

RAPPORT D'ÉTUDE
N°DRC-10-103689-01371A

01/07/2010

**Convention MEEDDM - INERIS 2009
DRC 18b -Opération a**

**Possibilités techniques et économiques de
réduction des émissions de NOx dans le secteur
des cimenteries françaises**

Convention MEEDDM - INERIS 2009

DRC 18b - Opération a

Possibilités techniques et économiques de réduction des émissions de NOx dans le secteur des cimenteries françaises

INERIS

Direction des Risques Chroniques

Client : MEEDDM

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

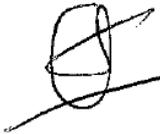
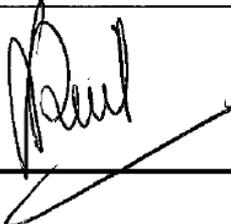
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. DUCOS	J-M. BRIGNON	L. ROUÏL
Qualité	Ingénieur de l'Unité Economie & Décision pour l'Environnement (EDEN) Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité Economie & Décision pour l'Environnement (EDEN) Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle Modélisation Environnementale & Décision (DECI) Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1.	GLOSSAIRE	9
2.	INTRODUCTION.....	10
3.	ELEMENTS DE CONTEXTE.....	11
3.1	Principaux éléments de contexte économique du secteur de la cimenterie.....	11
3.1.1	France	11
3.1.2	Europe et monde.....	15
3.2	Contexte réglementaire.....	16
3.2.1	Réglementation concernant les émissions de NOx des cimenteries en France.....	16
3.2.2	Réglementation concernant les émissions de NOx des cimenteries dans le monde	18
3.2.3	Réglementation concernant les émissions de NOx dans les autres secteurs industriels	19
3.3	Contexte technique	21
3.3.1	Phénomènes à l'origine des émissions de NOx dans une cimenterie	21
3.3.2	Inventaire des techniques de réduction des émissions de NOx	22
3.3.3	Spécificités de mise en œuvre dans les établissements producteurs de ciments alumineux fondus	25
4.	ANALYSE DES EMISSIONS DE NOX DES CIMENTERIES FRANÇAISES.....	28
4.1	Evolution des émissions de NOx sur la période 2000-2008	28
4.2	MTD mises en œuvre par les cimenteries	30
4.3	Analyse économétrique des déterminants des émissions de NOx	31
4.3.1	Analyse des corrélations	31
4.3.2	Résultats de l'analyse économétrique	32
5.	SIMULATION DE L'IMPACT DE SCENARIOS TECHNICO-ECONOMIQUES DE MOYEN TERME SUR LES EMISSIONS DE NOX DU SECTEUR DE LA CIMENTERIE.....	38
5.1	Le modèle de simulation choisi.....	38
5.1.1	Modèle visé initialement	38
5.1.2	Le modèle choisi.....	40
5.2	Construction des scénarios technico-économiques	41
5.2.1	Méthodologie de construction des scénarios	41
5.2.2	Les scénarios	43
5.3	Résultats des simulations	45

6.	EVALUATION DE L'IMPACT DE LA MISE EN ŒUVRE DES MTD SUR LA COMPETITIVITE DU SECTEUR.....	48
6.1	Evaluation du niveau de la compétitivité-prix du secteur	48
6.1.1	La rivalité entre les sociétés	48
6.1.2	Le pouvoir de négociation des fournisseurs.....	50
6.1.3	Le pouvoir de négociation des clients	53
6.1.4	La menace de produits de substitution.....	57
6.1.5	La menace de nouveaux entrants	58
6.2	Evaluation du niveau de la compétitivité-produit.....	61
6.2.1	Attributs intrinsèques du produit.....	61
6.2.2	Attributs du procédé de production	63
6.3	Impacts de la mise en œuvre des MTD sur la compétitivité du secteur	63
6.3.1	Impact sur la compétitivité-prix.....	63
6.3.2	Impact sur la compétitivité-produit.....	69
7.	CONCLUSION	70
8.	REFERENCES.....	72
9.	LISTE DES ANNEXES	73

RESUME

Ce rapport présente une évaluation des possibilités techniques et économiques de réduction des émissions de NOx dans le secteur de la cimenterie. Les possibilités techniques ont été évaluées en observant, d'une part, le rôle des MTD mises en œuvre par les cimenteries dans l'évolution des émissions de NOx sur la période 2000-2008 (analyse ex-post) et, d'autre part, en observant l'effet de scénarios d'évolution de l'adoption de MTD plus ambitieuses sur les émissions de NOx à l'horizon 2020 (analyse ex-ante). Les possibilités économiques ont été évaluées en analysant l'impact de la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et plus coûteuses sur la compétitivité du secteur.

L'analyse ex-post met en évidence le rôle significatif et robuste de deux MTD, à savoir le système expert d'optimisation et la SNCR, cette dernière ayant l'efficacité la plus élevée. Les émissions de NOx dépendent aussi, de façon robuste, du type de voie du four (meilleure efficacité des fours à voie semi-sèche), de la VLE à laquelle l'établissement est soumis et du combustible utilisé (le coke de pétrole augmente les émissions). Le niveau de production de clinker a un effet significatif difficile à identifier sur les concentrations et les flux spécifiques de NOx.

L'analyse ex-ante propose une évaluation de l'impact de scénarios technico-économiques sur les émissions de NOx à l'horizon 2020. Les scénarios simulés sont basés sur des hypothèses d'évolution de la production de clinker et d'évolution de l'adoption des techniques SNCR et SCR. Les résultats sont à comparer au scénario de statu quo dans lequel les émissions passent de 23 485t en 2008 à une fourchette située entre 22 146t et 25 243t en 2020 selon l'hypothèse de production de clinker. Pour le scénario où tous les fours adoptent la SNCR, les émissions de NOx diminuent de 2,8 à 3,2% par rapport au statu quo sur l'hypothèse de production de clinker. Pour le scénario où tous les fours adoptent la SCR, les émissions diminuent de 30,0 à 34,2% par rapport au statu quo. Enfin, pour le scénario le plus proche des préconisations du BREF ciment révisé, les émissions diminuent de 1,0 à 1,3% par rapport au statu quo.

L'analyse de l'impact de la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et plus coûteuses sur la compétitivité du secteur distingue la compétitivité-prix de la compétitivité-produit. Concernant l'impact sur la compétitivité-prix, les possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont en négociant à la baisse le prix des inputs, sans que le fournisseur ne se rétracte, sont relativement faibles. En revanche, les possibilités de transmission vers l'aval en haussant le prix du ciment, sans que les volumes de ciment vendus diminuent, sont beaucoup plus nombreuses. Elles pourraient, cependant, se trouver menacées par l'évolution de la demande vers des matériaux dits plus respectueux de l'environnement tels que le bois ou les briques. La menace pourrait aussi provenir de nouveaux entrants sur le marché français tels que les producteurs d'Afrique du Nord ou d'Asie. Enfin, on peut observer une certaine hausse de la rivalité entre les sociétés françaises par la hausse des importations. Ces menaces pourraient alors entraîner une internalisation du coût des MTD (réduction de la marge de la société) afin de ne pas réduire la compétitivité-prix.

L'analyse de l'impact sur la compétitivité-produit montre que certaines MTD peuvent produire des effets négatifs sur les attributs qualitatifs du ciment et entraîner une baisse de la compétitivité-produit. C'est le cas, par exemple, de la mise en œuvre de MTD consommatrices d'énergie (SCR, SNCR, refroidissement de la flamme). Certaines MTD peuvent également produire des effets positifs et améliorer la compétitivité-produit comme l'optimisation du procédé ou la SCR qui peuvent réduire d'autres émissions polluantes que les NOx.

