



# Le diagnostic énergétique d'une cimenterie

## Problématique

La production mondiale de ciment s'élevait, en 2001, à 1 692 millions de tonnes. En Afrique (5% de la production mondiale), les principaux producteurs sont localisés en Afrique du Nord (65%). En Asie (62% de la production mondiale), la Chine domine le marché de production. En fait, l'évolution du marché est liée notamment au niveau d'industrialisation du pays. Ainsi, le niveau de production de ciment dans les pays industrialisés s'est globalement stabilisé depuis une dizaine d'années, et les fluctuations observées dépendent seulement d'aléas conjoncturels. En revanche, la production de ciment dans les pays en développement s'est accrue, et continue à progresser en fonction de leur évolution économique.

Plusieurs facteurs appuient la nécessité de réaliser des diagnostics énergétiques dans l'industrie cimentière pour identifier les économies d'énergie potentielles et mettre en œuvre des mesures d'économies d'énergie.

- D'abord, l'industrie cimentière est *fortement consommatrice* en énergie calorifique et électrique (voir la section «Principes de base»). Les besoins mondiaux en énergie pour la fabrication du ciment sont estimés à environ  $6 \times 10^9$  GJ/an pour les combustibles et 200 TWh/an pour l'électricité. Par ailleurs, l'énergie représente 30 à 40% du prix de revient du ciment (hors frais d'amortissement).
- L'industrie cimentière est également *fortement capitalistique*, puisqu'une usine dont la capacité de production s'élève à 1 million de tonnes par an de ciment représente un investissement de l'ordre de 150 millions de \$US. Ceci incite à rechercher des solutions d'amélioration des unités de production existantes plutôt que de créer une nouvelle ligne.
- Par ailleurs, les *consommations spécifiques varient beaucoup* d'une usine à l'autre et selon les pays considérés (entre 3000 et 8000 kJ/tonne de clinker pour la consommation calorifique, et entre 70 et 160 kWh/tonne de ciment pour la consommation d'électricité). Des réductions importantes de consommation calorifique ont été obtenues durant les vingt à trente dernières années par, en particulier, l'abandon du procédé à «voie humide» dans les pays industrialisés (voir description dans la section suivante). Les lignes de production réalisées depuis une quinzaine d'années (jusqu'à 7000 tonnes par jour de clinker pour les plus récentes installées dans le sud-est asiatique) sont énergétiquement performantes. Les anciennes unités de production de petite capacité peu performantes ont été progressivement

remplacées par des lignes de plus grosse capacité présentant de bonnes performances énergétiques; quant aux unités de moyenne capacité, elles peuvent être généralement renouvelées. L'amélioration des performances des installations anciennes pose un problème d'optimisation entre les différents investissements envisageables et les gains économiques correspondants. Seul un diagnostic énergétique détaillé atelier par atelier et une analyse technico-économique des différentes solutions envisageables permettent alors de définir le meilleur choix pour améliorer les performances. Toutefois, de tels projets ne peuvent pas être dissociés d'autres nécessités telles que sécurité, respect de l'environnement, qualité des produits, etc.

- L'industrie cimentière est aussi *fortement émettrice de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone – CO<sub>2</sub>)*, provenant des besoins en énergie calorifique, mais aussi du procédé de fabrication du ciment. La problématique des changements climatiques incite à rechercher tous les moyens de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>: l'amélioration des consommations énergétiques spécifiques doit se doubler d'une démarche nouvelle de substitution des produits traditionnellement fabriqués (clinker) par des produits présentant des caractéristiques voisines (laitier, etc. – voir la section «Résultats attendus»). D'une façon générale, les pays en développement suivent les progrès technologiques et économiques réalisés dans les pays industrialisés avec un certain délai. De même, la réglementation locale sur les émissions suit progressivement les normes des pays industrialisés. Il est cependant souhaitable que toutes les mesures pouvant réduire les consommations énergétiques, et donc les émissions d'effluents gazeux, soient mises en œuvre le plus rapidement possible dans ces pays.

Les informations données dans cette fiche permettent de mieux comprendre les principales sources d'économie d'énergie à évaluer par un diagnostic énergétique spécifique à la cimenterie. Il faut noter que les aspects portant sur le diagnostic énergétique des bâtiments eux-mêmes (éclairage, ventilation, etc.) ne sont pas traités dans cette fiche puisqu'ils font l'objet d'une fiche spécifique.

Ce document donne un point sur la situation existante, et présente des filières à suivre pour l'amélioration des installations. Chaque projet, pour être mené à bien, doit être conduit avec la collaboration d'experts cimentiers et les fournisseurs concernés.

## Principes de base

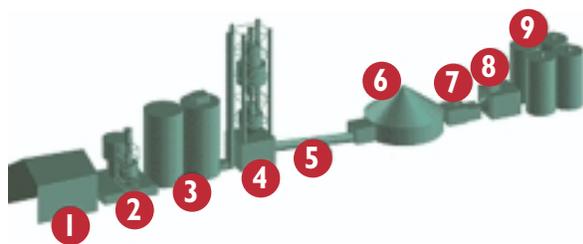
### La production de ciment

La production du ciment (voir figure 1) s'effectue en deux étapes principales:

- *La production du clinker* par cuisson de matières premières (calcaire, argile, alumine et oxyde de fer...), préalablement broyées finement et mélangées dans des proportions bien définies,
- *La fabrication du ciment* par co-broyage du clinker avec du gypse (régulateur de prise) et éventuellement d'autres matériaux, appelés ajouts, pouvant présenter une aptitude similaire au clinker du point de vue des résistances mécaniques.

