présenter des risques respiratoires pour les personnes les manipulant ainsi que les personnes vivant à proximité du site de manutention.

3.2.2 Prétraitement des cendres volantes brutes

Les principaux prétraitements réalisés sur une cendre volante de bois-biomasse peuvent être les suivants :

- L'*humidification de la cendre sèche* consiste à obtenir une teneur en eau proche de 35 % de la masse sèche. Dans le cas d'une cendre volante riche en chaux vive et destinée à une valorisation comme liant, cette opération doit être réalisée juste avant l'emploi de la cendre volante. Cette étape permet d'hydrater la chaux vive et ainsi de réduire ses propriétés de liant ;
- La *granulation* consiste à compacter la cendre volante sèche afin de la rendre plus manipulable ;
- Le *tri et la séparation des métaux* (*ferreux et non ferreux*) ou des *imbrûlés indésirables* ;
- Le *criblage* consiste principalement à éliminer les fractions grossières qui peuvent poser problème aux épandeurs agricoles et du génie civil ;
- Le *calibrage* consiste à obtenir une répartition des grains selon un fuseau granulométrique bien spécifique, via un dispositif de concasseur(s) et de crible(s).

3.3 CARACTERISATION

Les caractéristiques de la cendre volante de bois/biomasse dépendent fortement de la nature du combustible (*types de bois et de biomasse*), des paramètres de combustion et de la gestion de la cendre volante produite.

3.3.1 Principales spécificités

La cendre volante de bois/biomasse se caractérise par les spécificités suivantes :

- Elle présente de *grandes variations de texture, de composition et de propriétés* selon les caractéristiques de la biomasse et de combustion. Il importe de garantir une certaine constance de ces paramètres pour un grand nombre de filières de valorisation ;
- Elle possède un *certain pouvoir hydraulique* mais ses *propriétés pouzzolaniques sont quasi nulles* ;
- Elle peut contenir *certaines éléments polluants* tels que des métaux lourds, des composés organiques et des dioxines, notamment si la combustion a été incomplète et si le combustible provient de déchet de bois. C'est principalement la teneur en cadmium qui pose problème ;
- Les *quantités produites sont généralement faibles* pour un bon nombre de foyers. Cela nécessite souvent un regroupement et donc une certaine homogénéisation avant valorisation.

3.3.2 Examen visuel

La cendre volante de bois/biomasse se présente comme une poudre fine.

3.3.3 Compositions chimique et minéralogique

La composition de la cendre volante de bois/biomasse est très variable et dépend surtout de la nature du combustible brûlé et des caractéristiques de la combustion (*type de foyer, température, pression, etc.*).

REMARQUE : Certains auteurs (*Etiégni et Campbell (1990)*) ont montré que lorsque la température augmente, les concentrations en sodium, potassium et zinc diminuent alors que la teneur des autres métaux reste constante ou augmente.

Le tableau ci-dessous reprend la composition moyenne de différentes cendres volantes de bois/biomasse.

Tableau 3.II - Composition chimique moyenne des cendres volantes de biomasse (source : ADEME (2001)).

Agent	Bois	Ecorces	Biomasse	Paille	Remarque
SiO ₂	10 - 32	10 - 40	10 - 40	30 - 66	Faible pouvoir pouzzolanique
Al ₂ O ₃	1 - 5	0 - 4	0 - 8	1 - 4	
Fe ₂ O ₃	1 - 2,5	3,9	5 - 10	NC	
CaO total	18 - 65	20 - 62	15 - 45	10 - 30	
CaO libre	17 - 25	5 - 10	0,5 - 26		
MgO	2 - 4	0,5 - 2	1 - 4	NC	
SO ₃	0 - 1	0 - 0,5	0 - 0,5	NC	
P ₂ O ₅	1 - 5	0,5 - 6	0,5 - 23	1 - 4	
K ₂ O	2 - 9	2 - 5	5 - 12	10 - 28	
Na ₂ O	0,1 - 0,4	0,3 - 0,5	0,5 - 2	NC	
pH	13 - 14	12 - 13	12 - 13,5		Milieu très basique
Agent polluant (risques)	Métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb et Zn) (modification du comportement dans la prise d'un liant hydraulique) Composés organiques Dioxines				

