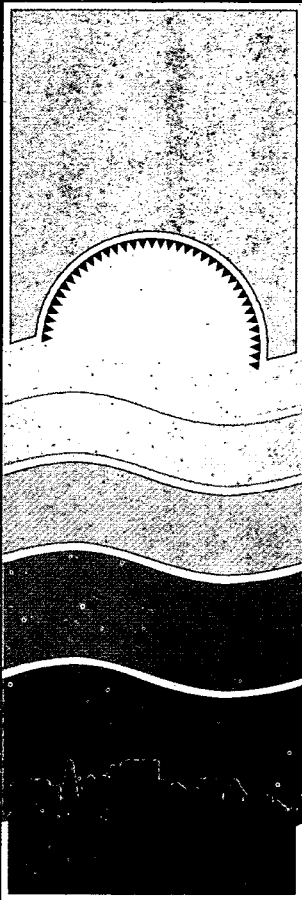


**CCME**

Le Conseil canadien  
des ministres  
de l'environnement

Canadian Council  
of Ministers  
of the Environment



# LIGNE DIRECTRICE NATIONALE POUR LES ÉMISSIONS DES FOURS À CIMENT

Initiative N306  
mars 1998  
PN 1285

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) est la principale tribune intergouvernementale au Canada qui permet la discussion et la mise en oeuvre d'initiatives conjointes sur des questions environnementales d'envergure nationale, internationale et mondiale. Les 13 gouvernements membres collaborent à l'élaboration de normes, pratiques et lois environnementales uniformes à l'échelle du pays.

Conseil canadien des ministres de l'environnement  
123, rue Main, bureau 360  
Winnipeg (Manitoba) R3C 1A3  
Téléphone : (204) 948-2090  
Télécopieur : (204) 948-2125

Préparé par le Groupe d'étude multipartite et par le Comité de gestion de l'initiative N306

PN 1285  
ISBN: 1-895925-96-7

Pour obtenir des exemplaires supplémentaires, veuillez communiquer avec :

Documents CCME  
a/s Publications officielles du Manitoba  
200, rue Vaughan  
Winnipeg (Manitoba) R3C 1T5  
Téléphone : (204) 945-4664  
Télécopieur : (204) 945-7172



# Table des matières

<b>Glossaire</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abréviations</b> .....	<b>v</b>
<b>Préface</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
Fours à ciment .....	3
<b>Ligne directrice nationale pour les émissions des fours à ciment</b> .....	<b>4</b>
Applicabilité .....	4
Émissions d'oxydes d'azote .....	4
Émissions d'autres polluants .....	5
Mesures et surveillance .....	5
<b>Annexe A</b> — Liste des membres du groupe d'étude .....	<b>7</b>
<b>Annexe B</b> — Document technique de base - Évaluation des technologies en matière de réduction des émissions de $\text{No}_x$ , applicables aux fours à ciment : Sommaire .....	<b>9</b>

# Glossaire

Dans le contexte des Lignes directrices, le sens de certains termes et expressions correspond aux définitions données ci-dessous.

<b>Additifs cimentaires:</b>	matériaux substitués au clinker dans la production de ciment, notamment le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, les scories de centrales électriques et d'autres produits secondaires ferreux ou à base de calcaire provenant de diverses industries.
<b>Brûleur à faible génération de NO<sub>x</sub>:</b>	brûleur conçu pour mélanger et brûler par étapes le combustible et l'air, de façon à abaisser les températures maximales de la flamme et ainsi réduire les émissions de NO <sub>x</sub> .
<b>Calcination:</b>	libération de dioxyde de carbone gazeux par la roche calcaire (carbonate de calcium), due à l'apport de chaleur au four à ciment ou à chaux.
<b>Ciment:</b>	produit pulvérulent utilisé en construction, produit par combinaison, dans un four fonctionnant à haute température, de matériaux renfermant de l'oxyde de calcium, de l'alumine, de l'oxyde de fer et de la silice, qui forment une combinaison de silicates de calcium.
<b>Clinker:</b>	produit intermédiaire dans la préparation du ciment, constitué principalement de granules d'oxyde de calcium, formés par transformation chimique à haute température de l'alimentation de matière première, puis refroidis et broyés en une fine poudre.
<b>Combustion à air étagée:</b>	technologie de réduction des NO <sub>x</sub> , qui utilise plus d'une étape de combustion à l'entrée du four à précalcinateur pour former une atmosphère réductrice, suivie d'une région oxydante.
<b>Four à ciment rotatif:</b>	grand cylindre rotatif en acier, monté horizontalement et légèrement incliné. L'alimentation, constituée d'un mélange humide ou sec de calcaire et d'argile, est introduite au four par son extrémité la plus élevée pour être calcinée par des gaz chauds (le CaCO <sub>3</sub> forme de l'oxyde de calcium et du CO <sub>2</sub> ), puis fondue ou frittée en un clinker grâce à un apport supplémentaire de chaleur très intense.
<b>Four à précalcinateur:</b>	four à ciment incorporant un brûleur supplémentaire à l'entrée du four, ce qui entraîne la calcination peu après la section de préchauffage du four. Il s'agit souvent de fours plus courts, possédant une capacité de production et un rendement énergétique plus élevés.
<b>Four à préchauffeur:</b>	type de four à ciment ou à chaux, utilisant une tour d'échange thermique à plusieurs étages du côté de l'alimentation, pour préchauffer la matière première introduite, activer la calcination et améliorer le rendement énergétique global.
<b>Gaz à effet de serre:</b>	ensemble de gaz, comprenant notamment le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, qui captent la chaleur solaire réfléchiée par la terre, d'où un réchauffement de la couche atmosphérique inférieure.
<b>Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>):</b>	désigne collectivement l'oxyde nitrique (NO) et le dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ), sous forme d'équivalent de dioxyde d'azote.
<b>Refroidisseur à clinker:</b>	dispositif d'échange thermique, situé au point de déversement du clinker à l'extrémité du four; il refroidit les granules de clinker en fournissant de l'air de combustion préchauffé au brûleur principal du four.
<b>Réduction non catalytique sélective :</b>	méthode de réduction des émissions utilisant l'injection d'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) ou de composés contenant de l'ammoniac dans le gaz de carneau, à une température assez élevée pour convertir les NO <sub>x</sub> en azote et en vapeur d'eau.
<b>Réduction catalytique sélective :</b>	méthode de réduction des émissions où l'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) est injecté dans le gaz de carneau en amont de la structure catalytique, à une température modérée appropriée, pour convertir les NO <sub>x</sub> en azote et en vapeur d'eau.