Plusieurs types de ciments sont fabriqués. Les ciments «PORTLAND CEM I» (ciment pur sans ajout, constitué de clinker et de gypse) et les ciments «PORTLAND composite CEM II» (ciments avec ajouts de calcaire, de laitier en provenance des hauts fourneaux, etc.) représentent une part importante du ciment fabriqué à travers le monde. L'utilisation accrue d'ajouts permet de réduire la consommation d'énergie de l'industrie cimentière (voir la section «Problèmes observés et solutions techniques»).

Figure 1 : Schéma simplifié de production du ciment



1. Extraction puis entreposage des matières premières
2. Broyage cru
3. Silos d'homogénéisation
4. Échangeur avec ou sans précalcination
5. Four rotatif
6. Stockage clinker
7. Additifs (gypse, cendres volantes, etc.)
8. Broyage ciment
9. Entreposage en vrac, ensachage, chargement vrac et sacs (camion, wagons)

Source : Association canadienne du ciment

### Survol énergétique

La capacité des lignes de production, l'âge et le type de procédé sont très variables d'une installation à l'autre; ceci se traduit par une grande variation de la consommation spécifique des différentes lignes de production. Ainsi, une enquête sur un échantillon d'environ 150 usines montre que la consommation calorifique est comprise entre 3 000 et 8 000 kJ/kg de clinker, et la consommation électrique est comprise entre 70 et 160 kWh/ tonne de ciment.

Les différences d'intensité énergétique (besoins énergétiques à la tonne de produit fabriqué) entre les installations peuvent aussi être expliquées par les facteurs techniques suivants:

- *Type et performance des équipements.* Qu'il s'agisse de la consommation calorifique ou des besoins en énergie électrique, les différents types d'équipements rencontrés présentent des différences de performance énergétique qui peuvent être très importantes (voie humide/voie sèche, refroidisseurs rotatifs/refroidisseurs à grille modernes à plaques caisson, broyeurs à boulets/Horomill, par exemple).
- *Entretien et taux de disponibilité des équipements.* Tout arrêt/redémarrage à la suite d'un incident entraîne une surconsommation énergétique (maintien ou remise en température du four, remise en régime après purge de la matière des broyeurs).
- *Perturbations «Procédé».* Un défaut de cuisson attribuable à des perturbations dans la cuisson peut entraîner la mise au rebut de clinker (ce qui constitue une perte économique et énergétique);
- *Stockage-matières inapproprié.* L'absence de stockage fermé pour le clinker engendre une dégradation de sa qualité lors des intempéries, et les éventuels défauts d'étanchéité des silos ciment sont préjudiciables à la qualité du ciment. Ces pertes de qualité engendrent des surcoûts énergétiques.
- *Filtres non performants.* Une partie de la production est perdue dans l'atmosphère, qu'il s'agisse du cru pour les filtres des lignes de cuisson, du clinker pour le filtre du refroidisseur ou du ciment pour les filtres des ateliers de broyage ciment. De plus, cette insuffisance de performance crée une pollution (émissions de poussières) au-delà des normes (les normes locales s'alignant progressivement sur les normes des pays industrialisés).
- *Nature des matières premières.* Les caractéristiques des matières premières (morphologie, etc.) ont une influence sur leur aptitude à la cuisson, ainsi qu'à leur broyabilité. Une bonne connaissance géologique des réserves (calcaire, argile, marnes, etc.) est indispensable pour établir un plan d'exploitation qui optimise les extractions, et qui préserve l'avenir. Il faut que chaque usine dispose de plus de 30-50 ans de réserves exploitables afin d'amortir au mieux les investissements réalisés.
- *Composition chimique du clinker.* Un faible taux de C3S (silicate tricalcique) dans le clinker donne une mauvaise aptitude au broyage ciment (surcoût en énergie électrique), et une aptitude moindre à l'obtention de résistances mécaniques pour le ciment (nécessité de broyer plus fin, et donc de dépenser plus d'énergie électrique).
- Etc.

### Les différents procédés cimentiers

La description détaillée des différents procédés est disponible dans de nombreux documents de référence (voir bibliographie). Quelques données énergétiques correspondant à des valeurs moyennes industrielles d'installations existantes sont fournies dans le tableau 1 et dans le paragraphe suivant pour

que le lecteur puisse situer ses propres installations par rapport à ces moyennes et aux valeurs extrêmes constatées.

- **La voie humide.** Ce procédé ancien (matières premières mélangées à l'eau avant broyage et homogénéisation) est, d'une façon générale, remplacé par la voie sèche (matières premières broyées, homogénéisées et acheminées à sec vers le four). Le remplacement est réalisé dans les pays industrialisés depuis vingt à trente ans sauf exception. Ce procédé est en effet parfois encore utilisé, dans les pays industrialisés, pour incinérer des déchets industriels et agricoles.
- **Les voies semi-humide et semi-sèche.** Ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide. Les matières premières étaient préparées sous forme de boudins via des «filtres-presses» (procédé semi-humide, technique actuellement abandonnée) ou sous forme de granules via un «granulateur», plateau tournant incliné – où la matière première est mélangée avec de l'eau (voie semi-sèche).
- **Les voies sèches.** Le procédé utilisant des «fours longs» n'est plus installé, mais il existe encore des lignes de production en service. Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés. Des fours sans précalcinateur ou avec une précalcination limitée (procédé AT «air-through») sont parfois installés, ce qui réserve la possibilité d'ajouter ultérieurement une précalcination type AS (air séparé) lorsqu'une augmentation de capacité devient nécessaire. L'adjonction d'une précalcination à une installation existante est possible mais elle reste une opération complexe. Il faut noter que la consommation calorifique avec ou sans précalcination est similaire (voir tableau I).

