

Réduire l'empreinte carbone du ciment

Le mode de production du ciment Portland génère d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Mais des fours moins énergivores et la substitution de l'énergie fossile par des combustibles alternatifs réduisent les impacts environnementaux. Si le piégeage du carbone et les nouveaux ciments moins émetteurs de CO₂ sont encore en phase expérimental, l'ensemble de ces innovations peut donner naissance à une industrie cimentière plus propre.

Hendrik G. van Oss

U.S. Geological Survey

Le ciment hydraulique – principalement le ciment Portland ou les ciments comparables – est l'agent liant du béton et de la plupart des mortiers. C'est donc un élément clé du secteur de la construction dans le monde (van Oss et Padovani, 2002). Les ciments hydrauliques tirent leur résistance de l'hydratation des composés cimentaires ou minéraux (combinaison chimique à l'eau) dont ils sont formés. En 2009, la production mondiale de ciment, d'environ 3 gigatonnes (Gt), était suffisante pour fabriquer 24 Gt de béton, soit environ 3,5 tonnes par habitant. Le béton est ainsi le matériau le plus fabriqué dans le monde. La plupart des problèmes environnementaux liés à la production de ciment concerne la fabrication du clinker, et surtout les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), un important gaz à effet de serre (GES), qui en découle.

La fabrication du ciment Portland nécessite la transformation du calcaire et de diverses autres matières premières en clinker. Puis la substance obtenue est broyée très finement avec environ 5 % de sulfate de calcium et d'autres additifs. La composition du clinker ne varie pas beaucoup d'un bout à l'autre de la planète et la production se fait essentiellement dans des fours rotatifs qui font appel à la même technologie. Le procédé de fabrica-

tion du ciment et les problèmes environnementaux liés sont donc les mêmes partout.

CALCINATION ET CHAUFFAGE, DEUX OPÉRATIONS FORTEMENT ÉMISSIVES DE CO₂

Le clinker se compose principalement de quatre oxydes : environ 65 % d'oxyde de calcium ou chaux vive (CaO), 22 % de dioxyde de silicium (SiO₂), 6 % d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) et 3 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃). Les 4 % restants sont composés de faibles quantités d'oxyde de magnésium (MgO) – en général moins de 2 % –, et d'alcalins divers. Dans le ciment Portland "classique", les principaux oxydes se combinent pour former quatre minéraux, réactifs à l'eau, constituants du clinker – silicate tricalcique ou "alite" (C₃S, généralement 50-55 %), silicate bicalcique ou "bélite" (C₂S, 19-24 %), aluminat tricalcique (C₃A, 6-10 %) et aluminoferrite tétracalcique (C₄AF, environ 7-11 %), auxquels on ajoute environ 5 % de gypse.

Pour que la fabrication du clinker soit possible, les matières premières doivent contenir une quantité abondante et peu coûteuse d'oxyde de calcium (C), fournie par le calcaire ou des roches similaires. Le calcaire est principalement composé de calcite, c'est-à-dire de carbonate de calcium (CaCO₃). Ce rôle important du calcaire est à l'origine de la plupart des problèmes environnementaux liés à la fabrication du ciment. En effet, le carbonate de calcium présent dans le mélange de matières premières est décomposé par la chaleur du four et libère son oxyde de calcium par une réaction appelée calcination. Le carbonate de calcium étant composé de 56 % de CaO et de 44 % de CO₂, la calcination libère une grande quantité de ce gaz à effet de serre. Si le carbonate de calcium est la seule source de CaO, il faudra calciner 1,16 tonne de CaCO₃

"La plupart des problèmes environnementaux liée à la production de ciment concerne la fabrication du clinker."

HENDRIK G. VAN OSS

Géologue et économiste, Hendrik van Oss travaille depuis 1996 pour le centre national d'information sur les minéraux de l'U.S. Geological Survey, où il est spécialiste des matières premières couvrant le ciment, le laitier de fonte et les produits dérivés de la combustion du charbon. De 1988 à 1995, il a été spécialiste pays au Bureau des mines américain après avoir travaillé dix ans dans le secteur de l'exploration minière (principalement aurifère) dans l'ouest des États-Unis.

pour obtenir 1 tonne de clinker à 65 % de CaO, et cette calcination libérera 0,51 tonne de CO₂. L'opération de calcination requiert par ailleurs une énergie considérable. La plupart des calcaires n'étant pas de la calcite pure, le ratio de masse du calcaire au clinker sera en fait plus proche de 1,5 que de 1,16 ; en ajoutant d'autres matériaux (comme l'argile ou le sable de silice), il faut environ 1,7 tonne de matière première brute pour produire 1 tonne de clinker. La calcination des matières premières est réalisée de 750°C à 1 000°C. La chaleur est produite par la combustion de combustibles fossiles, principalement du charbon et du coke de pétrole, qui libère elle aussi du CO₂. Une fois la calcination terminée, la formation de C₃S, de C₂S, de

“Les pays en développement sont généralement équipés de cimenteries plus modernes que de nombreux pays développés.”

