

Les matériaux alternatifs, « en même temps »,... ... créent de la valeur environnementale et économique

Les co-produits issus des industries minérales proposent d'importants tonnages de matériaux utilisables, soit dans le domaine routier et des infrastructures, soit dans leur secteur industriel d'origine. Chaque journée technique d'Afoco fait le point sur les dernières propositions des professionnels. Les avantages techniques sont complétés par des volets économiques et environnementaux qui stimuleront la demande. Vive l'équivalent CO₂ !



© PG / R&V

Environ 140 personnes ont participé à la journée technique d'Afoco à l'automne 2019.



© PG / R&V

1. Vincent Cau, Climatmundi.

Chaque année, l'Afoco* organise une journée technique portant sur un thème d'actualité. Les intervenants témoignent des récentes avancées techniques dans leur entreprise ou leur secteur. Fin septembre 2019, une quinzaine d'orateurs se sont succédés dans un amphithéâtre de l'Institut Mines Telecom Lille Douai, à Villeneuve d'Ascq. Président d'Afoco, Michel Gitzhofer était déjà président des élèves ingénieurs à l'école des Mines de Douai. Il a insisté sur les « variantes

techniques et les prix compétitifs » que peuvent apporter les matériaux alternatifs. Directeur de l'IMT Lille Douai, Alain Schmitt a présenté l'Institut (voir encadré A, L'Institut Mines Telecom Lille Douai).

Empreinte carbone des laitiers sidérurgiques : positive

Vincent Cau, de Climatmundi, concluait la matinée avec la très innovante étude portant sur l'Empreinte carbone des laitiers d'aciérie

et LD utilisés comme granulats. Cette étude a été initiée et financée par Afoco. L'article commence avec le dernier exposé, mais c'est le plus novateur de tous. L'évolution actuelle conduit à mesurer les impacts CO₂ et sur le climat des matériaux et des travaux effectués avec ceux-ci. Ceci repose sur les flux de matières et sur les spécificités des sites. L'un des objectifs est de pouvoir établir des comparaisons avec les granulats naturels. Le périmètre retenu commence au moment où l'on dispose du laitier sur le site de



Michel Gitzhofer, président d'Afoco.

Alain Schmitt, directeur de l'IMT Lille Douai.

production jusqu'au moment où l'on charge le camion du client. Les acteurs produisent des granulats et des scraps. On note les prix de marché des granulats destinés aux couches de fondation (2 €/t), des scraps d'acier (190 €/t) et des scraps d'inox (800 €/t). Le calcul des émissions de gaz à effet de serre s'effectue à partir des facteurs d'émission de la Base carbone de l'Ademe.

Le site SGA de Dunkerque est intégré dans le site ArcelorMittal de Dunkerque. Il produit 650 000 t/an de granulats et 110 000 t/an de scraps d'acier. L'électricité est fournie

par le site où la centrale à cycle combiné DK6 brûle un mélange de méthane importé et de gaz sidérurgique. Ceci a un impact carbone de 215 g CO₂/kWh, plus du triple de l'électricité nationale. L'impact total en équivalent CO₂ est détaillé dans le camembert B, *Production de CO₂ à Dunkerque*. Ce qui donne une faible empreinte carbone de 0,17 kg éq CO₂/t de granulats produite.

Le site Harsco Environmental d'Ugine (Savoie) produit 97 000 t/an de granulats et 1 160 t/an de scraps d'inox. Spécificités, les volumes sont relativement faibles, mais la

valeur de l'inox récupéré est élevée. L'impact total en équivalent CO₂ est détaillé dans le camembert C, *Production de CO₂ à Ugine*. Ce qui donne une faible empreinte carbone de 0,76 kg éq CO₂/t de granulats produite.

Les émissions d'équivalent CO₂ pour les différents types de granulats sont données dans le graphique D, *Émissions de GES des granulats*. De plus, l'impact carbone de la tonne de granulats livrée prend 1 kg éq CO₂/t tous les 18 kilomètres. L'hypothèse est un semi-remorque transportant 20 t de granulats et consommant 37 l de gazole aux 100 kilomètres.

A. L'Institut Mines Telecom Lille Douai.

Directeur de l'IMT Lille Douai, Alain Schmitt a rappelé la récente fusion entre les deux écoles, Mines de Douai et Telecom de Lille, effectuée durant l'été 2018. L'un des objectifs de l'institut est de diplômer, chaque année, 500 ingénieurs et 30 à 40 doctorants. Les ingénieurs généralistes sont néanmoins spécialisés dans quatre univers :

- Sciences et technologies du numérique,
- Énergie et environnement,
- Matériaux et structures,
- Processus pour l'industrie et les services.