On constate que la consommation électrique est indépendante du type de procédé de cuisson, par contre pour chaque procédé les valeurs énergétiques varient beaucoup.

## Problèmes observés et solutions techniques

Les performances énergétiques des anciennes installations sont souvent éloignées de celles obtenues avec des installations neuves. S'il est relativement aisé de réaliser de nouvelles

installations performantes, l'amélioration de la consommation énergétique des installations existantes nécessite une étude au cas par cas, et il n'est pas toujours possible de trouver une solution assurant les mêmes performances qu'une installation neuve à un prix acceptable. Néanmoins, la rénovation peut présenter un intérêt certain sur le plan économique par rapport à la construction d'une nouvelle unité. Il faut donc analyser de façon méthodique les performances des différents ateliers de production ainsi que les conditions d'exploitation, afin d'en déduire les éventuelles sources de progrès énergétiques possibles.

La comparaison des performances énergétiques d'une usine à celles d'autres usines modernes met en évidence les gains éventuels à rechercher. Les informations qui suivent aideront à l'identification des sources d'économie d'énergie calorifique et électrique susceptibles d'être réalisées dans une cimenterie.

## Les besoins calorifiques

Les besoins calorifiques sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1 450 à 1 500 °C. Des besoins calorifiques annexes sont cependant nécessaires pour assurer le séchage des produits d'addition (argile, laitier, etc.) qu'il vaut mieux protéger des intempéries

Les besoins calorifiques dépendent principalement des facteurs suivants :

- **Type de procédé utilisé** (voir tableau I);
- **Conception des équipements** (la récupération thermique dépend d'équipements tels que: refroidisseur, nombre d'étages du préchauffeur, etc.);
- **Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson** (des arrêts fréquents des lignes de cuisson, attribuables à des incidents, entraînent des surconsommations calorifiques importantes).

Les principaux combustibles utilisés pour la cuisson du clinker sont le coke de pétrole (utilisé à environ 40% de la valeur calorifique consommée), le charbon et la lignite (environ 50%), certains déchets, le fioul lourd et le gaz.

Depuis une décennie, la part des combustibles traditionnels, tels que le charbon, le fioul et le gaz, tend à être réduite au profit

**Tableau I : Consommation énergétique moyenne des procédés cimentiers**

Procédé	Capacité maximale (t/jour)	Consommation calorifique (MJ/t clinker)	Consommation électrique (kWh/t ciment)
Voie humide	3000	6400 (4931/7960)	120 (94.3/157.6)
Voie semi-sèche	2320	3900 (3210/4010)	106 (95.5/149.8)
Voie sèche – fours longs	3270	4530 (3133/4997)	135 (113.3/176.1)
Voie sèche – fours à préchauffeurs sans précalcinateur	3800	3836 (3125/4550)	110 (95/159.5)
Voie sèche – fours à préchauffeurs à précalcinateur AT (air through)	2740	3750 (3346/4029)	110 (96.2/143.5)
Voie sèche – fours à préchauffeurs à précalcinateur AS (air séparé)	7600	3430 (3008/4230)	110 (70.7/150.6)

N.B.: Étant donné qu'il s'agit de valeurs moyennes (valeurs extrêmes données entre parenthèses), ces valeurs ne peuvent être comparées à celles qui sont données par les constructeurs. Seules ces dernières devraient être considérées comme des objectifs à atteindre pour des installations neuves.

d'autres combustibles plus attrayants du point de vue économique, tels que le coke de pétrole, les déchets, et la biomasse (dont les farines animales). Les combustibles de substitution peuvent poser des problèmes d'utilisation vis-à-vis du procédé ou de la qualité, liés principalement aux composants chimiques qu'ils contiennent. Leur utilisation est donc limitée. Par exemple, le soufre des cokes de pétrole peut entraîner des perturbations dans l'atelier de cuisson. En revanche, il ne constitue généralement pas de problème vis-à-vis de l'environnement, car le soufre introduit par les combustibles se retrouve dans le clinker (et donc n'est pas émis dans l'atmosphère) pour des lignes de cuisson équipées de fours à préchauffeurs (ce n'est pas le cas des autres types de fours).

La solution idéale pour réduire la consommation calorifique est de disposer d'un procédé en voie sèche, avec ou sans précalcination, doté de préchauffeurs à cinq, voire six étages et de refroidisseurs à grilles. Toutefois, le nombre d'étage est conditionné par l'humidité du cru: il faut que la température des gaz en sortie four soit suffisante pour en assurer le séchage.

