

Laitier de haut-fourneau



©Shutterstock

Depuis plus de 150 ans, le laitier granulé de haut-fourneau est utilisé comme constituant dans la fabrication de ciment. En Belgique, les « ciments de haut-fourneau » ou CEM III sont les plus utilisés pour le béton prêt-à-l'emploi et ont contribué à rendre l'empreinte carbone du secteur parmi les plus faibles au monde. Or, la disponibilité de laitier est limitée par la production d'acier en haut-fourneau et la transition du secteur sidérurgique vers la neutralité carbone entraînera une diminution significative de cette disponibilité. Les cimentiers sont donc en train de développer des alternatives.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est un matériau minéral finement moulu qui, au contact de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation.

En Europe, les différents types de ciments courants pour les bétons sont décrits dans les normes EN 197-1, 197-5 et 197-6.

Le ciment, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, permet de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long, pour atteindre des niveaux de résistance mécanique endéans certains délais et présenter une résistance à long terme aux attaques chimiques et physiques.

Les ciments sont fabriqués en broyant finement un certain nombre de constituants, répondant à des spécifications précisées également dans les normes EN 197-1, -5 et -6.

Le principal constituant des ciments courants est le clinker Portland, symbolisé par la lettre K. Il est le résultat de la calcination à 1.450 °C d'un mélange fixé avec précision de carbonate de calcium (CaCO_3), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

Lors de la calcination, vers 850 °C, le carbonate de calcium subit une réaction chimique de décarbonatation et se décompose en oxyde de calcium et en dioxyde de carbone. L'émission de ce CO_2 « inévitable », dit CO_2 de process est la principale source de l'empreinte carbone du clinker et donc du ciment.

Le ciment Portland est constitué entre 95 et 100 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants dits secondaires. Enfin, du sulfate de calcium (CaSO₄) est ajouté à ces constituants du ciment en petites quantités (+/- 5%) pendant le processus de fabrication afin de réguler la prise du ciment.

Une série de matières, pour la plupart des sous-produits issus d'autres industries, peuvent être ajoutées au ciment en substitution du clinker. Ces constituants appelés en anglais « supplementary cementitious materials » ou SCM permettent donc de réduire la teneur en clinker (appelée également facteur clinker) du ciment et donc de diminuer son empreinte environnementale tout en favorisant la symbiose industrielle et l'économie circulaire.

Les normes décrivent les types de constituants aptes à la fabrication du ciment ainsi que leurs spécifications. On trouve ainsi :

- Les pouzzolanes naturelles (P), elles sont d'origine volcanique et on les retrouve principalement dans les pays du sud de l'Europe ; elles ne sont pas présentes en Belgique.
- Les pouzzolanes naturelles calcinées (Q), ce sont des argiles activées thermiquement. Certains ciments utilisant ces argiles sont disponibles en Belgique et le projet de recherche NEOCEM I vise à démontrer la durabilité des ciments contenant des argiles calcinées pour les introduire dans la NBN B 15-001 (annexe belge de la NBN EN 206, la norme européenne de spécification du béton prêt-à-l'emploi).

- Les cendres volantes (siliceuses V ou calciques W), elles, sont un déchet issu des centrales thermiques au charbon ; les objectifs de décarbonation de la production électrique entraîneront à court terme leur disparition en Europe.