# Abréviations

CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
MEC	Mesure en continu des émissions
kg	kilogramme
NO <sub>x</sub>	oxydes d'azote
SO <sub>2</sub>	dioxyde de soufre
CO	monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	dioxyde de carbone
CaO	oxyde de calcium
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium
NH <sub>3</sub>	ammoniac
COV	composés organiques volatils

## Préface

En mai 1991, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a publié la phase 1 du Plan de gestion des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et des composés organiques volatils (COV). Le but du Plan est d'atteindre régulièrement, d'ici l'an 2005, l'objectif canadien de qualité de l'air pour l'ozone, soit une concentration maximale de 82 parties par milliard pendant une heure. Cette ligne directrice donne suite à l'initiative N306 du Plan, qui est l'une de celles ayant pour but de prévenir un accroissement futur des émissions en limitant les rejets des nouvelles sources. Elle porte sur la limitation des émissions des nouveaux fours à haute température utilisés dans l'industrie du ciment et elle recommande de réduire les émissions des fabriques existantes qui sont en train d'être modifiées ou améliorées. Bien que cette ligne directrice établisse des limites maximales pour les émissions, à l'échelle nationale et de façon générale, il est entendu que les autorités de réglementation régionales, provinciales ou territoriales peuvent décider d'imposer des normes plus strictes pour faire face aux problèmes de qualité de l'air à l'échelle régionale ou locale.

Les principes suivants ont été considérés comme importants dans cette démarche : prévention de la pollution; rendement énergétique; coût-efficacité; objectif global visant à réduire au minimum les diverses émissions. Bien que les objectifs d'émissions de  $\text{NO}_x$  de cette ligne directrice visent les nouveaux fours, il a été reconnu que certaines stratégies de réduction des émissions pourraient également se révéler bénéfiques dans le cas de fours existants modifiés. Lorsqu'il y a des possibilités d'améliorer le rendement environnemental et le

rendement énergétique de fours auxquels des modifications majeures sont prévues, les taux d'émissions et les méthodes de réduction de celles-ci devraient être évalués en étroite consultation avec les autorités de réglementation concernées.

Pour le bien général de l'environnement, la ligne directrice encourage l'utilisation de produits de substitution pour les matériaux à base de ciment et pour les combustibles fossiles, lorsque le promoteur de projet peut démontrer que les émissions de  $\text{NO}_x$  n'iraient pas en augmentant. Elle encourage également la mise en oeuvre de mesures pour améliorer le rendement énergétique dans la production de ciment.

La ligne directrice a été élaborée, dans le cadre d'un processus de consultation multipartite, par un groupe d'étude constitué de représentants de l'industrie du ciment et de la chaux, de fabricants d'équipements, de groupes environnementaux et des gouvernements provinciaux, régionaux et fédéral. Nous remercions sincèrement tous ceux qui ont contribué à élaborer cette ligne directrice.

Les demandes de renseignements sur la ligne directrice peuvent être adressées à :

Gestionnaire  
Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie  
Direction générale de la prévention de la pollution  
atmosphérique  
Environnement Canada  
351, boul. Saint-Joseph  
Hull (Québec) K1A 0H3

Téléphone : (819) 953-1120  
Télécopieur : (819) 953-8903

## Introduction

La ligne directrice nationale pour les émissions des fours à ciment a été élaborée dans le but de constituer une base nationale cohérente visant à limiter les émissions de  $\text{NO}_x$  et d'autres polluants, tout en encourageant l'industrie à améliorer son rendement énergétique. Un document technique de base, préparé dans le cadre du processus de consultation, décrit les industries canadiennes du ciment ainsi que les méthodes existantes de réduction des  $\text{NO}_x$ . Un résumé de ce document est présenté à l'Annexe B afin d'aider à l'évaluation des stratégies de réduction visant tant les nouveaux fours que les fours anciens ou modifiés.

Dans cette ligne directrice nationale, les limites de  $\text{NO}_x$  pour les fours à ciment sont exprimées en tonnage d'émissions admissible par unité de production de clinker (kg/tonne). Pour déterminer les niveaux admissibles d'émissions par des fours à ciment où des modifications majeures sont prévues, il faudra prendre en considération l'utilisation d'additifs pour réduire le clinker dans la production de ciment, ou encore tenir compte de l'amélioration du rendement énergétique grâce à la récupération de la chaleur résiduelle provenant des gaz de carneau des fours à ciment. La ligne directrice traite également des questions liées à d'autres polluants atmosphériques usuels ainsi que de la surveillance des émissions.

### Fours à ciment

L'industrie du ciment est basée sur la conversion d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) et d'argile en clinker, constitué d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), par addition d'une grande quantité de chaleur dans un four rotatif alimenté au charbon ou au gaz. La formation de  $\text{NO}_x$  se produit principalement lors de cette étape de traitement à haute température visant à transformer la matière décarbonatée en clinker, et pendant la calcination initiale du calcaire. Cette dernière libère également du dioxyde de carbone. La production de clinker peut se faire : dans un four long à procédé par voie humide avec alimentation en matière première sous forme de suspension; dans un four long à procédé par voie sèche; enfin, avec

une alimentation sèche dans des fours à préchauffeur ou à précalcinateur plus modernes et plus efficaces.

Plusieurs méthodes de réduction des  $\text{NO}_x$  ont été évaluées au cours de l'élaboration de la ligne directrice, mais seulement certaines d'entre elles ont été expérimentées à l'échelle commerciale. Elles incluent les techniques de combustion qui réduisent ou suppriment les émissions à leur point de départ, et les techniques post-combustion qui réduisent les émissions déjà produites, comme on l'indique ci-dessous, avec des explications détaillées dans le Document technique de base :

- modifications de la combustion
- brûleurs à faible génération de  $\text{NO}_x$
- combustion à air étagé
- réduction non catalytique sélective
- réduction catalytique sélective

L'optimisation du procédé par des modifications de la combustion est l'une des premières options à retenir si l'on veut améliorer le rendement du procédé et réduire les émissions. L'emploi de brûleurs à faible génération de  $\text{NO}_x$  est à l'étude sur des installations existantes à l'échelle internationale, avec des résultats très variables. Ces brûleurs nécessitent généralement un système de combustion indirecte, dans lequel la majeure partie de l'air alimente la combustion à l'extérieur de l'enveloppe du brûleur. La réduction non catalytique sélective, utilisant l'injection de composés d'ammoniac, fait également l'objet de recherches pour trouver une technique de post-combustion applicable. On possède très peu d'expérience sur les méthodes d'épuration des gaz de carneau — comme la réduction catalytique sélective — ou sur des techniques comme la combustion à air étagé pour les fours à précalcinateur. L'expérience a démontré que les émissions de  $\text{NO}_x$  provenant des fours à combustion de charbon sont souvent plus faibles que celles produites par les fours brûlant du gaz naturel.

