

Lerm Infos n° 26 : Les cendres volantes



LERM INFOS

Editorial

Janvier 2014

Chers Amis,

Si nous vous parlons de cendres volantes, vous voyez immédiatement un feu de bois qui crépite, au point d'envoyer parfois, avec les flammes et la fumée, quelques cendres vers le ciel nocturne.

Mais... ce n'est nullement de cela dont il ici est question, mais des cendres issues de la combustion du charbon pulvérisé pour la production d'électricité dans les centrales thermiques. En 2012, leur production par EDF est de l'ordre de 1 000 000 de tonnes, qui gère un stock préexistant de 6 millions de tonnes accumulées en terrils. Nous sommes loin de notre feu de camp !

Ces cendres, qui sont un déchet, ont une qualité : elles présentent des propriétés pouzzolaniques leur permettant d'entrer utilement dans la composition du ciment... au point que leur contribution à la durabilité des grands ouvrages de génie civil est aujourd'hui recherchée et reconnue.

En vous initiant à la découverte de ces produits, nous vous invitons donc à suivre le parcours d'un déchet dont les chercheurs ont su faire un matériau : ajoutées au ciment, les cendres volantes, non seulement améliorent certaines de ses propriétés, mais encore limitent les émissions de CO₂ que génère sa production.

Les cendres volantes représentent ainsi un bel exemple réussi de réemploi de sous-produits de l'industrie. Il y en a d'autres... et d'autres encore à explorer et à mettre au point... pour que les étoiles, au dessus de nos feux de camps, continuent d'être visibles.

Nous vous envoyons, au nom du Lerm, nos vœux les meilleurs pour cette nouvelle année 2014...

Bernard Quénée, Directeur général délégué
Philippe Souchu, Rédacteur en chef

Dossiers techniques



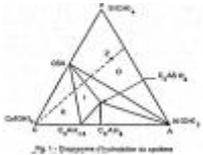
Volcans, cendres volcaniques et pouzzolanes

Les cendres volcaniques intéressent particulièrement tous ceux qui travaillent sur liants hydrauliques, car si les cendres du Vésuve ont détruit Herculanium et Pompéi lors de l'éruption de 79 apr J.-C., éruption dont Pline Le Jeune nous laissa un important témoignage, elles permirent également l'extraordinaire durabilité d'un très grand nombre d'édifices romains...



Pouzzolanité, activité pouzzolanique et hydraulité

Un matériau est donc dit pouzzolanique si, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux pour former un liant...



Produits de la réaction pouzzolanique

Diagramme d'hydratation du système CaO-Al₂O₃-H₂O en l'absence de gypse...



Qu'est-ce qu'une cendre volante ?

Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques.



Les cendres volantes selon la norme NF EN 450-1

Cette norme définit les exigences relatives aux propriétés chimiques et physiques ainsi qu'aux modes opératoires de contrôles pour la qualité des cendres volantes siliceuses...



Historique rapide des recherches sur les cendres volantes

La première recherche publiée dans la perspective d'ajouter des cendres de charbon pulvérisé au ciment en tant que pouzzolane remonte à 1914 avec l'article « *An investigation of the pozzolanic nature in Coal Ash* »...



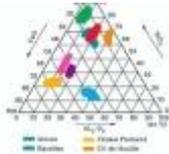
L'utilisation des cendres volantes dans le béton

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs...



Valorisation des cendres en technique routière

Cendres de foyer, cendres volantes sèches ou humides, tous les types de cendres peuvent être utilisés en techniques routières. La valorisation des cendres de charbon en matériaux de technique routière est encadrée par le « Guide d'application : Applicabilité de matériaux alternatifs en technique routière »...



Et les cendres sulfo-calciques ?...

Ces cendres ont des propriétés distinctes des cendres sulfo-alumineuses et leurs voies de valorisation sont donc spécifiques...



Un point d'histoire : sur l'usage que fait Francois Coignet de la cendre de houille

Pour ce qui concerne l'usage des cendres de houille dans les liants hydrauliques, Coignet n'est donc pas un pionnier et, de plus il ne s'y intéresse que pour des raisons qui ne sont pas les nôtres aujourd'hui...



Entretien avec Jean-Paul Jacquot, responsable de l'Environnement au sein de la Division Production Ingénierie Thermique d'EDF

Notre but, chez EDF, n'est pas de produire des cendres, mais de produire de l'électricité. Les cendres volantes, issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, sont donc un sous-produit de cette production...

Portrait



Portrait de Nouredine Rafai, Expert matériaux au Lerm

"Je ne ressens aucun hiatus entre la recherche et le travail... si bien que je me demande si j'ai un jour fini mes études ou bien si j'ai un jour commencé à travailler..."

Agenda



Le lerm propose un parcours de formation : « Les liants hydrauliques : fondamentaux »

Les 23 et 24 janvier 2014, quelques places sont encore disponibles... D'autres formations, complémentaires feront suite. Voir toutes les informations sur ce sujet

REMERCIEMENTS

LERM-Infos



Directeur de la publication : [Bernard Quénée](#)

Rédacteur en chef : [Philippe Souchu](#)

Avec la participation de Jean-Paul Jacquot (EDF), Arnaud Hourdin (Société Lafarge-SPI), Nouredine Rafai expert matériaux au lerm.

Communication : [Alexandre Mazzocco](#)

Volcans, cendres volcaniques et pouzzolanes



Nous nous souvenons tous de ce volcan dont nous ne pouvons pourtant prononcer le nom : le 20 mars 2010 commençait l'éruption volcanique de l'Eyjafjöll en Islande. Après une phase éruptive avec coulées de lave qui provoquent de violentes inondations du fait de la fonte subite de la glace de la calotte qui recouvre le volcan, un important panache volcanique se forme, constitué de vapeur d'eau, de gaz et de cendres.

On estime que, lors des 3 premiers jours de l'éruption, 200 millions de tonnes de cendres ont été projetées dans l'atmosphère.

Le panache est si important et si disséminé par les vents dans l'atmosphère en direction de l'Europe, que le trafic aérien est perturbé et parfois arrêté pendant plusieurs semaines.



On estime que, lors des 3 premiers jours de l'éruption, 200 millions de tonnes de cendres ont été projetées dans l'atmosphère.

Ces cendres volcaniques intéressent particulièrement tous ceux qui travaillent sur liants hydrauliques, car si les cendres du Vésuve ont détruit Herculaneum et Pompéi lors de l'éruption de 79 apr J.-C., éruption dont Pline Le Jeune nous laissa un important témoignage, elles permirent également l'extraordinaire durabilité d'un très grand nombre d'édifices romains.

Il y a fort longtemps en effet que l'homme a compris que les cendres ou le tuf volcanique, mélangés à la chaux, présentent des propriétés liantes et hydrauliques, c'est-à-dire résistantes à l'eau. On trouve ainsi des mortiers hydrauliques dans tout le pourtour méditerranéen, dont certains datent de 2000 à 1500 ans av. J.-C. Nombreux sont ceux qui contiennent de la terre dite de Santorin ou des tuileaux, démontrant ainsi la maîtrise des Grecs de la technique du mortier pouzzolanique, technique que les Romains adoptèrent ensuite à grande échelle.

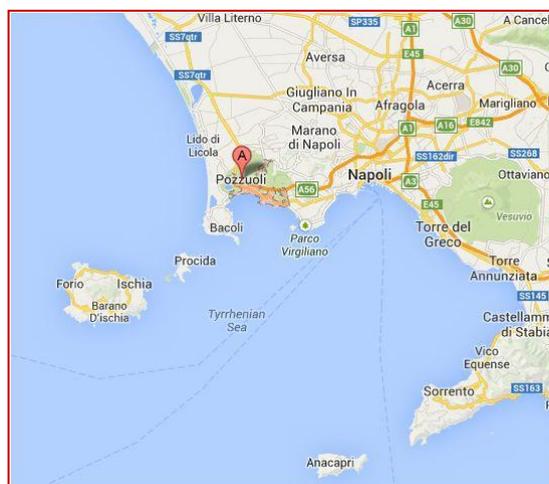


Le Panthéon de Rome, dont la coupole a été bâtie, au 1er siècle av. J.-C.; avec un mortier aux pouzzolanes.

La pouzzolane est ainsi décrite par Vitruve (1er siècle av. J.-C.) dans *De architectura* (Livre II, Chapitre 6, De la Pouzzolane & comment il faut s'en servir) :

« Il existe une espèce de poudre à laquelle la nature a donné une propriété admirable. Elle se trouve au pays de Baïes et dans les terres des municipes qui entourent le mont Vésuve. Mêlée avec la chaux et le moellon, non seulement elle donne de la solidité aux édifices ordinaires, mais encore les môles qu'elle sert à construire dans la mer acquièrent sous l'eau une grande consistance. Voici comment j'en explique la cause. Sous ces montagnes et dans tout ce territoire, il y a un grand nombre de fontaines bouillantes ; elles n'existeraient pas s'il ne se trouvait au fond de la terre de grands feux produits par des masses de soufre, ou d'alun, ou de bitume en incandescence. La vapeur qui s'exhale de ces profonds réservoirs de feu et de flamme, se répandant brûlante par les veines de la terre, la rend légère, et le tuf qui en est produit est aride et spongieux. Ainsi, lorsque ces trois choses que produit de la même manière la violence du feu, viennent par le moyen de l'eau à se mêler et à ne plus faire qu'un seul corps, elles se durcissent promptement ; et prennent une solidité telle, que ni les flots de la mer ni la poussée des eaux ne peuvent les désunir ».

Les romains se servaient donc d'un tuf zéolithique qu'ils récoltaient à Pouzzoles, non loin du Vésuve. C'est de ce lieu que vient le nom de pouzzolane qui, par extension, a été donné aux autres matériaux de ce type, d'abord naturels, puis, quels qu'ils soient, pourvu que, mélangés à la chaux, ils donnent un produit liant du fait de leur pouzzolanité.