## Les besoins électriques

La consommation électrique varie entre 70,7 et 159,5 kWh/tonne de ciment. Elle est liée principalement au broyage des matières premières et du clinker. Le tableau 2 ne met que très partiellement en évidence l'intérêt énergétique de certains procédés de broyage par rapport à d'autres. Ceci vient de multiples raisons telles que:

- extrême diversité des produits à broyer: en particulier pour le ciment, la finesse recherchée (la consommation électrique en dépend) est fonction de la qualité du ciment recherchée, et de la qualité du clinker broyé;

- on a pu installer de façon très rentable des séparateurs à haute performance sur des ateliers de broyage en «circuit ouvert»;
- etc.

Il est à noter que les ventilateurs sont également de gros consommateurs d'énergie électrique. À titre d'exemple, la puissance du ventilateur principal installé sur un broyeur vertical est du même ordre de grandeur que celle du moteur du broyeur.

La consommation électrique dépend aussi de la qualité de l'ingénierie mise en œuvre pour la conception de la ligne de production (usine en «ligne» avec un nombre limité de transporteurs, transport par convoyeurs plutôt que pneumatique, etc.). Le manque de fiabilité des équipements est un facteur important de surconsommation électrique, en fonction de la fréquence et de la durée des arrêts et redémarrages (les ventilateurs ne sont pas arrêtés lors d'arrêts momentanés, par exemple).

La production d'électricité étant souvent réalisée par des centrales thermiques brûlant des combustibles minéraux (charbon), ou pétroliers (fuel-oil, gaz), toute économie dans la consommation d'électricité permet de réduire la facture énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité.

## Les sources d'économie d'énergie

La transformation d'installations existantes doit avoir pour objectif de se rapprocher de la performance des meilleures technologies disponibles (par exemple, voie sèche, refroidisseur moderne, etc.), soit environ 3200/3400 MJ/t de clinker, et 80/85 kWh/t de ciment mais il n'est pas toujours économiquement rentable d'effectuer toutes les transformations permettant d'atteindre réellement cette cible. De nombreuses solutions peuvent réduire de façon significative les consommations calorifiques et électriques. Chaque solution, envisagée après une étude généralement menée par le cimentier, avec le concours éventuel d'experts ou ingénieurs conseils, est à valider sur le plan technico-économique avec les ingénieurs et constructeurs spécialisés sur l'ensemble des aspects énergétiques, production, qualité et impact sur l'environnement (voir tableau 2).

En effet, les modifications d'installations existantes ne se bornent pas seulement à l'aspect énergétique; il s'agit en général de projets à buts multiples intégrant l'évolution de la production, le respect de l'environnement, la recherche des qualités «ciment» adaptées aux besoins du marché, la performance de chaque équipement (énergétique, fiabilité, maintenance, etc.).

## Résultats attendus et stratégies de mise en œuvre Potentiel de gains énergétiques et rentabilité

L'étude de rénovation complète d'une cimenterie peut conduire à la construction d'une nouvelle ligne de production, ou à l'amélioration de lignes existantes. Il en est de même d'un atelier seul. Dans ces études sont pris en compte l'ensemble

**Tableau 2: Consommation énergétique des broyeurs de cru et de ciment**

Procédé	Consommation électrique moyenne (kWh/t)
<b>Broyage «cru»</b>	
Boulets, voie humide	20 (7/29.6)
Boulets, circuit ouverts	22 (21.9/26.7)
Boulets, circuits fermés (équipés de séparateurs)	24 (24.2/40.6)
Vertical	19 (18.6/32.2)
<b>Broyage ciment</b>	
Boulets, circuits ouverts	46 (26/93)
Boulets, circuits fermés (équipés de séparateurs)	51 (28/128)
Presse (en prébroyage) + boulets	42 (29.6/64.1)
Horomill	37 (28.5/39.6)

N.B.: Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes (valeurs extrêmes données entre parenthèses) définies à partir de nombreuses usines installées à travers le monde.

## Tableau 2: Sources d'amélioration de l'efficacité

### Action / Équipement/Description

**Utilisation de matières de substitution au clinker.** L'utilisation de laitier (sous-produit de la production de l'acier), cendres volantes (sous-produit des centrales électriques au charbon), pouzzolanes (cendres volcaniques), etc. permet d'éviter la consommation calorifique et électrique relative à la fabrication du clinker (broyage du cru et cuisson).

**Transformation de la voie humide en voie sèche.** L'impact sur la consommation calorifique est très important, puisque la voie sèche est fortement moins consommatrice d'énergie calorifique (voir tableau 1). L'arrêt de la ligne de cuisson, lors de la transformation, peut être minimisé en construisant la tour (préchauffeur avec ou sans précalcination) avant l'arrêt.

**Rénovation ou remplacement du refroidisseur.** La solution moderne utilisant des plaques caisson en première partie d'un refroidisseur à grilles permet d'améliorer le refroidissement du clinker et ainsi d'augmenter la production sans dépense calorifique complémentaire (les plaques caisson permettent, par leur perte de charge, d'assurer une bonne répartition de l'air même quand la couche de clinker n'est pas homogène). La consommation calorifique s'en trouve significativement améliorée, la consommation électrique spécifique s'en trouve un peu réduite, la ventilation de la ligne de cuisson étant la même, pour une production accrue.

**Modification des préchauffeurs.** La perte de charge des préchauffeurs ( $\Delta P$ ) s'accroît suivant une loi-carré de la production ( $P$ ) :  $\Delta P = k \times P^2$ . Or, les lignes de cuisson anciennes dépassent très souvent les capacités de production initialement définies lors de leur construction, la perte de charge de l'ensemble du préchauffeur peut ainsi atteindre des valeurs élevées ( $> 600$  daPa). Les constructeurs ont développé, depuis une dizaine d'années, des cyclones à faible perte de charge, et peuvent au cas par cas proposer des améliorations de la géométrie des cyclones existants.