C₃A, et de C₄AF ne requiert qu'un faible apport de chaleur supplémentaire, même si les réactions interviennent à des températures plus élevées (1 000-1 450°C).

Toutes opérations confondues, il faut environ 3,9 milliards de joules (GJ) de chaleur pour produire une tonne de clinker dans

un four en voie sèche, où les matières premières sont apportées à l'état sec. Cependant, des cimenteries plus anciennes utilisent des fours en voie humide, auxquels le mélange de matières premières est apporté sous forme de boue contenant environ 35 % à 40 % d'eau. Pour ces types de fours, l'évaporation de l'eau avant le préchauffage requiert un supplément de 1,6 GJ à 1,8 GJ par tonne de clinker.

DIFFÉRENTS TYPES DE FOUR POUR DES PERFORMANCES VARIABLES

Ces besoins en chaleur sont théoriques. Ils sont en réalité plus élevés du fait des déperditions de chaleur dues à l'équipement. Il est néanmoins possible d'économiser la chaleur, particulièrement en ce qui concerne l'air nécessaire à la combustion et au refroidissement du clinker. En effet, le clinker qui sort du four à très haute température doit être refroidi dans un dispositif spécial à une température de 100°C à 200°C avant d'être réduit en ciment. Cet air très chaud peut être réacheminé vers le brûleur du four ou servir à préchauffer les matières premières – ce qui économise les combustibles. La plupart des fours de construction récente sont des fours modernes

à préchauffage-précalcination. La majorité des installations récentes ont été construites dans des pays en développement, si bien que ces pays sont généralement équipés de cimenteries plus modernes que de nombreux pays développés. Cependant, en raison des modernisations en cours, la technologie installée des fours n'est pas la même partout.

L'abandon des fours en voie humide au profit de fours en voie sèche et la modernisation ou le remplacement des vieux fours en voie sèche par des technologies identiques mais plus modernes améliorent le rendement énergétique. Les données américaines en témoignent : en 2007, les fours en voie humide nécessitaient en moyenne 6,5 GJ par tonne de clinker ; les fours longs en voie sèche 5,3 GJ par tonne, tandis que les fours à préchauffage et les fours à préchauffage-précalcination consommaient respectivement 4,1 GJ par tonne et 3,6 GJ par tonne environ. Dans les fours préchauffés, le préchauffage n'est pas effectué dans le cylindre du four, mais dans un dispositif séparé, plus efficace. Le chauffage est alors réalisé à partir de l'air chaud résiduaire. Les fours à préchauffage et précalcination utilisent en outre un dispositif de calcination à alimentation séparée, qui est beaucoup plus efficace qu'un cylindre de four ; ce dernier est alors utilisé uniquement pour la dernière étape de la formation du clinker. En outre, les économies d'échelle sont réelles, les grandes cimenteries étant généralement plus économes en combustible. Enfin, il est possible dans la plupart des cimenteries de réaliser de petits gains de rendement énergétique en procédant à des améliorations ou à des réglages fins des systèmes en place – surtout en ce qui concerne l'électricité. Au final, les résultats cumulés peuvent être importants.

RÉDUCTION OU SUBSTITUTION DE COMBUSTIBLE

Les émissions de dioxyde de carbone résultant de l'utilisation des combustibles avoisinent généralement de 0,40 à 0,45 tonne de CO₂ pour une tonne de clinker. En ajoutant les émissions produites par la calcination, le total atteint de 0,91 à 0,96 tonne de CO₂. Mais il est possible d'utiliser des combustibles à faible teneur en carbone ou des sources non carbonées d'oxyde de calcium. Ainsi, certains ciments hydrauliques ont une teneur en clinker inférieure à celle du ciment Portland. Néanmoins, aux rythmes actuels, l'industrie mondiale du ciment émet environ de 2,2 Gt à 2,6 Gt de CO₂ par an.

Afin d'économiser le combustible, les cimenteries ont entrepris il y a déjà longtemps d'abaisser leur consommation unitaire d'énergie ►►►

REPÈRES

Créée en 1879, l'U.S. Geological Survey (USGS) est la plus importante agence scientifique du département américain de l'Intérieur. Elle réalise des études géologiques et environnementales sur le sol américain (mais aussi à l'étranger), concernant en particulier les ressources minières, les risques géologiques et les ressources hydriques. Elle mène par ailleurs une importante activité cartographique et topographique.