[Retour au Sommaire](#)

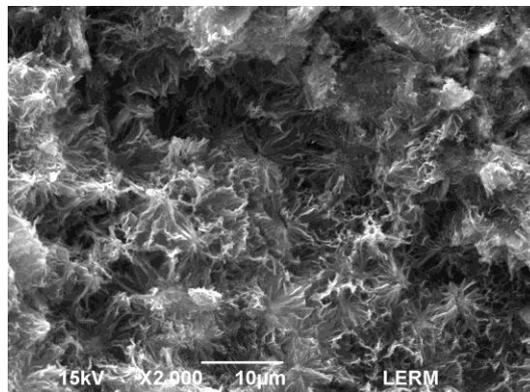
Pouzzolanité, activité pouzzolanique et hydraulité

La norme américaine ASTM C125-07 donne la définition suivante d'une pouzzolane naturelle : « *Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.* »

Un matériau est donc dit pouzzolanique si, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux pour former un liant.

Puisque c'est le caractère pouzzolanique d'un matériau qui en fait une pouzzolane (soit naturelle, soit artificielle (6)), sont donc finalement rangés sous cette dénomination des matériaux qui n'ont aucune parenté géologique entre eux. La clé des pouzzolanes est donc la pouzzolanité et c'est cette propriété que nous nous proposons d'examiner dans cet article, non sans la mettre immédiatement en rapport avec l'hydraulité qui caractérise la prise du ciment Portland.

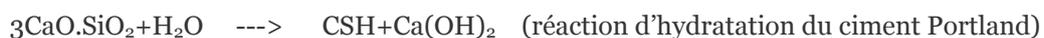
Réaction pouzzolanique



Gel de C-S-H

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) (C_3A , SiO_2), composé principal du ciment Portland.

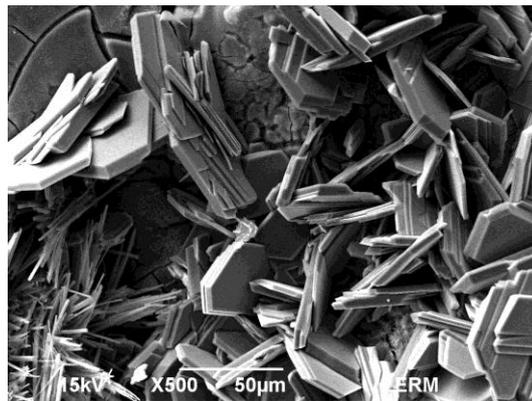
Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit :



On constate donc que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium ou Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, contrairement à l'hydratation du clinker qui en libère.

R. Dron (1) remarque que l'écriture simplifiée de la réaction pouzzolanique pourrait faire penser que des formes à haute cristallinité, le quartz, par exemple, seraient susceptibles de réagir avec la chaux. Ce n'est pas le cas.

Massazza (2) a montré que la réaction pouzzolanique ne se produit que lorsque la silice et l'alumine sont constitutives de phases vitreuses ou amorphes, à la seule exception des zéolites qui sont des minéraux cristallisés.



Portlandite

Produits de la réaction pouzzolanique

G. Malquori, dès 1960 (3) avait compilé les résultats de nombreuses études menées sur les produits de la réaction. Il recensait :

Silicate de calcium hydraté (CSH)

Aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13})

Et, sous certaines conditions :

Gehlenite hydratée (C_2ASH_8)

Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)

Ainsi que le monosulfo-aluminate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)

Roger Dron (1) résume, au moyen d'un [diagramme du système \$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}\$](#) , les aires de répartitions des produits de la réaction pouzzolanique.

Essais de pouzzolanicité...

Compte tenu du fait que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium, les méthodes chimiques généralement utilisées pour évaluer l'activité pouzzolanique d'un matériau consistent à déterminer la quantité de chaux fixée par ce matériau après un certain temps, ou à déterminer le taux de silice ou d'alumine (actives) solubilisées par un traitement approprié.

De manière générale, les paramètres influençant les réactions pouzzolaniques (4) sont la nature des phases actives et leurs proportions :

- la teneur en SiO₂,
- le rapport chaux/pouzzolane dans le mélange,
- la durée de cure,
- la finesse de la pouzzolane,
- le rapport E/C du mélange,
- la température.

... et optimisation de la pouzzolanicité

De nombreuses études ont été effectuées pour chercher à optimiser l'activation des pouzzolanes naturelles par différentes méthodes:

- la calcination,
- le traitement à l'acide,
- l'addition d'alcalins dans le ciment contenant de la pouzzolane,
- l'augmentation de la température de cure (préfabrication),
- le broyage prolongé.

Ces deux dernières solutions sont les moins coûteuses.

D'autres études (5) ont montré que l'utilisation d'activateurs chimiques (CaCl₂, NaCl, Na₂SO₄) au sein d'un mélange pouzzolane - chaux permet améliorerait la cinétique des réactions pouzzolaniques

Notes

¹ L'activité pouzzolanique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69

2 Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, in *6th International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, September 1974*

3 Malquori G., *Portland-Pozzolan Cement*, International Symposium on the Chemistry of Cement, 4, Washington, D.C, *Paper VIII-3*, 2, p983-1006, 1960

4 Shi C., *An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans*, Canadian journal of civil engineering, vol. 28(5), p778-786, 2001

5 Shi C., Day RL., *Pozzolan reaction in the presence of chemical activators. Part I. Reaction Kinetics*, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp. 51-58, 1999.

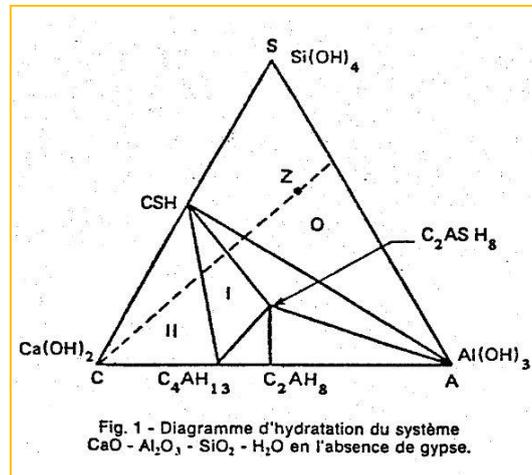
6 Dans sa thèse sur l' *Estimation de l'activité pouzzolanique, recherche d'un essai* (1975), Raymond Largent écrit que la distinction entre pouzzolane naturelle et pouzzolane artificielle n'est pas nette, les secondes étant des pouzzolanes qui ne manifestent leur comportement pouzzolanique qu'après un traitement thermique.

Il reprend ce qu'avancait d'emblée Vicat (songeant à l'argile calcinée) dès 1818 dans *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires* : « Nous comprenons sous ce nom de pouzzolane non seulement les produits volcaniques de l'Italie et de la France, mais aussi toutes les substances analogues que l'on modifie par le feu des fourneaux, et auxquelles on parvient à donner, à très peu près, les qualités de pouzzolanes naturelles ».

[Retour au Sommaire](#)

Produits de la réaction pouzzolanique

Diagramme d'hydratation du système $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ en l'absence de gypse
R. Dron (1)



En l'absence de sulfates, la composition d'une pouzzolane ramenée au total $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{AlO}_3$ est figurée par le point Z.

La composition du mélange pouzzolane + chaux se situe donc sur la droite ZC.

Les produits d'hydratation ont la même composition globale que le mélange chaux-pouzzolane dont ils procèdent. Cette composition est donc représentée par le même point.

Les phases présentes sont celles qui correspondent aux sommets du domaine triangulaire dans lequel se place le point représentatif de la composition. Par conséquent, si l'addition de chaux est forte, le point sera dans le domaine II.

On trouvera de la chaux éteinte (correspondant à un excès) et deux phases néoformées, le silicate de calcium hydraté (CSH) et l'aluminate tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}).

Si l'addition est plus faible, le point sera dans le domaine I.

Lorsque le système est en équilibre, il n'y a plus de chaux et on trouve trois phases néoformées : les deux précédentes et la gelhénite hydratée (C_2ASH_8).

Notes

1 L'activité pouzzolanique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69

[Retour au Sommaire](#)

Qu'est-ce qu'une cendre volante ?



Provenance des cendres volantes

Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques.

Pour réduire la pollution atmosphérique, les cheminées de ces centrales sont équipées de dépoussiéreurs qui captent les cendres pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère.

Sur la question de la production des cendres volantes, [voir aussi notre entretien avec Jean-Paul Jacquot.](#)

Ces cendres volantes sont classées en trois catégories selon le combustible dont elles proviennent :

Charbon de houille	cendres silico-alumineuses
Lignite	cendres calciques

Dans les années 1990, en France, le stock de cendres volantes accumulées en terril s'élevait environ à 20 M de tonnes. On en produit environ 400 M de tonnes par an dans le monde.

Production des cendres volantes

Pour brûler dans une chaudière, le charbon est traité : mélange, pulvérisation, et lavage pour éliminer autant de matière minérale incombustible que possible. Tout en accroissant le pouvoir calorifique du charbon, cela réduit la quantité de cendres produites lors de la combustion.

Les fumées de combustion du charbon pulvérisé passent par des dépoussiéreurs électrostatiques qui, complétés par des filtres à manche, parviennent à un rendement de 80 à 90 % de dépoussiérage.

Le temps nécessaire au processus de combustion du charbon, à la fusion, au transport des gaz vers les filtres et à la resolidification des particules est de l'ordre de quelques secondes.

Le stockage des cendres volantes

Les cendres peuvent être stockées de trois façons :

Cendres sèches

Captées à la base des cheminées, les cendres sont totalement exemptes d'eau. Ces cendres sèches demandent un mode de transport spécifique aux produits pulvérulents secs et elle sont stockées à l'abri de l'eau.