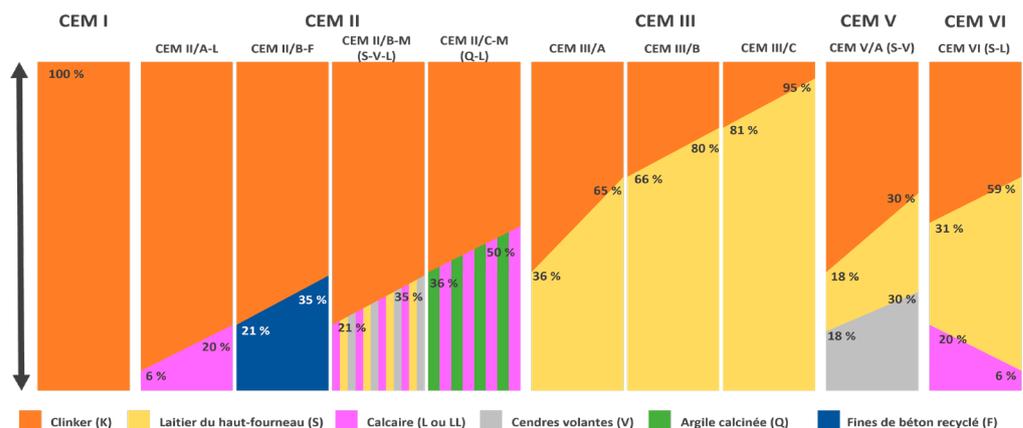
- Le laitier granulé de haut-fourneau (S), lui, est le sous-produit de la fabrication de la fonte en haut-fourneau. Il possède des propriétés hydrauliques dites latentes, cela signifie qu'il a besoin d'être dans un milieu alcalin pour que son hydraulicité soit activée.

- Les calcaires (L, LL), qui sont constitués à minima de 75 % de CaCO₃, n'ont pas de propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques mais ont un impact positif sur les propriétés du ciment.

- La fraction fine des bétons recyclés (F), elle, est issue de la séparation et du criblage de déchets de démolition ; à l'instar des argiles calcinées, le projet NEOCEM II vise à démontrer la durabilité des ciments contenant ces fines.

Les constituants ainsi que leurs pourcentages sont la base d'une nomenclature qui définit chaque type de ciments selon six familles dont quelques exemples sont présentés dans la figure ci-dessous. Les CEM IV sont les ciments aux pouzzolanes naturelles et ne sont pas disponibles en Belgique. Les CEM II/B-F et les CEM II/C-M (Q-L) pour béton ne sont pas encore produits en Belgique tant qu'ils ne sont pas reconnus dans la NBN B 15-001 comme aptes à leur application dans les différents environnements rencontrés en Belgique.

Exemples de ciments courants



Parmi ces constituants, le laitier de haut-fourneau occupe une place particulière. Sa première utilisation commerciale remonte à plus de 150 ans, en 1865, lorsqu'un ciment à base de laitier de chaux a été produit commercialement en Allemagne. En 1901, il était utilisé dans le ciment Portland pour fabriquer le « Eisenportlandzement » avec une teneur maximale de 30 % en laitier, suivi en 1907 par le « Hochofenzement » avec une teneur en laitier allant jusqu'à 85 %.

En Belgique, les premiers « ciments de haut-fourneau » apparaissent dès le début des années 1920 et leur utilisation se généralise à partir des années 1950. Les CEM III sont aujourd'hui les ciments les plus utilisés pour le béton prêt-à-l'emploi. Les avantages du CEM III sont principalement une faible chaleur d'hydratation, utile pour prévenir la formation de fissures pour les ouvrages massifs, et en général une bonne résistance aux attaques chimiques extérieures. De plus, son faible taux de clinker lui assure une empreinte carbone pratiquement imbattable. C'est un peu le ciment « tout terrain ».

Pour être complet, la NBN EN 206 complétée par son annexe nationale belge la NBN B 15-001 autorisent sous certaines conditions l'utilisation de laitier de haut-fourneau granulé moulu (LMA, laitier moulu agréé) comme addition de type II dans la fabrication du béton.

Le laitier, c'est quoi ?

Le laitier de haut-fourneau est le sous-produit de la fabrication de la fonte dans un haut-fourneau sidérurgique. La première étape dans la fabrication de l'acier à partir de minerai de fer est l'obtention de fonte. Le minerai de fer se présente principalement sous forme d'oxyde (Fe_2O_3), il est combiné à du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur et du calcaire comme fondant. Ces matières

alimentent un haut-fourneau, sorte de grand four vertical qui fonctionne à contre-courant : les gaz montent alors que la matière solide descend. Le principe du haut-fourneau consiste essentiellement à créer du monoxyde de carbone, dont l'affinité pour l'oxygène du minerai est plus forte que l'affinité entre oxygène et fer, pour désoxyder le minerai.