Cinq autres diplômes d'ingénieurs de spécialité sont accessibles par la voie de l'apprentissage :

- Génie civil et systèmes ferroviaires, sur le site InGHenia à Valenciennes ;
- Génie industriel, sur le site InGHenia à Valenciennes ;
- Génie énergétique, sur le site EuraÉnergie à Dunkerque ;
- Plasturgie et matériaux composites, sur le site ISPA d'Alençon ;
- Télécommunications et informatique, sur le site de Lille.

Cinq masters spécialisés sont accrédités par la Conférence des grandes écoles :

- Bâtiment à énergie positive,
- Ingénierie de la cybersécurité,
- Ingénierie de l'économie circulaire,
- Management des risques professionnels et technologiques,
- Produits et procédés de l'industrie du béton.

Enfin, Alain Schmitt mentionne la chaire *Ecosed* qui porte sur l'écologie circulaire des sédiments, qu'ils soient originaires des ports, des canaux, des rivières, des lacs ou des barrages.



2. Ludovic Burghgraeve, Cerema.



2. Sandrine Taquin, Cerema.

De façon courante, l'empreinte carbone d'une tonne de granulats est d'environ 1 kg éq CO₂/t, contre 55 kg éq CO₂/t pour les enrobés à modéré élevé et 100 kg éq CO₂/t pour le béton C25/30 réalisé à partir de ciment CEM I. Le choix des granulats (laitier, recyclé ou calcaire) a un impact carbone marginal pour les travaux de BTP, sauf pour les ouvrages exceptionnels comme les remblais et les volumes importants.

En conclusion, l'impact carbone des granulats issus des laitiers vaut entre 0,15 et 0,80 kg éq CO₂/t. Il est nécessaire d'effectuer une mesure sur une durée de cinq ans afin d'obtenir une valeur de référence et de pouvoir alimenter les éco-calculateurs. Ces valeurs sont fortement liées au gazole non routier utilisé. Globalement, les avantages concurrentiels portent sur l'économie circulaire, la préservation des ressources naturelles et de la biodiversité.

Labellisation des matériaux alternatifs

Ludovic Burghgraeve et Sandrine Taquin, pour le Cerema Hauts-de-France, font le point sur la *Démarche d'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs et la labellisation*.

La labellisation concerne trois scénarii :

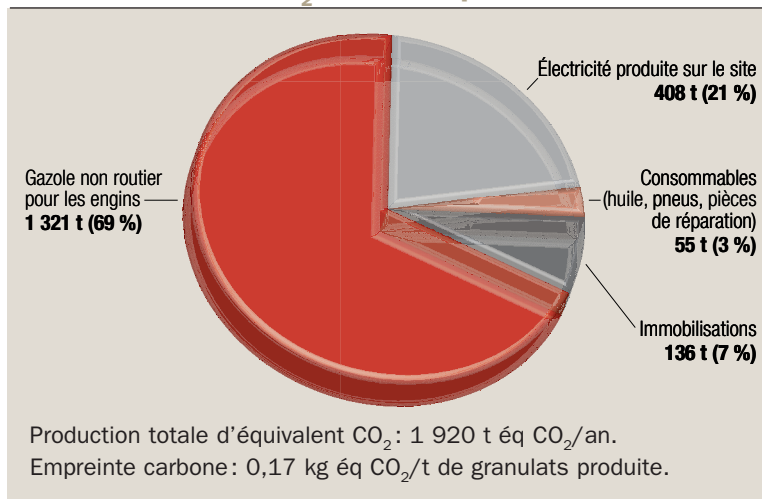
- les projets de construction, de réhabilitation ou d'entretien des infrastructures linéaires de transport (voies de stationnement ou aires de stationnement) et les ouvrages associés (merlons paysagers ou phoniques) ;
- la réalisation de projets d'aménagements ou d'opérations de construction qui font l'objet d'une procédure d'autorisation d'urbanisme ;
- le comblement de cavités souterraines pouvant être d'origine anthropique ou naturelle.

La labellisation est une démarche



3. Axel Dhondt, Routes de France.

B. Production de CO₂ à Dunkerque.



nationale portée par le ministère de la Transition écologique et solidaire. Le label est décerné sur des engagements de la maîtrise d'ouvrage en amont d'un projet et il est confirmé en fin d'opération. Le label porte sur deux volets :

- la valorisation de déchets non dangereux minéraux utilisés comme matériaux alternatifs sur un site receveur, et
 - la gestion des déchets de conception générés sur ce site receveur.
- Charte d'engagement, le label est un référentiel d'excellence pour les acteurs engagés dans une démarche vertueuse d'utilisation des ressources minérales, et il garantit la qualité environnementale des matériaux alternatifs valorisés.