Cendres humidifiées

Une fois humidifiées, le transport des cendres par camion ou wagon devient possible. Ces cendres peuvent être stockées en plein air.

Cendres liquéfiées

Ces cendres sont acheminées par voie hydraulique dans des bassins de décantation. Certaines se drainent peu et peuvent présenter après décantation, des teneurs en eau supérieures à 50 %.

Les deux derniers modes de stockage ne sont pas adaptés aux cendres calciques qui présentent un pouvoir hydraulique. Pour les cendres siliceuses stockées en plein air, il existe des installations spécifiques de séchage, qui permettent de fournir des cendres sèches à la demande.

Les cendres volantes sont un déchet

Dans la liste des déchets de la communauté européenne (Décret no 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets), les cendres volantes sont un **Résidu de Procédé Thermique** (RPT) qui porte le numéro de code 10 01 02 (lorsqu'il provient d'une centrale thermique à charbon pulvérisé) et 10 01 19 (lorsqu'il provient de centrales à Lit Fluidisé Circulant).

Elles ne sont pas classées déchet industriel spécial, et ne sont pas non plus considérées comme un déchet dangereux (Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets du ministère de l'environnement).

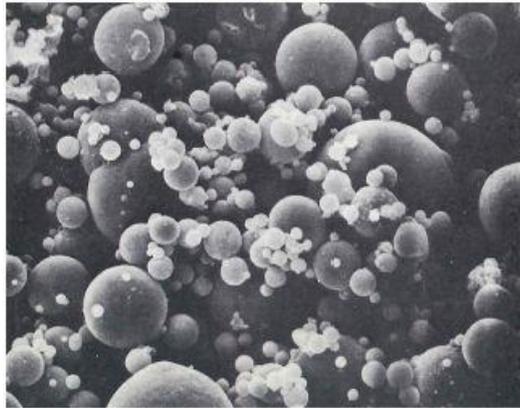
Les cendres volantes, en tant que matériau de construction, sont un produit normalisé

[Voir notre article sur ce sujet...](#)

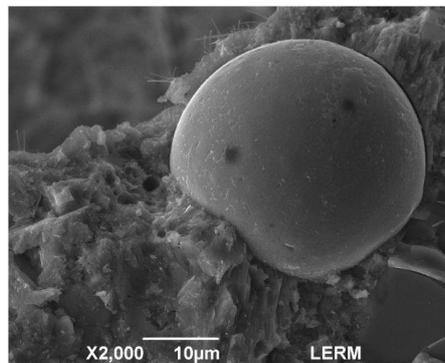
Caractéristiques des cendres volantes

Les cendres volantes de houille se présentent sous la forme d'une poudre fine et douce au toucher. Au microscope électronique, elles apparaissent sous la forme de sphères isolées ou accolées.

La dimension des grains de cette poudre va de 0,1 à 200 microns.



Cendres silico-alumineuse au MEB (LERM)



La finesse d'une cendre influe directement sur la vitesse de développement des résistances mécaniques. Il s'agit donc de l'un des paramètres principaux pour la définition de l'aptitude d'une cendre à être additionnée au ciment. La finesse d'une cendre est comprise entre 2200 et 4000 cm^2/g .

Minéralogie

Minéralogiquement parlant, les cendres volantes sont constituées d'alumino-silicates vitrifiés incluant des proportions moindres de calcium, fer, magnésium, potassium, sodium et titane, associées à des phases de quartz, mullite (silicate d'aluminium) et magnétite.

La composition chimique des cendres volantes silico alumineuses

Cette composition est proche de celle des pouzzolanes naturelles ; elle varie en fonction de l'origine des charbons et se situe dans la fourchette indiquée dans le tableau ci-dessous :

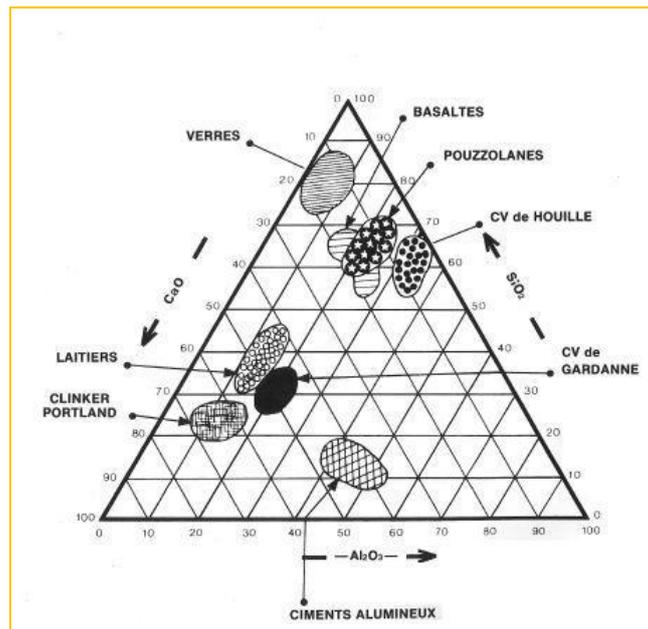
	% Minimum	% Maximum
SiO_2	43	54
Al_2O_3	22	32

Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	4	15
CaO	1	8
MgO	1	3
K ₂ O	2	5
Na ₂ O	0,5	2
SO ₃	0,5	2

Les cendres volantes siliceuses sont essentiellement constituées de dioxyde de silice et d'oxyde d'aluminium. Elles présentent des propriétés pouzzolaniques.

Les cendres volantes calciques sont essentiellement constituées d'oxyde de calcium de dioxyde de silice et d'oxyde d'aluminium. Elles présentent des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques.

Les cendres volantes contiennent en outre des imbrûlés, provenant de l'incomplète combustion du charbon dont la proportion n'excède pas 5%.



Compositions chimiques comparées des pouzzolanes
in Les Cendres volantes, 1975

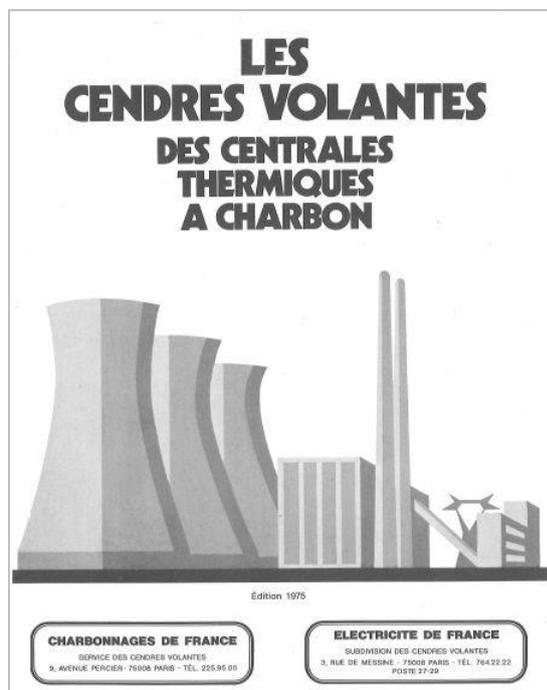
Pouzzolanicité des cendres volantes

La phase réactive des cendres volantes est leur enveloppe vitreuse riche en silice. La vitrification de cette enveloppe est due à leur refroidissement rapide au contact de l'air à la sortie des chaudières. Le cœur des cendres est le plus souvent cristallisé.

Afin d'augmenter la surface vitreuse de l'enveloppe et donc la pouzzolanicité des cendres, des recherches ont été menées sur un traitement thermique des cendres constitué d'un cycle de fusion/trempe violente.

[Retour au Sommaire](#)

Les cendres volantes selon la norme NF EN 450-1



Les cendres volantes sont définies et spécifiées par la norme NF EN 450-1 d'octobre 2012 : *"Cendres volantes pour béton Partie 1 : Définition, spécifications et critères de conformité"*.

Cette norme définit les exigences relatives aux propriétés chimiques et physiques ainsi qu'aux modes opératoires de contrôles pour la qualité des cendres volantes siliceuses.

Pour cette norme, une cendre volante est une poudre fine constituée de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion de charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques. Leur composition est essentiellement SiO_2 et Al_2O_3 , elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées de centrales électriques, pouvant être

préparées, par exemple, par classification, sélection, tamisage, séchage, mélange, broyage ou réduction par le carbone, ou par combinaison de ces procédés, dans des sites de production adéquats. Un assemblage de cendres d'origines différentes est possible, chacune se conformant à la définition fournie dans ce paragraphe.

La norme précise que les cendres volantes provenant de l'incinération d'ordures ménagères et de déchets industriels ne se conforment pas à la définition donnée par cette norme.

Du point de vue de la norme, les cendres volantes sont une addition au béton de type II, c'est-à-dire un matériau finement divisé à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent qui peut être incorporé au béton afin d'en améliorer certaines propriétés ou pour obtenir des propriétés spéciales.