Les oxydes de fer se réduisent ainsi en descendant suivant la séquence suivante :

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$
hématite → magnétite → wustite → fer

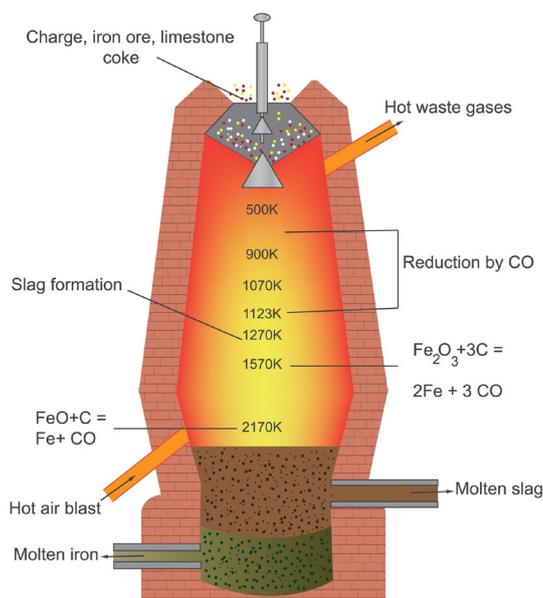


Schéma d'un haut-fourneau sidérurgique

Ce processus fonctionne en continu, la colonne de matières brutes descendant au fur et à mesure que le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut-fourneau sous forme de fonte, recouverte par une couche de laitier environ trois fois plus léger. Ce laitier est une roche liquide (1500 °C environ) composée des parties non métalliques du minerai combinées à la chaux. La fonte et le laitier, tous deux en fusion, sont périodiquement soutirés du haut-fourneau. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 kg de laitier.

Lors du soutirage, le laitier est dirigé vers un dispositif dans lequel il va subir un arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) destiné à le vitrifier. L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément du laitier vitrifié. Ce dispositif s'appelle un granulater et le laitier est appelé laitier vitrifié ou plus généralement laitier granulé.

Le laitier se présente sous forme de sable de couleur jaune/beige avec une granulométrie de l'ordre de 0/8 millimètres. Les principaux composants chimiques de ces laitiers sont la chaux (CaO , 40 % environ), la silice (SiO_2 , 35 % environ), l'alumine (Al_2O_3 , 11 % environ) et la magnésie (MgO , 8 % environ).

Une variante consiste à refroidir le laitier à l'air et le laisser cristalliser sous forme de roche. Après le début de la solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. On obtient ainsi du laitier cristallisé brut, qui peut alors être concassé et criblé pour produire des granulats. Contrairement au laitier granulé, le laitier cristallisé n'a pas de propriété hydraulique.

Il existe également d'autres types de laitiers, notamment le laitier de convertisseur : la fonte en fusion obtenue en sortie de haut-fourneau, très riche en carbone, est trop fragile et passe en général par un convertisseur (Basic Oxygen

Furnace) alimenté également avec des ferrailles et de la chaux et/ou de la dolomie. En sortie, chaque tonne d'acier, génère environ 100 kg d'un laitier qui est refroidi à l'eau. Très dense et résistant à l'abrasion, il est principalement utilisé comme granulater pour les enrobés.

La production d'acier en aciérie électrique (Electric Arc Furnace), la production d'acier inoxydable voire encore la production de cuivre ou d'aluminium génèrent également des laitiers avec différents types de compositions chimiques. Bien qu'ils aient certaines propriétés hydrauliques, leur composition chimique, leur dureté et leur variabilité chimique n'ont pas permis de généraliser leur utilisation dans la production de ciments.