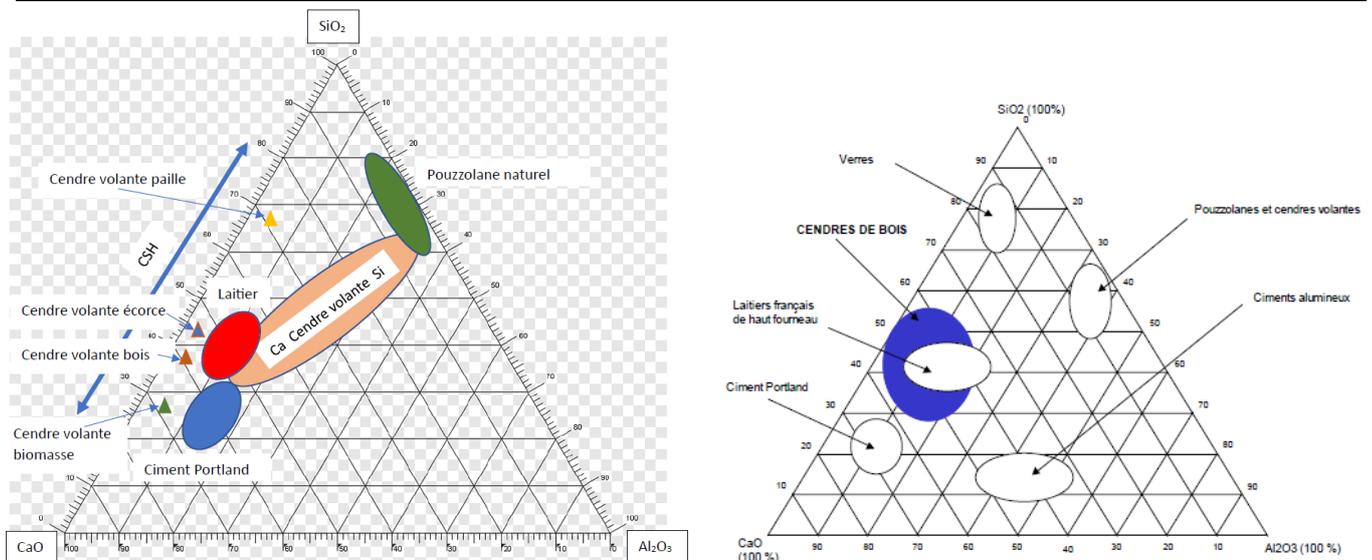


Figure 3.3 : Répartition moyenne des compositions chimiques de différentes cendres volantes de bois/biomasse. Attention : Les points sont basés sur les valeurs moyennes et ne tiennent pas compte de la grande variabilité des valeurs (Sources : ADEME (2001) et JB Conseils).

Le tableau et la figure ci-dessus mettent en évidence les commentaires suivants :

- La cendre volante de bois/biomasse a un **pH très élevé** (12 - 14). Le milieu est donc très basique ;
- La composition chimique moyenne d'une cendre volante de bois/biomasse est **principalement composée de CaO et de SiO₂** en quantité variable (10 - 40 % pour SiO₂ et 0,8 - 26 % pour CaO). Elle est par contre **très pauvre en aluminium** (≤ 5 %), azote, soufre et chlore ;
- La **grande variabilité des teneurs en SiO₂ et CaO** pour les cendres de bois (bois et écorce) est principalement due à l'essence du bois brûlé ;
- Outre cette grande variabilité, la **composition chimique moyenne d'une cendre volante de bois** (bois et écorce) est proche de celle d'un laitier tandis que la **composition moyenne d'une cendre volante de biomasse** est plus proche de celle d'un ciment portland car plus riche en CaO. Sur base de ces compositions chimiques, la cendre volante de bois/biomasse peut être qualifiée de **cendre volante calcique à silico-calcique**. Par contre, la composition chimique d'une cendre volante de paille est plus riche en SiO₂ et en K₂O ;
- Il n'existe **pas d'informations sur la teneur en sulfates** ;
- La cendre volante de bois se distingue des autres cendres volantes de biomasse généralement par une **teneur plus faible en potassium** (P₂O₅).

3.3.4 Analyses environnementales

Une campagne environnementale réalisée sur les cendres de charbon en France en 2015 dans le cadre de l'élaboration du guide d'application "Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé" (CEREMA – 2019), a permis de déterminer les valeurs critères pour ces matériaux ainsi que les critères supplémentaires spécifiques pour une cendre de coïncinération faisant intervenir plus de 10 % de biomasse.

Tableau 3.III – Valeurs limites à respecter pour tout matériau alternatif élaboré à base de cendre volante de charbon et valorisable en domaine routier (source : CEREMA – 2019).

Polluant	France (NF EN 12457-2 ou 4)		
	Usage type 1	Usage type 2	Usage type 3
Analyse de lixiviation (exprimée en mg/kg MS)			
As	0,7	0,6	0,6
B	50	25	25
Ba	56	28	25
Cd	0,05		
Cr total	4	2	0,6
Cr VI ¹	1,2	0,6	---
Cu	3		
Hg	0,01		
Mo	4,8	2,4	0,6
Ni	0,5		
Pb	0,6		
Sb	0,4	0,2	0,08
Se	0,5	0,3	0,1
Zn	5		
Chlorure	10 000	5 000	1 000
Fluorures	60	30	13
Sulfates	10 000	5 000	1 300
Analyse en contenu total			
COT	60 000 mg/kg MS ²		
HAP	50 mg/kg MS ³		
HCT (C10-C40)	500 mg/kg MS		
BTEX	6 mg/kg MS		
PCB (7 congénères)	1 mg/kg MS		
Dioxines et furanes	10 ng I-TEQ _{OMS,2005} / kg MS ⁴		
¹ Si la valeur en Cr VI est supérieure à celle de Cr total, la valeur de Cr total est considérée. Par contre, si Cr total < 0,6 mg/kg MS, la valeur de Cr VI ne doit pas être déterminée. ² Si la teneur en COT dépasse 60 000 mg/kg MS, il est possible de la déduire à partir de l'estimer à partir de la teneur en carbone élémentaire. ³ La mesure HAP reprend 16 congénères selon US EPA. ⁴ Lorsque la concentration d'un congénère est inférieure à la limite de quantification, alors elle est considérée comme nulle dans le calcul cumulé.			