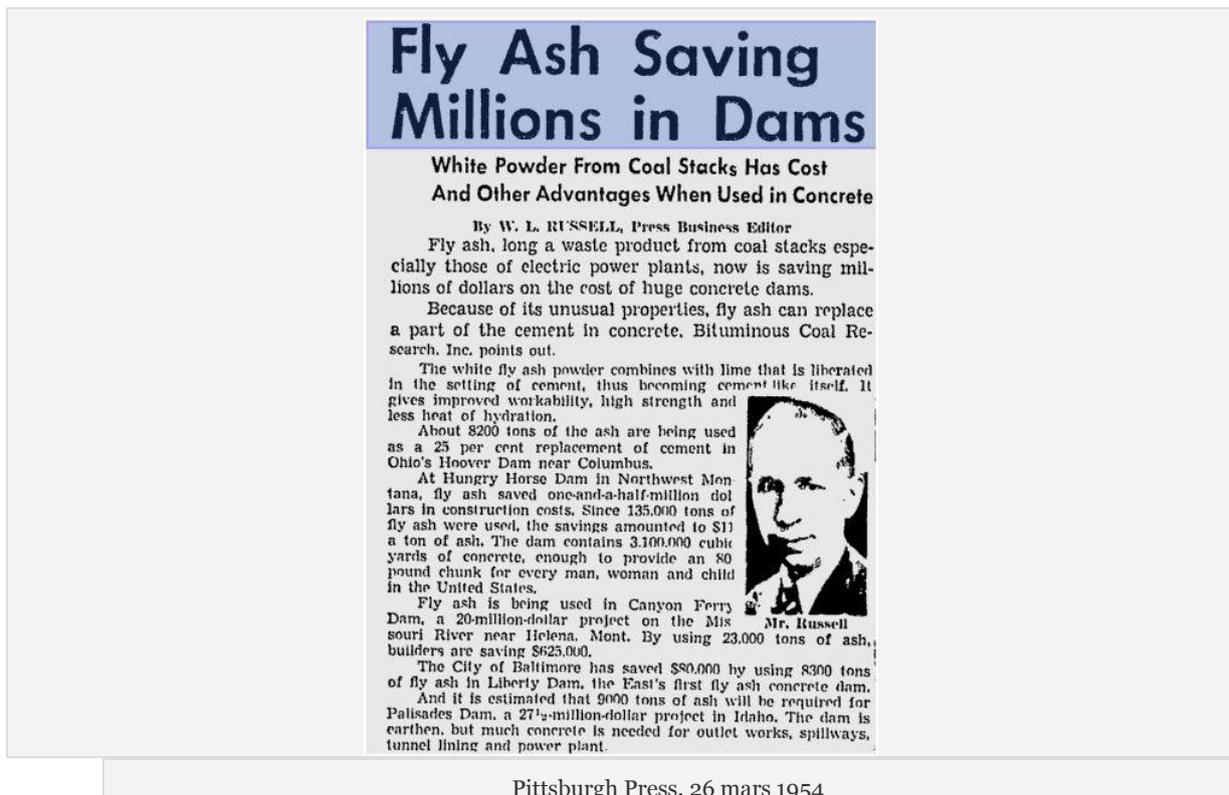
C'est la norme NF EN 450 d'octobre 2005, *"Cendres volantes pour béton Partie 2 : Evaluation de la conformité"*, qui spécifie le système d'évaluation de la conformité des cendres volantes. Cette norme est accompagnée du fascicule de documentation FD CEN/TR 15840, qui date de février 2009.

[Retour au Sommaire](#)

Historique rapide des recherches sur les cendres volantes

La première recherche publiée dans la perspective d'ajouter des cendres de charbon pulvérisé au ciment en tant que pouzzolane remonte à 1914 avec l'article « *An investigation of the pozzolanic nature in Coal Ash* ».

L'appellation de cendre volante apparaît quant à elle en 1937 dans l'article de R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly, H. E. Davis : « *Properties of cements and concrete containing fly ash* ».



Fly Ash Saving Millions in Dams

White Powder From Coal Stacks Has Cost And Other Advantages When Used in Concrete

By W. L. RUSSELL, Press Business Editor

Fly ash, long a waste product from coal stacks especially those of electric power plants, now is saving millions of dollars on the cost of huge concrete dams.

Because of its unusual properties, fly ash can replace a part of the cement in concrete. Bituminous Coal Research, Inc. points out.

The white fly ash powder combines with lime that is liberated in the setting of cement, thus becoming cement like itself. It gives improved workability, high strength and less heat of hydration.

About 8200 tons of the ash are being used as a 25 per cent replacement of cement in Ohio's Hoover Dam near Columbus.

At Hungry Horse Dam in Northwest Montana, fly ash saved one-and-a-half-million dollars in construction costs. Since 135,000 tons of fly ash were used, the savings amounted to \$11 a ton of ash. The dam contains 3,100,000 cubic yards of concrete, enough to provide an 80 pound chunk for every man, woman and child in the United States.

Fly ash is being used in Canyon Ferry Dam, a 20-million-dollar project on the Missouri River near Helena, Mont. By using 23,000 tons of ash, builders are saving \$625,000.

The City of Baltimore has saved \$80,000 by using 8300 tons of fly ash in Liberty Dam, the East's first fly ash concrete dam.

And it is estimated that 9000 tons of ash will be required for Palisades Dam, a 27½-million-dollar project in Idaho. The dam is earthen, but much concrete is needed for outlet works, spillways, tunnel lining and power plant.

Mr. Russell

Pittsburgh Press, 26 mars 1954

C'est alors aux USA que se développe la recherche sur la qualité des cendres volantes sur leur utilisation dans les

bétons de masse, notamment dans les grands barrages comme celui de Hungry Horse Dam, dont la construction démarre en 1948.

En 1949, l'ASTM fait paraître dans la Publication Technique n° 99 le recensement de l'état de la pratique dans ce domaine avec l'article de H. S. Meissner « *Pozzolans used in Mass Concretes* ».

La première norme ASTM sur les cendres volantes paraît en 1954 : « *Tentative specification for fly ash for use as an admixture in Portland cement concrete* ».

En France, à partir de 1950, la démonstration de l'intérêt des cendres volantes pour le remplacement d'une partie du clinker et l'organisation de leur valorisation, sont menées avec ténacité par Alfred Jarrige, ingénieur aux Houillères du Nord et du Pas-de Calais. (*Les cendres volantes et leurs possibilités d'utilisation*, Annales des Mines, Article en 2 parties, n° d'octobre et de novembre 1957).

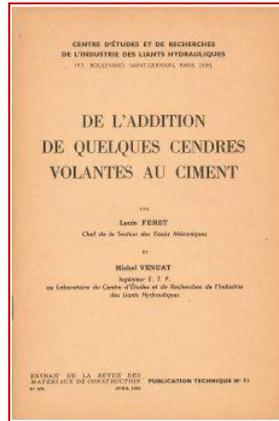


Adolphe Jarrige à Polytechnique

C'est à cette époque, en 1951, que Fouilloux brevète un ciment qu'il nomme pouzzolano-métallurgique. On l'obtient par co-broyage d'environ 50% de clinker Portland et 50% d'un mélange de laitier et de cendres volantes.

En 1954 débutent en France les études du CERILH et du Laboratoire de minéralogie de l'Université de Toulouse, sur les cendres volantes ; elles sont menées sous les responsabilités du Centre de recherches des Charbonnages de France.

En 1955, le CERILH publie une étude positive concernant des échantillons de cendres volantes provenant des Houillères du Nord et du Pas-de Calais. Louis Ferret, Michel Vénuat : "De l'addition de quelques cendres volantes au ciment, Publication technique n° 71, 1955".



Elle sera suivie, en 1957, d'une *Etude des propriétés du ciment aux cendres volantes* : Michel Vénuat, CERILH, publication technique n° 93, 1957, qui apporte des conclusions sur la pouzzolanité des cendres, sur l'importance du broyage et de la chaleur, sur l'absence d'influence sur le retrait et sur la chaleur d'hydratation.

En 1964, la norme NF P 15-302 consacre l'existence de ciments aux cendres.

En 1968, l'usage des cendres volantes est répandu au point que, lors du 5^e Congrès sur la chimie des ciments qui se tient à Tokyo, Mastane Kokubu présente un article principal sur les cendres volantes et les ciments aux cendres volantes.

Au Canada, le Centre canadien pour la technologie des ressources énergétiques et minérales a joué un grand rôle dans les recherches sur les ajouts pouzzolaniques depuis le milieu des années 50. Associé à l'American Concrete Institute, il a organisé en 1986, à 2007 des colloques internationaux sur ce sujet.

Voir aussi notre bref article :

[Un point d'histoire sur l'usage que fait François Coignet de la cendre de houille](#)

[Retour au Sommaire](#)

L'utilisation des cendres volantes dans le béton

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs :

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts
- Réduire la chaleur d'hydratation
- Améliorer la maniabilité du béton
- Améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme
- Améliorer la durabilité

Deux voies sont employées pour les incorporer au béton :

- Utiliser un mélange de ciment aux cendres volantes
- Utiliser les cendres en tant que composant supplémentaire du béton, c'est à dire en tant qu'additions de type II, au sens de la norme NF EN 206-1.

Dans le cas de l'usage de la première voie, le mélange de ciment doit alors, en France, respecter la norme NF P 15-301 de juin 1994 : Ciment courants : Composition , spécifications et critères de conformité :

La norme NF P 15-301 de juin 1994 précise que si la proportion de cendres volantes est supérieure à 5% en masse du mélange, seules les cendres, répondant aux spécifications de cette même norme sont utilisables. Elle distingue les cendres volantes siliceuses (V) et les cendres volantes calciques (W) et, pour les premières, elle précise le seuil de teneur maximale en chaux réactive (moins de 5 %) et la teneur minimale en silice (25%).

Selon la norme NF EN 197-1 d'avril 2012, si un ciment contient de 6 à 20 % en masse de cendres volantes siliceuses (V), il est alors désigné comme ciment Portland composé (CEM II/A-V). S'il contient de 21 à 35% en masse de cendres volantes calciques (W), il est alors désigné comme ciment Portland composé (CEM II/B-V).

Effets des cendres volantes sur le béton

Maniabilité et rhéologie

En raison de leur sphéricité et de leur très petite dimension, les cendres volantes influent sur la rhéologie des pâtes de ciment. L'ajout de cendres réduit le besoin en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité équivalente pour un ciment sans cendres volantes : les cendres peuvent donc jouer un rôle de plastifiant.