**Transports matière.** Il vaut mieux éviter les transports pneumatiques (par pompe) dont la consommation électrique est élevée, et privilégier les transports par élévateur, bandes transporteuses, et aéroglossières.

**Amélioration des lignes de broyage.** Qu'il s'agisse du cru comme du ciment, l'installation de séparateurs dynamiques de troisième génération fournit un double gain en énergie électrique et en production (pouvant aller jusqu'à 20% pour ces deux postes) par rapport à des installations en circuit ouvert (sans séparateur) ou par rapport à des broyeurs équipés de séparateurs statiques.

En ce qui concerne le broyage des combustibles solides, l'utilisation accrue de coques de pétrole fortement soufrés, qui sont de plus en plus difficiles à broyer, conduit à améliorer la finesse du combustible broyé pour éviter les problèmes de procédé en zone de cuisson ; l'installation de séparateurs dynamiques s'impose, et l'utilisation de variateurs de vitesse pour la table des broyeurs verticaux permet de minimiser les problèmes de vibrations rencontrés fréquemment lors de l'utilisation des coques de pétrole.

Quant aux broyeurs à boulets, un contrôle de la ventilation interne doit être effectué, car il n'est pas rare de constater une insuffisance de la vitesse de l'air ou des gaz traversant le broyeur, conduisant à un surbroyage et donc à une surconsommation électrique. Une autre possibilité de réduire la consommation électrique des broyeurs à boulets est d'installer, en pré broyage, une presse à rouleaux, mais un tel investissement ne peut se justifier que par la nécessité d'augmenter la capacité de production de l'atelier.

**Stabilité du procédé de cuisson.** Un problème fréquemment rencontré est un bouchage de la partie amont du four et de la partie inférieure du préchauffeur ; ce phénomène s'explique par la volatilisation en zone de cuisson des sulfates alcalins et de calcium, suivie d'une recondensation en amont du four et en partie basse du préchauffeur qui conduit à des concrétions importantes. Une amélioration de la combustion est nécessaire pour éliminer ces problèmes (finesse accrue du combustible, et tuyère à haute impulsion).

**Entretien général.** Le taux de fiabilité des différents ateliers doit être le plus élevé possible pour réduire les consommations calorifique et électrique. Toutes les causes d'arrêt par incident doivent être analysées systématiquement, classées par ordre et les parades nécessaires doivent être mises en place. Un taux de fiabilité élevé (supérieur à 95%) doit être l'objectif minimal à atteindre.

**Entretien spécifique: suivi des broyeurs à boulets.** Ce type de broyeur nécessite un suivi régulier de ses performances énergétiques (kWh/t) car celles-ci peuvent se dégrader en quelques mois. Le bon état des équipements et le niveau de la charge en boulets doivent être vérifiés plusieurs fois par an. Un complément de boulets doit être installé à ces occasions. Par ailleurs, une fois par an, la charge en boulets doit être réassortie en fonction des recommandations des fournisseurs ; les boulets étant extraits du broyeur, ils doivent être triés, la composition de la charge existante sera comparée à la charge définie par une société spécialiste, et un réassortiment sera effectué pour retrouver la composition idéale. Si l'état des équipements internes ne nécessite (usure des blindages, cloisons, etc.), leur remise en état doit également être programmée. Un suivi attentif des performances, doublé de visites internes, permet de maintenir à un niveau optimum les performances des broyeurs.

**Entretien des fours.** Les principaux problèmes rencontrés proviennent d'une instabilité du procédé ou d'un défaut d'entretien mécanique.

- Procédé: Une mauvaise combustion crée des phénomènes de volatilisation suivis de bouchages en partie amont (voir «Stabilité du procédé de cuisson»). Les conséquences sont des arrêts de four (et donc une surconsommation calorifique et électrique), une consommation accrue en briques (tout arrêt provoque un choc thermique préjudiciable à la durée de vie des réfractaires), voire la déformation de la virole du four, et donc une fiabilité basse de cet atelier. Un audit par un spécialiste permet de résoudre ces problèmes (voir «Stabilité du procédé de cuisson»). De mauvaises performances du refroidisseur et/ou une forte instabilité de son fonctionnement contribuent à l'aggravation de ces problèmes «Procédé».
- Entretien mécanique: L'entretien mécanique des joints d'étanchéité en amont et en aval est souvent insuffisant. Un défaut d'étanchéité du joint en amont se traduit par une aspiration d'air extérieur froid, au lieu d'un tirage, via le four, des gaz de combustion: réduction de la production, risque de cuisson en atmosphère réductrice (favorisant les problèmes procédé). Un défaut d'étanchéité du joint en aval diminuera la température de l'air de combustion, réduira la récupération thermique du refroidisseur, la production du four, et augmentera les consommations énergétiques (calorifiques et électriques).

**Ventilation.** Le remplacement des registres à ventelles à l'aspiration des ventilateurs par des variateurs de vitesse (ventilateur de tirage, ventilateur du four, ventilateurs de soufflage du refroidisseur) est une source significative d'économie en énergie électrique.