ABSTRACT

This report presents an evaluation of technico-economic possibilities to reduce NOx emissions from the cement sector. Technical possibilities were evaluated, on the one hand, by observing the role of BATs implemented by cement plants on NOx emissions over the period 2000-2008 (ex-post analysis) and, on the other hand, by observing the effect of scenarios about the implementation of more ambitious BATs on NOx emissions by 2020 (ex-ante analysis). Economic possibilities were evaluated by analyzing the impact of the implementation of more ambitious and expensive BATs on the sector competitiveness.

The ex-post analysis highlights the significant and robust role of two BATs, namely the optimization expert system and the SNCR, the latter having the highest effectiveness. NOx emissions also depend on, in a robust way, the kiln process type (higher effectiveness with semi-dry process kiln), the Emission Limit Value the plant is regulated at and the type of combustible used (petroleum coke increases NOx emissions). It is difficult to identify a significant effect of the clinker production level on NOx specific flux and concentrations.

The ex-ante analysis suggests an evaluation of the impact of technico-economic scenarios on NOx emissions by 2020. Simulated scenarios are based on hypothesis on the evolution of clinker production and on the evolution of SCR and SNCR implementation. Results are compared to a status quo scenario in which NOx emissions pass from 23 485t in 2008 to a range over 22 146-25 243t in 2020 depending on the hypothesis on clinker production. For the scenario where all kilns have SNCR, NOx emissions decrease from 2.8 to 3.2% as compared to the status quo depending on the hypothesis on clinker production. For the scenario where all kilns have SCR, NOx emissions decrease from 30.0 to 34.2% as compared to the status quo. Finally, for the most similar scenario to the revised BREF, NOx emissions decrease from 1.0 to 1.3% as compared to the status quo.

The analysis of the impact of more ambitious and expensive BATs on the sector competitiveness distinguishes the price-competitiveness from the product-competitiveness. As regards the impacts on price-competitiveness, possibilities to transfer the costs of BATs towards upstream activities by negotiating lower prices, without losing the providers, are weak. In contrast, possibilities to transfer the costs of BATs to downstream activities by increasing the cement price, without decreasing the volumes of cement sold, are a lot more numerous. They could, on the other hand, be threatened by an evolution of the demand towards more environmental friendly materials such as wood or bricks. The threat could also come from new entrants in the French market such as Producers from North Africa or Asia. Finally, an increase of the rivalry between French firms is observed through the increase of imports. These threats could then generate an internalization of the costs of BATs (reduction of the firm margin) in order not to reduce the price-competitiveness.

The analysis of the impact on the product-competitiveness shows that some BATs can produce negative effects on cement qualitative attributes and cause a fall in product-competitiveness. This is the case of, for instance, the implementation of more energy consuming BATs (SCR, SNCR, flame cooling). Some BATs can also produce positive effects and improve the product-competitiveness such as the process optimization or the SCR, which can reduce other polluting emissions than NOx ones.

1. GLOSSAIRE

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ATILH	Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques
BDREP	Base de Données du Registre français des Emissions Polluantes
BREF ECME	Document de Référence « Economics and Cross-Media Effects »
CES	Centre d'Economie de la Sorbonne
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
EACEI	Enquête Annuelle sur les Consommations d'Energie dans l'Industrie
EPER	Registre Européen des Emissions Polluantes
FOC	Fuel Oil Domestic
GIC	Grandes Installations de Combustion
HT	Hors Taxes
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
LERNA	Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
PRTR	Registre Européen des Rejets et des Transferts de Polluants
SCR	Réduction Sélective Catalytique
SESSI	Service des Etudes et de Statistiques Industrielles
SNCR	Réduction Sélective Non Catalytique
VLE	Valeur Limite d'Emissions

2. INTRODUCTION

La Directive 2001/81/CE fixe les plafonds nationaux d'émissions de NOx à atteindre pour 2010 dans l'Union Européenne. Pour la France, le plafond est de 0,81 million de tonnes, alors qu'en 2007, ses émissions étaient de 1,35 million de tonnes (source CITEPA¹). Les émissions du secteur du transport routier représentaient, cette même année, 53% des émissions totales (en baisse depuis les années 90), l'industrie manufacturière 14% (en baisse dans les années 90 puis relativement constantes depuis 2000), le secteur agricole 11% (en baisse depuis les années 90) et la transformation d'énergie 9% (en forte baisse dans les années 80 puis relativement constantes depuis les années 90) (source CITEPA).

Des actions de réduction des émissions de NOx ont été conduites au niveau national comme, par exemple, la mise en œuvre du programme européen Auto-oil (suite à la directive Auto-oil relative aux émissions des véhicules du transport routier). Ce programme a déjà permis et permettra encore une réduction conséquente des émissions d'origine automobile. Concernant le secteur industriel (manufacturier et énergie), malgré les efforts réalisés par certains établissements dans le cadre, notamment, d'engagements volontaires, les émissions de ce secteur sont restées globalement stables depuis le début des années 2000 (ATILH, ADEME, 2003). Des efforts supplémentaires s'imposent donc à l'ensemble des secteurs industriels.

Sur demande du Ministère de l'Ecologie, l'INERIS a évalué les possibilités techniques et économiques de réduction des émissions de NOx dans le secteur de la cimenterie, qui représente 14% des émissions industrielles (et 1,5% des émissions totales françaises). Plus précisément, les possibilités techniques ont été évaluées en observant, d'une part, le rôle des MTD mises en œuvre par les cimenteries dans l'évolution des émissions de NOx sur la période 2000-2008 (analyse ex-post) et, d'autre part, en observant l'effet de scénarios d'évolution de l'adoption de MTD plus ambitieuses sur les émissions de NOx à l'horizon 2020 (analyse ex-ante). Ces évaluations ont été réalisées en collaboration avec le Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles (LERN) et le Centre d'Economie de la Sorbonne (CES) (rapport en annexe I). Elles reposent sur des données provenant de l'enquête réalisée par l'INERIS auprès de chaque établissement de cimenterie, de bases de données du SESSI (Antipol, EACEI, EAE) et du registre français des émissions polluantes (BDREP). Les possibilités économiques ont été évaluées en analysant l'impact de la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et plus coûteuses sur la compétitivité du secteur. Cette analyse est basée sur la méthodologie préconisée dans le BREF Economics and Cross-Media effects (CEME). Les informations utilisées proviennent des entretiens réalisés avec chaque société de cimenterie française, leurs représentants nationaux (ATILH) et européens (Cembureau) et de la revue de la littérature.

L'étude comprend 4 parties. La première (chapitre 3) décrit les principaux éléments de contexte économique, réglementaire et technique nécessaires à l'interprétation des résultats. Les deuxième et troisième parties (chapitre 4 et 5) présentent la méthodologie et les résultats des analyses ex-post et ex-ante de l'impact des MTD sur les émissions de NOx. La dernière partie (chapitre 6) présente la méthodologie et les résultats de l'analyse de l'impact économique de la mise en œuvre des MTD sur la compétitivité du secteur de la cimenterie.

¹ Source : http://www.citepa.org/emissions/nationale/Aep/aep_NOx.htm

3. ELEMENTS DE CONTEXTE

Ce chapitre décrit les principaux éléments de compréhension des contextes économique, réglementaire et technique du secteur de la cimenterie en France, en Europe et dans le monde. Ces éléments seront repris lors des différentes analyses présentées dans ce rapport. Ils serviront également lors de l'interprétation des résultats et lors des conclusions. A noter que, les travaux présentés dans ce rapport ne s'adressant qu'au ciment dit « Portland »², les éléments de ce chapitre ne concernent que ce type de ciment.

3.1 PRINCIPAUX ELEMENTS DE CONTEXTE ECONOMIQUE DU SECTEUR DE LA CIMENTERIE

Cette partie présente l'évolution de la production de clinker et de ciment en France, en Europe et dans le monde.