REMARQUE : En France, la valorisation de la cendre volante de bois/biomasse devait dans le passé, répondre aux critères d'un mâchefer V (Valorisable) de la loi du 9 mai 1994 pour pouvoir être utilisée en domaine routier.

Les principaux résultats obtenus montrent les points suivants :

- La *récupération humide de la cendre volante* permet de réduire les quantités et les valeurs de lixiviation ;
- La cendre volante de bois obtenue principalement à partir de *résineux* peut contenir des *valeurs plus élevées en zinc (Zn)* ;

3.3.5 Caractérisation géotechnique

Néant

3.3.6 Etude de comportement

3.3.6.1 Indice d'activité ou influence sur la prise du ciment

L'indice d'activité consiste à comparer la résistance d'un mortier témoin à un mortier substitué à hauteur de 25 % du clinker et à définir l'indice d'activité à x jours comme étant le rapport $R_{C_{cendre\ xj}} / R_{C_{étalon\ xj}}$.

Les quelques essais réalisés lors de l'étude ADEME (2001) ont montré les points suivants :

- La valeur d'indice d'activité est comprise entre 23 et 53 %, soit une valeur relativement faible en comparaison avec la valeur d'une cendre volante siliceuse de charbon et à la valeur du critère présent dans la norme EN 450 (> 75 %). Cela s'explique probablement par une teneur relativement importante en chaux libre. La *cendre de biomasse ne possède pas de bonnes propriétés pouzzolaniques* ;
- Certaines mesures de résistance à la compression n'ont pu être réalisées sur un échantillon de cendre volante de bois, suite à la *présence d'un gel gonflant* ayant fissuré les éprouvettes ;

3.4 FILIERES DE VALORISATION

3.4.1 Etats des lieux

Vu la composition très variable de la cendre volante de bois/biomasse, toutes les voies de valorisation ne sont pas applicables à toutes les centrales de bois/biomasse mais seulement à certaines. Ainsi, une étude de faisabilité technico-économique doit être réalisée pour chaque foyer et chaque changement majeur.

Jusqu'à dans les années 2010, les deux principales filières de la cendre volante de bois/biomasse non dangereuse étaient le domaine agricole (*épandage agricole et forestier avec une autorisation relativement souple*) et l'élimination en CET II tandis que la cendre volante de bois/biomasse dangereuse était automatiquement éliminée en CET III.

Actuellement, les filières liées à la cendre volante non dangereuse de bois/biomasse se sont diversifiées mais restent encore très marginales.

REMARQUE : La cendre volante dangereuse de bois/biomasse ne peut toujours pas être actuellement valorisée.

Tableau 3.IV : Principales filières de valorisation des cendres de biomasse.

Type	Filières de valorisation ou d'élimination
Cendre volante de biomasse non dangereuse	<p>Domaine agricole : compostage (<i>source de carbone</i>), engrais, amendement calcaire, épandages agricole et forestier</p> <p>Domaine routier : liant, filler d'apport, granulats synthétiques</p> <p>Domaine de la construction : céramique, ciment, filler et panneaux agglomérés</p> <p>Elimination (CET 2)</p>
Cendre volante de biomasse dangereuse	Elimination (CET 3)

3.4.2 Domaine agricole

La cendre volante de bois/biomasse se caractérise par un milieu basique élevé ($pH : 12 - 14$) et une certaine teneur en éléments nutritifs (N, P ou K) ou (Ca, Mg et S).

Les différents pays et régions européennes ont adapté leurs législations pour permettre l'utilisation des cendres volantes de bois/biomasse sous différentes formes en domaine agricole : épandages agricole ($3-10\ t/ha$) et forestier ($10-20\ t/ha$), engrais, amendement calcaire et élément de compostage. Elle est utilisée seule ou en mélange avec du compost ou du lisier. Seule, elle ne présente pas de nuisance olfactive et est pauvre en azote.

REMARQUE : L'épandage forestier permet aussi de réduire l'acidité du sol, notamment dans une forêt de résineux.

Ces principales adaptations juridiques concernent principalement la présence de valeurs-seuils liées aux éléments nutritifs (*pour certaines applications*) et à certains métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb et Zn).

La Wallonie autorise depuis 2012, leur valorisation en tant qu'engrais/amendement dans l'agriculture ou dans le processus de production de compost, moyennant des critères d'acceptation bien définis.

3.4.3 Domaine du génie civil

3.4.3.1 Ciment

La cendre volante de bois/biomasse a une composition similaire à une cendre volante calcique, un clinker Portland ou à un laitier. Elle est relativement riche en silice et en calcium. Une application dans du ciment est envisageable, moyennant une opération de broyage préalable. L'Autriche et la Hollande sont des pays précurseurs en la matière.