**Visites régulières.** La pratique de visites d'inspection quotidiennes avec des programmes définis à l'avance permet de réduire les sources de panne, et donc de surconsommation énergétique. Tous les points de contrôle des équipements doivent être listés avec la fréquence des contrôles, et les données à recueillir. Un suivi des machines doit être établi afin de pouvoir pratiquer une maintenance «conditionnelle», mieux adaptée qu'une maintenance «préventive».

**Autres.** Les vérifications habituelles pour toute activité industrielle (rendement des moteurs électriques, gestion du courant réactif, stockage des matériaux à l'abri des intempéries, vérification du bâtiment, etc.) s'appliquent et n'ont pas été détaillées ici.

des nécessités techniques, sécurité, fiabilité, performances d'une façon globale (avec cependant l'examen des variantes jugées opportunes). Comme évoqué précédemment, l'aspect énergétique n'est qu'un aspect de l'ensemble des buts des projets de rénovation, et chaque cimenterie ou chaque atelier constitue un cas particulier d'étude. Finalement, si les contraintes économiques obligent l'obtention d'une rentabilité suffisante, les aspects sécurité et respect de l'environnement ne peuvent être laissés de côté.

Plusieurs scénarii doivent alors être étudiés pour rechercher une rentabilité raisonnable et minimiser les risques financiers dus à l'investissement. Par ailleurs, les temps d'arrêt de production, lors d'une rénovation, doivent être pris en compte dans l'estimation des solutions disponibles. Autant que possible, les travaux doivent être réalisés avant l'arrêt de l'atelier concerné.

## Résultats environnementaux

Le CO<sub>2</sub> émis par les lignes de production provenant de la combustion dépend de la **consommation calorifique de l'installation**; les émissions sont comprises entre 300 et 500 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker pour tous combustibles confondus (entre 130 kg et 500 kg de CO<sub>2</sub>/tonne de clinker si les émissions provenant des déchets et de la biomasse sont exclues, comme recommandé dans les procédures de calcul des émissions de CO<sub>2</sub>). Toute mesure d'économie d'énergie et d'utilisation de déchets comme combustibles de substitution ou comme matière première permettra donc de réduire l'utilisation de combustibles fossiles primaires et de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées.

Si le procédé cimentier est un gros consommateur d'énergie génératrice de CO<sub>2</sub>, les **procédés de fabrication du clinker** contribuent aussi aux émissions de gaz à effet de serre. En effet, au cours de la fabrication du clinker, le calcaire (carbonate de calcium) se décompose en CO<sub>2</sub> (gaz carbonique) qui s'échappe à la cheminée et en CaO (chaux libre). Le CO<sub>2</sub> émis lors de la décarbonatation est évalué à 520 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker. La seule façon de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> est d'utiliser des produits déjà décarbonatés, tels que les laitiers de sidérurgie. On les utilise généralement en substitut partiel du clinker car ils disposent d'une aptitude au développement des résistances mécaniques similaires au clinker. On commence à les utiliser comme substitut partiel des matières constitutives du «cru» lorsque que leur aptitude à remplacer le clinker est faible.

## Étapes de réalisation du diagnostic

La première étape du diagnostic énergétique d'une cimenterie est de **situer sa performance énergétique** par rapport aux unités modernes ainsi qu'aux moyennes évoquées précédemment, ce qui permet d'évaluer approximativement les marges de gain envisageables. Le diagnostic est donc amorcé par une revue des données caractéristiques du fonctionnement de l'usine : tonnage des ventes annuelles, factures d'électricité, factures de combustibles.

La deuxième étape est d'identifier le **taux de fiabilité des équipements**, puisqu'une disponibilité faible des équipements

(arrêts fréquents, etc.) est source de dépenses énergétiques importantes (il faut rappeler que l'objectif de fiabilité est 95%). Ce problème est rencontré fréquemment dans les pays en développement et constitue un axe important du diagnostic, d'autant plus qu'une part importante de l'amélioration de la fiabilité peut ne pas nécessiter d'investissements importants : il est nécessaire d'implanter des méthodes rigoureuses de suivi des équipements, d'analyser les sources réelles d'arrêt (des défauts mécaniques ou électriques peuvent cacher une origine procédé) et de trouver les parades nécessaires. Les méthodes d'entretien curatif puis préventif laissent progressivement la place à l'entretien conditionnel. Ce type d'entretien est à privilégier, puisqu'il cherche à suivre au mieux le comportement des équipements afin de déterminer à l'avance le moment de l'intervention.

Une **comptabilisation, par atelier et par équipement**, des consommations calorifiques et électriques est nécessaire pour disposer d'un bilan énergétique suffisamment précis pour permettre d'identifier les sources principales d'amélioration de la performance énergétique. Pour un atelier de broyage comprenant plusieurs broyeurs, il est important de connaître les puissances spécifiques de chacun d'eux individuellement, puisqu'il n'est pas rare qu'un seul des broyeurs soit la cause d'une mauvaise performance globale de l'atelier.

Une fois que les consommations énergétiques spécifiques sont bien identifiées par atelier et par équipement, il est souhaitable d'examiner les **différentes possibilités d'amélioration énergétique** en intégrant obligatoirement les exigences de qualité visée pour le produit, mais aussi les nécessités de respect de l'environnement, en fonction des normes applicables ou à venir. Ces études sont à mener au cas par cas avec des experts internationaux qui peuvent faciliter la définition des axes de progrès à examiner.