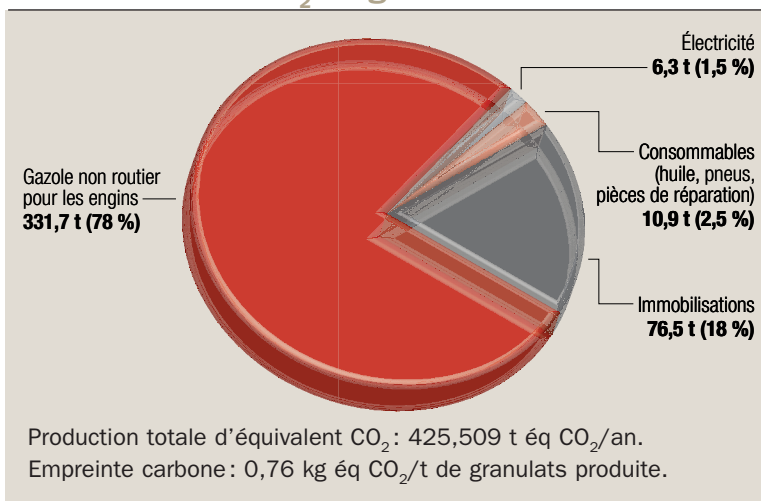
Seve évalue les variantes environnementales

Axel Dhondt intervient pour le syndicat des entreprises routières Routes de France à propos de *Seve*, le *Système d'évaluation des variantes environnementales*. Les variantes environnementales s'inscrivent dans le cadre réglementaire du Grenelle de l'environnement, de la directive européenne 2014/14/UE du 26 février 2014 qui concerne le coût du cycle de vie, de la loi relative à la Transition énergétique pour la croissance verte, et du Code de la commande publique entré en vigueur en avril 2019.

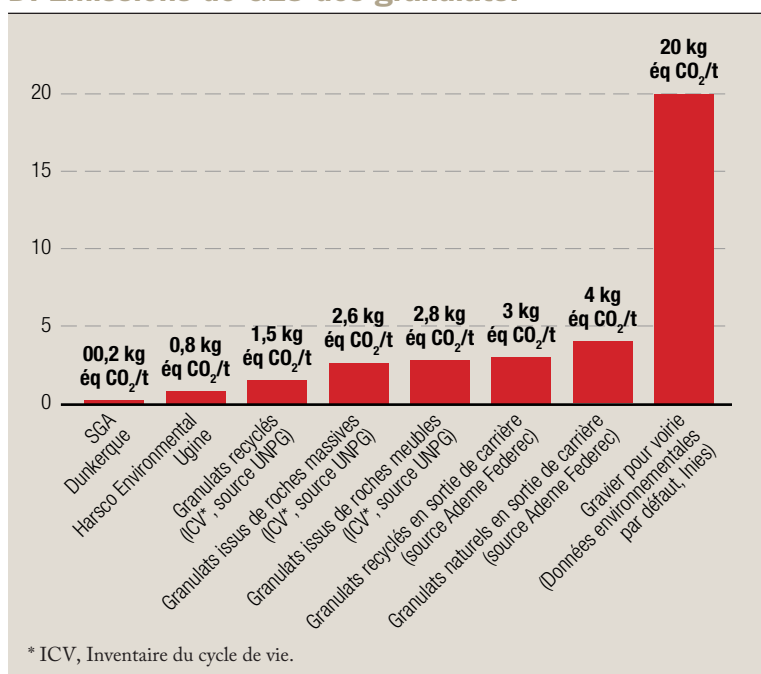
De plus, la profession, par ses syndicats, a signé une Convention d'engagement volontaire avec plus de 60 collectivités territoriales. Elle est également engagée auprès du ministère à l'horizon 2020 pour réduire de 33 % les émissions de gaz à effet de serre en généralisant les enrobés tièdes, en réduisant les émissions de GES dans les centrales d'enrobage et en utilisant plus souvent les techniques d'émulsion de bitume pour des solutions d'entretien. Les tonnages d'enrobés tièdes avoisinent 4 Mt pour les années 2014 à 2017. Les émissions de GES ont baissé de 31 % entre 2009 et 2017 dans les centrales d'enrobage. La profession est également engagée pour réemployer ou valoriser les matériaux géologiques naturels excavés, en particulier les enrobés bitumineux.

Seve permet de comparer de façon quantitative différents scénarii pour un projet de rénovation routière. Ce système compte l'énergie consommée lors de l'ouvrage, mais ne comprend pas l'énergie nécessaire à la production de la matière. Il comprend les matériaux mis en œuvre, les opérations et tous les transports, et convertit les émissions de méthane et d'oxydes d'azote en équivalent gaz carbonique. Il tient compte de la préservation du réseau routier. *Seve* compare aussi de façon déclarative la gestion de l'eau et la

C. Production de CO₂ à Ugine.



D. Émissions de GES des granulats.



biodiversité liées au chantier. Ainsi, il est possible de comparer la solution choisie initialement dans le Cahier des clauses techniques particulières et la variante proposée par l'entreprise.