Toutefois, sa faible teneur en aluminium et la faible présence de silice réactive ne lui permettent pas d'avoir des propriétés pouzzolaniques intéressantes (*activité inférieure à 75 %*). De plus, elle peut contenir des dosages relativement élevés en chaux vive, en alcalins (*retardateurs de prise*), en sulfates (*risque de formation d'ettringite secondaire*) et en métaux lourds (*Cd et Zn principalement*) qui freinent sa valorisation en tant que liant. Des pré-traitements existent pour réduire ces effets néfastes mais ont un coût.

Par contre, elle peut intervenir comme correcteur granulométrique.

3.4.3.2 Béton

Plusieurs études concernant l'ajout de cendre volante de biomasse comme additif dans un béton ont été réalisées avec des résultats contradictoires en fonction de la nature de la cendre volante et de la teneur en chaux libre induisant ou non une prise. Cela ne permet pas de les valoriser de façon rentable dans ce type d'application :

- Une *étude menée par Buildwise (ex CSTC)* sur une cendre volante de biomasse du site des Awirs (2008) a montré qu'avec un taux d'incorporation de 33 % et une valeur élevée en chaux vive, une **prise éclair** se produit. Une réduction du taux de substitution et l'emploi d'un retardateur de prise sont alors nécessaires ;
- Une *étude menée par la société Eurovia et l'organisme SETE (France)* sur une cendre volante issue du Nord n'a montré aucune valeur de résistance à la compression ;
- Des *études suisses* ont montré qu'il est possible d'utiliser une cendre volante de biomasse dans un béton, moyennant un processus préalable de traitement qui permet d'éliminer les effets négatifs d'hydratation. De ce fait, elle peut intervenir non comme additif mais comme filler inerte ou charge.

REMARQUE : Il faut garantir que le lixiviat du béton contenant la cendre ne soit pas polluant pour l'eau et le sol.

Toutefois, la cendre volante de bois/biomasse peut être valorisée dans un béton non armé préfabriqué comme filler d'apport remplaçant une partie du sable, pour autant que certains critères en termes de granulométrie et composition chimique soient respectés.

3.4.3.3 Domaine routier

La cendre volante de biomasse peut être valorisée en domaine routier selon trois formes :

- Un *filler pour granulats pauvres en éléments fins* : Cette application constitue la valorisation la plus simple mais n'est envisageable que si la teneur en chaux libre est faible ou après un éventuel prétraitement d'humidification de la cendre volante sèche (*hydratation de la chaux vive*). Le matériau joue alors un rôle de remplissage ;
- Le *filler dans les enrobés bitumineux* ;
- Un *liant aérien pour matériau de remblai* : Cette application ne concerne qu'une cendre volante riche en chaux vive. De plus, le matériau dispose d'une faible activité pouzzolanique qui peut également intervenir. Cette application a été testée en Autriche, Finlande et Suède ;
- Un *liant hydraulique alternatif* : La société française Surschiste valorise la cendre volante dans un liant hydraulique appliqué aux travaux de terrassement et aux structures routières.

REMARQUE : Dans le passé, la France a autorisé la valorisation de la cendre volante de bois/biomasse en couche de forme et fondation routière pour autant qu'elle respectait les caractéristiques des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères de type V (*valorisable*) selon la Circulaire du 9 mai 1994. L'expérience a montré qu'un prétraitement était souvent nécessaire.

3.4.3.4 Autres domaine du génie civil

De nombreuses filières de valorisation dans le domaine de la construction ont été envisagées mais ont eu peu de succès, vu la constance des paramètres à avoir et les études et nombreux tests à réaliser pour le démontrer.

a. Matériaux de remplissage de cavités souterraines

L'Allemagne utilise une partie de ses cendres volantes de bois/biomasse pour combler ses mines de sels. Une étude approfondie concernant l'hydrologie et le risque de contamination de l'eau et du sol doit être réalisée au préalable.

b. Stabilisation des matériaux de dragage et de décharge

Les caractéristiques hydrauliques de la cendre volante de bois/biomasse permettent de stabiliser les matériaux peu cohérents tout en inertant une partie de la pollution.

c. Granulats synthétiques

Il est possible d'obtenir des granulats synthétiques à partir d'une opération de collage à froid.

d. Briques

La cendre volante de bois/biomasse peut être utilisée en remplacement du sable, moyennant un traitement préalable. C'est une pratique courante en Autriche et en Hollande.

e. Céramique

La cendre volante de bois/biomasse non dangereuse peut être valorisée dans le secteur de la céramique artisanale (*poterie et décoration*) et de la céramique traditionnelle (*principalement dans les réfractaires et sanitaire*) sous réserve de ses teneurs en chaux vive (*problème de prise et stabilité des bains d'émaux en phase humide*), en oxydes de fer (*une teneur trop importante fournit une couleur prononcée*) et en oxydes alcalino-terreux (*variation de comportement rhéologique lors de la mise en œuvre en phase liquide*) ainsi que d'une granulométrie compatible.