3.1.1 FRANCE

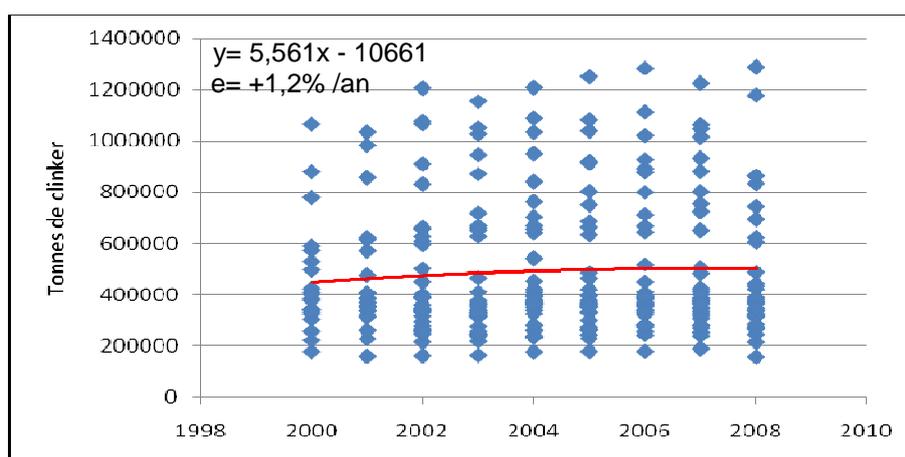
Pour la France uniquement, les chiffres sont tout d'abord présentés par four puis de façon agrégée au niveau national. L'évolution du chiffre d'affaire, de la consommation de ciment et de la capacité de production du secteur français est également présentée.

➤ Les chiffres par four (2000-2008)

Le Graphique 1 présente la production annuelle par four de clinker ainsi que sa tendance sur la période 2000-2008.

Les valeurs proviennent de l'enquête INERIS réalisée début 2009 auprès de chaque établissement de fabrication de ciment (voir annexe 3).

Graphique 1: Evolution de la production annuelle de clinker par four sur la période 2000-2008



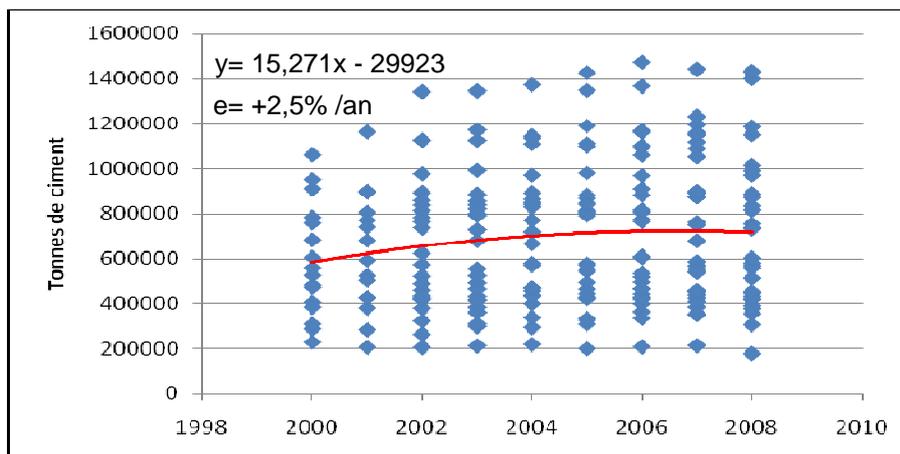
Source : enquête INERIS

² La production de ciment Portland représente presque 80% de la production de liants hydrauliques des cimenteries françaises.

On peut voir à partir de ce graphique que la production moyenne annuelle de clinker par four augmente de 1,2% par an sur la période 2000-2008 et qu'elle est de moins en moins centrée autour de la moyenne des fours (élasticité de l'écart-type de +2,7%), i.e. les fours qui produisaient moins de clinker que les autres en début de période, en produisent encore moins en fin de période, et, ceux qui produisaient plus de clinker en produisent encore plus.

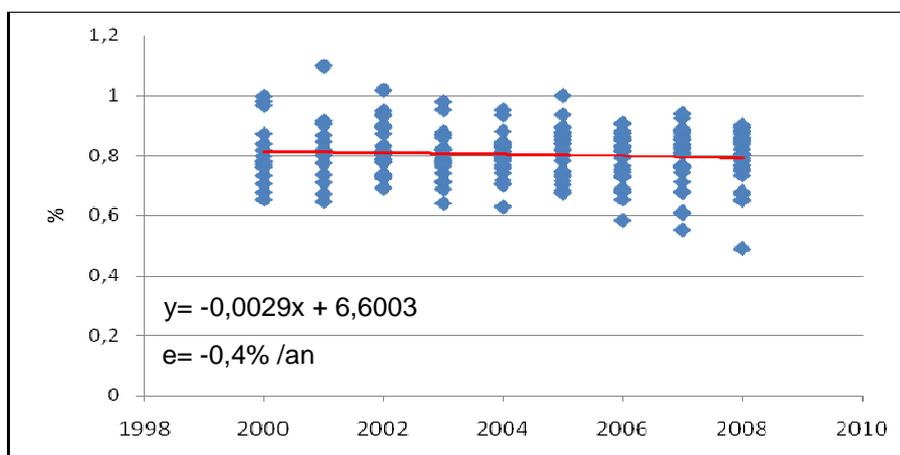
Les deux graphiques suivants présentent l'évolution de la production annuelle de ciment par four ainsi que celle du rapport clinker sur ciment sur la période 2000-2008.

Graphique 2: Evolution de la production annuelle de ciment par four sur la période 2000-2008



Source : enquête INERIS

Graphique 3: Evolution du rapport clinker sur ciment par four sur la période 2000-2008



Source : enquête INERIS

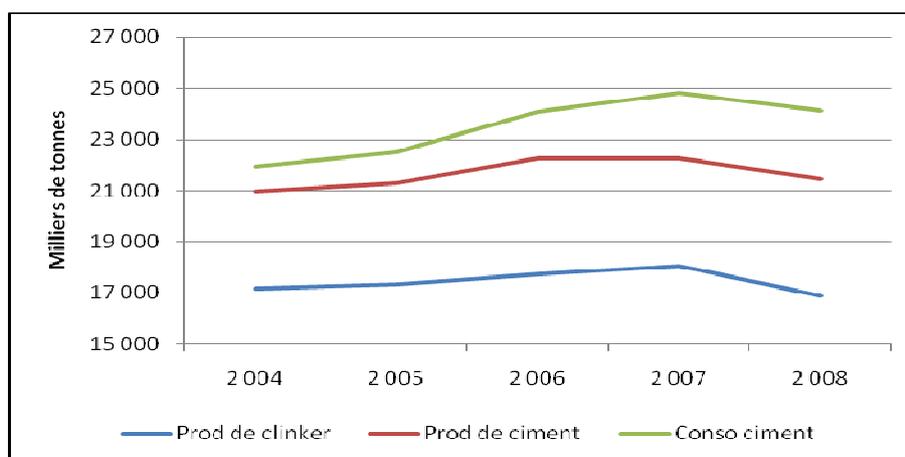
La production moyenne de ciment augmente de 2,5% par an, soit plus vite que celle du clinker sur la même période 2000-2008 (1,2%). Le rapport clinker sur ciment diminue de 0,4% par an. Ce rapport est calculé à partir de la production annuelle de clinker et de ciment et ne prend pas en compte les quantités de clinker stockées et éventuellement utilisées pour produire le ciment des années suivantes. Dans ce cas, le rapport clinker sur ciment pourrait en réalité être constant sur la période observée. On ne peut donc pas avancer que la diminution du rapport telle que représentée dans le Graphique 3 reflète une augmentation de la part des ajouts dans la formulation des ciments.