La présente ligne directrice constate que les procédés optimisés et à bon rendement énergétique, comme les fours à préchauffeur et à précalcinateur possédant

des moyens de contrôle modernes pour le procédé et les émissions de particules, représentent les moyens les plus efficaces pour réduire au minimum la majeure partie des émissions des fours à ciment. Ces méthodes sont axées sur des mesures de prévention de la pollution tenant compte du coût et de l'efficacité, et visent diverses émissions, notamment celles des gaz à effet de serre.

Les émissions de NO<sub>x</sub> peuvent également être réduites à leur minimum en diminuant le rapport clinker/ciment; des essais ont montré que les combustibles dérivés de déchets ont, dans certains cas, eu une incidence positive sur la réduction des émissions. Les autorités de réglementation devraient évaluer les répercussions environnementales globales de l'incorporation de cendres volantes ou de scories mélangées au produit cimentaire fini pour réduire les besoins en clinker, ainsi que l'emploi de combustibles résiduels de remplacement, notamment les solvants, les pneus et les gaz qui s'échappent des sites d'enfouissement, comme suppléments pour les combustibles traditionnels. À titre de guide technique pour les normes de fonctionnement et de rendement, on pourra consulter une publication spéciale du CCME, intitulée «*Lignes directrices nationales pour l'utilisation de déchets dangereux et non dangereux comme combustible de substitution dans les fours à ciment*».

## **Ligne directrice nationale pour les émissions des fours à ciment**

### **Applicabilité**

Les limites d'émissions de la présente ligne directrice s'appliquent à tous les nouveaux fours à ciment, d'une capacité supérieure à 1 500 tonnes par jour dits «gros fours», dont la construction fait l'objet d'une autorisation officielle finale après le 1<sup>er</sup> janvier 1998. Les clauses d'applicabilité pourraient être modifiées par les autorités de réglementation régionales ou provinciales concernées.

Dans le cas d'un gros four à ciment existant, les limites de la ligne directrice pour les nouvelles installations indiquées ci-dessous s'appliqueront lorsqu'une modification entraîne une augmentation de 25 % de la capacité autorisée du four. Une

modification entraînant une augmentation de capacité inférieure à cette valeur ne devrait être permise qu'une seule fois, de façon à éviter les améliorations multiples visant à contourner l'objectif de cette ligne directrice.

Dans le cas des modifications dues à une augmentation inférieure à 25 % de la capacité, un programme visant à améliorer le rendement devrait tirer parti de technologies efficaces et rentables pour réaliser des réductions d'émissions faisables. Les niveaux d'émissions par les fours modifiés, ainsi obtenus, n'ont pas nécessairement à respecter les limites établies pour les nouveaux fours. Lorsqu'il existe des possibilités d'améliorer le rendement environnemental et le rendement énergétique de fours sur lesquels des modifications majeures sont prévues, les taux d'émissions et les méthodes de réduction de celles-ci devraient être évalués en étroite consultation avec les autorités de réglementation concernées.

Une dispense spéciale peut être accordée par les autorités de réglementation appropriées, responsables de l'élaboration des lignes directrices pertinentes pour les émissions, dans les cas suivants :

- nouveaux petits fours à ciment, possédant une capacité inférieure à 1 500 tonnes par jour, lorsqu'on peut justifier l'installation d'une unité, comme un four long à procédé par voie sèche;
- lorsqu'on peut démontrer que le fonctionnement d'un four peut parfois se faire dans des conditions exceptionnelles.

### **Émissions d'oxydes d'azote**

Les émissions provenant de nouveaux fours à ciment, alimentés au gaz naturel ou au charbon, ne devraient pas dépasser 2,3 kg de NO<sub>x</sub> par tonne de clinker produit, si l'on se base sur une période moyenne mensuelle. Des périodes moyennes plus courtes avec des taux plus élevés, reflétant un régime irrégulier d'émissions, pourraient être acceptées par les autorités compétentes si cela se justifie pour des raisons particulières au site.

Si d'autres combustibles sont utilisés temporairement, notamment des huiles lourdes ou

du coke de pétrole, ou encore si d'autres mélanges combustibles, renfermant par exemple des gaz de sites d'enfouissement, sont brûlés en permanence, alors il faut obtenir les autorisations voulues auprès des autorités de réglementation compétentes.

Lorsque le promoteur de projet réussit à démontrer que la production de clinker peut être compensée par l'ajout d'additifs cimentaires, comme les cendres volantes ou les scories, les autorités de réglementation pourraient accepter une limite plus élevée de  $\text{NO}_x$  (kg/tonne de clinker). Elle pourrait être basée sur la portion de clinker produite à partir de matière première primaire, excluant tout additif cimentaire, comme les cendres volantes ou les scories. Une limite de ce genre permettrait d'augmenter le taux d'émissions en kg/tonne de clinker produite par le four tout en reconnaissant une réduction des émissions nettes globales pour une quantité donnée de ciment produit. En pareille circonstance, l'emploi d'additifs ne devrait pas résulter en une augmentation des émissions totales de  $\text{NO}_x$  par le four à pleine capacité.

Une démarche semblable pourrait être envisagée s'il est démontré que la chaleur résiduelle provenant de la cheminée ou du refroidisseur de clinker sert à un procédé industriel — chauffage ou autre — normalement non associé au fonctionnement d'un four. La limite d'émissions correspondrait aux économies d'émissions qui résulteraient de l'utilisation réduite du combustible normalement employé pour ce chauffage ou un autre procédé.

### **Émissions d'autres polluants**

Lorsqu'on envisage d'apporter des modifications à un procédé pour diminuer les émissions de  $\text{NO}_x$ , il faut veiller à réduire au minimum les effets nuisibles d'autres polluants sur l'environnement, tout en conservant une qualité acceptable pour le clinker. Il faudrait concevoir de nouveaux fours et choisir des matières premières permettant de réduire au minimum les émissions de  $\text{SO}_2$  et de CO, tout en respectant les lignes directrices sur les  $\text{NO}_x$ . Ces émissions devraient être évaluées site par site, selon les conditions déterminées par l'organisme de réglementation approprié.