Retard de prise

Les cendres volantes retardent la prise du ciment, ce qui peut être un avantage par temps chaud. Leur ajout peut donc nécessiter l'emploi d'un accélérateur. Notons que seul le début de la prise est retardé ; à partir du début de la prise, la période d'atteinte du durcissement final n'est pas modifiée.

Température d'hydratation

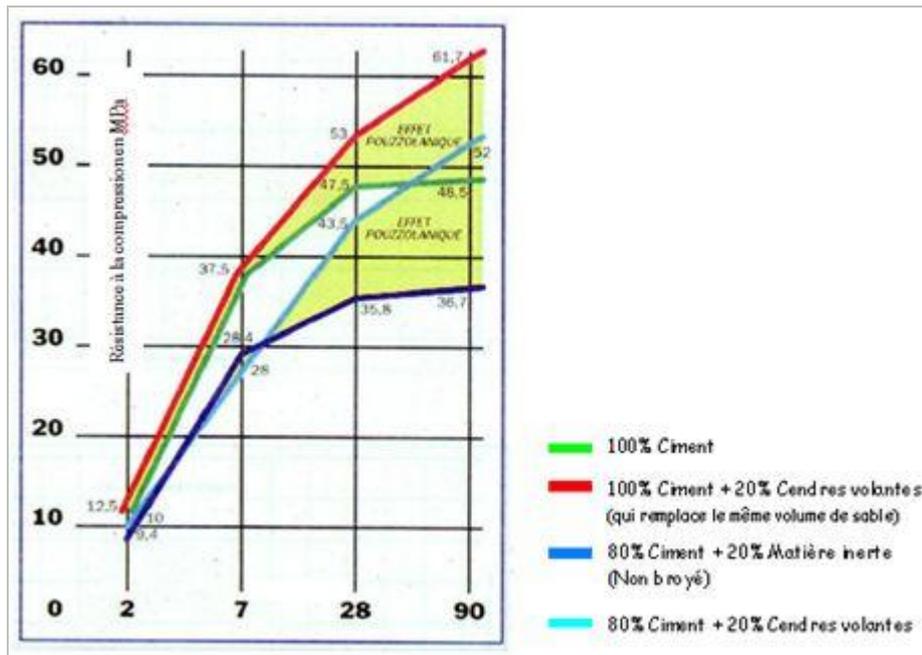
L'hydratation de la pâte de ciment s'accompagne d'une élévation de la température. Retardant et ralentissant l'hydratation du ciment, les cendres volantes ont une influence bénéfique sur l'évolution de la chaleur d'hydratation. Elles sont donc précieuses dans les bétons de masse : réduisant l'exothermie des réactions d'hydratation, elles permettent d'éviter la fissuration par retrait thermique des ouvrages massifs.

Complément du fuseau granulaire

Compte tenu de leur finesse et de leur sphéricité, les cendres peuvent être utilisées pour corriger les sables dépourvus d'éléments fins. Contribuant alors à la compacité des mortiers, elles contribuent ainsi également à leur durabilité.

Résistance mécanique et durabilité

[Du fait de leur activité pouzzolanique consommant la portlandite](#), les cendres augmentent les résistances mécaniques à long terme des bétons, améliorant de fait leurs résistances aux attaques chimiques et donc leur durabilité. Ces deux avantages proviennent également de la compacité que fournit au béton leur ajout (effet filler).



Effet pouzzolanique des cendres incorporées dans le béton ou dans le ciment (1)

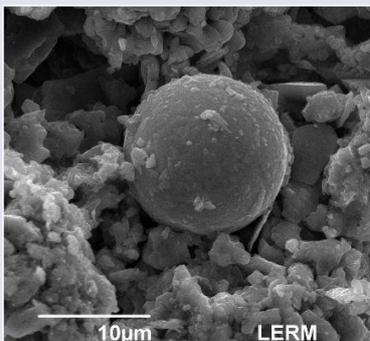
L'hydratation des ciments aux cendres volantes

Dans le cas des cendres silico-alumineuses, le délai de déclenchement de la réaction pouzzolanique (certains auteurs parlent d'une période de latence) peut s'expliquer par le fait que la silice amorphe des cendres n'est attaquée qu'à partir du moment où le pH du liquide interstitiel du béton atteint au moins 13,2. Or, l'alcalinité du liquide interstitiel ne croît qu'avec l'hydratation d'une partie du ciment Portland du béton. Pendant cette période la réaction est encore retardée du fait que les produits d'hydratation du ciment Portland viennent se fixer sur les cendres qui jouent alors le rôle de nucleus de germination ; la gangue ainsi formée retarde l'attaque de la silice amorphe.

Ensuite, la précipitation des CSH, issus de la mise en solution de la silice amorphe par l'attaque de la chaux libérée par l'hydratation du ciment, viendra réduire la porosité de la matrice cimentaire et participer ainsi à sa compacité et à son imperméabilité.

L'hydratation des cendres volantes est donc lente mais à long terme, le béton aux cendres atteint des performances élevées, tant au regard des résistances mécaniques que des propriétés de transfert.

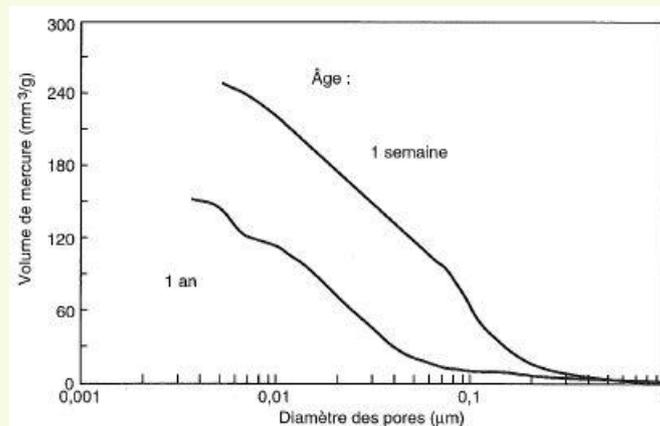
Ainsi, sur le Pont Vasco de Gama construit sur le Tage à Lisbonne, les bétons dosés à 430 k/m³ d'un ciment contenant 22% de cendres silico-alumineuses atteignent à 28 jours des coefficients de diffusion proches de 10⁻¹³m².s⁻¹ et une perméabilité à l'oxygène inférieure à 10⁻¹⁸m². Les auteurs précisent qu'à cette échéance, l'action pouzzolanique des cendres volantes est faible (2).



Résistance des bétons de cendres aux milieux chimiquement agressifs

C'est la structure de pores de la matrice cimentaire qui détermine sa porosité et sa perméabilité et donc sa sensibilité aux processus de transport et de diffusion. La perméabilité du béton est une fonction du rapport eau/ciment. Le remplacement du ciment par des cendres volantes fait croître ce rapport eau/ciment. Pour cette raison la structure poreuse initiale d'un ciment aux cendres est initialement plus ouverte que celle d'un béton classique de référence, ce qui se traduit par de moindres performances mécaniques aux jeunes âges.

Lorsque les cendres volantes, entre 7 et 28 jours, initient leur activité pouzzolanique, la porosité de la matrice commence à décroître. Compte tenu du délai de réaction des cendres, c'est avec le temps que le béton aux cendres deviendra plus imperméable qu'un béton classique.



Changement de la distribution de la dimension des pores (porosimétrie mercure) d'une pâte de ciment contenant 30% de cendres volantes silico-alumineuses de classe F (3)

L'ajout de cendres volantes réduit le coefficient de diffusion des ions chlorures non seulement par une diminution, à terme, de la porosité de la matrice cimentaire, mais également du fait de l'amélioration de la capacité de liaison des ions chlorures par la matrice, ceci pour plusieurs raisons :

- Liaison chimique : l'élévation de la teneur en alumine qu'implique l'ajout de cendres améliore la capacité de liaison des ions chlorures par la formation de chloroaluminates,
- Liaison physique : l'enrichissement en C-S-H qu'implique la réaction pouzzolanique augmente d'autant les capacités d'adsorption des ions chlorure à la surface du gel de C-S-H.

Notes

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

(2) [Overview of a two decades durability follow-up for two major bridges](#): Vasco de Gama (Portugal) and Rion-Antirion (Greece) : in FIB International Congress – 2012, Ammouche, Abdelkrim ; Carde, Christophe ; Rafai, Nourredine ; Linger, Lionel. - 2012. - 8 p.

(3) The reaction of fly ash in concrete, a critical examination. Fraay, Bijen, de Haan. Cement and Concrete Research, 19, n° 2, 1990

[Retour au Sommaire](#)

Valorisation des cendres en technique routière

Généralités et conditions d'emploi

Cendres de foyer, cendres volantes sèches ou humides, tous les types de cendres peuvent être utilisées en techniques routières.

La valorisation des cendres de charbon en matériaux de technique routière est encadrée par le « Guide d'application : Applicabilité de matériaux alternatifs en technique routière », que nous avons présenté dans [une précédente Lettre d'information](#).

Ce guide définit les conditions d'utilisation des cendres volantes. Elles sont de deux types :

- les cendres doivent entrer dans le cadre d'un usage normalisé pour garantir les performances mécaniques du matériau final,
- elles doivent faire la preuve de leur acceptabilité environnementale au regard des sites d'implantation l'ouvrage final.

Les spécifications de produit et de performances dépendent de l'usage prévu des cendres dans l'ouvrage routier : remblais, couche de base, couche de forme, liant routier...

Les cendres volantes utilisées seules sont mécaniquement sensibles à l'action de l'eau. Leur utilisation en technique routière dépend donc de maîtrise du contact avec l'eau :

- l'ajout de chaux ou de ciment permet la prise hydraulique des cendres, qui deviennent alors insensibles à l'eau,
- l'isolation de l'ouvrage constitué de cendres seules doit les protéger du contact avec l'eau, qu'elle soit souterraine ou météorique.