Décarbonation de l'industrie sidérurgique

L'industrie sidérurgique est responsable d'environ 7 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. Ces émissions proviennent à la fois de l'utilisation de combustibles fossiles comme le charbon mais également des procédés mis en œuvre, notamment la réduction chimique du minerai de fer.

La décarbonation de l'industrie sidérurgique est donc absolument essentielle pour atteindre les objectifs globaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Voici plusieurs leviers clés qui sont mis en œuvre pour y parvenir :

1. Electrification du processus

Une alternative à la filière haut-fourneau décrite plus haut consiste à produire de l'acier à partir de ferrailles de récupération fondues grâce à l'énergie électrique dans un four à arc électrique (Electric Arc Furnace). On parle ici de production d'acier secondaire, par opposition à la production primaire au départ de minerai de fer. La limitation principale



Laitier granulé de haut-fourneau

de ce procédé est la disponibilité de ferrailles d'acier tant localement que globalement. Dans la grande majorité des scénarios de décarbonation de l'industrie, les besoins en acier sont tels, notamment pour les projets d'infrastructure, qu'une part significative de la production d'acier restera primaire à l'horizon 2050.

2. Amélioration de l'efficacité énergétique et recours à la biomasse

Depuis des dizaines d'années, l'industrie sidérurgique développe et met en œuvre des améliorations de ses procédés pour diminuer sa consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Le recours à la biomasse en lieu et place du charbon est une alternative intéressante mais est limitée par sa disponibilité localement.

3. Capture, utilisation ou stockage du CO₂ (CCUS = Carbon Capture and Use or Storage)

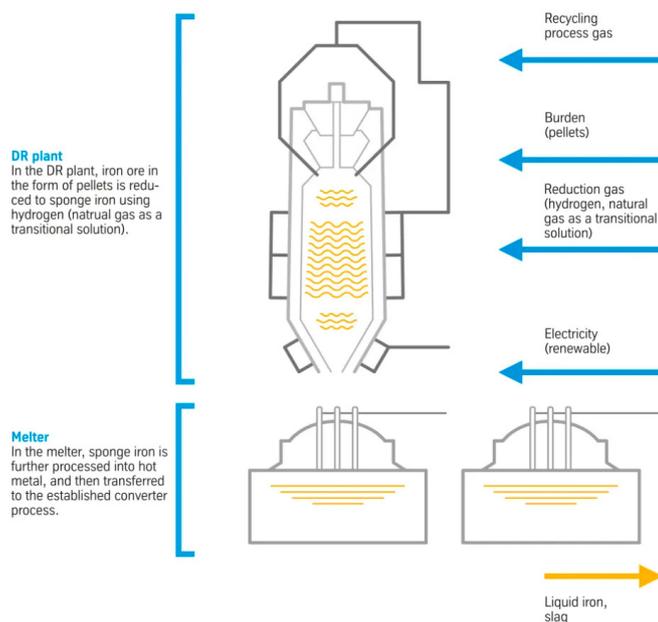
Comme pour d'autres industries, différents projets consistent à capturer le CO₂ ou le CO émis avant qu'il ne pénètre dans l'atmosphère en vue de son utilisation ou de son stockage permanent.

4. Réduction directe du minerai de fer (DRI)

Le procédé DRI (Direct Reduced Iron), est une alternative aux méthodes traditionnelles de fabrication de l'acier en haut-fourneau. Le minerai de fer est introduit dans le réacteur sous forme de pellets où il est exposé à un flux de gaz réducteurs. Traditionnellement, il s'agit d'un mélange d'hydrogène (H₂) et de monoxyde de carbone (CO) provenant du reformage du gaz naturel. Le processus réduit chimiquement le fer (enlève l'oxygène du minerai de fer), le transformant en fer métallique presque pur, appelé « fer éponge » en raison de sa texture poreuse après la réduction. Le fer éponge produit peut être utilisé tel quel ou comprimé en briquettes. Il est principalement

utilisé dans les fours électriques à arc (EAF) pour produire de l'acier. L'un des avantages majeurs du procédé DRI est sa flexibilité quant aux sources d'énergie ; il peut utiliser du gaz naturel, ce qui est moins polluant que le charbon utilisé dans les hauts-fourneaux. De plus, le procédé peut être alimenté par de l'hydrogène. Si celui-ci est produit par électrolyse de l'eau à partir de sources d'électricité décarbonée, le DRI peut devenir une méthode de production de fer pratiquement sans émission de carbone. L'autre caractéristique du DRI par rapport au procédé traditionnel est qu'il ne produit pas de laitier...