### **Particules**

Les fines particules de poussières, présentes dans les gaz du four libérés par la cheminée principale ou provenant du système de refroidissement du clinker peuvent être captées par des dispositifs comme les dépoussiéreurs électrostatiques ou les épurateurs à manches filtrantes en tissu. Les émissions de particules dans les gaz libérés par les nouveaux fours ne devraient pas dépasser 0,2 kg par tonne de clinker à la sortie de la cheminée, et 0,1 kg à partir du système de refroidissement du clinker.

### **Dioxyde de soufre**

Le dioxyde de soufre produit à partir de la matière première alimentant le procédé, et du soufre présent dans le combustible, est généralement capté en grande partie dans la tour de préchauffage et dans le broyeur de clinker. Étant donné que la composition de la matière première est étroitement liée au site et que les émissions de  $\text{SO}_2$  sont parfois inversement liées aux émissions de  $\text{NO}_x$ , il faudrait concevoir de nouveaux fours permettant de réduire au minimum les concentrations de  $\text{SO}_2$  dans le gaz de carneau tout en respectant les lignes directrices sur les émissions de  $\text{NO}_x$ .

### **Monoxyde de carbone**

La présence de monoxyde de carbone dans le gaz libéré par le four ou dans les systèmes de contrôle des particules en aval devrait faire l'objet d'un suivi pour éviter toute situation dangereuse et être en mesure d'arrêter l'alimentation du four en combustible si les concentrations de CO dépassent les limites spécifiées pour l'installation. Les nouveaux fours devraient être conçus de façon à réduire au minimum les concentrations de CO tout en respectant les lignes directrices sur les émissions de  $\text{NO}_x$ .

### **Mesures et surveillance**

Afin de pouvoir vérifier qu'une installation fonctionne en respectant la présente ligne directrice, tous les nouveaux fours à ciment devraient disposer d'un système de mesure en continu des émissions (MCE) pour permettre de mesurer les émissions de  $\text{NO}_x$  et de  $\text{SO}_2$ . Si le système de mesure utilisé pour

le contrôle du procédé à la sortie du four doit servir à la préparation des rapports sur les émissions, alors le promoteur de projet devrait présenter une méthode qui montre que ces émissions sont représentatives de celles libérées par la cheminée.

Dans tous les cas, les critères de mesure, de surveillance et d'élaboration de rapports doivent être soumis à l'approbation de l'organisme de réglementation approprié. Les méthodes de mesure devraient normalement correspondre à celles élaborées et publiées à cette fin par Environnement Canada.

Les fours existants — auxquels on prévoit des modifications majeures — devraient faire l'objet de mesures à l'aide d'un système MCE ou de toute autre méthode possédant une efficacité comparable pour la surveillance en continu, selon les exigences de

l'organisme de réglementation approprié. Une méthode de ce type pourrait comprendre des calculs de bilan massique pour  $\text{SO}_2$ , ou une surveillance prévisionnelle/paramétrique. Les méthodes peuvent être appuyées par un échantillonnage et une analyse périodiques à la source.

Les usines qui envisagent de demander des allocations d'émissions pour l'utilisation d'additifs cimentaires ou de chaleur perdue devraient communiquer les calculs pertinents de bilan massique et d'énergie.

# Annexe A

## Liste des membres du groupe d'étude

### Gouvernements provinciaux et régionaux

Martin Lecours	Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec
Hanna Corinthios	Ministère de l'Environnement de l'Ontario
Chow-Seng Liu	Alberta Environmental Protection
Kamal Bhattacharyya	District régional du grand Vancouver

### Industrie

Allan Moore	Tilbury Cement
Peter Darbyshire	Continental Lime (Canadian Lime Institute)
Murray Smith <sup>(1)</sup>	Union Gas (Association canadienne du gaz)
Charles Coles <sup>(2)</sup>	St. Lawrence Cement (Association canadienne du ciment Portland)
Jacques Denizéau	Lafarge Canada
Steve Prahacs <sup>(3)</sup>	Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers
Richard Plante	Graybec Lime
Paul Arsénault <sup>(4)</sup>	Pillard Combustion

### Organisme environnemental non gouvernemental

Bruce Walker <sup>(5)</sup>	STOP
-----------------------------	------

### Gouvernement fédéral

Horace Whaley	Laboratoire de recherche sur l'énergie du CANMET
Hugh Dibbs	Environnement Canada
Manfred Klein	Environnement Canada

- (1) Remplace Ron Brintnell, Union Gas
- (2) Remplace Michael Nisbet, Lafarge Canada
- (3) Remplace Iver Simonsen, ICRPP
- (4) Remplace Gilles Uguen, Pillard
- (5) Remplace Ellen Schwartzel, Pollution Probe

# Annexe B

## Document technique de base Évaluation des technologies en matière de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, applicables aux fours à ciment et à chaux

Radian-Canada Inc., avril 1995

### Sommaire

Dans le cadre du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), Environnement Canada s'attaque, parmi d'autres problèmes de pollution atmosphérique, à la question des émissions de NO<sub>x</sub>, en coordonnant un processus de consultation multipartite afin d'établir des directives nationales pour les émissions par les principales sources de combustion fixes. L'initiative N306 du Plan CCME vise les industries fabriquant le ciment et la chaux, et se concrétisera par la publication d'une ligne directrice sur les émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) pour les usines nouvelles ou modifiées.

Le présent rapport de Radian Canada Inc. présente à Environnement Canada et aux membres du Groupe d'étude N306 sur les fours à ciment et à chaux une étude et une évaluation des technologies en matière de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, applicables aux fours à ciment et à chaux. Le rapport est fondé sur l'information provenant des deux industries concernées, des organismes de réglementation au Canada, aux États-Unis et en Europe, et enfin de Radian qui a étudié directement les technologies de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>. L'évaluation ainsi obtenue sera utilisée par le CCME pour préparer des recommandations en vue de l'élaboration de lignes directrices nationales pour les émissions. Elle pourra également devenir partie intégrante de la publication de base du CCME pour l'application de mesures correctives par les installations existantes.

Le rapport donne l'information de base sur les industries canadiennes du ciment et de la chaux, avec une vue d'ensemble à la fois des procédés de

production et du profil économique. Il présente les données existantes sur les émissions de NO<sub>x</sub> par les sources canadiennes ou autres, et donne un aperçu des lignes directrices et des objectifs concernant les émissions de NO<sub>x</sub> pour les deux industries à travers le monde. La partie principale du rapport consiste en une étude détaillée des technologies existantes de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, notamment une description de ces procédés et une évaluation de leur applicabilité aux fours à ciment et à chaux, aussi bien du point de vue de l'ingénierie que de l'aspect économique. On examine également les techniques de mesure en continu de ces émissions. Les conclusions et les recommandations mettent l'accent sur les éventuelles avenues qui s'offrent en matière de technologies applicables de réduction des émissions et d'élaboration de lignes directrices nationales pour les émissions de fours nouveaux ou modifiés.