Il est aisé de définir les coûts d'investissement d'une nouvelle unité de production. Il est cependant plus difficile d'évaluer l'évolution des coûts énergétiques, qui sont liés à des données politiques et conjoncturelles. Or, ils représentent une part importante du prix de production. Toute étude de modernisation devra donc être établie en mesurant la sensibilité de la rentabilité de l'investissement aux coûts des énergies consommées.

## Conclusion

L'énergie représente une partie importante du prix de revient de la fabrication du ciment. La volonté affirmée de réduire les émissions de gaz à effet de serre participe également à la nécessité d'améliorer les performances énergétiques des cimenteries. Qu'il s'agisse d'énergie calorifique ou électrique, la disparité des performances rencontrées est très importante. Il y a donc un gisement important d'économies à réaliser. L'amélioration des performances énergétiques des usines cimentières nécessite une étude détaillée par ligne de production et par atelier (cuisson et broyage). Les projets de rénovation sont la plupart du temps complexes car ils doivent intégrer tous les aspects de la production associés aux projets de réduction de consommation énergétique (sécurité, environnement, qualité, etc.). La valorisation d'autres

# Le diagnostic énergétique d'une cimenterie

matériaux, tels que le laitier venant de la sidérurgie, la pouzzolane, ou les cendres volantes venant des centrales thermiques au charbon sont autant d'exemples permettant d'améliorer les performances énergétiques et ainsi réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les principales sources d'économie d'énergie à évaluer par le diagnostic sont:

- Les processus de fabrication (voie sèche, refroidisseur moderne, installation de séparateurs dynamiques sur les broyeurs...);
- L'obtention d'un taux de fiabilité des équipements de l'ordre de 95%;
- La valorisation énergétique de déchets dans les fours de cimenteries, permettant à la fois de réduire la consommation d'énergie fossile et d'éliminer ces résidus;
- L'optimisation de la composition du ciment, visant l'utilisation d'autres matières (laitier, cendres volantes, pouzzolanes) que le clinker comme matières premières dans la production de ciment.

La mise en œuvre des savoir-faire et des technologies les plus efficaces dans les industries cimentières des pays en développement ou en transition peut bénéficier des mécanismes associés à la lutte contre les changements climatiques, dont le mécanisme de développement propre et l'application conjointe, permettent le transfert technologique des pays industrialisés vers les pays en développement ou en transition. La réalisation d'un diagnostic énergétique constitue la première étape indispensable pour identifier les mesures à mettre en œuvre et pour bénéficier des transferts technologiques disponibles.

L'étude de cas montre comment l'amélioration de l'efficacité énergétique s'inscrit généralement dans une stratégie plus globale d'amélioration de la rentabilité des installations ou d'augmentation de la production.

## Références

### Ouvrages

Duda, Walter H., 1985. *Cement Data Book, Vol. 1, 2 and 3*. Mac Donald, & Evans, London.

Energy Conservation Center, 1994. *Energy Conservation in Cement Industry – Output of a seminar*. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and Ministry of International Trade and Industry, Sri Lanka, p. 44. <http://www.unido.org/userfiles/PuffK/cement.pdf>

Groupe de travail sur les minéraux et les métaux, 1999. *Changements climatiques: Options de l'industrie du ciment et du béton*. Table de concertation de l'industrie, Processus canadien sur les changements climatiques, p. 18. [http://www.nccp.ca/html\\_f/tables/pdf/options/ciment.pdf](http://www.nccp.ca/html_f/tables/pdf/options/ciment.pdf)

### Sites Internet

Association Canadienne du Ciment: [www.ciment.ca](http://www.ciment.ca)

Association du Ciment Portland: [www.portcement.org](http://www.portcement.org)

Association Européenne du Ciment: [www.cembureau.be](http://www.cembureau.be)

Banque d'information sur la fabrication des ciments: [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)

Liste des projets-pilotes de réduction des gaz à effet de serre (plusieurs projets dans des cimenteries): [www.unfccc.int/program/coop/aij/aijproj.html](http://www.unfccc.int/program/coop/aij/aijproj.html)

### Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie) sont publiées par l'IEPF.

Directeur de la publication:

El Habib Benessahraoui, directeur exécutif, IEPF

Comité éditorial:

Sibi Bonfils, directeur adjoint, IEPF

Jean-Pierre Ndoutoum, responsable de programme, IEPF

Supervision technique:

Maryse Labriet, Environnement Énergie Consultants

Rédaction:

Jean-Pierre Pillard, consultant cimentier,

Chassieu (France). Ancien Directeur chez Lafarge

Édition et réalisation graphique:

Communications Science-Impact



Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie IEPF

L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie est un organe subsidiaire de l'Agence intergouvernementale de la Francophonie (AIF). Il a été créé en 1988 par la Conférence générale de l'Agence, suite aux décisions des deux premiers Sommets des chefs d'État et de Gouvernement des pays ayant en commun l'usage du français. Son siège est situé à Québec, au Canada. Sa mission est de contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement des partenariats au sein de l'espace francophone dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF)  
56, rue Saint-Pierre, 3<sup>e</sup> étage  
Québec (QC) G1K 4A1 Canada  
Téléphone: (1 418) 692 5727  
Télécopie: (1 418) 692 5644  
Courriel: [iepf@iepf.org](mailto:iepf@iepf.org)  
Site Web: [www.iepf.org](http://www.iepf.org)



L'Agence de l'efficacité énergétique du Québec (AEE) est un organisme public dont la mission est d'assurer la promotion de l'efficacité énergétique pour toutes les sources d'énergie et dans tous les secteurs d'activités. Les mandats de l'Agence portent sur l'encadrement législatif du domaine de l'efficacité énergétique, sur la conception et l'application de programmes de promotion, sur la réalisation de projets de démonstration, ainsi que sur le développement de matériel et d'outils d'information, de formation et de sensibilisation à l'intention de tous les consommateurs d'énergie. L'AEE assume également un mandat de promotion de l'expertise québécoise en efficacité énergétique à l'échelle internationale.