Elle peut intervenir dans les émaux comme matière première fondante et fournit une cendre volante vitrifiée. Dans ce cas, une étude approfondie est nécessaire afin de déterminer ses comportements rhéologique et pyroscopique ainsi que son influence sur la couleur, la texture et les motifs obtenus. Différents paramètres sont également exigés comme la teneur en oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO et MgO), chaux vive, fondants alcalins (Na_2O et K_2O), oxydes colorants (Fe_2O_3 , TiO_2 et MnO) et en imbrûlés. Or, toutes ces analyses ont un prix.

f. Argile expansée

L'Italie autorise l'emploi de cendres de biomasse dans la formation de billes d'argile expansée.

g. Panneaux agglomérés

Des essais ont montré qu'il est possible d'incorporer jusqu'à 20 % de cendre volante de bois/biomasse dans un panneau aggloméré.

h. Filler en peinture, coulis d'injection, pigments et colle minérale

Cette application n'est envisageable que si la teneur en chaux libre est faible après un éventuel prétraitement d'humidification (*hydratation de la chaux vive*). Le matériau joue alors un rôle de remplissage et peut être utilisé comme charge minérale.

3.4.4 Autres domaines

3.4.4.1 Autres domaines

D'autres filières de valorisation ont été envisagées pour une cendre volante de bois/biomasse, notamment sous forme de filler pour charge minérale de matière plastique, géopolymère ou de absorbants d'odeur en raison de leur finesse et de leur relativement forte capacité d'absorption.

Des études ont également envisagé la possibilité d'une substitution au charbon actif (*capacité d'absorption élevée*).

3.5 CAS PARTICULIER DES CENDRES DE FOYER DE BOIS/BIOMASSE

La *cendre de foyer de bois/biomasse* se définit comme un *résidu grossier issu de la combustion du bois ou de la biomasse dans un foyer à bois ou une installation de coïncinération thermique et récupéré à la base de ce foyer.*

Tableau 3.V - Classification européenne d'une cendre volante de bois (source : CED).

10	Déchets provenant de procédés thermiques
10 01	<i>Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion</i>
10 01 01	<i>Mâchefers, scories et cendres sous chaudière</i>

3.5.1.1 Valorisation

La cendre de fond de bois/biomasse peut être valorisée principalement dans le domaine agricole sous forme d'amendement, d'engrais ou de complément de compost en raison de sa teneur élevée en calcium, de sa faible quantité et de sa variabilité, pour autant qu'un certain nombre de critères environnementaux soient respectés.

4. CAS PARTICULIER DES CENDRES VOLANTES DE PAPIER

4.1 GENERALITES

4.1.1 Définition et classifications

4.1.1.1 Définition

La *cendre volante de papier* se définit comme un *fin résidu solide issu d'un procédé de combustion des déchets de l'activité papetière en vue de fournir de la chaleur et/ou de l'électricité et d'un dispositif de récupération des fumées*. La cendre volante est en réalité un cas particulier de cendre volante de biomasse.

Tableau 4.I - Classification européenne d'une cendre volante de papier (source : CED).

10	Déchets provenant de procédés thermiques
10 01	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion
10 01 17	Cendres volantes provenant de la coïncinération autres que celles visées à la rubrique 10.01.16*

4.1.1.2 Classification

La cendre volante de papier répond aux principales classifications du chapitre 1.

4.1.2 Contextes

4.1.2.1 Contexte juridique et administratif

En accord avec l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets, la cendre volante de papier peut être valorisée, moyennant la tenue d'une comptabilité au sens de cet AGW.

4.1.2.2 Contexte économique

La production de cendre de papier dépend de la production de papier et carton.

4.1.2.3 Contexte scientifique

- Le projet européen *PaperChain* vise à trouver pour les déchets générés par l'industrie papetière, des filières de valorisation dans les secteurs minier, de la construction (*route et bâtiment*) et de la chimie. Il regroupe 5 pays et concerne principalement les boues et les fibres générées lors du traitement.

4.1.3 Processus de fabrication

La production de papier génère à la fois des *déchets solides* (de l'ordre de 90 % du volume des déchets totaux) présents sous forme d'écorce, de refus de bois (*éclats, nœuds, sciures, feuilles, etc.*) et des déchets de papier recyclé (*acier des agrafes, etc.*) ainsi que des *déchets liquides* sous forme de boue de désencrage (*boue riche en cellulose provenant des fibres de papier, en calcite et en kaolinite utilisée pour blanchir le papier*) et de boue issue de station d'épuration.

Ces différents déchets sont ensuite brûlés dans un four à lit fluidisé porté à 820°C afin de produire de la chaleur ou de la vapeur. La boue est envoyée telle quelle ou peut subir un cycle de séchage préalable.

La cendre est un des résidus de cette combustion. Elle représente 20 % de production de pâte à papier produite. Elle se présente sous forme de *cendre volante* (85 % du volume) et de *cendre de foyer* (15 %).