Comme il existe des différences significatives entre les deux industries ainsi que dans la quantité d'information pertinente disponible au sujet des émissions de NO<sub>x</sub> et de leur réduction, les industries du ciment et de la chaux seront traitées séparément dans le présent rapport.

#### ***Fours à ciment***

Pendant les 20 dernières années, on a acquis des connaissances considérables sur la production et les émissions de NO<sub>x</sub> ainsi que sur leur réduction, grâce à des recherches sur les combustibles fossiles et sur la combustion dans les chaudières de centrales et

**Tableau A1. Émissions de NO<sub>x</sub> par les fours à ciment\***

Combustible	Voie humide	Voie sèche, four long	Préchauffage	Précalcination
Gaz naturel	9,0	7,0 - 9,5	5,65	1,7 - 3,0
Mazout	AD	3,3 - 4,6	AD	AD
Charbon	1,45 - 4,33	2,4 - 4,6	1,5 - 2,85	1,35 - 1,95

\*kg NO<sub>2</sub>/tonne de clinker; AD = absence de données

les fours industriels. Bien que beaucoup de chercheurs aient tenté de le faire, ces données ne peuvent être extrapolées au procédé de fabrication du ciment Portland. On dispose d'une quantité limitée de données publiées sur les émissions de NO<sub>x</sub> par les fours à ciment. Cependant, en dépit de ces limitations, il se dégage une forte corrélation entre le niveau d'émissions de NO<sub>x</sub> générées et le type de four ainsi que le combustible employé (tableau A1).

Les fours modernes à préchauffeur ou à précalcinateur produisent généralement moins d'émissions de NO<sub>x</sub> que les fours plus anciens, à rendement énergétique moindre et fonctionnant par voie humide ou sèche (fours longs), lorsqu'ils sont alimentés avec le même type de combustible. Par ailleurs, les fours longs à voie sèche ne produisent pas nécessairement moins d'émissions de NO<sub>x</sub> que les fours à voie humide.

Avec le même type de four, le charbon produit nettement moins de NO<sub>x</sub> que le gaz naturel ou l'huile lourde, ce qui vient clairement confirmer que, vu la haute température de combustion dans les fours à ciment (1 630-1 900 °C contre 1 150 °C dans les chaudières de centrales), les NO<sub>x</sub> thermiques constituent le facteur dominant, les NO<sub>x</sub> de combustible ne jouant qu'un rôle secondaire. En ce qui concerne la production de NO<sub>x</sub>, la prédominance du charbon comme combustible, par opposition au gaz naturel ou au mazout, représente une différence majeure entre les fours à ciment et la plupart des autres sources fixes d'émissions de NO<sub>x</sub>, comme les chaudières industrielles et celles de centrales.

Il semble, d'après certains indices très convaincants, que l'utilisation de combustibles dérivés de déchets (CDD) ait un effet bénéfique sur la réduction des émissions de NO<sub>x</sub>. Cette approche pourrait se révéler très utile, à condition qu'il n'y ait pas d'effets négatifs eu égard aux autres émissions, à la qualité du clinker, et enfin au fonctionnement et à l'entretien du four.

Les limites et les réglementations sur les émissions des fours à ciment, adoptées ou proposées dans différents pays, révèlent non seulement des inquiétudes au sujet des émissions de NO<sub>x</sub> et de leurs effets sur l'environnement, mais également un certain manque de compréhension quant à ce qui peut être accompli de façon pratique et économique. Les limites actuelles sont très variables et dépendent du pays ou de la région où se trouve la cimenterie. Il y a également un problème au niveau de la comparaison des diverses données et limites, qui sont exprimées en unités différentes. La plupart des données européennes sont présentées soit en ppm<sub>v</sub>, soit en mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>. Les mesures peuvent aussi être exprimées à sec ou à l'état humide, ainsi qu'à diverses teneurs en O<sub>2</sub>. On peut aussi, comme c'est généralement le cas en Amérique du Nord, particulièrement au sein des organismes de réglementation, exprimer les valeurs massiques des émissions par unité de produit fini, plus précisément en kg NO<sub>x</sub>/tonne de clinker. La Communauté européenne, où l'industrie du ciment a été modernisée plus vite qu'en Amérique du Nord et où la plupart des fours sont du type soit à préchauffeur, soit à précalcinateur, avec alimentation au charbon, semble s'orienter vers un système de

réglementation à deux niveaux, dans lequel la majeure partie des pays auront une norme de 2,75-3,6 kg NO<sub>x</sub>/tonne de clinker, alors que les pays avant-gardistes dans le domaine de l'environnement, comme l'Allemagne et la Suisse, viseront une plage de 1,3-2,0 kg NO<sub>x</sub>/tonne de clinker. Il semble que le Japon possède lui aussi une norme exigeant un faible taux d'émissions de NO<sub>x</sub>.

Un certain nombre de technologies de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> ont été considérées pour les fours à ciment. Elles peuvent être regroupées en technologies de *combustion* ou de *post-combustion*. Plusieurs d'entre elles ont déjà été expérimentées, utilisées commercialement et appliquées avec succès dans d'autres industries. Les techniques de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> au stade de la combustion sont fonction des mécanismes de formation de NO<sub>x</sub> et elles visent à réduire ces émissions ponctuellement, là où elles sont produites; les techniques post-combustion ne dépendent pas de la façon dont les NO<sub>x</sub> sont produits et elles n'agissent sur les NO<sub>x</sub> qu'après leur formation.

Il faut insister sur le fait que les technologies de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, connues et utilisées dans d'autres secteurs de l'industrie et des services, ne peuvent pas toutes s'appliquer indifféremment aux fours à ciment. Même si l'une de ces techniques de réduction s'est révélée très efficace, par exemple dans le cas des chaudières industrielles, cela ne veut pas dire qu'elle sera aussi performante dans l'atmosphère poussiéreuse et à haute température des fours à ciment. Le procédé utilisé, les conditions de fonctionnement (particulièrement le régime de température et l'excès/manque d'oxygène), les spécifications du produit fini et l'effet sur les émissions d'autres contaminants sont autant d'éléments qui déterminent la faisabilité d'une technique de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> et son applicabilité à une opération particulière dans un four à ciment donné.