Comme pour la production de clinker, la production moyenne annuelle de ciment par four est de moins en moins centrée autour de la moyenne des fours (élasticité de l'écart-type de +4,1%) alors que le rapport clinker sur ciment par four est de plus en plus centré autour de la moyenne des fours (élasticité de l'écart-type de -1,3%). Cela signifie, d'une part, que les établissements qui produisaient moins de ciment que les autres en début de période en produisent encore moins en fin de période, et, ceux qui produisaient plus de ciment que les autres en produisent encore plus. Et inversement pour le rapport clinker sur ciment.

➤ Les chiffres agrégés (2004-2008)

Le Graphique 4 permet d'observer l'évolution de la production française de clinker et de ciment ainsi que de la consommation de ciment sur la période 2004-2008. Les données de production de l'enquête INERIS sur la période 2000-2003 étant incomplètes, seuls les chiffres de la période 2004-2008 sont présentés.

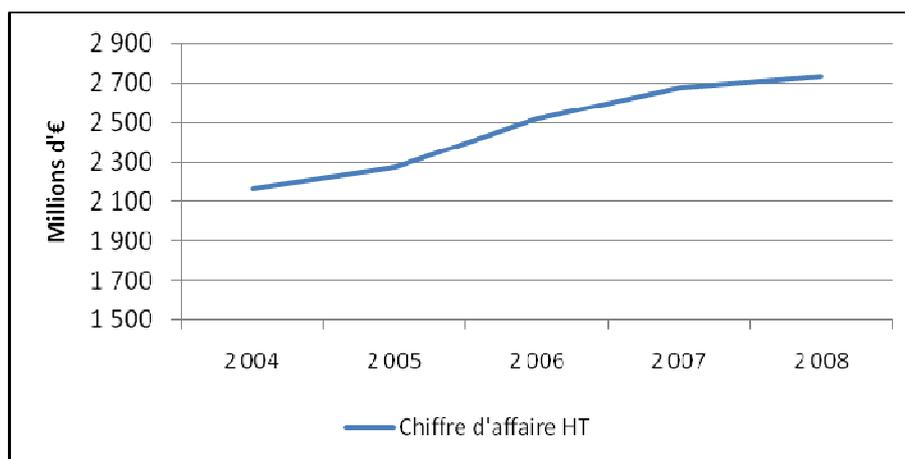
Graphique 4: Evolution des productions totales de clinker et de ciment ainsi que de la consommation de ciment sur la période 2004-2008



Source : ATILH

L'évolution de la production de clinker montre clairement l'effet de la crise des subprimes de 2008. La production de clinker diminue, en effet, d'environ 4% en 2008 par rapport à la moyenne 2004-2007. La production de ciment suit celle du clinker³ avec un léger décrochage à la hausse en 2005 et un ralentissement dès 2006. La consommation de ciment semble évoluer comme celle de la production de clinker et de ciment. Il faut cependant noter que la consommation augmente légèrement plus vite que la production de ciment à partir de 2005, ce qui laisse entrevoir l'entrée de producteurs étrangers sur le marché français. Contrairement à ces tendances, le chiffre d'affaire du secteur poursuit son évolution à la hausse (voir Graphique 5).

Graphique 5: Evolution du chiffre d'affaire HT sur la période 2004-2008



Source : ATILH

➤ La capacité de production

La France compte 29 établissements de fabrication de ciment Portland et 35 fours. Plus de la moitié des fours (18) ont une capacité comprise entre 1000 et 2000 t/j. 5 fours ont une capacité inférieure ou égale à 1000 t/j. 12 fours ont une capacité supérieure à 2000 t/j (voir Tableau 1).

Tableau 1: Capacité de production des fours

Capacité du four	Nb. fours
≤ 1000 t/j	5
1000 < x ≤ 2000 t/j	18
2000 < x ≤ 3000 t/j	6
> 3000 t/j	6
<i>total</i>	35

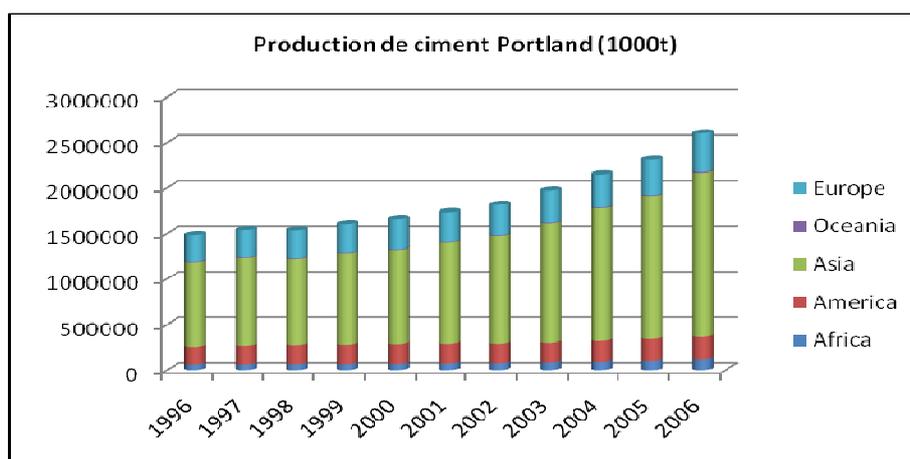
Source : BDREP

³ Le ciment Portland de catégorie CEM I contient au moins 90% de clinker, la catégorie CEMII contient au moins 80% de clinker.

3.1.2 EUROPE ET MONDE

Premier pays producteur au monde, la Chine est à l'origine de 42 % de la production mondiale de ciment Portland et devrait en assurer la moitié d'ici 2020. Le Graphique 6 montre bien l'importance de la croissance de la production du ciment asiatique par rapport aux autres continents. La France est le quatrième producteur européen derrière l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne, et se positionne au dix-huitième rang mondial (SESSI, 2005).

Graphique 6: Evolution de la production de ciment Portland dans le monde sur la période 1996-2006



Source : Cembureau

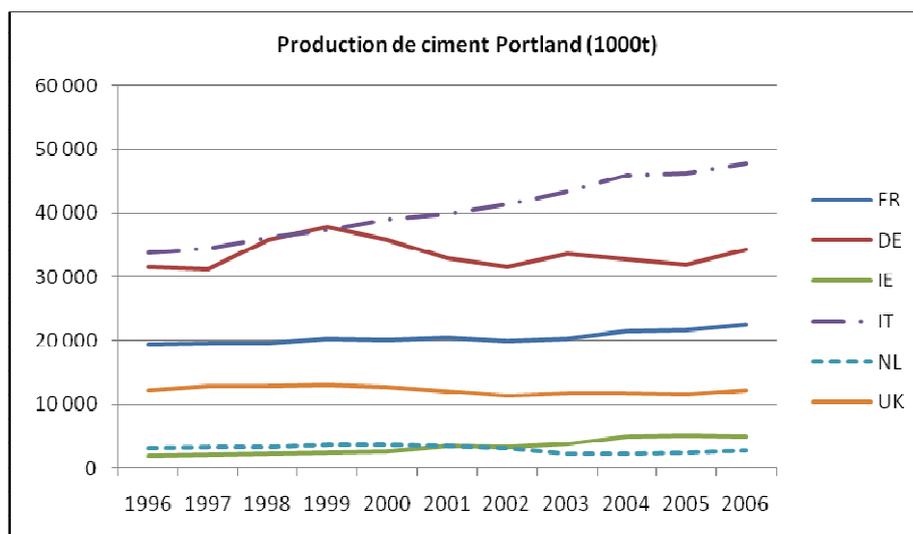
Au niveau européen, il est possible de distinguer 6 classes d'Etats membres en fonction du niveau de leur production de ciment Portland et de l'évolution de cette production sur la période 1996-2006 (Tableau 2):

Tableau 2: Classes d'Etats membre en fonction de l'évolution de leur production de ciment Portland sur la période 1996-2006

	Production <10Mt	Production entre 10Mt et 30Mt	Production >30Mt
Production en hausse	AT ; FI ; IE ; SE ; BG ; EE ; HU ; SI ; SK	FR ; EL ; PT	IT ; ES
Production en baisse	NL ; CZ	UK	
Production variable	BE ; DK ; LU ; LV ; LT ; RO ; CY	PL	DE

La France se situe parmi les Etats membres dont la production est moyenne (entre 10 et 30 millions de tonnes par an) avec une tendance à la hausse. Le graphique suivant illustre ces propos en présentant l'évolution de la production d'un Etat membre de chaque catégorie.