Le projet d'ArcelorMittal à Gand est un exemple remarquable de cette transition vers une production décarbonée d'acier. Avec un investissement de 1,1 milliard d'euros, ce projet prévoit la construction d'une usine DRI de 2,5 millions de tonnes et de deux fours à arc électrique. L'usine DRI utilisera du gaz naturel et, à terme, de l'hydrogène vert pour réduire les émissions de carbone. Le projet vise à réduire les émissions de CO₂ de 3,9 millions de tonnes par an d'ici 2030. Les gouvernements belge et flamand ont montré leur soutien pour ce projet crucial de transition vers une production d'acier neutre en carbone.

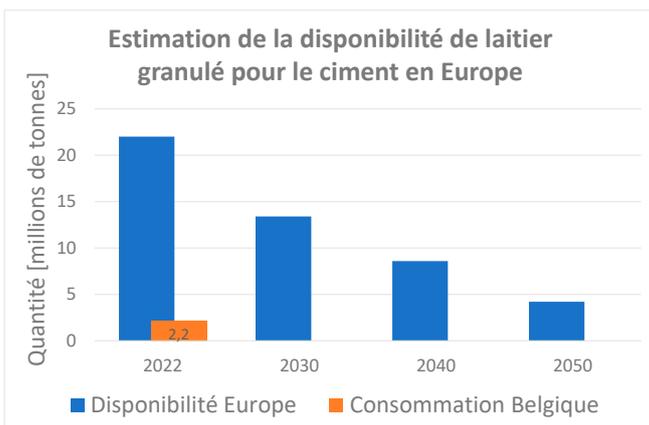


De même, le projet tkH2Steel de ThyssenKrupp, avec un financement de près de deux milliards d'euros des gouvernements allemands, est prévu pour démarrer la construction en 2026 avec une mise en service attendue pour 2029. Ce projet implique également la construction d'une installation de réduction directe à 100 % hydrogène, capable de produire 2,5 millions de tonnes de fer réduit directement par an. Il est anticipé que ce projet permettra d'économiser jusqu'à 3,5 millions de tonnes de CO₂ annuellement, marquant ainsi une étape significative vers la décarbonation de l'industrie sidérurgique en Europe.

En conclusion, la transition vers la neutralité carbone de l'industrie sidérurgique est en marche et elle entraînera des conséquences très directes sur la disponibilité de laitier granulé et donc sur les leviers de décarbonation de l'industrie cimentière européenne.

Disponibilité du laitier

En Europe, sur base des statistiques de production fournies par Euroslag (fédération européenne des producteurs de laitier) et des statistiques d'importation, on estime la disponibilité de laitier granulé de haut-fourneau à environ 22 millions de tonnes par an, à comparer avec les 175 millions de tonnes de ciment produites annuellement. Sur base des hypothèses de transition de l'industrie sidérurgique et des besoins en acier primaire, CEMBUREAU (fédération européenne de l'industrie cimentière) estime la diminution de la disponibilité de laitier granulé à plus de 80 % en 2050.

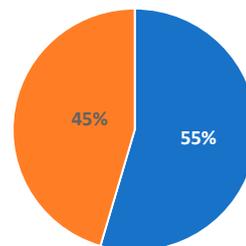


Au niveau belge, la présence importante de hauts-fourneaux a favorisé l'utilisation massive du laitier. Aujourd'hui, son utilisation sous forme de constituant ou d'addition représente environ 2,2 millions de tonnes dont environ 55 % sont produites en Belgique par ArcelorMittal Gand. Le reste provient d'importations.