Parmi les technologies de réduction des émissions (TRE) de NO<sub>x</sub> envisagées pour les fours à ciment et examinées plus en détail dans le présent rapport, figurent les suivantes :

- modifications de la combustion (MC)

- brûleurs à faible génération de NO<sub>x</sub> (BFGN)
- combustion à air étagé (CAE)
- réduction non catalytique sélective (RNCS)
- réduction catalytique sélective (RCS)

Après une étude approfondie du niveau actuel des connaissances dans ce domaine, on en vient aux conclusions suivantes en ce qui concerne les TRE de NO<sub>x</sub> et leur applicabilité générale à l'industrie du ciment.

Dans l'ensemble, l'application des TRE de NO<sub>x</sub> est spécifique à chaque four. Le bon rendement d'une technique particulière de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> avec un four donné ne garantit pas nécessairement d'aussi bons résultats avec un autre four à ciment apparemment «semblable».

Dans la documentation publiée, on semble unanime à dire que les diverses TRE de NO<sub>x</sub>, soit la modification de la combustion (MC), l'emploi de brûleurs à faible génération de NO<sub>x</sub> (BFGN), la combustion à air étagé (CAE), la réduction non catalytique sélective (RNCS) et la réduction catalytique sélective (RCS), peuvent toutes être utilisées sur les fours à ciment. Cependant, les deux dernières (RNCS et RCS) n'ont pas encore fait leurs preuves à l'échelle industrielle.

Le potentiel de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> s'établit comme suit : 15-30 % pour les MC, 15-30 % pour les BFGN, 20-50 % pour la CAE, et 40-70 % pour la RNCS. (Si deux technologies sont mises en oeuvre en même temps, la réduction globale n'est pas égale à leur somme.) La faisabilité technique, par ordre décroissant, est la suivante : MC > BFGN > CAE > RNCS; les coûts relatifs et le rendement par rapport aux coûts s'établissent, par ordre ascendant, comme suit : MC < BFGN ≈ CAE < RNCS.

Toute MC permettant une consommation réduite de combustible et une amélioration de la stabilité du procédé contribuera à réduire au minimum les émissions de NO<sub>x</sub> (potentiel de 15 à 30 % de réduction). Les paramètres de fonctionnement du four — notamment la température de la zone de

combustion, la quantité d'air en excès et la forme de la flamme — comptent parmi les facteurs qui influent le plus sur le niveau des émissions de  $\text{NO}_x$ . Toutes les mesures visant à améliorer le rendement du combustible, à augmenter la stabilité du procédé et à réduire les températures dans la zone de combustion devraient avoir un effet bénéfique sur la qualité du produit. Mais, les mesures prises pour modifier les conditions de combustion et améliorer le milieu réducteur dans la zone de combustion peuvent influencer sur la qualité du clinker et sur le fonctionnement du four.

De toutes les TRE de  $\text{NO}_x$  disponibles, c'est celle des BFGN qui a été la plus considérée et la plus expérimentée, du moins dans les fours longs à chauffage indirect au charbon et fonctionnant par voie sèche, dans les fours à préchauffeur et dans les fours à précalcinateur (potentiel de 15 à 30 % de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ ). Il y a sur le marché quelques fournisseurs de BFGN. Le rendement de ces brûleurs varie d'une usine à l'autre, et ils ne donnent pas toujours les résultats escomptés. L'expérience de longue date avec les BFGN dans l'industrie du ciment est mitigée : un certain nombre de questions demeurent quant à leur efficacité dans les fours à ciment. Les coûts d'investissement pour les BFGN sont relativement faibles; cependant, ces coûts peuvent devenir beaucoup plus élevés s'il faut procéder à la conversion simultanée d'un système à *chauffage direct au charbon* à un système à *chauffage indirect*. L'opération des BFGN est particulière au site et la qualité du clinker et le fonctionnement du four peuvent être altérés; de plus, le niveau des émissions de CO et d'hydrocarbures totaux (HT) risque d'augmenter.

La CAE convient plutôt aux fours à *précalcinateur* ou *préchauffeur* (potentiel de 20 à 50 % de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ ), bien que cette technique puisse aussi être utilisée, dans une certaine mesure, sur les fours longs pour brûler les combustibles secondaires à mi-four. Une seule cimenterie avec une installation de CAE fonctionnant à l'échelle commerciale a communiqué des résultats sur son rendement. La CAE installée en 1987-1988 dans cette cimenterie a permis de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$ ; cependant, il y avait eu augmentation

simultanée et significative des concentrations des émissions de CO et de  $\text{SO}_2$ . Bien que, dans des conditions idéales, la CAE puisse être adaptée sur des systèmes de préchauffage/précalcination existants, en réalité cette technique de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  ne pourrait être incorporée que lors de la conception d'une nouvelle usine, et non après sa construction. Le coût d'investissement de la CAE peut se limiter à celui de brûleurs supplémentaires, plus le coût de toute modification additionnelle ou complémentaire, propre au site. Cependant, la conversion majeure d'un four à procédé par voie humide ou d'un four long à procédé par voie sèche en un four moderne à préchauffeur ou précalcinateur et CAE intégrée pourrait coûter plusieurs millions de dollars. Il est peu probable que la CAE altère la qualité du clinker, mais les émissions de CO, de  $\text{SO}_2$  et HT pourraient augmenter. Étant donné le faible nombre d'installations utilisant cette technique et le peu d'essais réalisés avec la CAE, des tests additionnels sont requis. Il n'en demeure pas moins que la CAE laisse entrevoir des possibilités intéressantes pour la réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  dans l'industrie du ciment, avec un bon rapport efficacité/coût.

La RNCS elle aussi ne convient qu'à des fours modernes à préchauffeur ou précalcinateur (potentiel de 40 à 70 % de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ ). Bien qu'il y ait eu récemment quelques essais à court terme aux États-Unis et en Europe, avec injection d'ammoniac ou d'urée, cette technique n'a pas encore pleinement fait ses preuves. Il n'y a pas encore eu d'installation de RNCS à l'échelle réelle dans l'industrie du ciment. La mise en place de la RNCS entraînerait des frais d'exploitation supplémentaires pour le coût des réactifs. La RNCS ne devrait pas altérer la qualité du clinker, vu qu'elle est installée en aval de la zone de clinkérisation. Il existe un risque d'émissions de  $\text{NH}_3$ , de CO et de  $\text{PM}_{10}$  (particules de matières inférieures à 10 microns), ainsi que de formation d'une traînée renfermant des sels d'ammonium. Bien que la RNCS laisse entrevoir des possibilités intéressantes pour la réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  par les fours à ciment à préchauffeur ou précalcinateur, le nombre très limité d'essais effectués jusqu'ici, l'absence d'installations à l'échelle commerciale et les coûts

très élevés d'investissement et d'exploitation justifient la nécessité d'effectuer d'autres essais et de vérifier la faisabilité à long terme de cette technique.