4.2 GESTION ET TRAITEMENT

4.2.1 Stockage et transport

Selon sa teneur en eau, la cendre volante de bois/biomasse est stockée et transportée différemment :

- La *cendre volante sèche* nécessite un stockage et un transport, via des contenants hermétiques à l'eau (*sac plastique, silo et citerne*). Elle peut générer un certain nombre de poussières lorsqu'elle est soumise à l'air. C'est toutefois la forme la plus fréquente ;
- La *cendre volante humide* est stockée en benne ou sur un tas couvert ou non (*terril*). En cas de stockage couvert, un arrosage artificiel est organisé afin de réduire la dispersion de poussière. Son transport se fait par contenant ouvert (*benne, bande transporteuse, etc.*). Elle est donc plus facilement manipulable et occasionne moins de poussières ;

Le bon de livraison doit mentionner la teneur en eau au départ de la centrale.

En ce qui concerne les précautions à prendre, vu son caractère basique, des risques de blessure à la peau et aux yeux existent. De plus, il ne faut pas négliger la présence de silice cristalline (*ex. tridymite, cristobalite*) qui peuvent présenter des risques respiratoires pour les personnes les manipulant ainsi que les personnes vivant à proximité du site de manutention.

4.3 CARACTERISATION

4.3.1 Examen visuel

La cendre volante de papier se présente à l'état brut sous forme de particules grossières de diamètre compris entre 1 et 5 mm. Elle est souvent humidifiée à 50 % afin de devenir un matériau pelletable de couleur gris bleu.

A l'échelle microscopique, la cendre volante de papier présente des grains de forme variable allant de particules sphériques pleines ou creuses et très souvent vitreuses (*similaires à celle d'une cendre volante de charbon siliceuse*) à des particules allongées, anguleuses et très poreuses en passant par des agglomérats de particules frittées (*Mazouak et al. (2001)*).

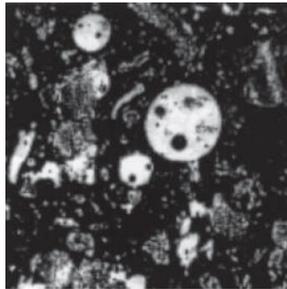


Figure 4.1 : Exemple au microscope d'un échantillon de cendre volante de papier (*Source : Mazouak et al. (2001)*).

4.3.2 Analyse chimique et minéralogique

4.3.2.1 Composition chimique

La cendre volante de papier peut contenir les éléments suivants en quantité variable selon le processus et les matières premières utilisées :

- Des *matières minérales* présentes dans la pâte et les divers résidus de produits chimiques entrant dans sa composition. Elle est riche en chaux, contient de la potasse, du phosphore, du magnésium et de nombreux oligo-éléments mais par contre, elle est dépourvue d'azote. Ce sont des éléments importants pour une valorisation en domaine agricole et forestier ;
- Des *charges, pigments, couches ou résidus de divers adjuvants* ;
- Du *métal* provenant des canalisations ou de la machinerie.

REMARQUE : Un essai (*norme ISO 1762 : 2015*) permet de déterminer la quantité et la composition de résidu (*cendres*) présent dans un échantillon de papier, de carton ou de pâte après incinération à 525°C. En effet, à cette température, le CaCO_3 , les charges et pigments présents ne se décomposent pas. Seuls, les matières organiques, le carbonate de magnésium et le sulfate de calcium se décomposent sous cette température.

La composition chimique de la cendre volante de papier est similaire à celle d'une cendre de biomasse et d'un clinker Portland, soit un matériau riche en silice et calcium et pauvre en aluminium et potassium.

Il faut remarquer que la cendre volante de papier étudiée par Mazouak et al. (2001) se distingue par une teneur plus importante en alumine (*propriétés pouzzolaniques plus développées*), en phosphore et en chlorures.

Tableau 4.II – Composition chimique d'une cendre de papier (sources : Gautry (2001) et ADEME (2001)).

% (NC : valeur non communiquée)	Cendre volante de papier (ADEME (2001))	Cendre volante de papier (Mazouak et al. (2001))	Cendre de biomasse	Cendre calciq ue	Cendre siliceuse
pH	12,3	NC	12 - 13		
SiO ₂	NC - 40	31,1	10 - 40	5 - 50	20 - 76
Al ₂ O ₃	1 - 4	10 - 18	0 - 8	1 - 28	5 - 40
Fe ₂ O ₃	NC	NC	5 - 10	1 - 10	2 - 27
CaO total	14 - 22	14 - 20,5	15 - 45	10 - 50	0,1 - 45
CaO libre	NC	< 10	0,5 - 22	1 - 30	< 5
SO ₃	NC	0,68 - 2,7	< 0,5	0,5 - 34	< 15
K ₂ O	2 - 4	NC	5 - 12	< 9	< 8
MgO	1,7	NC	1 - 4	< 5	< 15
Na ₂ O	0,7	NC	0,5 - 23	< 2	< 8
P ₂ O ₅	0,5 - 5	9 - 18,7	0,5 - 23	< 1,1	< 10
Chlorure	NC	3,7 - 5,5			

4.3.2.2 Composition minéralogique

L'étude de Mazouak et al. (2001) montre que leur cendre volante de papier est principalement composée de quartz, d'halite (NaCl), de sylvite (KCl) et d'anhydrite (CaSO₄) et est pauvre en chaux vive et calcite.