En ce point, les préoccupations de performances mécaniques servent également celles de l'environnement : la limitation du contact avec l'eau (nappes ou eaux superficielles) permet d'éviter toute éventuelle dissémination de polluants.

Normes encadrant l'usage des cendres de charbon en technique routière

Les cendres siliceuses sont notamment utilisées pour l'élaboration de remblais. Dans le cadre de cet usage, elles doivent satisfaire aux spécifications de la norme A05-252 de juillet 1990 "*Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblais*".



Leur utilisation en couche de forme doit le plus souvent s'envisager soit avec un traitement aux liants hydrauliques, soit avec une activation calcique.

En couche de fondation ou en couche de base, les cendres sont activées par de la chaux. Il s'agit alors de graves-cendres volantes-chaux qui doivent être conformes aux normes mises à jour en août 2013 :
NF EN 14227-1 : *Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 1 : mélanges granulaires traités au ciment*,
NF EN 14227-2 : *Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 2 : mélanges granulaires traités au laitier*,
NF EN 14227-5 : *Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 5 : mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques routiers*

On peut également ajouter du laitier : nous sommes alors en présence graves-laitiers-cendres volantes-chaux qui doivent être également conformes aux normes NF EN 14227-1, NF EN 14227-2, NF EN 14227-5.

Les cendres traitées à la chaux et au gypse peuvent également être utilisées en couche de fondation, conformément à la norme NF EN 14227-3 de 2013 : "*Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 3 : mélanges granulaires traités à la cendre volante*". Le guide d'application SETRA-LCPC de 1998 impose alors des proportions de mélange qui visent à éviter les gonflements liés à la formation d'ettringite.

Enfin les cendres volantes calciques, du fait de leur hydraulicité, peuvent être utilisées comme liant. Elles ont alors employées comme constituant d'un liant pour le traitement de sol ou de graves. S'il s'agit d'un ciment, ce sera conformément à la norme NF EN 197-1, et s'il s'agit d'un liant, conformément à la norme NF P15-108 de 2000 : "*Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité*".

Autres références utiles

NF EN 13282 - Liants hydrauliques routiers

NF P 98 111- Assises de chaussées - Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux

Guide Sétra : Acceptabilité de matériaux alternatifs - mars 2011

[Retour au Sommaire](#)

Et les cendres sulfo-calciques ?...

En France, la plupart des centrales thermiques sont à charbon pulvérisé. Les cendres issues de cette combustion sont les cendres silico-alumineuses.

Mais d'autres types de centrales existent : les centrales à lit fluidisé circulant (LFC). Elles permettent de diminuer significativement les émissions atmosphériques d'oxydes d'azote et de soufre.

Deux centrales LFC fonctionnent en France, en Lorraine et dans le SE à Gardanne.

Ces centrales, plus récentes que les centrales à charbon pulvérisé, ont un rendement thermique supérieur, ce qui permet de diminuer la quantité de charbon utilisé et, par voie de conséquence, les émissions de gaz à effet de serre. Elles permettent également de brûler des combustibles médiocres et variés à forte teneur en soufre.

Le dioxyde de soufre émis lors de la combustion est capté par du calcaire injecté dans le foyer. Les cendres collectées sont donc composées de sulfate de calcium et de chaux.

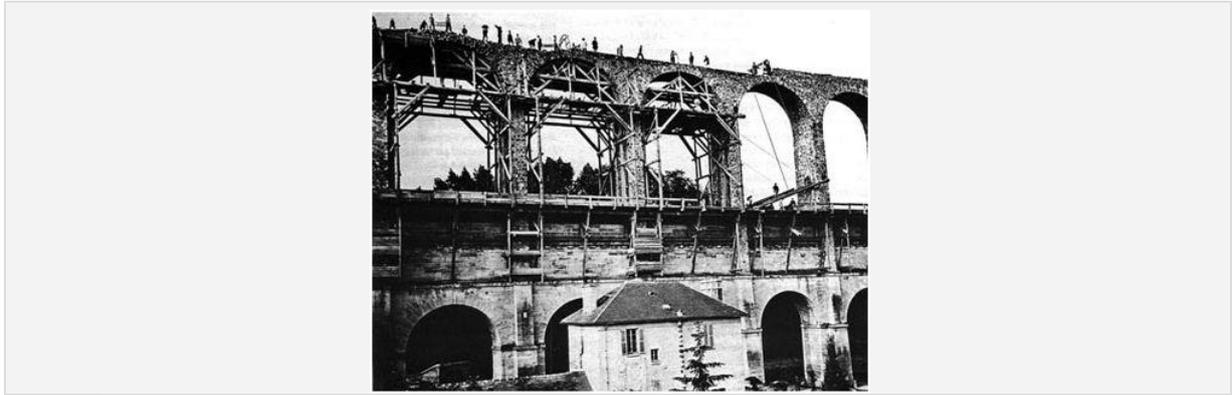
Ces cendres sont dites sulfo-calciques. Elles ont des propriétés distinctes des cendres sulfo-alumineuses et leurs voies de valorisation sont donc spécifiques.



La centrale LFC de Gardanne

[Retour au Sommaire](#)

Un point d'histoire : sur l'usage que fait François Coignet de la cendre de houille



Construction de l'aqueduc de la Vanne en béton Coignet

François Coignet (1814-1888) breveta son béton dit Coignet pour de nombreux usages : canalisations, ouvrages maritimes, éléments préfabriqués, éléments décoratifs, réservoirs, etc... Son entreprise prospéra sous le Second Empire, grâce à la commande publique de grands travaux dont il obtint l'adjudication. La recette de son béton qui fait mention de l'usage de cendre de houille pourrait-elle amener à le considérer comme un pionnier dans l'usage de la cendre ?

Avant d'examiner ce qu'il en dit lui-même, considérons que le mortier de houille était connu dès la deuxième moitié du 18^e siècle et sans doute avant. En 1771, Carrey (1) décrit la fabrication et l'usage de la cendrée de Tournai. Il précise que ce mortier est résistant à l'eau :

ON appelle *cendrée*, une espèce de ciment composé de chaux & de cendre de charbon de terre: ce ciment a la propriété de se consolider dans l'eau, & de devenir, après quelques années, plus dur que les pierres auxquelles il sert de liaison.

En 1829, Dans son Mémoire sur les mortiers hydrauliques Clément Louis Treussart (2), faisant référence aux travaux de Vicat, indique que l'hydraulicité de cette cendrée était due à la présence d'argile dans la chaux intimement liée à la cendre. Le décor théorique est donc, à cette époque, déjà solidement planté.

Que dit donc François Coignet de l'usage de la cendre dans la recette de son béton ?

Il précise d'abord que « ...Lorsqu'on emploie des bétons et lorsqu'on veut obtenir le maximum de solidité et de résistance, qu'ils peuvent atteindre, il y a d'autres conditions que l'hydraulicité qu'il faut observer et réaliser. » Et plus loin : « les lois de l'hydraulicité, si bien élucidées par M. Vicat, étaient

insuffisantes pour expliquer théoriquement la prise initiale et la dureté finale que les mortiers et les bétons par l'emploi de procédés que nous préconisons... » (3)

L'hydraulicité du mélange n'est donc pas suffisante. Quant à la pouzzolanité des ajouts et notamment de la cendre de houille, il la tient pour négligeable :

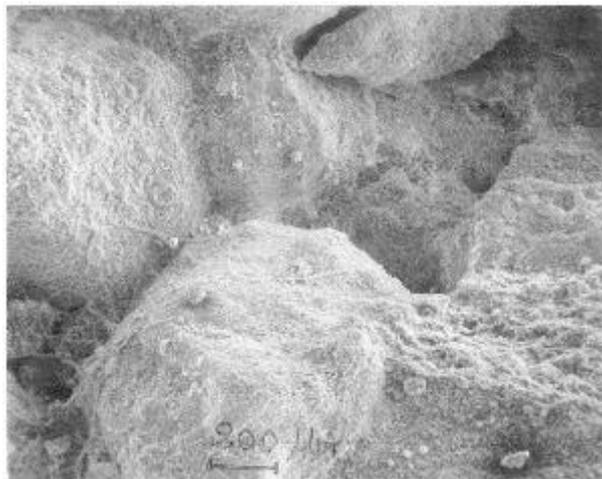
« Croyant alors, à cette époque, conformément à l'opinion généralement admise, que la composition chimique des cendres de houilles était la cause de la bonté des bétons de cendre, en donnant lieu à la formation de silicates doubles, nous demandâmes le secret pour l'emploi du béton de sable, à l'introduction de matières que nous croyions propres, comme les cendres, à exercer une action chimique. Mais c'est en vain que, cherchant toujours la formation de ces silicates doubles qui seraient la cause de la prise des bétons, nous eûmes recours aux pouzzolanes naturelles les meilleures, aux briques pilées, aux oxydes de fer... »

En fait, pour Coignet qui, dès la page de titre de son ouvrage, se présente comme *Manufacturier*, tout est dans le procédé. Il ne croit qu'en deux choses quant à la durabilité des bétons : l'élimination de l'excès d'eau et compacité du mélange. C'est déjà beaucoup !

Selon lui, la chimie doit être secondée (et peut-être précédée) par la physique du procédé. Ce procédé c'est le broyage fin et la liaison intime des matières par agglomération (pilonnage en moule de type pisé).

« ... les cendres et scories de houille sont un corps aiguillé, spongieux, rempli d'aspérités à l'infini, lequel, malgré la présence d'un excès de chaux ou d'un excès d'eau, peut s'écraser sous le pilon, se tasser, s'enchevêtrer de manière à produire quand même une liaison suffisante, et à former une masse assez ferme pour ne pas se déformer ni s'écrouler au démoulage. »

Pour ce qui concerne l'usage des cendres de houille dans les liants hydrauliques, Coignet n'est donc pas un pionnier et, de plus il ne s'y intéresse que pour des raisons qui ne sont pas les nôtres aujourd'hui. Dans sa perspective la cendre de houille est appréciée pour ses qualités de texture physique avant ses qualités pouzzolaniques.