Seve contourne Cantin

Julien Waligora, pour Eiffage, aborde l'*Application de l'éco-comparateur Seve aux chantiers routiers* grâce à l'exemple du contournement de Cantin (au sud de Douai, Nord). Des mâchefers d'incinération et des laitiers sidérurgiques ont été utilisés sur ce chantier réalisé en 2010. Il s'agissait de créer une chaussée de

deux fois deux voies, longue de 3,5 km et comprenant trois giratoires et un ouvrage d'art. Le trafic journalier était estimé à 20 000 véhicules dont 5 % de poids lourds. Les critères de notation du chantier étaient composés à 40 % du prix et à 60 % de la technique dont 30 % (la moitié) dédié au développement durable. Julien Waligora regrette que les appels d'offre actuels favorisent beaucoup plus le prix (60 à 70 %), au détriment de la technique (20 à 30 %) et plus encore du développement durable (10 %). La solution retenue (variante 1) a consisté à mettre en œuvre :

- une couche de forme en mâchefer, 40 000 m³ sur une épaisseur de 50 cm ;
- une couche de GLCV (grave de laitier, cendres volantes et chaux) comprenant 25 000 t de bétons recyclés, sur une épaisseur de 18 cm ;
- une couche de grave traitée au liant routier *Sidmix*, soit 25 000 t sur une épaisseur de 18 cm ;
- une couche de béton bitumineux d'une épaisseur de 8 cm ;
- une couche de béton bitumineux absorbant sur le plan acoustique *microphone*, d'une épaisseur de 2,5 cm.

La variante retenue a économisé 29,5 % d'émissions de gaz à effet de serre, sur les postes terrassement et chaussée. L'entretien sur 30 ans coûte un peu plus cher : 52,81 €/ml de voie au lieu de 52,54 €/ml avec la solution de base. Le logiciel *Seve* facilite le recours aux solutions techniques bas carbone et le recours aux matériaux alternatifs.

Les cendres volantes en terfil

Loïc Danest, directeur technique de Surschiste, rappelle à notre bon souvenir *les cendres volantes de terfil*. Deux centrales thermiques au charbon, situées à Saint-Avold (Moselle) et à Gardanne (Bouches-du-Rhône), seront fermées en 2022. Deux sécheurs historiques sont situés à Carling, près de Saint-Avold, et à Hornaing (Nord). Six terfils de cendres, gérés par Surschiste, cumulent 6 Mt. Les importations de cendres représentent environ 150 000 t/an.

Les travaux du Grand Paris Express ont fait croître la production du sécheur d'Hornaing à 190 000 t en 2018. Le sécheur de Carling a une capacité de production de 120 000 t/an.

Une étude a été menée sur les terfils afin de comparer les qualités des cendres, y compris en se projetant après séchage. Plus globale-



4. Julien Waligora, Eiffage.



5. Loïc Danest, Surschiste.

ment, la certification européenne EN 450 EVCP 1+ vise à garantir les qualités des cendres volantes produites.

Pour rappel, les cendres volantes, utilisées en addition de type II dans les bétons, apportent plusieurs avantages :

- une réaction pouzzolanique qui augmente la résistance et la durabilité ;
- une amélioration de la maniabilité des bétons frais ;
- la réduction de la demande en eau, donc de la perméabilité ;
- l'augmentation de la résistance aux agressions sulfatiques et la réduction des risques liés à l'alcali-réaction ;
- la réduction de la chaleur d'hydratation des bétons ;
- la contribution à la réduction de l'impact environnemental des bétons ;
- la production et la livraison conformément à la norme européenne harmonisée EN 450.



6. Patrick Dessauvages, RMN-Préfermord.

Valoriser les mâchefers

Christophe Marcilly, directeur de Recco, rappelle *les nombreux domaines de valorisation des mâchefers* issus des déchets non dangereux. Recco est un constructeur et un fournisseur d'installations clés en main pour le traitement des mâchefers d'incinération des déchets non dangereux. Il est également opérateur d'installations en Allemagne pour 350 000 t/an et aux Pays-Bas pour 200 000 t/an.

En France, 122 UVE (Unités de valorisation énergétique) traitent chaque année 14,5 Mt de déchets non dangereux, principalement d'origine ménagère. Le résultat de l'incinération produit environ 3 Mt de mâchefers. La maturation et la préparation des mâchefers dans 75 installations produit 2 Mt de graves criblées 0/20 et 0/31,5. Les métaux (1 %, environ 30 000 t) et les imbrûlés (2 %, environ 60 000 t) en sont retirés. Ces graves ont une

densité moindre que les matériaux naturels avec 1,5. Un guide Setra, publié en octobre 2012, encadre leur utilisation.