4.3.3 Analyses environnementales

La cendre de papier ne présente pas de substance nocive pour la santé, ni de nuisance olfactive.

Tableau 4.III – Composition environnementale d'une cendre volante de papier (source : Gautry - 2001).

ppm	Echantillon ADEME (2001)	Echantillon Mazouak et al. (2001)
As	NC	< 5
Cd	< 2	25
Cr	33,5	21
Cu	55	6 900
Hg	0,1	NC
Ni	29	NC
Pb	48,5	670
Zn	315	5 500

Il faut remarquer que la cendre volante de papier étudiée par Mazouak et al. (2001) se distingue par une teneur très élevée en cuivre et en zinc et que la quantité totale de métaux lourds représente environ 1,5 % de la masse des cendres.

4.3.4 Caractérisation géotechnique

4.3.4.1 Principales spécificités

Il existe peu d'études publiées concernant la caractérisation géotechnique de cendres volante de papier. Le présent ouvrage reprend les résultats de quelques études (*Mazoual A. et al. (2001) et Dailly (2007)*).

Tableau 4.IV – Principales caractéristiques des cendres volantes et de fond de papier (source : *Dailly (2007)*).

	Type d'essai	Cendre volante	Cendre de foyer	Commentaires et critères CCT Qualiroutes
Paramètres géométriques	Analyse granulométrique <i>Passant à 90 µm</i>	28 - 65 %	19 %	Définition comme filler
	Finesse Blaine	3 670 - 5 481 cm ² /gr	1 780 cm ² /gr	Influence la vitesse de prise
	Valeur au bleu de méthylène (MB)	< 1,7 gr/kg	< 1,7 gr/kg	
Paramètres physiques	Masse volumique absolue	2,85 t/m ³	2,47 t/m ³	Eléments légers
	Masse volumique réelle	2,493 t/m ³	---	
	Porosité intergranulaire	48 %	54 %	
	Teneur en eau	0 %	7,3 %	
Paramètres chimiques	Teneur en chaux libre <i>(Leduc)</i>	7,1 %	3,6 %	

4.3.4.2 Paramètres géométriques

a. Courbe granulométrique

La seule analyse granulométrique disponible montre les points suivants :

- La courbe granulométrie d'une cendre volante de papier est une *courbe intermédiaire entre celle d'un ciment et celle d'un sable* utilisée pour du béton ;
- La *courbe est généralement plus étalée*.

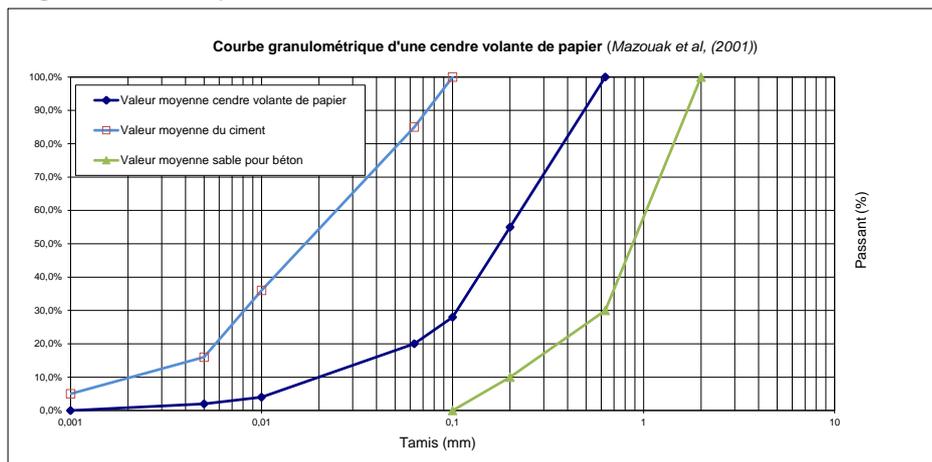


Figure 4.2 : Courbe granulométrique d'une cendre volante de papier (source : *Mazouak A. et al. (2001)*).

b. Finesse des grains

Les quelques valeurs de surface spécifique fournissent des valeurs comprises entre 3 670 et 5 4815 cm²/gr, soit des valeurs moyennes pour un clinker.

4.3.4.3 Paramètres physiques

a. Masses volumiques

La seule valeur de masse volumique réelle équivaut à 2,493 t/m³, soit une valeur moyenne.

4.3.4.4 Paramètres chimiques

Néant

4.3.5 Etude de comportement

Néant

4.4 FILIERES DE VALORISATION

4.4.1 Etats des lieux

Jusqu'au début du 21^{ème} siècle, les trois principales destinations des cendres de papier étaient l'épandage en agriculture, l'incinération et la mise en décharge type 2. Depuis 2000, une bonne majorité des cendres de papier est valorisée dans le secteur de la construction (*principalement, la route*).