Béton Coignet de l'aqueduc de la Vanne. Aspect général

Cliché MEB, LERM

Notes

1 Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts, 1771, Tome 1, p. 370

2 Clément Louis Treussard, Mémoire sur les mortiers hydrauliques et les mortiers ordinaires, Guiraudet Imprimeur, 1829

3 François Coignet, Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire. Librairie scientifique, industrielle et agricole, 1861. Toutes les citations de François Coignet sont tirées de cet ouvrage.

[Retour au Sommaire](#)

Entretien avec Jean-Paul Jacquot, responsable de l'Environnement au sein de la Division Production Ingénierie Thermique d'EDF



Monsieur Jacquot, nous allons nous entretenir sur le sujet des cendres volantes. Auparavant vous pouvez, peut-être, décrire vos missions chez EDF ?

Au sein de la Division Production Ingénierie Thermique, je suis responsable de l'Environnement : nous travaillons sur la question du CO₂ et sur l'ensemble de la problématique des émissions atmosphériques, ainsi que sur les rejets aquatiques, les déchets et les sous produits... Notre mission consiste également à appliquer, voire à anticiper les réglementations environnementales européennes et françaises, sans négliger, bien-sûr la réglementation locale, par exemple les arrêtés préfectoraux de nos sites de production.

En pratique, notre travail consiste à accompagner techniquement les sites de production, par exemple pour améliorer les performances des systèmes de dépollution (désulfuration, dénitrification,...) . Nous nourrissons également des relations avec les filiales du groupe EDF qui se trouvent en Grande Bretagne, en Pologne, et qui exploitent des centrales charbon en échangeant les expériences et les bonnes pratiques.

Venons-en, si vous le voulez bien, à la production des cendres volantes. Pouvez-vous nous décrire le processus de cette production...

Je précise d'abord que notre but, chez EDF, n'est pas de produire des cendres, mais de produire de l'électricité. Les cendres volantes, issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, sont donc un sous-produit de cette production, au même titre que les cendres de foyer ou le gypse. Les centrales thermiques fonctionnant au gaz (Cycles combinés gaz) ou au fioul (installations de pointe telles que des turbines à combustion) ne produisent évidemment pas de cendres.

L'électricité présente cette particularité d'être une énergie non stockable. Sa production doit donc s'adapter en permanence aux besoins. Vous le savez sans doute, 80% des besoins en électricité sont couverts en France par la production nucléaire ; les centrales thermiques, elles, fonctionnent de façon fluctuante pour adapter notre offre aux variations rapides et parfois de grande ampleur de la consommation ou encore de la production renouvelable (éolien). Ces centrales thermiques fournissent environ 4% de la production annuelle d'électricité en France.

On rentre un peu, avec vous, dans le détail du fonctionnement d'une centrale thermique charbon?

Volontiers... Le principe est que de l'eau, qui circule dans une chaudière, s'échauffe jusqu'à se transformer en vapeur. Cette vapeur est envoyée sous pression vers une turbine qui, couplée à un alternateur, produit de l'électricité. les principes sont restés les mêmes depuis des dizaines d'années

avec toutefois de grandes améliorations des performances Rendement, Protection de l'environnement, sécurité, ...!

Toute la question est de chauffer cette eau...

Voilà... C'est à cette fin qu'on brûle du charbon. Le charbon présente une granulométrie grossière et hétérogène, il est donc concassé puis broyé finement avant d'être injecté, sous forme pulvérisée, dans la chaudière.

Ce charbon, dont vous parlez, n'est plus extrait en France ; vous devez donc l'importer...

En effet, les dernières mines françaises ont été fermées dans les années 90 ; la dernière mine en Lorraine a été fermée en 2004. Nous importons donc le charbon de l'étranger en fonction de son cours, en ce moment, par exemple, de Pologne, de Colombie, d'Afrique du Sud et des USA, où l'usage du gaz de schiste, rend plus disponible le charbon.

Mais les centrales françaises sont situées sur les sites miniers historiques...

Oui, pour les plus anciennes, car elles ont été construites aussi près que possible des sources de charbon. Les plus récentes (début des années 80) ont été construites en bord de mer où l'approvisionnement est plus proche des ports et également moins coûteux. Aujourd'hui, nos centrales sont approvisionnées principalement par barges ou par train, après que le charbon ait été débarqué des vraquiers dans les ports.

Comme il n'y a pas de cendres sans combustible, nous avons fait ce petit détour vers le charbon, mais revenons aux cendres et à leur production...

Nous en étions à la combustion du charbon... Des poussières très fines, générées par cette combustion, sont entraînées par les gaz de combustion qui sont traités avant rejet dans l'atmosphère. Elles sont collectées par des dépoussiéreurs électrostatiques, qui captent plus de 99% des poussières présentes dans les gaz de combustion. Les centrales charbon récentes (Palier 600 MW) sont en outre équipées de systèmes de dénitrification et désulfuration très performants.

Lors de la combustion, la fraction organique du charbon (carbone, matières volatiles) est intégralement brûlée. C'est la fraction minérale et incombustible qui est récupérée sous forme de poussières. Cela représente environ 10% de la masse initiale du charbon.

Pour être précis, les poussières collectées, regroupées sous la dénomination « cendres » sont de deux types : les unes, dites « cendres de foyer » sont récupérées à la base de la chaudière dans des cendriers, les autres sont les « cendres volantes » qui nous intéressent ici. Les premières représentent environ 10% de la masse de cendres issues de la combustion, les autres environ 90%. Enfin, pour fixer un ordre d'idées, la production annuelle de cendres volantes en France est d'environ 900 000 tonnes (en incluant EDF ainsi que la SNET, filiale du Groupe E.On).

Puisque nous en sommes à la production des cendres, pouvons nous aborder la question de leur teneur en imbrûlés. Cette teneur conditionne, n'est-ce pas, leur conformité à la norme NF EN 450-1... Qu'est ce qui dans le cours du process, influe sur cette teneur ?

C'est globalement la qualité de la combustion du charbon qui se traduit par une fraction résiduelle de matière organique dans les cendres. Cette teneur est généralement de l'ordre de 3% à 4%. Au-delà de 7%, les cendres ne sont plus conformes à la norme NF EN 450-1 que vous venez de mentionner. Cela posera donc des problèmes de valorisation en aval.

Comme une forte teneur en imbrûlés, signifie pour nous, exploitant, un mauvais fonctionnement de l'installation, c'est-à-dire une perte de rendement énergétique, cette teneur est un paramètre que nous contrôlons en continu pour maintenir la qualité optimale de la combustion. Ce contrôle continu permet également que les cendres soient triées immédiatement en fonction de leur conformité ou non à la norme.

Mais quels sont les facteurs qui peuvent nuire ainsi à une combustion optimale du charbon ?

Les deux facteurs principaux sont le réglage des brûleurs de la chaudière et la finesse du charbon ; dans ce dernier cas, le problème est alors du côté des broyeurs. Si donc la finesse des cendres n'est pas directement contrôlée, elle l'est cependant par le suivi continu de la teneur en imbrûlés. Cette finesse des cendres est aussi un paramètre de leur [réactivité pouzzolanique](#) et donc un critère de leur qualité.

Ainsi, la finesse et la teneur en imbrûlés, deux qualités escomptées des cendres, dépendent du bon fonctionnement énergétique de la centrale et la teneur en imbrûlés est précisément un indice de ce bon fonctionnement : qualité des cendres et fonctionnement optimale de la centrale thermique vont donc de pair.

Quels sont ensuite les débouchés des cendres ainsi produites ?

En fonction de leur qualité qui conditionne leur respect des normes NF EN 450-1, relative aux cendres pour béton, et NF EN 197-1, relative aux ciments, les cendres volantes trouvent des débouchés dans différents secteurs. Pour ce qui concerne EDF, ils se répartissent ainsi : 56% dans les ciments, 32 dans les bétons, 8% en technique routière et 4% pour d'autres usages.

Nous vendons aujourd'hui 120 à 140% de notre production. Cela signifie que nous destockons les terrils historiques, dont nous avons hérité suite à une période de consommation intensive de charbon, où la valorisation de ce sous-produit n'était pas encore développée. Pour mémoire, ces stocks sont de l'ordre de 10 millions de tonnes en France. Ces stocks sont une ressource d'avenir dans la mesure où à l'horizon 2016, un certain nombre de centrales thermiques devront être fermées (palier 250 MW notamment) .

Du point de vue environnemental, quels sont les enjeux, pour vous producteur, des cendres volantes ?

Votre question mérite une réponse en deux temps. Le premier volet serait le bénéfice environnemental de l'usage des cendres volantes . Valorisées dans le ciment ou le béton, les cendres volantes présentent plusieurs bénéfices : une **économie en ressource naturelle** en réduisant la part de composants du clinker extraits de carrières des cendres , mais aussi une réduction des émissions de CO₂ en cimenterie. Cette valorisation des cendres induit une résorption des stocks de cendres, Elle permet une baisse du coût des produits dans lesquels elles se substituent aux matières premières, enfin un accroissement notable de la [durabilité de ouvrages induit par l'effet pouzzolanique des cendres](#).

Le deuxième volet de la réponse concerne l'acceptabilité environnementale des cendres volantes. Les cendres sont un déchet et entrent dans la nomenclature des déchets définie à l'annexe II de l'article R541-du code de l'environnement. Elles ne sont pas classées en tant que déchet dangereux au sens de l'annexe I de ce même article. De plus, elles sont classées comme déchets non dangereux et « valorisables comme constituant du cru de cimenterie, du ciment ou du béton » . par la *circulaire n° 96-85 du 11/10/96 relative aux cendres issues de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile, etc ...* Non dangereuses, elles sont néanmoins des déchets.