Graphique 7: Evolution de la production d'un EM de chaque catégorie



Source : Cembureau

3.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Cette partie met en parallèle les différentes réglementations françaises, européennes et hors Europe concernant les émissions de NOx dans le secteur de la cimenterie. Le parallèle est également fait entre les différents secteurs émetteurs de NOx.

3.2.1 REGLEMENTATION CONCERNANT LES EMISSIONS DE NOX DES CIMENTERIES EN FRANCE

Les cimenteries d'une capacité de production supérieure à 500 tonnes par jour de clinker entrent dans le champ de la Directive 96/61/CE du Conseil sur la prévention et la réduction intégrée de la pollution (IPPC) puis 2008/1/CE. A ce titre, le document de référence sur les Meilleures Techniques Disponibles (BREF) pour la fabrication du ciment leur est applicable.

Le registre européen des émissions de polluants (EPER) a été institué par la Décision du 17 juillet 2000 de la Commission européenne. Ce registre a ensuite été remplacé par le registre du Règlement 166/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant la création d'un registre européen des rejets et des transferts de polluants (PRTR). La création du PRTR a été transposée en France dans l'arrêté ministériel du 31 janvier 2008 relatif à la déclaration annuelle des émissions polluantes des installations classées soumises à autorisation.

La Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil sur l'incinération des déchets s'applique aux cimenteries co-incinératrices. Cette Directive a été transposée au niveau national sous la forme de 2 arrêtés ministériels, tous deux du 20 septembre 2002. L'un est relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux, l'autre, est relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux. Ces textes sont appliqués depuis le 28 décembre 2005. Avant cette date, les installations en question étaient soumises à l'arrêté du 10 octobre 1996 relatif aux installations spécialisées d'incinération et aux installations de co-incinération de certains déchets spéciaux mais il ne limitait pas les émissions de NOx. En ce qui concerne les cimenteries non co-incinératrices, les émissions polluantes sont réglementées par l'arrêté du 3 mai 1993 relatif aux cimenteries.

Les cimenteries sont également concernées par la Directive 2001/81/CE du Parlement européen et du Conseil fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques dont les NOx. Elle fixe pour la France des limites à l'horizon 2010 qui correspondent à une réduction d'environ 40% par rapport à l'année 2000.

Le Tableau 3 présente une synthèse des VLE nationales et des VLE préconisées dans le premier BREF ciment ainsi que dans le BREF révisé en 2010.

Tableau 3: Synthèses des VLE indiquées dans la réglementation européenne et nationale

Texte réglementaire	Paramètres exprimés en (mg/Nm ³)	Conditions de mesure	Observations
AM cimenteries 3 Mai 1993	Four sans co-incinérateur: 1200 (voie-sèche avec préchauffeur) 1500 (voie semi-sèche et semi humide) 1800 (voie humide et voie sèche sans préchauffeur)	0°C, 1013 mbar, gaz sec Equivalent NO ₂	VLE Mesure en continu lorsque le débit massique en NOx est sup à 50kg/h, sinon, mesure périodique au moins annuellement Moyenne journalière
AM incinération 20 septembre 2002 appliquée à partir du 28 déc. 2005	Four avec co-incinérateur*: 800 existantes 500 nouvelles	0°C, 1013 mbar, gaz sec, Teneur en O ₂ de 10%	VLE Mesure en continu Moyenne journalière
BREF Ciment et Chaux (avant 2010)	200 à 500 Avec la mise en œuvre de la SNCR	0°C, 1013 mbar, gaz sec, Teneur en O ₂ de 10%	VLE (selon la directive IPPC) Mesure en continu Moyenne journalière
BREF Ciment et Chaux (après 2010)	<200-450 avec préchauffeurs 400-800 avec Lepol et four long rotatif	0°C, 1013 mbar, gaz sec, Teneur en O ₂ de 10%	VLE (selon la directive IPPC) Mesure en continu Moyenne journalière
Dir. Incinération des déchets	800 existantes 500 nouvelles	0°C, 1013 mbar, gaz sec, Teneur en O ₂ de 10%	VLE Mesure en continu Moyenne journalière

*L'arrêté préfectoral d'autorisation peut prévoir une valeur limite différente pour les NOx pour les cimenteries existantes utilisant le procédé en voie humide.

Depuis 2009, tous les fours français sont co-incinérateurs. Ils ont également tous été construits avant 2008 (date à partir de laquelle une installation est dite « nouvelle »). Le seuil applicable actuellement sur tous les fours français est donc de 800mg/Nm³. L'arrêté préfectoral d'autorisation peut, néanmoins, prévoir une valeur limite différente pour les cimenteries existantes utilisant le procédé à voie humide (2 fours en France) ou pour les cimenteries qui brûlent moins de trois tonnes de déchets par heure à condition que la valeur limite n'excède pas 1200 mg/Nm³, et ce jusqu'au 1^{er} janvier 2008 en France (arrêté du 20 septembre 2002 relatifs aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux). Au delà de cette date, la valeur limite rejoint celle des installations existantes, i.e. 800.

Enfin, les conditions de respect de la VLE ont soulevé de nombreuses questions lors des entretiens. Les conditions peuvent en effet être différentes en fonction du texte réglementaire :

- Dans l'arrêté du 3 mai 1993, la mesure en continu doit faire apparaître que, pour les heures d'exploitation, la valeur moyenne sur un mois ne dépasse pas la VLE. Toutes les mesures périodiques doivent montrer le respect des VLE. **Ici, la valeur moyenne mensuelle des émissions ne doit pas dépasser la VLE.**
- Dans la Directive 2000/76/CE et l'arrêté du 20 septembre 2002, la VLE est considérée comme respectée lorsqu'aucune des moyennes journalières ne la dépasse. Les moyennes journalières sont calculées à partir des moyennes sur une demi-heure et des moyennes sur 10 minutes. Ces moyennes sont déterminées pendant la période de fonctionnement effectif à partir des valeurs mesurées après soustraction de la valeur d'intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle de confiance ne doit pas dépasser 20% de la VLE. Pour qu'une moyenne journalière soit valide, il faut que, pour une même journée, pas plus de 5 moyennes sur une demi-heure n'aient pu être écartées pour cause de mauvais fonctionnement ou d'entretien du système de mesure en continu. Pas plus de 10 moyennes journalières par an ne peuvent être écartées pour cause de mauvais fonctionnement ou d'entretien du système de mesure en continu. **Ici, la valeur moyenne journalière des émissions ne doit pas dépasser la VLE.**
- Dans le BREF ciment, il n'y a pas d'indication particulière sur les conditions de la VLE. **Ici, les conditions de la VLE sont à déterminer par les autorités nationales.**

Les personnes interrogées lors de nos entretiens ont soulevé le manque de clarté des conditions des VLE indiquées dans le BREF et de la façon dont elles sont transposées dans le droit français. Il est en effet important de savoir s'il est question de valeurs limites à ne pas dépasser dans l'absolu ou de valeurs moyennes limites, auquel cas, la période durant laquelle la moyenne est calculée doit être spécifiée.