La RCS peut réduire fortement (70 à 90 %) les émissions de  $\text{NO}_x$  de tous les fours, mais à des coûts très élevés d'investissement et d'exploitation pour les réactifs et la main-d'oeuvre, et dans des conditions de faisabilité technique encore incertaines. Il n'y a eu aucun essai de la technique RCS sur un four à ciment.

En ce qui a trait à une limite d'émissions de  $\text{NO}_x$  des nouveaux fours à ciment ou de ceux qui sont modifiés, il semble qu'une plage de 2,0-2,5 kg de  $\text{NO}_x$ /tonne de clinker serait à considérer comme cible pour les émissions de  $\text{NO}_x$  par des fours à préchauffeur/précalcinateur modernes avec alimentation au charbon (ceux-ci constituent la majeure partie des fours construits au Canada et ailleurs dans le monde pendant les 15 à 20 dernières années, et probablement aussi ceux qui seront construits dans le futur).

Le tableau A2 résume les principales caractéristiques des TRE de  $\text{NO}_x$  dans le cas des fours à ciment.

### **Fours à chaux**

La documentation technique ne donne pratiquement aucune information sur les émissions de  $\text{NO}_x$  par les fours à chaux. Cette situation est peut-être due au fait que l'industrie de la chaux est beaucoup moins importante que celle du ciment, que ses fours fonctionnent à des températures beaucoup moins élevées que celles des fours à ciment (~ 1 200 °C contre 1 500 °C), d'où une production moindre d'émissions de  $\text{NO}_x$ , et que l'industrie de la chaux, contrairement à celle du ciment, ne surveille pas les concentrations de  $\text{NO}_x$  aux fins de contrôle des conditions de combustion dans le four. D'après EPA AP-42, les facteurs d'émissions des fours rotatifs se situeraient généralement dans une plage de 1,4-1,7 kg de  $\text{NO}_x$ /tonne de chaux, selon le type de combustible employé, alors que, selon l'information limitée fournie par les producteurs canadiens de chaux, les facteurs d'émissions couvrent plutôt une

plage de 0,5 à 3,5 kg de  $\text{NO}_x$ /tonne de chaux. Il semblerait que les fours verticaux et les fours Calcimatic produisent moins d'émissions de  $\text{NO}_x$ .

Du fait de certaines similitudes entre les procédés de fabrication du ciment et de la chaux, et malgré les différences qui existent entre les deux produits et procédés, il est probable que les technologies de réduction d'émissions les plus prometteuses dans le cas des fours à ciment pourraient également, en cas de besoin et après les modifications qui s'imposent, s'appliquer aux fours à chaux rotatifs. Il s'agit des techniques suivantes :

- modification de la combustion (MC)
- brûleurs à faible génération de  $\text{NO}_x$  (BFGN)
- combustion à air étagé (CAE)
- réduction non catalytique sélective (RNCS)

Cependant, il semble qu'aucune de ces technologies de réduction d'émissions n'ait encore été expérimentée sur des fours à chaux rotatifs, et l'industrie s'interroge pour l'instant sur leur applicabilité. On estime qu'à ce stade-ci il n'est pas nécessaire d'envisager des mesures particulières pour la réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  par les fours verticaux et Calcimatic, vu leur faible production de ces émissions, mais cela devrait être vérifié et confirmé grâce à des mesures indépendantes.

## **Recommandations**

Les recommandations suivantes sont faites au sujet de l'application des techniques de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  aux fours à ciment et à chaux :

### **Fours à ciment**

- Il faudrait entreprendre une étude pour obtenir une base de données sur les émissions totales de  $\text{NO}_x$  et sur les émissions de  $\text{NO}_x$  par unité de production dans les fours à ciment canadiens, par type de four et type de combustible.
- Il faudrait pleinement exploiter la MC et optimiser le procédé sur tous les fours à ciment avant d'envisager l'application de toute autre technique de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$ .

**Tableau A2. Comparaison des techniques de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> pour les fours à ciment**

Technique de réduction	Faisabilité technique	Capacité de réduction de NO <sub>x</sub>	Plage du coût annualisé 000 \$/année	Rentabilité en \$/t de NO <sub>x</sub> éliminée	Effet sur la qualité du clinker	Effet sur d'autres émissions
MC	très bonne (tous les types de fours)	15-30 %	-	-	peut être soit positif soit négatif	SO <sub>2</sub> , CO, et HT <sup>x</sup> risquent d'augmenter
BFGN fours à combustion indirecte* ou directe**	très bonne (tous les types de fours)	15-30 %	110-160* 370-590**	340-570* 1 280-2 050**	peut varier selon l'installation et le type de combustible; peut être négatif	peut varier selon l'installation; CO et HT risquent d'augmenter
CAE	très bonne (fours à précalcinateur, préchauffeur <sup>†</sup> et four long <sup>†</sup> )	20-50 %	120-160 <sup>†</sup> 180-220 <sup>†</sup>	250-400 <sup>†</sup> 660-940 <sup>†</sup>	aucun	CO et HT risquent d'augmenter
RNCS	moyenne (fours à précalcinateur)	40-70 %	610-1 250	1 220-1 690	aucun	risque d'émissions de NH <sub>3</sub> et de PM <sub>10</sub>
RCS	faible (tous les types de fours)	70-90 %	3 510-10 050	4 840-7 500	aucun	risque d'émissions de NH <sub>3</sub> et de PM <sub>10</sub> ; SO <sub>3</sub> peut augmenter

- D'autres essais des BFGN sont nécessaires dans l'industrie du ciment pour évaluer leur capacité à long terme de limiter leurs émissions de NO<sub>x</sub> à des valeurs régulièrement basses, et de produire en même temps un clinker de haute qualité, sans pour autant influencer négativement sur les autres émissions.
- La CAE et la RNCS sont des techniques prometteuses pour une réduction significative, efficace et rentable des émissions de NO<sub>x</sub>; mais, en raison du faible nombre d'essais réalisés jusqu'ici et du peu d'installations existantes, il faudra évaluer plus à fond les effets complets sur l'environnement et l'impact de ces techniques.
- Il faudrait également étudier de près les conséquences de la réglementation des émissions de NO<sub>x</sub> sur les autres polluants (SO<sub>2</sub>, CO, COV, particules), et peser leur impact négatif.
- À mesure que les fours à voie humide et les fours longs à voie sèche approchent de la fin de leur cycle de vie, ils pourraient être convertis en fours à préchauffeur ou à précalcinateur, si les conditions du marché ainsi que la faisabilité technique et économique le permettent.
- Pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>, on devrait envisager l'emploi de combustibles dérivés des déchets (CDD), à condition qu'il n'y ait aucun effet négatif sur l'environnement et que cela n'altère pas la qualité du clinker et ne nuise pas au fonctionnement ni à l'entretien du four.

