

Etat des lieux sur les ciments à base de sédiments

La norme ciment NF EN 197-1 est contraignante sur le produit final. Mais ne fournit aucune exigence sur les caractéristiques des matières premières du cru... Ce qui permet d'envisager la production de ciments à base de sédiments, avec une composition chimique adéquate et en réponse à une problématique environnementale. Synthèse des recherches menées par la chaire industrielle EcoSed¹ de l'Ecole des mines de Douai.

I - A quelles problématiques peut répondre la synthèse des ciments ?

De nos jours, le niveau de production de déchets solides dans le monde est compris entre 1,3 à 2,2 Mdt/an. Ce volume devrait sans doute s'accroître en raison du développement démographique et économique mondial. Mais aussi du fait d'une surconsommation et d'une utilisation inefficace des matériaux.

En général, les déchets produits, ainsi que les émissions s'y rapportant, sont liés à des produits de la construction, aux ordures ménagères, à l'exploitation minière, aux processus agricoles, aux déchets municipaux et industriels, à la circulation maritime... Il y a donc lieu de trouver des méthodes de gestion efficaces, des techniques d'élimination appropriées. Une dose d'innovation conduisant *in fine* à l'utilisation de matériaux durables, telle qu'impulsée dans bon nombre de doctrines de l'Union européenne, à l'image du "Green Deal", des programmes H2020...



La norme ciment NF EN 197-1 est contraignante sur le produit final. Mais ne fournit aucune exigence sur les caractéristiques des matières premières du cru... Opération de préparation du cru dans une cimenterie.

Outre le problème de la gestion des déchets et du fait qu'entre 6 et 10 Mdt de bétons sont produits chaque année dans le monde, l'industrie de la construction a un très grand impact environnemental, qu'elle s'est d'ailleurs engagée à atténuer. La production des ciments Portland est en majorité faite par voie humide, sèche ou intermédiaire, après cuisson à 1 450 °C pendant 1 h d'un mélange de minéraux. Ce mélange est composé d'argile et de calcaire, pour l'essentiel. L'utilisation dans cette

filrière de sous-produits, tels que les sédiments, pourrait représenter un avantage économique et écologique considérable. La valorisation de ces ressources secondaires dans le cru cimentier peut représenter une nouvelle source d'approvisionnement en matières premières, en substitution du calcaire et/ou de l'argile.

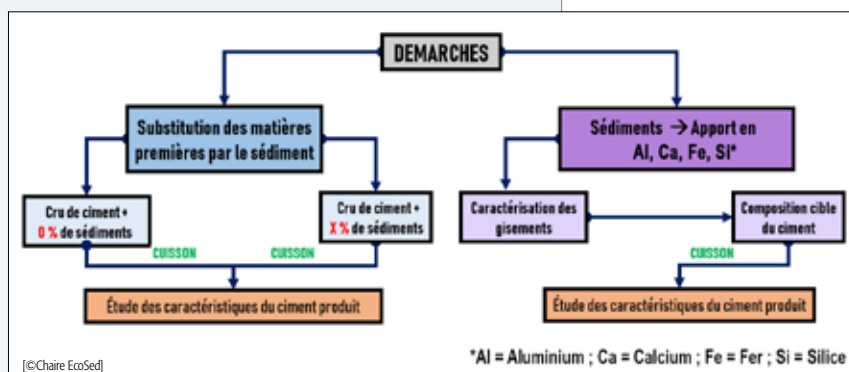
II - Comment valoriser les sédiments dans les liants cimentaires ?

En France, la spécification des ciments, leurs compositions et leurs propriétés sont encadrées par la norme NF EN 197-1. Or, cette dernière ne fournit aucune exigence sur les caractéristiques des matières premières qui entrent dans la composition du cru. Elle n'apporte des contraintes que sur le produit final. Le cahier des charges sur la composition du cru et des matières premières reste donc différent d'une cimenterie à une autre...

La valorisation envisagée consiste à remplacer dans le cru cimentier une partie des matières premières courantes par des déchets ou sous-produits industriels (SPI). Ces derniers apportent les mêmes éléments chimiques majeurs lors de la cuisson : aluminium (Al), calcium (Ca), fer (Fe) et silice (Si). Et de nombreuses cimenteries ont la possibilité d'intégrer efficacement ces SPI dans leurs process.

Les types de déchets valorisés et leurs proportions dépendent, d'une part, de leur composition et, d'autre part, du contexte local (disponibilité de ces nouvelles ressources, coût de transport...). Aujourd'hui en développement, ces techniques permettent de valoriser des déchets ou sous-produits, en général mis en centre d'enfouissement

Schéma des démarches de valorisation de sous-produits et de synthèse de ciments à base de sous-produits, tels les sédiments.



[©Chaire EcoSed]

technique ou de stockage. Les sédiments de dragage en sont un bon exemple. Ce type de valorisation est intéressant pour les gestionnaires de cours d'eau, de ports, les acteurs industriels, les acteurs politiques, les acteurs régionaux. Surtout, elle reste une solution durable.

III - Comment passer du laboratoire à l'échelle industrielle ?