4.4.2 Domaines agricole et forestier

La cendre de papier est valorisée dans le domaine agricole et forestier pour les applications suivantes, moyennant le respect de nombreux critères environnementaux et des accords de l'administration :

- L'*amendement agricole* est une des filières les plus fréquentes en raison de la richesse en éléments minéraux (K, Ca, Mg, etc.) et oligo-éléments ainsi que de sa faible teneur en azote. Cette filière s'applique principalement au sol acide ;
- L'*amendement forestier* est moins fréquent car les résultats ne sont pas aussi probants que ceux obtenus lors de l'amendement agricole. De plus, il faut attendre un certain temps avant de percevoir les premiers résultats. Cela s'explique par une modification rapide du pH, affectant le cycle nutritionnel des arbres. Selon certaines études, l'efficacité serait meilleure sous les arbres feuillus.

4.4.3 Routes et voies ferrées

Les principales filières de valorisation de la cendre de papier en domaine routier sont :

- Le *traitement de sol* : La cendre de papier peut se substituer partiellement ou totalement à la chaux vive. Cette technique est particulièrement bien développée en Flandre avec des liants commercialisés sous le nom de TopCrete et Calcarit. En Wallonie, la société Carmeuse a reçu en 2021, une reconnaissance de Statut de Sortie de Déchet (SSD) pour produire un LHR contenant jusqu'à 60 % de cendres de papier et pouvant être utilisé à raison de 6 % maximum comme liant d'un sol et ce, notamment pour respecter la teneur en plomb ;
- Le *traitement des graves* : L'entreprise espagnol Acciona a réalisé début 2020, dans le cadre du projet de recherche PaperChain, un tronçon d'autoroute près de Valence (*Espagne*) en substituant une partie du ciment par de la cendre volante de papeterie. Cette opération concerne la fondation en empierrement lié, voire le revêtement en béton. Il y a peu d'information disponible à ce sujet ;
- La *composition d'un remblai léger*

4.4.4 Autres domaines

Néant

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2001) : "*Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois*" – Etude réalisée par le bureau d'études Trivalor pour l'ADEME (novembre 2001).
- CEREMA (2019) : "*Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé*" – Collection/Références.
- COURARD L. (2010) : "*Sous-produits industriels : Cendres volantes*" – Cours donné à l'ULg dans le cadre de la formation "*Valorisation des déchets et sous-produits industriels*", chapitre II.3, pp 30 – 49.
- DAILLY J. (2007) PFE – INSA de Strasbourg.
- GAUTRY J. Y. (2001) : "*Les cendres de papeterie : essai de valorisation en forêt*" – Forêt Méditerranéenne, 2001, XXII (2), pp. 55-160 (hal-03558446)
- HAZIME A. (2014) : "*Cendres volantes : Modèles de création de valeur*" - Exposé lors de la journée AFOCO à Douai (5 juin 2014)
- HUET J., CHOQUET F. et VERHASSELT A. (1981) : "*Les cendres volantes belges – leurs qualités de filler routier*" – CRR 16/81.
- KANBOUCHI I., SOUABI S., CHTAINI A., ABOULHASSAN M.A. et CHAHBANE N. (2007) : "*Valorisation des cendres : application au traitement des eaux chargées en colorants*" – Tribune de l'eau Vol. 60, n°642, pp 31-43.
- LAMRANI S., BEN ALLAL L., AMMARI M. et AZMANI A. (2013) : "*Amélioration des propriétés du béton par incorporation de deux cendres volantes*" (*Improving the properties of concrete by incorporation of two fly ashes*) – J. Mater. Environ. Sci. 5 (2), pp 450 – 455 ; ISSN : 2028-2508.
- MAZOUAK A., SHARROCK P., GUENDOZ F., MORARECH M. et AZMANI A. (2001) : "*Cendres volantes issues de l'incinération de déchets solides d'une papeterie : Caractérisation, lixiviation et valorisation*" – Revue DECHETS (*revue francophone d'écologie industrielle*) n° 22 (2^{ème} trimestre 2001), pp 12-16.
- OFRIR (2013) : Base d'information française.
- PREDIS Nord-Pas-de-Calais (2002) : "*Guides Techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels*".
- RADIOACTIVITE NATURELLE TECHNOLOGIQUEMENT RENFORCEE (2009) : "*Les cendres de charbon et les phosphogypses*" – Robin des bois/ Autorité de Sécurité Nucléaire - Rapport de Janvier 2009.
- RECORD (2016) : "*Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse – Revue des gisements et des procédés associés*" – Etude n° 14-0913/1A.
- 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*". CRR : CR 21/84.
- THIJS M. (1990) : "*Chantier pilote en cendres volantes provenant de la combustion du charbon broyé sur la N1 à Vilvorde*" – CRR : CR 31/90.
- WANG D. (2011) : "*Solidification et valorisation de sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers*" – Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Douai et de l'Université Lille 1.
- WIKIPEDIA