Christophe Marcilly cite l'utilisation de 110 000 t de grave 0/31,5 issue des mâchefers, pour la couche de forme de la déviation d'Armentières (Nord), sur une épaisseur de 40 cm. L'incorporation de *Sidmix* aux graves a permis de réduire l'épaisseur de la couche à 30 cm. La moitié des graves obtenues est utilisée pour fabriquer des éléments autobloquants de construction d'alvéoles de stockage.

Les schistes houillers aux usages diversifiés

Laurent Froehlich, de Solodet (Société lorraine d'exploitation de terrils), intervient à propos *des schistes houillers*, dans l'est du département de la Moselle.

Un avantage mineur de l'utilisation de ces schistes houillers est d'éviter les incendies des terrils. Ce phénomène "naturel" rare se produit pour des volumes supérieurs à 100 000 m³, une quantité de charbon supérieure à 15 %, une alimentation en oxygène et un élément déclencheur. Conséquence positive après un incendie, les qualités mécaniques des schistes augmentent.

Dans les années 80 et 90, l'important programme routier en Lorraine, et notamment à l'est du département de la Moselle, entraîne le recours aux schistes houillers. Le matériau a été utilisé pour les remblais, puis pour la couche de forme, et même pour la couche de base. Récemment, quelques chantiers importants ont été réalisés avec du schiste noir tout-venant :

- 200 000 t pour la phase 2 de la LGV Est ;
- 180 000 t pour le remblaiement du bassin 7 de l'usine Arkema de Saint-Avold ;
- 100 000 t pour le remblai de la côte des Quatre Vents sur la route

départementale 910 en Moselle, et sur une hauteur de 16 m ;

- 50 000 t pour le nouveau centre logistique de Viessmann à Faulquemont (Moselle).

Du schiste noir 100/250 a été utilisé comme matériau de poinçonnement ou en amélioration d'arase. Des schistes noirs « *formo* » 20/125 et 20/60 ont été utilisés comme couche de forme pour des chaussées et des plateformes industrielles. Par exemple, 720 000 t pour la phase 2 de la LGV Est.

Du schiste noir 6/22,4 a lui été utilisé en remblaiement de tranchée, notamment pour des remblais contigus à des ouvrages, ou encore au contact de tout matériau inerte ou de béton.

Des alphaschistes 0/3 sont utilisés pour des terrains de football sans herbe et des pistes d'athlétisme.

Enfin, les schistes rouges sont employés pour de l'aménagement paysager, des allées piétonnes ou des terrains de boules.

Recycler les déchets réfractaires dangereux au chrome : Wool

Bruno Dorier, directeur du marketing de Valoref, présente *Wool*, un premier pas concret vers le recyclage des déchets réfractaires dangereux au chrome. Valoref fait partie du groupe Saint-Gobain et dispose de trente années d'expérience. Les deux sites industriels de Bollène (Vaucluse) traitent 35 000 t/an de réfractaires verriers, pour un chiffre d'affaires annuel de 7,5 M€.

Le nouveau programme de recyclage de Valoref porte sur les réfractaires à base de chrome, de zircon et d'alumine. Ces réfractaires sont utilisés pour la fabrication de laine de verre parce qu'ils résistent à la corrosion de ce type de verre. Différents types de réfractaires, comprenant des taux de chrome différents, tapissent les parois du four. La durée de vie d'un four est de sept ans. Une fois allumé, un four fonctionne



6. Christophe Marcilly, Recco.



7. Laurent Froehlich, Solodet.

de façon continue. À son arrêt, tous les réfractaires sont démontés de façon sélective.

Les réfractaires à base de chrome, lorsqu'ils sont en contact avec une matière alcaline, développent des composants solubles de chrome hexavalent qui se trouvent dans cet état d'oxydation dans les dichromates de calcium ou de potassium, par exemple. Ce chrome hexavalent existe en phases gazeuse, liquide ou solide. La forme solide se remarque par des traces jaune/orange caractéristiques.

Le chrome hexavalent Cr VI est classé CMR comme cancérigène, mutagène et toxique pour la reproduction. Au contraire, le Cr III est inoffensif et le chrome Cr, qui se retrouve dans beaucoup d'alliages inoxydables, est de qualité alimentaire.

Le producteur de verre qui utilise ce type de réfractaire est responsable des réfractaires usagés jusqu'à leur fin de vie. Considéré comme producteur de déchet, il en confie la gestion à un spécialiste qui assure la bonne orientation. Le taux de recyclage est maximal avec des exutoires conformes à la législation, ce qui génère une économie pour le producteur de laine de verre.

Les réfractaires contenant du chrome VI sont traités par de l'acide ascorbique qui transforme celui-ci en chrome III. Le programme *Wool* révolutionne le recyclage pratiqué :

- le taux de réintroduction des réfractaires verriers s'élève à 50 %, contre 10 % avec le procédé précédent ;
- la recette de fabrication des réfractaires se base sur la matière recyclée à laquelle on ajoute des ingrédients, ce qui n'était pas le schéma précédent ;
- les performances du produit fini sont meilleures que celles du produit fabriqué à partir de matières vierges ;
- et enfin, la gestion de fin de vie du produit s'opère dès sa conception.

