

VALORISATION DES COPRODUITS ET DES DÉCHETS

VALORIZATION OF BY-PRODUCTS AND WASTE

par /by Isabelle Moulin, responsable de l'activité Environnement / Manager of the Environment Department, Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux / Materials Research Laboratory (Lerm), Arles

Cet article passe en revue les produits et les types de valorisation que proposent aujourd'hui les filières du ciment et du béton, ainsi que les perspectives qu'offrent les recherches en cours.

This article reviews the products and the different types of valorization practices in use today by the cement and concrete industry and the opportunities that current research programs can propose.



Figure 1 – Unité de traitement de Scoribel, filiale belge d'Holcim, spécialisée dans le prétraitement des déchets industriels afin de les transformer en combustibles pour l'industrie du ciment

The Scoribel processing unit, a Belgian subsidiary of Holcim, is specialised in the pretreatment of industrial waste in order to transform them into fuels for the cement industry

La pratique des additions dans les liants minéraux est très ancienne : les Grecs, puis les Romains ajoutaient des cendres volcaniques ou, à défaut, des tuileaux de terre cuite à leurs mortiers de chaux pour les rendre résistants à l'eau. Dans la seconde moitié du

19^e siècle, l'essor de la production industrielle, contemporaine de la généralisation de l'usage des ciments hydrauliques, procure à l'addition minérale des ressources nouvelles et abondantes. Le laitier de haut fourneau sera la première de ces additions minérales.

L'accroissement de la production de déchets et de coproduits industriels et la multiplication des contraintes environnementales, tout au long du 20^e siècle, vont conduire à des séries de recherches sur la valorisation des coproduits de l'industrie dans les ciments et les bétons.

VALORISATION DANS LA FILIÈRE CIMENT

La filière ciment permet deux types de valorisation très largement pratiqués : d'une part la valorisation énergétique qui utilise des combustibles de substitution pour la production du ciment, et d'autre part la valorisation matière opérée au niveau du cru ou des constituants.

Valorisation énergétique

On obtient le ciment par la combinaison de ses matières premières, calcaire et argile, qu'autorise leur cuisson à une température de 1 450 C°. La production d'une tonne de clinker consomme environ 100 kg de combustible.

Pour réduire la consommation d'énergie fossile, ont été introduits dans les fours de cimenterie des combustibles de substitution. On valorise ainsi certains déchets de l'industrie : les fours utilisent comme combustibles des produits que l'on aurait éliminés avec la même production de CO₂, mais en pure perte. Un tiers de l'énergie thermique des cimenteries provient aujourd'hui de cette valorisation.

Cette pratique permet notamment la valorisation énergétique de biomasse (balles de riz, huile de palme, coques de café, farines animales), de pneus usagers, de déchets plastiques et de déchets industriels divers (peintures, vernis, huiles usagées...). Rappelons que cette valorisation énergétique est encadrée par la Directive n° 94/67/CE du 16 décembre 1994 concernant l'incinération de déchets dangereux.

Valorisation matière

Trois étapes de la fabrication du ciment permettent la valorisation matière de déchets ou coproduits industriels, favorisant ainsi, d'une part l'économie de res-

sources naturelles (principalement calcaire, argile et gypse) et d'autre part la réduction du volume d'émission de CO₂.

Valorisation dans le cru

De nombreuses cimenteries ont la possibilité d'introduire directement, lors de la préparation du cru, des déchets industriels pouvant se substituer partiellement à l'argile et/ou au calcaire. Les types de déchets valorisés et leurs proportions dépendent d'une part du contexte local (disponibilités de ces nouvelles ressources/coût de transport), et d'autre part de leur composition. Cette pratique permet de valoriser couramment des déchets comme certaines cendres volantes de centrales thermiques, des boues rouges issues de la production d'aluminium, des oxydes de fer, des sables de fonderie, des boues de papeteries...

Valorisation comme constituant

Plus de 60 % du CO₂ émis par l'industrie cimentière provient de la décarbonatation du calcaire. La réduction de la part du clinker par l'ajout d'autres constituants dans le ciment au sens de la norme NF EN 197-1 permet de réduire ce volume d'émission.

Les différents produits concernés sont les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes siliceuses ou calciques, la fumée de silice, les fillers calcaires et les schistes calcinés... Il s'agit probablement de la plus ancienne voie de valorisation dans la fabrication du ciment et de la mieux encadrée d'un point de vue normatif. Ces anciens déchets ont désormais indiscutablement acquis le statut de produits. Sur le rôle de ces différents constituants dans les matrices cimentaires, on peut se reporter à l'article de N. Rafaiï (*CBPC* 890, avril-mai 2008, pp.60-65, *Les composants de la matrice cimentaire*).