Concernant les conditions de mesure des émissions, également évoquées en entretiens, le passage de 11 à 10% d'O₂ des paramètres de mesure des émissions de NO_x a pour conséquence d'augmenter de 10% les valeurs mesurées d'émission de NO_x. Autrement dit, si les émissions mesurées de NO_x d'un four sont de 100 mg/Nm³ avec un paramétrage à 11% d'O₂, elles seront alors de 110 mg/Nm³ avec un paramétrage à 10% d'O₂. Cette remarque a été prise en compte lors de l'analyse des émissions de NO_x sur la période 2000-2008.

3.2.2 REGLEMENTATION CONCERNANT LES EMISSIONS DE NOX DES CIMENTERIES DANS LE MONDE

La Directive 2001/81/CE fixe les plafonds d'émissions de NO_x à atteindre pour 2010 dans l'Union Européenne. La France doit dans ce cadre limiter ses émissions nationales annuelles de NO_x à des quantités ne dépassant pas les 810 000 de tonnes (soit une réduction d'environ 40% par rapport aux émissions de 2007). Le plafond français défini dans cette Directive correspond à la limite supérieure des objectifs de réduction fixés dans le protocole de Göteborg (réduire d'au moins 40 % d'ici 2010 les émissions de NO_x).

La Directive 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrée de la pollution introduit des concentrations seuils de NO_x à ne pas dépasser au niveau du four. Selon cette Directive, l'autorisation d'exploiter doit comporter des valeurs limites d'émission (en concentration) pour les NO_x susceptibles d'être émis par le four, ces valeurs limites d'émission étant fondées sur les Meilleures Techniques Disponibles détaillées dans le BREF.

Aux Etats-Unis, les « Best Available Control Techniques » sont définies au niveau de chaque Etat. En Floride, le débat se situe actuellement entre les techniques SNCR et SCR⁴. Dans ce même Etat, un projet de réglementation à 675 mg/Nm³ sur une moyenne de 30 jours était en cours en 2006. En Arizona, un projet de réglementation à 800 mg/Nm³ sur une base de 24h était également en cours (Leibacher et al., 2006). Au Texas, le « Texan Administrative Code » n°30 sur la qualité de l'environnement régleme les émissions de NOx des cimenteries en termes de flux spécifique allant de 2721 g/t de clinker pour les fours à voie humide à 1270 g/t de clinker pour les fours avec préchauffeur et précalcinateur (valeurs en 2006). Par ailleurs, toujours en 2006, quatre Etats avaient des normes d'émissions similaires à celles du Texas (Maryland, Illinois, Indiana et Michigan), cinq Etats avaient des normes de technologies d'abattement des NOx similaires à celles du Texas (Pennsylvania, South Carolina, Tennessee, Ohio, Alabama), le Kentucky et la côte sud de la Californie avaient des normes d'émission moins strictes. Pour d'autres Etats, les normes étaient établies au cas par cas et la tendance du niveau des normes est plus difficile à identifier. Les Etats américains étaient à cette date en train de réfléchir à des mesures plus restrictives pour les cimenteries afin de se conformer au « NOx State Implementation Plan Call » et le « 8-hour Ozone Standard » (0,08 ppm en moyenne sur 8 heures) (ERG Inc, 2006).

Au Japon, il existe une norme nationale d'émissions de NOx pour les cimenteries qui établit des limites d'émissions pour les établissements construits avant 1975 et ceux après 1975. Avant 1975, la norme est de 480 ppmv. Après 1975, elle est de 250 ppmv. A titre de comparaison, la norme post-1975 correspond à 500 mg/Nm³ (ERG Inc, 2006).

En Chine, la réglementation concernant les émissions de NOx dans les cimenteries date de 2004 (GB4915-2004) et a été validée en 2006. Les seuils limites correspondent aux seuils européens. Pour les fours existants avant le 1^{er} janvier 2006, la concentration limite est de 800mg/Nm³ et le flux spécifique limite est de 2,40kg/t. Pour les fours créés après le 1^{er} janvier 2006, la concentration limite est de 500mg/Nm³ et le flux spécifique limite est de 1,50kg/t.

Il semblerait donc que le niveau de contrôle des émissions de NOx soit plus élevé en Europe qu'aux Etats-Unis. Bien que les valeurs de la norme japonaise soient équivalentes à celle des MTD, on peut considérer la norme japonaise comme globalement plus contraignante qu'en Europe par l'application du seuil de 500mg/Nm³ sur les fours construits à partir de 1975 et non 2008 comme en Europe. Enfin, en Chine, la réglementation est similaire mais elle est bien plus récente que la réglementation européenne.

3.2.3 REGLEMENTATION CONCERNANT LES EMISSIONS DE NOX DANS LES AUTRES SECTEURS INDUSTRIELS

Le tableau suivant indique, pour chaque type d'installation ICPE en France, les VLE concernant les NOx ainsi que les textes réglementaires associés.

⁴ Voir les échanges sur :

<http://internetbeta.dep.state.fl.us/air/emission/construction/cement/FDEP0908.pdf>

Tableau 4: VLE pour les NOx selon la réglementation française pour différents secteurs industriels (VLE au 31/01/2010 et prenant en compte les modifications d'arrêtés)

INSTALLATIONS IPPC	REGLEMENTATION		VLE NOx (en mg/Nm ³)	
Grandes installations de combustion (GIC) Moteurs, Turbines	Arrêté du 11/08/1999 (modifié par l'Arrêté du 14/11/2003)	Moteurs	Combustibles liquides P<100 MW	1000
			Combustibles liquides P>100 MW	600
			Combustibles gazeux 20-100 MW	350
			Combustibles Gazeux P>100 MW	250
		Turbines	Combustibles liquides (FOD)	120
			Gaz naturel P≤50 MW	80
			Gaz naturel P>50 MW	50
GIC chaudières P > 50 MW th	Arrêté du 30/07/2003 (modifié par les Arrêtés du 13/07/2004 et du 31/10/2007)	Installations existantes (en vigueur jusqu'au 01/01/2008)	Combustibles solide	650
			Combustibles liquides	450
		Combustibles gazeux	350	
	Arrêté du 20/06/2002 (modifié par les Arrêtés du 24/12/2002 et du 13/07/2004)	Installations existantes (en vigueur après le 01/01/2008)	50<P≤500 MW	225-600
			P>500 MW	200-500
		Installations nouvelles	Combustibles solides et liquides 50-100 MW	400
Cimenteries	Arrêté du 03/05/1993	Si n'incinère pas de déchets En vigueur le 16/06/1993 (nouveaux) et jusqu'au 15/06/2001 (existant)	Voie humide	1800
			Voies semi-sèches et semi-humides	1500
			Voies sèches	1200
	Arrêté du 20/09/2002	Si co-incinération de déchets	Existants	800
			Nouveaux	500
	Verreries	Arrêté 12/03/2003 (modifié par les Arrêtés du 04/03/2005 et du 26/12/2007)	Capacité 20-450 t/j	En général
Capacité > 450 t/j			Existants	600-800
			Nouveaux	400
Production papier, carton,...	Arrêté du 06/01/1994 et du 03/04/2000			500
Incinération Déchets, Industriels spéciaux	Arrêté du 20/09/2002	En vigueur le 01/01/2007		200
Usines d'Incinération des Ordures Ménagères	Arrêté du 20/09/2002	Nouveaux : en vigueur le 11/12/2002 Existants : en vigueur le 28/12/2005		200

Source : Soleille, 2004 (et réactualisation à partir du site www.legifrance.fr)

On peut voir à partir de ce tableau que les cimenteries existantes sont soumises à des VLE qui, la plupart du temps, sont plus élevées que dans les autres secteurs.

3.3 CONTEXTE TECHNIQUE

Ne sont présentés ici que les éléments nécessaires à la compréhension des mécanismes à l'origine des émissions de NOx dans un four de cimenterie ainsi que les différentes techniques de réduction de ces émissions. Une section particulière à la fin de ce chapitre est dédiée aux spécificités des établissements de production de ciments alumineux fondus.