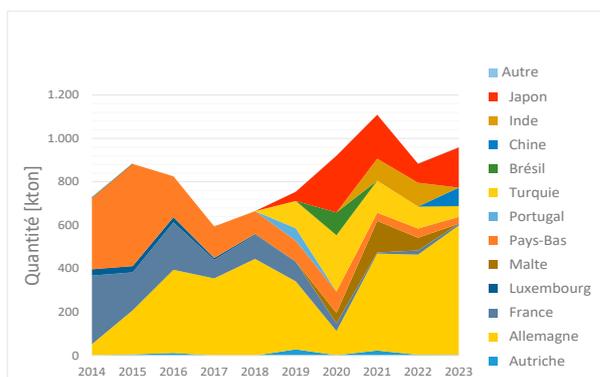


Hauts-fourneaux à proximité de la Belgique - logo Puspito Noun Project

Il est intéressant de remarquer que la provenance des importations a significativement évolué ces dix dernières années : majoritairement de France (ArcelorMittal Dunkerque) et des Pays-Bas (Tata IJmuiden) précédemment, le laitier provient aujourd'hui en majorité d'Allemagne mais également du Japon, de Chine, d'Inde, etc. C'est le signe d'une tension sur la disponibilité de laitier, déjà palpable aujourd'hui, elle ne fera que s'accroître dans les années à venir.



Sources de laitier granulé en Belgique :
 • production locale (ArcelorMittal Gand)
 • Import



Imports de laitier de haut-fourneau en Belgique

Alternatives au laitier

Comme explicité plus haut, les normes ciments EN 197-1, -5 et -6 autorisent différentes matières (SCM) comme substituts du clinker. Si tous les ciments constitués selon ces normes possèdent une aptitude générale à l'emploi, il faut encore démontrer que ces ciments présentent des performances de durabilité qui permettent de les utiliser dans les différents environnements où sévissent des agressions du béton tel que le gel, la pluie, les sels marins ou de déverglaçage et les attaques chimiques. Il s'agit de leur aptitude spécifique à l'emploi qui est démontrée sur base de la norme belge NBN B 15-100 « Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de

l'aptitude à l'emploi des ciments et des additions destinés au béton ».

Démarré en 2020, le projet de recherche belge prénormatif de grande ampleur baptisé NEOCEM, piloté par l'industrie cimentière avec la collaboration de trois centres de recherche, le CRIC, BUILDWISE et le CRR vise à démontrer l'aptitude spécifique de quatre types principaux de ciments (CEM II/B-M, CEM II/C-M, CEM V/A et CEM VI) avec des nouvelles matières : argiles calcinées (Q) et fines de béton recyclé (F) ainsi que du calcaire (L, LL) en substitution du clinker et du laitier.

Au niveau européen et mondial, les cimentiers étudient l'utilisation d'autres sous-produits industriels. Il faut cependant garder à l'esprit que ces matières doivent être à la fois disponibles localement et à long-terme, avoir des spécifications suffisamment précises et offrir des garanties en matière de santé et de sécurité. C'est pour ces raisons que les argiles calcinées combinées avec du calcaire apparaissent aujourd'hui comme une alternative valable au laitier.

Sources bibliographiques:

- <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/sustainability/climate-strategy/climate-strategy.html>
- <https://belgium.arcelormittal.com/en/arcelormittal-signs-letter-of-intent-with-the-governments-of-belgium-and-flanders-supporting-e1-1-billion-investment-in-decarbonisation-technologies-at-its-flagship-gent-plant/>
- https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/factsheet/fr/FACT_SHEET_-_nouveaux_ciments.pdf
- <https://www.euroslag.com/research-library-downloads/downloads/>
- <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/>
- <https://www.eurofer.eu/publications>
- <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability>
- <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/granulated-blastfurnace-slag-gbfs/>
- <https://cembureau.eu/media/qeohlghe/240305-cembureau-position-faq-on-clinker-substitution.pdf>