Régulateur de prise

Un ajout de 3 à 5 % de sulfate de calcium au clinker est indispensable pour réguler la prise du ciment.

Différents substituts au gypse naturel permettent aujourd'hui d'économiser la ressource naturelle en valorisant des déchets industriels : des gypses industriels comme le désulfogypse, issu du traitement à la chaux des émissions gazeuses des centrales thermiques, ou le titanogypse issu du traitement des eaux acides de la production de pigments. Des résidus de plâtres (pertes d'usines, démolition...) sont aujourd'hui également utilisés.

Le laitier de haut fourneau et autres ajouts minéraux

Vicat, dès le début du 19^e siècle, avait entrevu le pouvoir hydraulique du laitier et avait pensé à l'utiliser pour en faire un ciment. C'est en 1862 qu'Emil Langen montre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux fournit un liant hydraulique. La fabrication industrielle de ciment au laitier commence en Allemagne en 1882, sous l'impulsion de G. Prüssing. Dans ce pays, son homologation officielle a lieu dès 1909 pour le ciment Portland dit de fer (qui contient jusqu'à 30 % de laitier). En France, les ciments de laitier ne seront normalisés qu'à partir de 1934.

Le laitier remplace le clinker dans les catégories de ciments courants CEM II, CEM III et CM V (jusqu'à 95 %), destinés à la réalisation de bétons en milieu agressifs. La présence de laitier dans le béton favorise notamment la résistance à l'alcali-réaction et protège les armatures de la pénétration des chlorures en milieu marin.

VALORISATION DANS LES BÉTONS, COULIS, MORTIERS

L'évolution récente du coût des matières premières, le négoce plus tendu des additions largement reconnues et prisées comme les laitiers de haut fourneau, les fumées de silice ou encore certaines cendres de centrales thermiques ont largement contribué au lancement de nombreuses recherches concernant la valorisation de déchets ou sous-produits dans les filières coulis, mortier et béton.

À des stades de développement différents, les voies de valorisation les plus explorées sont :

- l'utilisation en tant qu'addition ou ajout ;
- la valorisation en tant que granulats pour mortier ou béton (sable, gravillon...).

Addition, ajouts...

Les additions minérales classiquement utilisées dans les bétons sont de deux types : les additions dites inertes, utilisées pour leur finesse et l'effet granulaire ou filler qu'elles apportent au béton, et les



Figure 2 – Utilisation de pouzzolanes et de fuels alternatifs chez Lafarge en Ouganda

Use of pozzolana and alternative fuels at Lafarge in Ouganda

additions réactives de type pouzzolanique ou hydraulique. Outre l'aspect économique de leur emploi, elles permettent de modifier certaines caractéristiques ou propriétés des bétons (ouvrabilité, performances mécaniques, durabilité).

La majorité de ces additions minérales proviennent de la valorisation de coproduits ou déchets industriels, pratique parfois très ancienne qui leur a conféré le statut de produits.

Ces additions au béton connaissent aujourd'hui une définition normative : "...matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés et pour lui conférer des propriétés particulières..." (Norme NF EN 206-1). Les cendres volantes, les laitiers moulus de haut fourneau et les fumées de silice sont les additions les plus employées.

L'aptitude générale à l'emploi de ces additions est également normalisée : les cendres volantes sont encadrées par la norme NF EN 450, les fumées de silice par la norme NF EN 13263-1, le laitier de haut fourneau par les normes NF P 18-506.

En France, des ajouts peuvent également être incorporés au béton et permettent une plus grande souplesse dans les types de matériaux utilisés.

Les pressions économiques et environnementales ont suscité de nombreuses études, portant sur la valorisation d'autres déchets ou sous-produits comme addition ou ajout dans la filière béton.

Des procédés produisent des fines minérales qui souvent ne trouvent pas d'autres débouchés. En tant que déchets, leur finesse est un inconvénient (dispersion, manutention, transport), mais ils sont précisément exploités pour cette finesse dans la fabrication de coulis ou de bétons. En pratique, ces matériaux peuvent se présenter sous forme de boues, comme les boues de lavage des granulats ou les fines de sciage. Des études de ce type sont également

réalisées avec des sédiments de dragage traités ou même des coquilles d'huîtres broyées.