3.3.1 PHENOMENES A L'ORIGINE DES EMISSIONS DE NOX DANS UNE CIMENTERIE

Les émissions de NOx sont générées par les procédés employant des températures de combustion élevées. Elles se forment soit par la combinaison de l'azote contenu dans le combustible avec l'oxygène de l'air à l'intérieur de la flamme (NOx combustibles), soit, par la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air de combustion (NOx thermiques). Le BREF ciment décrit ces deux phénomènes comme suit :

NOx thermiques : une partie de l'azote de l'air comburant réagit avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote. Les NOx thermiques se forment au-dessus de 1200°C à partir de la réaction des molécules d'azote et d'oxygène de l'air comburant. La majeure partie se forme dans la zone de clinkérisation du four où la température est assez élevée pour que cette réaction puisse se produire. La quantité de NOx thermiques qui y est produite dépend de la température et de la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air) de cette zone. La vitesse de la réaction à l'origine de la formation de NOx thermiques augmente avec la température. Les mélanges qui ne peuvent brûler qu'à une température très élevée dans la zone de clinkérisation tendent à former une quantité de NOx thermiques supérieure à celle des mélanges qui brûlent facilement. La vitesse de la réaction augmente aussi avec la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air). La conduite d'un même four avec une teneur en oxygène plus élevée à l'arrière (facteur d'excès d'air) provoque la formation d'une plus grande quantité de NOx thermiques dans la zone de cuisson (bien que les émissions de SO₂ et/ou de CO puissent diminuer).

NOx combustibles : les composés contenant de l'azote, lié chimiquement dans le combustible, réagissent avec l'oxygène de l'air et forment des oxydes d'azote. L'azote se combine avec d'autres atomes d'azote pour former le gaz N₂ ou il réagit avec l'oxygène pour former les NOx combustibles. La plage de températures la plus fréquente dans un précalcinateur est comprise entre 850 et 950°C, ce qui est insuffisant pour provoquer la formation d'une quantité significative de NOx thermiques mais suffisant pour provoquer celle des NOx combustibles. De même, d'autres types de combustions secondaires dans la partie arrière d'un four (dans la conduite ascendante d'un four à préchauffeur à cyclones ou dans la chambre de calcination d'un préchauffeur à grilles) peuvent provoquer la formation de NOx combustibles. Dans les fours à précalcinateurs où 60% du combustible peut être brûlé dans le précalcinateur, la formation de NOx combustibles représente une part importante de l'ensemble des émissions de NOx. La formation de NOx thermiques dans ces fours est très inférieure à celle des fours où la totalité du combustible est brûlé dans la zone de clinkérisation.

Les émissions de NOx thermiques qui ont lieu lors de la clinkérisation sont les plus importantes.

Selon le BREF, les émissions de NOx varient en fonction de :

- La température et la teneur en oxygène de l'air ;
- La réactivité et le taux d'azote dans le combustible ;
- La présence d'humidité ;
- Le procédé de cuisson utilisé : la combinaison préchauffeur à cyclones et récupération de chaleur émet moins de NOx que le préchauffeur à cyclones sans récupération de chaleur. Le préchauffeur à cyclones émet moins de NOx que le préchauffeur à grilles (Lepol) ;
- L'équipement du four : forme de la flamme, géométrie de la chambre de combustion, temps de réaction disponible, forme du bruleur.

Le rapport ATILH-ADEME (2003), ajoute que :

- Les fours en voie humide génèrent sensiblement plus de NOx que les autres ;
- Les potentialités de réduction des NOx sont différentes selon le procédé. En particulier, les procédés qui permettent des combustions étagées avec des mesures primaires obtiennent les meilleurs résultats ;
- La combinaison de l'aptitude à la cuisson du cru et du niveau de saturation du clinker est un facteur important de différence d'émission de NOx à procédé équivalent. L'aptitude à la cuisson du cru et le niveau de saturation du clinker sont directement liés à la carrière sur laquelle l'usine se situe et au type de ciment qu'elle produit. Cela est particulièrement visible avec les ciments blancs qui ne contiennent pas de fer et par conséquent peu de fondant permettant d'abaisser la température de clinkérisation ;

La fabrication de ciments très réactifs nécessite un clinker à plus fort niveau de saturation, ce qui rend la cuisson plus difficile et produit des émissions de NOx plus élevées.

3.3.2 INVENTAIRE DES TECHNIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE NOX

Les différentes techniques disponibles de réduction des émissions de NOx sont présentées dans cette partie par grandes catégories.

➤ Techniques primaires

Les mesures primaires consistent à limiter les émissions en intervenant sur la combustion. Selon le BREF ciment révisé, les MTD sont les suivantes.

Optimisation du procédé : L'optimisation de la clinkérisation est généralement réalisée pour réduire la consommation de combustible, pour améliorer la qualité du clinker et pour augmenter la durée de vie des équipements. Cela se traduit par une stabilisation des paramètres du procédé, i.e. homogénéisation du cru, garantir l'uniformisation du dosage de combustible. Des opérations sans heurts et stables ont par ailleurs pour effet indirect de réduire les émissions de NOx. Des systèmes experts de régulation (système informatisé de mesure des conditions de combustion et des émissions) ont été développés pour réguler et d'optimiser les conditions de cuisson. Ces systèmes permettent donc d'observer les éventuels écarts à la VLE, et, le cas échéant d'améliorer la moyenne journalière en effectuant les réglages adéquats (source : entretiens réalisés par l'INERIS).

Refroidissement de la flamme : Réduction de la température des zones chaudes de la flamme par injection d'eau pure ou injection d'eau additivée de FOD (Fuel Oil Domestique). L'injection peut se faire à différents endroits et sous différentes formes : L'eau peut être injectée au centre de la flamme, au centre de la tuyère, latéralement sur la flamme avec une canne indépendante, ou encore directement dans l'air secondaire.

Brûleur bas-NOx: Il existe plusieurs configurations de brûleur dont le principe commun est le suivant : étagement de l'air avec création d'une première zone de combustion en défaut d'air, puis, d'une zone en excès d'air en aval. Une ignition très rapide se produit dans la zone amont, en particulier des composés volatils du combustible dans une atmosphère appauvrie en oxygène, ce qui tend à réduire la formation de NOx (BREF révisé). Le pourcentage d'air primaire est un point clé de la maîtrise des NOx (ATILH-ADEME, 2003).

Combustion étagée : se situe à mi-chemin entre les techniques primaires et secondaires de réduction des NOx. On traite effectivement les fumées issues du foyer, mais le procédé s'apparente davantage à une technique primaire d'étagement de la combustion, avec recirculation éventuelle des fumées. L'étagement de la combustion est, en effet, effectué comme suit :

Le premier étage de la combustion est le four rotatif : où les conditions de cuisson du clinker sont optimales : 85-90% du combustible est brûlé dans des conditions d'excès d'air classiques et il se forme donc du NO thermique.

Le deuxième étage est un brûleur situé à l'entrée du four : on injecte dans les fumées le reste du combustible de façon à ce que la combustion se déroule en milieu réducteur. Dans ces conditions, une grande partie du NO est transformé en azote moléculaire N₂.

Au troisième étage, le combustible est introduit dans le calcinateur avec une certaine quantité d'air tertiaire ce qui crée là aussi une atmosphère réductrice. Ce procédé diminue la formation des NOx combustibles et les échappées de NOx à l'extérieur du four.

Au quatrième et dernier étage de combustion, le reste d'air tertiaire est introduit dans l'installation en tant qu'air final et utilisé pour la combustion résiduelle⁵.

La combustion étagée est une voie encourageante de diminution des NOx et fonctionne dans quelques usines notamment en Californie. Le combustible utilisé pour créer la zone réductrice, l'excès d'air en fond de four et la température en zone réactionnelle constituent des points clefs du procédé (ATILH-ADEME, 2003).