Le ciment, entre responsabilité écologique et impératifs économiques

►►► (par tonne de produit) en installant des technologies modernes. Les modernisations en cours s'inscrivent dans leur stratégie de réduction des émissions de CO₂ (U.S. Environmental Protection Agency, 2010). Les cimenteries peuvent également utiliser une grande variété de combustibles de substitution, y compris des déchets industriels (dont certains sont dangereux). Beaucoup de ces déchets ont une teneur en carbone inférieure à celle des combustibles traditionnels. Les protocoles de comptabilisation des émissions carbone autorisent des déductions au titre de l'utilisation de combustibles de substitution et de biocombustibles (par exemple, le caoutchouc naturel contenu dans les pneus usagés). Les modélisations du changement climatique considèrent généralement que les biocombustibles sont neutres en émissions de carbone. Les contraintes inhérentes à ce type de combustibles résident dans l'obtention de permis environnementaux (surtout pour les déchets dangereux) ; les quantités (qui doivent être suffisantes), le coût d'approvisionnement, de stockage et de mélange. Enfin, leur pouvoir calorifique et leur teneur en humidité sont plus variables que les combustibles traditionnels.

VERS UN CIMENT PLUS ÉCOLOGIQUE

D'autres pratiques peuvent participer également à la réduction des émissions. Outre les matériaux traditionnels comme le calcaire, les cimenteries peuvent utiliser de nombreuses matières premières de substitution. Les plus fréquentes sont des "déchets" industriels tels que les cendres de charbon issues de centrales électriques, le laitier de fer ou d'acier et les résidus industriels. Les scories et les cendres de charbon sont particulièrement intéressantes car elles ont souvent une composition similaire à celle du clinker. Néanmoins, le principal intérêt de ces matières premières de substitution (surtout du laitier de fer), c'est qu'elles peuvent être d'importantes sources non carbonées de CaO, ce qui diminue la consommation de calcaire et les émissions correspondantes de CO₂. La combustion de ces matières premières requiert une température plus basse, ce qui réduit la consommation de combustibles et les émissions de dioxyde de carbone.

Les contraintes pesant sur l'utilisation des matières premières de substitution ont trait à la disponibilité et aux coûts (surtout de transport), à la nécessité d'obtenir des permis environnementaux et à leur composition en oxydes. En tenant compte de ces limites, ces matières premières ont permis à l'ensemble de l'industrie cimentière américaine de réduire les quantités de CO₂ produites par la calcination, à hauteur d'environ 0,7 à 1,3 million de tonne par an

(soit de 2,4 % à 3 %). Ce pourcentage se situe dans une fourchette de 2 % à 10 % dans les cimenteries faisant appel à des matières premières de substitution. Il est plus difficile d'évaluer les réductions d'émissions liées aux combustibles, mais à technologie de four comparable, la consommation d'énergie des cimenteries qui utilisent des matières premières de substitution est généralement inférieure de 3 % à 30 % aux moyennes enregistrées dans l'industrie cimentière américaine.

Il est possible de réduire la teneur en clinker du ciment en incorporant des ajouts cimentaires comme les cendres volantes, le laitier de haut-fourneau granulé broyé, les fumées de silice, le métakaolin et les cendres volcaniques pouzzolaniques, pour fabriquer des ciments composés. Ces matériaux trouvent de nombreuses applications identiques à celles du ciment Portland dans la fabrication du béton. Ces ajouts cimentaires réduisent l'empreinte carbone de l'industrie cimentière, mais la plupart proviennent d'industries qui émettent elles aussi du CO₂. Les ajouts cimentaires développent leurs propriétés par réaction avec le CaO libéré au cours de l'hydratation du ciment Portland. Les producteurs de béton peuvent aussi incorporer directement des ajouts cimentaires au mélange de béton pour réduire la teneur en ciment Portland (et donc en clinker). Dans un cas comme dans l'autre, l'utilisation d'ajouts cimentaires améliore généralement la qualité du béton. La teneur type en ajouts cimentaires des ciments composés et les taux de substitution au ciment Portland dans le béton vont de 5 % à 50 % – mais ils peuvent être supérieurs dans certaines applications. Les contraintes d'utilisation des ajouts cimentaires portent principalement sur leur disponibilité et sur la réglementation.

La teneur du ciment en clinker peut être encore réduite, lorsque c'est autorisé, en incorporant des agents d'allongement ou de gonflement relativement inertes, comme par exemple le calcaire broyé, non calciné.

La quantité incorporée peut aller jusqu'à 20 %, mais elle est généralement inférieure à 10 %. Entre les agents d'allongement inertes et les ajouts cimentaires, la teneur en clinker du ciment hydraulique

est de l'ordre de 75 % à 80 % en moyenne, contre 95 % environ pour les ciments Portland classiques. Il faut noter aussi que si l'incorporation d'ajouts cimentaires ou d'autres agents d'allongement au ciment ou au béton ne réduit pas les émissions de CO₂ de l'industrie, elle réduit les émissions unitaires et permet ainsi de fabriquer davantage de matériau avec la même quantité de clinker.