Les cendres diverses et variées forment une autre catégorie de produits, largement étudiés pour des applications dans la filière béton. Outre leur finesse, certaines de ces cendres présentent des propriétés pouzzolaniques, voire hydrauliques.

Différents travaux sont menés sur l'utilisation de cendres de boue de station d'épuration, de cendres de boues de papeterie, ou encore de chaufferie bois. Certaines de ces recherches ont abouti à des applications concrètes testées à l'échelle industrielle, notamment dans la filière du béton préfabriqué.

Les efforts de recherche sont également fortement affectés aux résidus susceptibles de contenir de la silice réactive, comme la poudre de verre recyclé, les résidus argileux calcinés ou les cendres de balles de riz.

Enfin, et depuis plusieurs années, les laitiers d'aciérie sont l'objet de nombreux travaux visant leur valorisation matière, notamment dans la filière ciment.

Granulats

L'utilisation de granulats recyclés ou valorisés en substitut des granulats naturels dans les bétons ou mortiers est une pratique plus récente et moins courante. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau, obtenus par refroidissement à l'eau. C'est en 1960 qu'une norme a consacré le laitier concassé de haut fourneau comme granulats lourds pour la confection des bétons. Il avait déjà été utilisé localement pendant l'entre-deux-guerres, dans les usines sidérurgiques ou près des lieux de production, pour la construction d'ouvrages en élévation ou en fondation.

D'autres valorisations se pratiquent, mais elles concernent des tonnages moindres et/ou des applications spécifiques. C'est le cas notamment des sables de fonderie ou de certains granulats de bois couramment issus des broyats de bois (déchets des industries du bois, et notamment ceux provenant de la destruction des palettes de manutention usagées). Les bétons de bois ainsi formulés sont utilisés pour la fabrication de murs-écrans antibruit.

La filière des granulats légers ou expansés est également exploitée, par exemple



Figure 3 – Partenariat entre les Carrières du Boulonnais et la société Gagneraud Industries par le biais de Valsid (Valorisation des laitiers sidérurgiques du Dunkerquois), pour la transformation de laitiers sidérurgiques en granulats pour bétons, entre autres
Partnership between the Boulonnais quarries and the Gagneraud Industries company through the intermediary of Valsid (Recycling of steels slags from the Dunkirk area), for the transformation of steel slags into aggregates for concrete manufacturing, among other things

pour la fabrication de granulats de verre expansé à partir de poudre de verre recyclé. Ajoutés au béton, ces granulats l'allègent et améliorent ses performances thermo-acoustiques, sans sacrifier sa résistance à la compression.

Les enjeux économiques (création de nouvelles filières de valorisation, économie de ressources naturelles, hausse du prix des granulats naturels, coût du transport...) et la nécessité de préserver la ressource naturelle stimulent de nombreuses recherches sur des déchets à fort tonnage, comme les Miom (Mâche-fers d'incinération d'ordures ménagères), déjà utilisés en technique routière, ou les granulats de béton recyclé.

D'autres études visent l'incorporation de granulats issus de déchets dans la filière béton tout en lui conférant des propriétés particulières. C'est le cas, par exemple, des granulats de verre dans le cadre de recherches esthétiques sur le béton, ou encore de granulats de pneu, de déchets de caoutchouc ou encore de plastique avec lesquels on vise des propriétés acoustiques, thermiques ou élastiques.

L'incorporation de fibres au béton limite les fissures de retrait et lui fournit une bonne résistance mécanique aux chocs. Certaines de ces fibres proviennent de

Cendres volantes

Les cendres volantes sont des coproduits de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques. Elles sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Silico-alumineuses, elles sont employées pour leurs propriétés pouzzolaniques ; silico-calciques, elles sont employées pour leurs propriétés hydrauliques.

C'est aux USA, vers 1930, que commencent les recherches sur les cendres volantes, afin d'étudier leur emploi possible dans les ciments et les bétons*. Mais c'est après 1945 que l'on s'intéresse réellement aux applications pratiques. Ce sont d'abord, dans les années 1950, la stabilisation des sols avec des mélanges de cendres volantes et de chaux. En 1948, le barrage de Hungry Horse, dans le Montana (2 300 000 m³ de béton) absorbe 140 000 tonnes de cendres.

* Davis, R. E., R. W. Carlson, J. W. Kelly, et A. G. Davis. 1937. Properties of cements and concretes containing fly ash. Proceedings, American Concrete Institute 33:577-612.