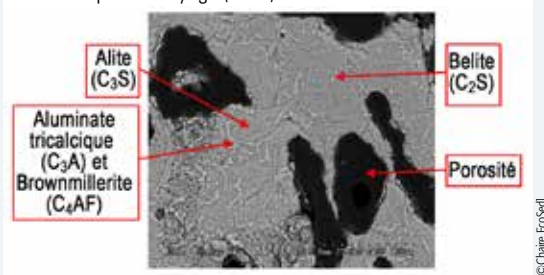
Un plan d'action a été défini pour la préparation et la caractérisation des formulations. Pour suivre le changement d'échelle, une comparaison a été effectuée entre les méthodologies pour chaque formulation :

- Mélange laboratoire et cuisson laboratoire ;
- Mélange industriel et cuisson laboratoire ;
- Mélange industriel et cuisson industrielle.

À l'échelle du laboratoire, la première étape pour caractériser les matériaux est de les sécher et de les échantillonner. Le matériau est donc mis à l'étuve à 105 °C pendant 24 h, puis calciné durant 1 h à 1 050 °C. Cette dernière température permet de décarbonater le sous-produit, afin de connaître sa perte au feu à haute température. Des pastilles sont alors produites et cuites au four à 1 450 °C sur la base des mélanges judicieusement préparés.

Les analyses DRX (diffractométrie) et FX (fluorescence) permettent d'affirmer que la minéralogie et la composition chimique du produit de cuisson sont satisfaisantes. Les quatre phases du clinker sont bien présentes et les résultats montrent une bonne synthèse du clinker.

Identification des phases cimentaires par microscopie électronique à balayage (MEB).



L'avantage que présente la meilleure formulation est d'avoir réussi à valoriser trois sous-produits en même temps et d'avoir obtenu un bon équilibre des phases, notamment l'aluminate tricalcique (C₃A), pour une cuisson dans des conditions optimisées. La réactivité mesurée par calorimétrie permettant de suivre la chaleur dégagée lors

de l'hydratation a confirmé les premiers résultats. Pour ces meilleures formulations, jusqu'à 20 % de sédiments fluviaux ont pu être valorisés dans le cru cimentier.

Plusieurs formulations bi-matières et tri-matières ont été effectuées. Le passage à l'échelle industrielle est ensuite fait à la suite d'une validation expérimentale en laboratoire. L'installation industrielle utilisée permet de préparer jusqu'à 48 t de ciment à base de sous-produits.

IV - Quel est l'impact environnemental de ces produits ?

Réalisées sur la base de ciments préparés à partir de sédiments, des éprouvettes ont subi une maturation de 28 j avant essai de lixiviation. Les éprouvettes cassées à maturation suite aux essais mécaniques ont été récupérées et concassées. Puis, tamisées conformément à la norme NF EN 12457-2. Ensuite, 1 l d'eau déminéralisée a été ajouté à 100 g de matériau sec (rapport Liquide/Solide égale à 10). Les analyses par spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP) sont effectuées après 24 h de lixiviation sur le mélange "pâte de ciment broyée + eau déminéralisée" ayant subi une filtration. L'objectif était de classer les produits selon les seuils des installations de stockage des déchets inertes (ISDI), non inertes non dangereux (ISDND) et dangereux (ISDD).

Les tests de lixiviation sont concluants quant à l'innocuité environnementale de ces ciments. En effet, tous les éléments chimiques identifiés ne dépassent les seuils d'acceptation d'une ISDI en France. En outre, les éléments suivants : antimoine (Sb), arsenic (As), cadmium (Cd), plomb (Pb), sélénium (Se) et zinc (Zn) sont détectés dans des proportions très faibles, même s'ils ont été présents dans certaines proportions dans le sédiment avant cuisson (voir tableau ci-dessous).



Mouhamadou Amar
(docteur ingénieur)



Nor-Edine Abriak
(professeur)

IMT Lille Douai, Chaire EcoSed²

¹ EcoSed : Economie circulaire des sédiments.

² Université Lille, IMT Lille Douai, Université Artois, Yncrea Hauts-de-France et Laboratoire de génie civil et géo-environnement (LGCgE - ULR 4515).

Éléments chimiques	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	Chlorures	Fluorures	Sulfates
Ciments à base de sédiments	< 0,1	10,3	< 0,01	0,01	< 0,03	< 0,02	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,06	< 0,01	< 10	4	< 10
Seuils ISDI (Installations de stockage des déchets inertes)	0,5	20	0,04	0,5	2	0,5	0,4	0,5	0,06	0,1	4	800	10	1 000
Seuils ISDND (Installations de stockage des déchets non inertes non dangereux)	2	100	1	10	50	10	10	10	0,7	0,5	50	15 000	150	20 000
Seuils ISDD (Installations de stockage des déchets dangereux)	25	300	5	70	100	30	40	50	5	7	200	25 000	500	50 000

Tableau - Contaminants minéraux et seuils de pollution (en mg/kg de matières sèches)

Références bibliographiques

- *Calcination des déchets industriels : synthèse de ciment et stabilisation/solidification des résidus de combustion* - Maxime Renault, thèse de doctorat, Université d'Artois, 2017.
- *Ability of two dam fine-grained sediments to be used in cement industry as raw material for clinker production and as pozzolanic additional constituent of portland-composite cement*. Waste Biomass Valor 8, 2141–2163 (2017) - Antoine Faure, Agnès Smith, Coryse Coudray, Baptiste Anger, Horacio Colina, Isabelle Moulin & François Thery (<https://doi.org/10.1007/s12649-017-9870-8>)