"Les cimenteries peuvent utiliser une grande variété de combustibles de substitution."

LE PIÉGEAGE DU CARBONE, AU STADE EXPÉRIMENTAL

Parce que ce sont d'importants émetteurs stationnaires de CO₂, les cimenteries sont considérées comme de bons candidats à la technologie de piégeage du carbone, surtout lorsque la teneur en dioxyde de carbone de la vapeur d'échappement peut être concentrée en remplaçant l'air par de l'oxygène pour la combustion. Un flux de CO₂ concentré diminue le volume de gaz à traiter et peut réduire la taille de l'unité de piégeage nécessaire, ainsi que la consommation de réactifs absorbants. Les méthodes de piégeage envisagées comprennent la production d'un flux gazeux ou liquide de CO₂ (qui peut être alors utilisé ailleurs ou injecté en sous-sol à titre permanent), l'absorption par un réactif (qu'il faut ensuite éliminer), et la formation d'un produit commercialisable comme le bicarbonate de soude.

Dans l'ensemble, les technologies de piégeage du carbone pour les cimenteries sont expé-

“Les nouveaux ciments coûtent plusieurs centaines de dollars de plus à la tonne que le ciment Portland.”

mentales et coûteuses. Pour certains systèmes envisagés, elles nécessitent des installations de taille comparable à celles de la cimenterie elle-même. Très peu d'installations utilisent ces technologies et de nombreuses cimenteries anciennes ou de petite taille n'ont sans doute pas les moyens de le faire. D'autre part, sauf exception, les unités de production sont situées à proximité de carrières de calcaire ; ces emplacements ne se prêtent pas nécessairement à la mise en place de conduites de transport du CO₂.

Les cimenteries pourraient peut-être consommer le carbonate de calcium formé par certaines nouvelles technologies de piégeage de CO₂ ou par ce qu'on appelle le cycle calcium, envisagé pour les centrales thermiques. L'utilisation de ce carbonate de calcium renverrait bien sûr le CO₂ dans l'atmosphère, mais elle réduirait au moins la nécessité pour la cimenterie de brûler son propre calcaire.

NOUVEAUX CEMENTS À MOYEN ET LONG TERME

Bien qu'ils soient fabriqués aujourd'hui en très petites quantités, les nouveaux ciments développés ces dernières années pourraient convenir à certaines applications. C'est le cas notamment des ciments géopolymères et de plusieurs liants à base d'oxyde de magnésium (MgO). Les avantages de ces ciments résident dans une fabrication moins gourmande en énergie et donc moins émettrice de CO₂. Les

liants à base de MgO ont l'avantage d'absorber le CO₂ présent dans l'air et peuvent donc présenter un bilan carbone neutre, voire négatif. Les liants à base de MgO acquièrent leur résistance par “carbonatation”.

Mise à part les problèmes d'acceptation de nouveaux ciments dans les réglementations locales concernant la construction, l'utilisation généralisée de liants (CaO ou MgO) qui acquièrent leur résistance par carbonatation se heurte à certaines contraintes. La carbonatation exige une exposition prolongée à l'atmosphère et, bien qu'elle convienne à certaines applications de surface (telles que les stucs, les dalles minces et les blocs de petite taille), elle risque d'être trop lente en cas d'utilisation de gros volumes de béton. La perméabilité au CO₂ pourrait en effet être problématique. En outre, la faible disponibilité de matières premières de pureté suffisante pour la fabrication du liant MgO pourrait limiter une utilisation de masse.

Même lorsque ces nouveaux ciments auront une résistance, une durabilité et une applicabilité appropriées, il faudra en fabriquer chaque année des milliards de tonnes pour réduire sensiblement les émissions de dioxyde de carbone. Ils devront concurrencer une production bien installée de milliers d'unités de production de ciment Portland dans le monde – ce qui représentent des milliards de dollars d'investissements. D'autre part, ces nouveaux ciments coûtent plusieurs centaines de dollars de plus à la tonne que le ciment Portland. Le coût de ce dernier augmente néanmoins, surtout sous l'effet du renchérissement des combustibles et cette tendance semble appelée à se poursuivre à long terme. Si certains des nouveaux ciments pouvaient être fabriqués en grandes quantités, des économies d'échelle pourraient être réalisées et dans les trente à cinquante prochaines années, certains d'entre eux pourraient être compétitifs face au ciment Portland. Entretemps, on peut penser que de nombreuses cimenteries fabriquant du ciment Portland auront épuisé leurs réserves locales de calcaire, que leurs équipements devront être remplacés et que les coûts initiaux seront entièrement amortis. Le monde pourrait alors entrer dans l'ère “post-Portland”. ●