Laitiers sidérurgiques et enrochements

Pascal Leconte, du CTPL, Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques, traite des *enrochements pour tous les usages*. Les enrochements maritimes et fluviaux sont les applications les moins connues des laitiers sidérurgiques. Les enrochements sont des matériaux de construction : voir encadré E. Pascal Leconte évalue l'opportunité de toucher de nouveaux marchés.

Les digues fluviales cumulent une longueur de 8 000 km et les digues maritimes 500 km. Le marché d'enrochement des digues représenterait 30 à 33 Mt/an. Par comparaison, le marché total des granulats est estimé, en France, à 435 Mt dont 314 Mt de roches naturelles (source UNPG, 2019).

Selon le rapport 2011 du Cepri, Centre européen de prévention du risque d'inondation, 17 millions de résidents et 9 millions d'emplois sont exposés au risque d'inondation. Rappelons Nîmes en 1988, Vaison-la-Romaine en 1992 ou La Faute-sur-Mer en 2010. Les dommages annuels représentent 1 à 1,4 Md€, mais la gestion de crise peut atteindre 5,7 Md€ sur une année. Les travaux nécessaires pour placer la population à l'abri porteraient sur 200 km en moyenne annuelle, pendant une durée de 15 à 25 ans. Les roches utilisables doivent présenter des caractéristiques géométriques, physiques, chimiques



8. Réfractaires verriers avant tout traitement, arrivant sur le site Valoref de Bollène.

et, surtout, de durabilité. Les essais d'absorption d'eau tiennent compte du sel de l'eau de mer et des cycles de gel et de dégel.

La conformité à une norme française est remplacée par la notion européenne de performance par rapport à un marché. En conséquence, le marché définit les performances souhaitées. Certaines sociétés, comme la Compagnie nationale du Rhône, la SNCF, etc., disposent de référentiels internes. Les enrochements répondent à deux classifications :

- l'une par taille, de 45/125 mm à 90/180 mm, et qui concerne les laitiers ;
- l'autre par la masse avec les enrochements légers ou moyens, de 5/40 à 15/300 kg, et des enrochements lourds, de 300/1 000 kg à entre 10 et 15 t.

Les caractéristiques techniques des laitiers sont comparables à celles des roches naturelles. Pour la ré-



8. Bruno Dorier, Valoref.



9. Pascal Leconte, CTPL, Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques.

E. Les enrochements, des matériaux de construction.

Selon le Règlement européen des produits de construction, les enrochements sont des matériaux de construction avec trois éléments :

- un marquage CE par une attestation de niveau 4 ou 2+ ;
- une norme harmonisée NF EN 13 383-1 d'août 2003 ;
- et, dans le contexte français, la norme NP P 18-545, article 14.

Les enrochements au sens de la présente norme sont des matériaux granulaires utilisés dans les ouvrages hydrauliques et autres ouvrages de génie civil.

Les matériaux rocheux utilisés dans d'autres contextes sont parfois appelés « blocs » et ne font pas l'objet d'un marquage CE.

La révision de la norme NF EN 13 383-1 prévoit une extension du domaine d'application aux ouvrages de génie civil terrestres, maritimes et fluviaux avec le marquage CE associé.



© PG / R&V

10. Guillaume Martin, LME-Beltrame Group.

sistance à la rupture, les laitiers se classent Rc 60. Pour la résistance à l'usure, essai Micro Deval, les laitiers sont majoritairement MDE 10 et MDE 20. Le coefficient d'absorption d'eau se situe en dessous de 0,5 %. Les caractéristiques chimiques portent sur plusieurs thèmes :

- le relargage de substances solubles dans l'eau, le pH et la conductivité électrique, c'est la norme NF EN 1744-3 ;
- la désintégration du silicate bicalcique et du fer pour les LHFc (laitiers de haut fourneau cristallisés), il s'agit de la norme NF EN 1744-1, articles 19.1 et 19.2 ;
- la désintégration des laitiers d'aciérie, avec un protocole différent, il s'agit de la norme NF EN 13 383-2.

Deux guides différents édités par le Setra en octobre 2012 et par le Cetmef en novembre 2012 (*Utilisation des laitiers sidérurgiques dans les ouvrages maritimes et fluviaux*) encadrent l'utilisation des laitiers sidérurgiques, l'un dans l'univers routier, le second dans l'univers maritime et fluvial.

Les laitiers de poche dans les travaux publics

Guillaume Martin, LME-Beltrame Group, développe une utilisation innovante des laitiers de poche dans le domaine des travaux publics. LME, comme Laminés marchands européens, fabrique des produits en acier longs au carbone, dans la ville de Trith-Saint-Léger, près de Valenciennes. LME fait partie de Beltrame Group. Le site réunit une aciérie électrique (recyclage) d'une capacité de 800 000 t/an et deux laminoirs à chaud d'une capacité de 630 000 t/an.