Agence de l'efficacité énergétique du Québec  
5700, 4<sup>e</sup> Avenue Ouest, B405  
Charlesbourg (Québec) G1H 6R1  
Téléphone: (1 418) 627-6379  
Télécopie: (1 418) 643-5828  
Courriel: [international@aee.gouv.qc.ca](mailto:international@aee.gouv.qc.ca)  
Site Web: [www.aee.gouv.qc.ca](http://www.aee.gouv.qc.ca)

## Étude de cas

### Rénovation d'une cimenterie<sup>1</sup>

#### Raisons du projet et description

Pour une capacité de 3 millions de tonnes, l'usine comportait 10 fours dont 6 à voie humide et 4 à voie sèche. Il a été décidé de moderniser cette usine pour des raisons de compétitivité: le prix de revient du ciment fabriqué était excessif. Une démarche « qualité et environnement » a été intégrée au projet de rénovation.

L'étude de modernisation a examiné deux options principales: d'une part, la construction d'une nouvelle ligne de cuisson; d'autre part, la rénovation des 4 lignes à voie sèche, en deux étapes. La rénovation a été retenue, constituant le choix technico-économique le plus attrayant.

L'analyse détaillée des matières premières et de l'installation existante ont conduit principalement aux recommandations et actions suivantes:

- Amélioration du broyage du cru en installant des chambres de séchage et des séparateurs dynamiques, en vue d'augmenter la capacité de broyage et d'améliorer la finesse pour assurer une meilleure aptitude à la cuisson des matières premières.
- Installation de préchauffeurs à faible perte de charge à 4 étages, avec possibilité d'installer ultérieurement une précalcination partielle pour porter la capacité des fours à 2200 t/j (au lieu de 1550 t/j).
- Implantation d'un « by-pass » de déconcentration en chlore (5%) des gaz de sortie de four.
- Mise en place de refroidisseurs à grilles, avec plaques caisson dans la première chambre afin d'améliorer la consommation calorifique et contribuer à l'augmentation de la capacité des lignes de cuisson.
- Remplacement des filtres pour la protection de l'environnement (tours de conditionnement et filtres électrostatiques pour les fours, filtres à manche avec échangeur air/air pour l'air d'exhaure des refroidisseurs).
- Optimisation de l'installation d'air comprimé

#### Résultats techniques et financiers

En plus des économies énergétiques, les actions mises en œuvre ont permis d'améliorer la protection de l'environnement, la qualité des produits, la fiabilité des installations et la productivité. L'investissement total s'est élevé à 175 DM en 1991. Le temps de retour sur investissements a été court (quelques années).

#### Tableau : Résultats

	Unités	Avant	Après
Production clinker	t/j	1 550	2 200
Consommation calorifique	MJ/t clinker	3 956	3 366
Consommation électrique	kWh/t ciment	162	108,9

#### Stratégie de mise en œuvre et financement

Le diagnostic a suivi les étapes habituelles décrites dans la fiche. Étant donné que la rénovation d'une ligne prend environ 18 mois, la réalisation des travaux a été étalée sur plusieurs années, permettant aussi de répartir les investissements et de ne pas arrêter le fonctionnement de tous les fours en même temps, afin de maintenir la production. Le coût de la rénovation a été assumé par le cimentier.

Le projet forme un tout indissociable, et la partie purement énergétique, bien qu'importante, ne peut être isolée de l'investissement d'ensemble. Il n'est donc pas possible de ventiler les dépenses et les gains résultant d'une rénovation en fonction de chacune des conséquences induites, étant donné les interrelations entre toutes les conséquences.

Par exemple, un nouveau refroidisseur induit des économies d'énergie, mais aussi une amélioration du procédé de cuisson et de la qualité du clinker, des besoins d'entretien plus faibles, un système de filtration moins onéreux à installer que si le refroidisseur n'avait pas été changé, etc. Ou encore, le fait de réduire la consommation calorifique réduit le débit de gaz envoyé à l'atmosphère, et donc la taille des filtres à installer, exigés pour respecter les contraintes environnementales de limitation de rejets. Dans un tel cas, la réduction de coûts sur les filtres grâce à la réduction de consommation énergétique n'est pas évaluée distinctement.

#### Conclusion

Le projet a permis d'augmenter le volume de production, tout en réduisant les consommations spécifiques en énergie calorifique et électrique des activités de production. Cette étude de cas montre comment le diagnostic énergétique d'une cimenterie s'intègre généralement dans une démarche plus large de rénovation et d'amélioration des procédés de production, en vue d'une amélioration de la qualité du produit et de la rentabilité, intégrant les contraintes environnementales futures surtout dans le cas d'installations de grande envergure.

1. Pour des raisons de confidentialité, certaines informations ne peuvent être fournies et certaines données ne peuvent être détaillées.