- Des systèmes de mesure en continu des émissions (MCE), montés à la sortie de la cheminée ou du four, pourraient se révéler nécessaires pour satisfaire aux normes de surveillance de tous les gros fours. D'autres systèmes, comme la SPE (surveillance prévisionnelle des émissions), pourraient servir dans le cas des fours plus petits.

En se fondant sur l'information provenant des installations les plus récentes de type four long à procédé par voie sèche ou four à préchauffeur/précalcinateur, qui brûlent soit du charbon soit du gaz, et pour lesquels on disposait de données fiables sur les émissions de NO<sub>x</sub>, les représentants de l'industrie du ciment ont préparé un premier projet de lignes directrices à l'intention du Groupe d'étude N306 sur le ciment et la chaux. Dans le cas des fours à ciment neufs ou modifiés de façon significative, l'industrie, en se basant sur les meilleures technologies prouvées de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, propose deux séries de lignes directrices : l'une pour des périodes à court terme,

fondées sur les moyennes quotidiennes plus deux écarts-types (avec conformité à 95 % du temps); l'autre pour des moyennes plus longues, soit annuelles ou mensuelles.

Les tableaux A3 et A4 présentent les lignes directrices, proposées par l'industrie.

### **Fours à chaux**

- Il existe un besoin d'évaluation des émissions de NO<sub>x</sub> et de développement d'une base canadienne de données établissant le lien entre la production de NO<sub>x</sub> et le type de four à chaux et de combustible.
- Ce n'est qu'après l'obtention de cette base de données, qu'on pourra établir des objectifs pour la réduction des émissions de NO<sub>x</sub>. En l'absence de cette information, une plage de 1,5-2,0 kg NO<sub>x</sub>/tonne de chaux est proposée comme objectif provisoire pour les fours à chaux rotatifs modernes, avec préchauffage.

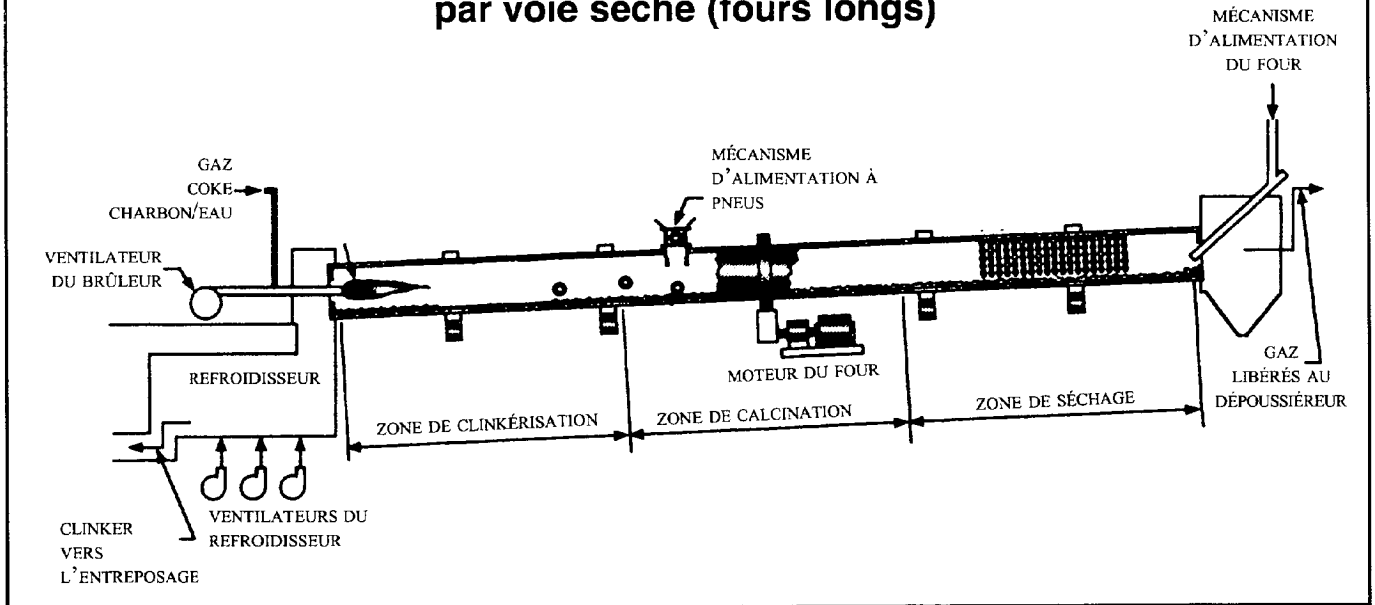
**Tableau A3. Lignes directrices sur les émissions de NO<sub>x</sub> par les fours à ciment, moyennes quotidiennes (kg NO<sub>2</sub>/tonne de Clinker)**

	Four long, procédé par voie sèche	Four à préchauffeur/ précalcinateur
Four alimenté au gaz	$5,0 + 2 \times 0,35 = 5,7$	$2,1 + 2 \times 0,2 = 2,5$
Four alimenté au coke/charbon	$3,0 + 2 \times 0,5 = 4,0$	$2,1 + 2 \times 0,2 = 2,5$

**Tableau A4. Lignes directrices sur les émissions de NO<sub>x</sub> par les fours à ciment, base annuelle (kg NO<sub>2</sub>/tonne de Clinker)**

	Four long, procédé par voie sèche	Four à préchauffeur/ précalcinateur
Four alimenté au gaz	5,0	2,1
Four alimenté au coke/charbon	3,0	2,1

## Procédé des fours à ciment par voie humide et par voie sèche (fours longs)



*Source: Association canadienne du ciment Portland*

## Procédé des fours à préchauffeur et à précalcinateur