Deux types de laitiers sont produits : 70 000 t/an depuis le four électrique (LAFE) et 20 000 t/an par l'affinage (laitier de poche). Ces laitiers sont

valorisés en technique routière et en sous-couche de plateforme.

Depuis 2012, la politique environnementale se traduit par les systèmes de management certifiés ISO 14001 pour l'environnement et ISO 50001 pour l'énergie. La valorisation des déchets est un objectif pour 2020, par le *AWaRe Project*, comme All Waste Recovered. L'amélioration de la gestion des eaux pour l'aciérie et les laminoirs est un projet de 3,5 M€ qui se déroule de 2018 à 2021. Les eaux pluviales seront récupérées dans une fosse de relevage qui les enverra dans un bassin de rétention de 3 000 m³. Après un traitement physico-chimique, ces eaux seront rejetées dans l'Escaut. Les eaux utiles pour le process ont été prélevées dans ce fleuve qui aboutit à Anvers.

Le laitier de poche produit par le site sera utilisé pour ériger les digues périphériques du bassin de rétention. 8 000 tonnes sont utilisées, ce qui dispense de recourir à des matériaux extérieurs. Le bassin est rendu étanche par des bâches d'étanchéité. Son débit d'alimentation maximal est de 3 600 m³/h. Fini en octobre 2019, cet exemple en grandeur réelle est une bonne démonstration d'utilisation des laitiers de poche.

Chromic : métaux récupérés à partir de laitiers sidérurgiques

Kathy Bru, ingénieur procédés et chef de projets au BRGM, synthétise le projet européen *Chromic : récupération des métaux à partir de laitiers sidérurgiques*. L'intérêt de *Chromic* consiste à récupérer les métaux (chrome, ferro-chrome, molybdène, niobium et vanadium) en conservant l'intégrité de la matrice minérale. La première partie du traitement est un broyage de la matière qui facilite la récupération des particules métalliques. On obtient une première matrice de minéraux

utilisables en matériaux de construction. Après une lixiviation sélective, on récupère une seconde fois des métaux et une seconde matrice de minéraux.

Quatre échantillons de laitiers ont été étudiés :

- des laitiers d'aciérie électrique au carbone (CS),
- des laitiers d'acier inox (SS),
- des laitiers ferrochrome (FeCr) à faible teneur en carbone (LC), et
- des laitiers ferrochrome (FeCr) à haute teneur en carbone (HC).

La teneur en chrome des laitiers est de 2 à 3 % pour les CS et SS, de 3 à 4 % pour les LC FeCr et de 10 à 16 % pour les HC FeCr.

Les étapes de traitement comparent les techniques connues et des techniques innovantes. Les préparations minéralurgiques de la matière utilisent le broyage conventionnel, la fragilisation par l'utilisation de microondes et la fragmentation par champ électrique pulsé. Elles utilisent aussi les séparations magnétique, gravimétrique et électrostatique, ainsi que la flottation.

Plusieurs lixiviations sont comparées : la lixiviation assistée par microondes, ondes radio ou ultrasons ; le grillage traditionnel suivi d'une lixiviation à l'eau, comparés au grillage sous microondes suivi d'une lixiviation à l'eau ; la lixiviation en tas. Enfin, la récupération des métaux en solution utilise la précipitation sélective, l'absorption, l'extraction par solvant et l'électrocoagulation. Ces techniques s'imposent parce que 50 % des phases porteuses de chrome ont une taille comprise entre 20 et 30 microns...

Une seconde étape du projet consiste à sélectionner le procédé de traitement optimal pour chaque type de laitier. Il convient de considérer les performances techniques, environnementales et économiques, l'analyse des risques (santé et sécurité, et les voies de valorisation de la matrice résiduelle.



© PG / R&V

11. Kathy Bru, BRGM.

Laitiers inox en technique routière

Yves Hanoteau, du CRR, Centre de recherches routières (Bruxelles) traite de la *Valorisation des scories inox en technique routière*. Il note que le vocabulaire wallon diffère du vocabulaire hexagonal, les scories belges devenant des laitiers français. Deux aciéries inox sont actives en Belgique, l'une en Flandre et l'autre en Wallonie. Il faut également rappeler que trois réglementations routières s'appliquent : Standaardbestek SB 250 en Flandre, Qualiroutes en Wallonie et une troisième pour la région de Bruxelles, avec des approches différentes.