Insérées dans une matrice cimentaire, leur usage dans les bétons et dans les ciments n'est pas problématique.

La circulaire n°96-85 du 11/10/96 précise par ailleurs que d'autres usages sont envisageables « si leur producteur donne des éléments d'appréciation relatifs à l'impact potentiel de tels usages sur l'environnement ».

Ainsi, lors de leur usage en technique routière, elles doivent faire la preuve de leur acceptabilité environnementale.. A chaque usage de cendres dans un contexte donné, cette acceptabilité doit être prouvée.

C'est pour affranchir les usagers de nos cendres de ces études préalables au cas par cas que nous contribuons actuellement à l'élaboration d'un guide SETRA d'application aux cendres de charbon de la démarche d'évaluation de l'acceptabilité environnementale . Celle-ci a été cadrée dans le [guide SETRA](#) , plus général , d'acceptabilité de **matériaux alternatifs** en technique routière, publié en mars 2011.

Nous avons préparé par ailleurs pour les cendres volantes un dossier de demande de sortie du statut de déchet pour qu'elles ne soient plus considérées comme un déchet mais comme un produit.

Votre lettre d'information a traité a plusieurs reprises de ce sujet de la [sortie du statut de déchet](#), je n'y reviens donc pas. Disons que adossées à un processus de production de qualité normalisé ISO 9001, munies de fiches FIS (Fiches d'Information Sécurité) suite à leur enregistrement sous REACH, caractérisées tant sur leur plan minéralogique que chimique, leur impact environnemental, enfin, ayant été expertisé, les cendres volantes sont mûres, selon nous, pour accéder au statut pérenne de produit.

[Retour au Sommaire](#)

Portrait de Nouredine Rafai, Expert matériaux au Lerm



Nouredine, tu es « expert matériaux » au LERM... peux-tu nous décrire un peu ton parcours ?

J'ai toujours été très intéressé par la géologie. Lors de mes études, à partir de la licence, j'ai eu le désir de suivre deux pistes à la fois, celle de la recherche et de l'enseignement et celle de la pratique, car j'avais également une grande curiosité pour les processus industriels. J'envisageais donc de m'orienter vers le génie civil ou la pétrochimie.

Une jeunesse consacrée aux études donc ?

Oui, et aux petits boulots pour pouvoir les suivre !... J'ai fréquenté de nombreuses universités : c'est à l'Université Mohammed I d'Oujda que je prépare et passe ma licence. C'est ensuite à l'Université Mohammed V de Rabat que je passe ma maîtrise. Je viens ensuite en France, passer une maîtrise à l'Université des Sciences et Techniques de Lille. J'y travaille sous la direction de Jean-François Raoult, co-auteur du fameux Dictionnaire de Géologie. Je n'en reviens pas... Il me semble que je suis sur une sorte d'Olympe.

Qu'est-ce qui t'amène alors en France pour poursuivre tes études ?

Seules deux universités, au Maroc, proposaient un troisième cycle dans le domaine qui m'intéressait ; je devais donc quitter le Maroc. En venant à Lille, je découvre le froid, mais aussi les moyens des laboratoires qui sont mis à notre disposition. J'en profite d'autant mieux que notre formation théorique dispensée au Maroc était de qualité.

On poursuit ton cursus ?...

J'entreprends ensuite un DEA de géochimie sous la direction de Claude Allègre à Paris VII, puis une thèse à Paris VI sous la direction de René Létolle : "*Application des isotopes stables (^{13}C et ^{18}O) à l'étude de la carbonatation et de la décalcification des bétons*"... Un véritable tour de France des Universités, non ?

Lors de mon stage de DEA, que j'effectue au Lerm en 1989, à Bagnolet, mon tuteur m'oriente sur l'étude de la carbonatation au moyen des isotopes. Je commence ma thèse sur ce sujet en 90-91 et j'ai alors la chance de travailler avec Hugues Hornain au MEB et en microscopie optique.

Ce sont donc tes études qui t'introduisent au Lerm, qui lui, en est alors à ses débuts...

Oui ! Le laboratoire, c'est, à cette époque, une équipe de 8 personnes, en tout et pour tout, dont 5 sont propriétaires de l'entreprise. L'ambiance est familiale, et si c'est une chance d'être au Lerm, c'en est une particulière d'y être à ce moment là.

... et c'est donc au Lerm que tu passes des études au travail...

En effet, la qualité du travail scientifique et technique liée à la qualité humaine du laboratoire m'incite à y rester. En réalité, entouré de gens qui, comme par exemple Bernard Thuret et Hugues Hornain, sont aussi passionnés que moi, je ne ressens aucun hiatus entre la recherche et le travail... si bien que je me demande si j'ai un jour fini mes études ou bien si j'ai un jour commencé à travailler. J'ai donc la chance de rester dans un environnement où mon souhait, dont je t'ai parlé, de ne pas séparer la théorie de la pratique se réalise.

Il n'y a donc que des géologues au Lerm ?

Je me présenterais plutôt comme géochimiste... Mais ce n'est pas étonnant qu'il y ait tant de géologues au Lerm (même si nous ne le sommes pas tous !) car le béton est une roche, même si elle est artificielle. C'est une roche particulière certes, puisqu'on la fabrique et, dans cette mesure, on tâche de maîtriser sa durabilité... Mais c'est bien une roche, si vivante d'ailleurs, qu'on parle de ses âges : jeune âge, maturité, etc...

Quel est ensuite ton parcours au sein du Lerm ?

Après la soutenance de ma thèse en 1994, je deviens responsable du département microstructure. Je le serai pendant 12 ans jusqu'à ce que nous nous installions à Arles. Le déménagement est, pour nous tous, une aventure rondement menée : le labo n'a pas fermé une semaine entière !... même s'il a fallu réinstaller tous les appareils, dont certains d'ailleurs ont été renouvelés.



Tu prends, à partir de ce moment, la fonction d'expert. Tu peux nous expliquer un peu ce que recouvre cette appellation...

En douze ans, les choses changent : le laboratoire grandit, la direction se renouvelle, moi-même je change bien-sûr et tout ceci se conjugue pour que de nouvelles fonctions deviennent nécessaires, dont celle d'expert. Au fond, je ne prends pas cette fonction, c'est l'évolution du laboratoire qui la crée et je

l'endosse dans la mesure où, dans le mot expert, avant toute chose, j'entends d'abord sonner « expérience »...

Dans un laboratoire qui grandit, qui plus est, dans un environnement concurrentiel, le maintien, l'évolution et l'amélioration des compétences internes sont vraiment vitales. D'un autre côté, une prise de recul est nécessaire, qui permet la veille sur les évolutions extérieures des connaissances et de la technique, la réflexion sur le marché et sur la concurrence. C'est le rôle, me semble-t-il, de l'expert de maintenir l'excellence des connaissances et des pratiques internes, articulées sur une prise en compte de l'environnement scientifique, commercial et économique de l'entreprise.

Les outils qui découlent de cela et que mettent en œuvre les experts du Lerm, ce sont surtout des outils de formation interne en direction des techniciens, mais également de l'ensemble du personnel du laboratoire ; c'est également un rôle de suivi et de conseil auprès des nouveaux arrivants, pour que, aussi élargie que soit aujourd'hui l'équipe, elle soit porteuse d'une véritable identité scientifique et déontologique.

Cela signifie-t-il que tu n'es plus à la production, comme on dit ?

Disons que je suis de grands projets de type recherche appliquée, comme la mise au point, en son temps, de ciments sulfo-alumineux avec, entre autres, des chercheurs chinois... Les projets ensuite s'enchaînent : travaux sur la valorisation de cendres volantes avec la Société Surschiste, étude du métakaolin dans les liants et les bétons, étude de laitiers d'aciérie dans le cadre du projet ORLA, étude de la durabilité des liants pétroliers pour l'obturation de puits dans le cadre du captage et stockage du CO₂ dans les réservoirs géologiques avec Total, de revêtement de surface de bétons comme pour l'EPR d'EDF. Aujourd'hui, par exemple, je travaille sur le diagnostic matériau du parc d'aéroréfrigérants d'EDF.

Dans cette fonction d'expert, il y a également les rencontres et les échanges, les liens tissés avec la communauté des chercheurs. C'est très stimulant. Je garde en mémoire de grandes et belles dates, comme le séminaire d'Arles que nous avons organisé en 1996 en l'honneur de Micheline Regourd, l'organisation des Journées scientifiques de Toulouse en 1998 où nous étions associés avec l'AFGC et au LMDC ou encore le projet BHP 2000, et bien entendu toutes les nombreuses dates qui se sont succédées depuis....

Comment vois-tu l'évolution de ton activité au sein du laboratoire ?

A la place qu'ils occupent, les experts du Lerm véhiculent et observent la réputation du laboratoire mais aussi celle de l'ingénierie. Cette réputation est bonne. Il faut qu'elle le reste ; cela signifie qu'il faut que nous maintenions collectivement la maîtrise de nos thèmes et de nos techniques dans la perspective même de la croissance de nos effectifs. Les experts, par leur activité de formation, de conseil, de transfert de compétences et par leur expérience sont les garants de la permanence et de la rigueur d'une culture commune à toute l'entreprise. Cette qualité interne à l'entreprise, les experts doivent également la véhiculer à l'extérieur, à travers les nombreux contacts qu'ils entretiennent dans l'environnement qui est le notre.

Je vois donc mon activité à venir comme celle d'un veilleur, d'un garant, d'un chercheur certes, mais également comme celle d'un passeur de ce dont j'ai moi-même hérité.

[Retour au Sommaire](#)