Conclusion de l'étude menée, la « *démétallisation* » des laitiers d'aciérie inox produit différentes fractions granulaires, des fillers aux sables et aux granulats. Les résultats obtenus dans les tests indiquent une bonne conformité par rapport aux spécifications techniques exigées dans les différentes régions belges et à la législation environnementale wallonne. La valorisation des granulats, sables et fillers des laitiers d'aciérie inox a été étudiée avec trois finalités :

- les bétons routiers, béton de revêtement ou bétons linéaires de glissières coulées en place ;
- le sable-ciment pour les couches de base ;
- les enrobés, ou revêtements hydrocarbonés en wallon.

Première finalité, un béton utilisant exclusivement des **granulats** 0/14 a été réalisé pour constituer le revêtement de la chaussée sur l'autoroute A8, à proximité de Tournai. Ce test s'applique à la sortie de la station-service et sur une longueur supérieure à 300 m. Le béton est dosé à 400 kg/m³ de CEM III/A 42,5, avec un facteur E/C maximal de 0,45 et un entraîneur d'air. Différentes mesures

ont été effectuées afin d'apprécier les qualités du béton réalisé :

- résistance à la compression de 63 à 79 MPa pour une exigence Qualiroutes de 50 MPa, selon la norme NBN EN 12390-3 ;
- absorption d'eau par immersion de 6,2 % en moyenne pour une exigence Qualiroutes de <6,8 % ;
- résistance au gel avec sels de déverglaçage ; la perte de matière constatée varie de 0,45 à 4,85 g/dm² pour une exigence Qualiroutes de <5 g/dm² ;
- diverses mesures de glissance, prises selon les deux méthodes Odiographe et Scrim, montrent de très bonnes valeurs ;
- différentes carottes ont servi à mesurer la lixiviation qui montre des valeurs conformes pour tous les métaux.

Les bétons réalisés pour les glissières de sécurité n'ont pas posé de difficulté, tant pour protéger les torons en acier galvanisé que pour l'efficacité des crash tests, le béton de laitier d'aciérie inox étant plus lourd que le béton fabriqué avec des granulats naturels.

Deuxième finalité, des **sables** de calibre 0/0,5 mm et 0,5/2 mm ont été employés pour constituer des couches de fondation, les gros granulats étant issus du recyclage de béton et de briques. La première méthode a pris la forme de planches d'essai en traitement de sol, à Farcienne près de Charleroi. La seconde méthode a utilisé les sables dans une centrale à béton. Pour certaines recettes, une partie du ciment a été remplacée par le filler produit dans le processus de retrait des métaux dans les laitiers. Les couches de cure comprenaient des granulats 4/6 qui facilitaient la circulation ultérieure des engins. Résultats, de manière générale, les résistances à la compression sont bonnes dans toutes les régions. Par contre, pour la Wallonie, le critère de portance n'est pas atteint.

Les bétons obtenus sont plus difficiles à compacter. Maigres, avec des teneurs en ciment de 2,5, 5 et 7 %, ce sont néanmoins des bétons à hautes performances.

Troisième finalité, des **fillers** sont testés dans des enrobés, en couche de roulement et en sous-couche. Dans la Flandre, la réglementation donne des objectifs de résultat. En Wallonie, la réglementation porte sur les recettes et les mélanges. Les enrobés ont été mis en œuvre à l'entrée du port fluvial de Charleroi où le trafic routier est intense.

PG / R&V

* Association française des opérateurs sur co-produits industriels, membre d'Euroslag.



12. Yves Hanoteau, CRR, Centre de recherches routières (Bruxelles).

Programme de la journée.

Thème :

Créer de la valeur économique et environnementale ?
Les matériaux alternatifs, bien sûr !

Interventions :

- **Démarche d'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs et labellisation**, par Ludovic Burghgraeve et Sandrine Taquin, Cerema.
- **Seve : Système d'évaluation des variantes environnementales**, par Axel Dhondt, Routes de France.
- **Application de l'éco-comparateur Seve aux chantiers routiers**, par Julien Waligora, Eiffage.
- **Les cendres volantes de terril**, par Loïc Danest, Surschiste.
- **Les nombreux domaines de valorisation des mâchefers**, par Christophe Marcilly, Recco et Patrick Dessauvages, RMN-PréferNord.
- **Les schistes houillers**, par Laurent Froehlich, Solodet.
- **Wool : premier pas concret vers le recyclage des déchets réfractaires dangereux au chrome**, par Bruno Dorier, Valoref.
- **Laitiers sidérurgiques : des enrochements pour tous les usages**, par Pascal Leconte, CTPL, Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques.
- **Une utilisation innovante des laitiers de poche dans le domaine des travaux publics**, par Guillaume Martin, LME-Beltrame Group.
- **Chromic : récupération des métaux à partir de laitiers sidérurgiques**, par Kathy Bru, BRGM.
- **Valorisation des scories inox en technique routière**, par Yves Hanoteau, CRR, Centre de recherches routières (Bruxelles).
- **Empreinte carbone des laitiers d'aciérie et LD utilisés comme granulats**, par Vincent Cau, Climatmundi.