Mid-kiln firing: Même principe que la combustion étagée mais pour les fours longs, c'est-à-dire que l'on injecte dans les fumées en milieu de four un combustible de façon à créer une zone de combustion en milieu réducteur. Le combustible ne peut être injecté que par intermittence, à chaque rotation du four. Pour maintenir la continuité de l'apport de chaleur, il est possible d'utiliser des combustibles solides qui brûlent lentement comme les pneus ou d'autres types de déchets.

Minéralisation du clinker : apport de minéralisateurs (fluorure de calcium par ex.) dans la matière première de façon à ajuster la qualité du clinker et à abaisser la température dans la zone de clinkérisation, ce qui réduit la formation des NOx.

⁵ BREF ciment et <http://www.energie-plus.com/news/fullstory.php/aid/1349#275>

➤ Techniques secondaires

Si la mise en œuvre des mesures primaires de réduction des émissions est impossible, ou si elles se révèlent d'une efficacité insuffisante pour respecter les VLE réglementaires, les émissions "end of pipe" peuvent alors être traitées. Deux types de procédés de traitement sont cités dans le BREF ciment révisé : la réduction sélective non catalytique (SNCR) et la réduction sélective catalytique (SCR). Tous deux utilisent l'ammoniac (ou un dérivé comme l'urée) pour réduire les oxydes d'azote en azote moléculaire. La SCR se distingue de la SNCR par son catalyseur qui nécessite une température opératoire moins élevée et une consommation de réactif moins importante. Le catalyseur augmente le coût d'investissement mais il élève sensiblement l'efficacité de réduction des émissions de NOx et permet de détruire simultanément les dioxines et furannes. Ces deux techniques sont dites « sélectives » parce que l'agent réducteur réagit de préférence avec les NOx à la place de l'O₂ lorsqu'il est injecté à la bonne température. Plus précisément :

SNCR : les plages de températures auxquelles se produisent les réactions de réduction sont 850-1050 °C avec un rapport molaire supérieur à 1, voire 2 dans certains cas. La définition du système d'injection et de sa régulation est l'un des éléments clés du dispositif. L'emplacement des injecteurs doit être choisi avec précision en fonction du profil des températures et de la répartition des débits gazeux dans le four (BREF révisé).

Plusieurs réactifs peuvent être utilisés : eau ammoniacuée, gaz ammoniacuée, solutions de sel d'ammonium, urée sèche (en pastilles), urée en solution,...

Lorsque le four est déjà équipé d'un système de combustion étagée, des aménagements spécifiques doivent être réalisés sur la SNCR pour pouvoir ajuster les conditions de réaction de ces deux techniques (BREF révisé).

La « high efficiency SNCR » est un développement de la technique SNCR spécifique à la cimenterie. L'activation des injecteurs et la quantité d'eau ammoniacuée injectée sont déterminées par un système de contrôle en fonction du profil de température dans le préchauffeur (BREF révisé). La consommation et les fuites d'ammoniac sont ainsi réduites.

SCR: Les plages de températures auxquelles se produisent les réactions de réduction sont 250-400 °C avec un rapport molaire voisin de 1 sur un catalyseur.

Le système SCR est utilisé à échelle réelle dans l'industrie cimentière depuis 2001 bien qu'il ait été appliqué bien avant dans d'autres secteurs (Armendariz, 2008).

De l'ammoniac ou de l'urée mélangé à de l'air est ajouté aux fumées dans une proportion qui est fonction de la teneur en NOx. Les fumées chargées de NH₃ traversent ensuite un catalyseur à plusieurs lits dans une plage de températures comprises entre 250 et 380°C. La chambre de réaction peut être située en amont de la filtration des fumées, sur les gaz bruts (« high-dust » SCR), ou en aval de la filtration, sur les gaz propres réchauffés (« low-dust » SCR). Le système high dust peut être préférable parce qu'il ne nécessite pas de réchauffer les gaz. En effet, la température des gaz en sortie de préchauffeur est en général à la bonne température pour le fonctionnement de la SCR.

Cette technique est très utilisée pour réduire les émissions de NOx dans d'autres secteurs industriels (centrales thermiques au charbon, incinérateurs de déchets) (BREF Ciment révisé).

Jusqu'à présent, seuls les systèmes high-dust ont été testés dans le secteur de la cimenterie.

Un tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients de ces deux techniques se trouve en annexe II.

Remarque générale pour les techniques primaires et secondaires:

Les effets de plusieurs techniques ne sont pas cumulatifs. Par exemple, la mise en place d'une tuyère bas-NOx et d'une SNCR n'entraîne pas systématiquement une réduction des émissions de NOx correspondant à la somme des efficacités de ces deux techniques.

➤ **Techniques de modification du procédé :**

Les modifications de procédés sont généralement effectuées afin de réduire les coûts opérationnels, augmenter la capacité de production et améliorer la qualité du produit (ERG Inc, 2006). Les émissions de NOx étant directement liées à la quantité d'énergie consommée pour la fabrication du ciment, améliorer l'efficacité énergétique permet de réduire leurs émissions. Les mesures suivantes peuvent être préconisées :

- Contrôle continu des excès d'air et de température dans la zone de combustion pour une combustion optimale ;
- Utilisation de combustibles avec une bonne capacité de brûlage afin de réduire la quantité de combustible ;
- Réduction de matière alcaline dans le cru (un cru avec un taux d'alcalin élevé nécessite d'être brûlé plus longtemps et à une température plus élevée) ;
- Changement de combustible : cette mesure implique un arbitrage entre combustibles contenant de l'azote (ex charbon > gaz naturel) et combustibles avec une température de flamme élevée (ex gaz naturel > charbon) ;
- Amélioration de l'efficacité thermique du four : les fours à voie sèche avec préchauffeur et précalcinateur sont, par exemple, les plus efficaces.

Encart 1: Effet du combustible sur les émissions de NOx

Les fluctuations d'émissions de NOx dans l'année peuvent être expliquées notamment par le type de combustible. Les émissions sont ainsi supérieures pour les bitumes (CHV, Combustible Haute Viscosité), puis par importance décroissante, le charbon et le gaz naturel. Le bitume est disponible en hiver lorsque les travaux routiers sont au ralenti, puis, en été lorsque ces travaux reprennent, on le remplace par du charbon. Le gaz naturel est très peu utilisé car son prix est de 3 à 10 fois plus élevé que le charbon ou le bitume.

Source : entretiens

3.3.3 SPECIFICITES DE MISE EN ŒUVRE DANS LES ETABLISSEMENTS PRODUCTEURS DE CIMENTS ALUMINEUX FONDUS

Les produits fabriqués et les conditions de fabrication ne sont pas les mêmes pour le ciment Portland et les ciments alumineux. Les spécificités de chacun de ces produits sont présentées dans le *Tableau 5*.

Tableau 5: Spécificités des ciments Portland et alumineux fondus

	Ciments alumineux fondus	Ciments Portland
Matières premières	Bauxite, chaux, alumine	Chaux, argile
Approvisionnement en matières premières (bauxite, chaux,...)	Plusieurs carrières dans le monde. Par conséquent, les caractéristiques de la matière première sont variables.	Une seule carrière (celle à proximité de la cimenterie). Les caractéristiques de la matière première sont stables.
Type de four	Four vertical intégré	Four vertical ou horizontal
Type de cuisson	Fusion (température plus élevée que Portland)	Frittage
Conduite du four	Conduite variable en fonction du type de clinker fabriqué	Conduite stable (fabrication de clinker pour ciment Portland uniquement)
Procédé de fabrication du ciment	Pas d'ajout dans le produit final (sauf dans la gamme SECAR® par frittage)	Ajout possibles dans le produit final (laitier par ex)
Normalisation	Normalisation européenne partielle CAC avec des contraintes sur la présence du sulfure, alcalin, chlorure	Normalisation européenne CEM

Source : entretiens

Le ciment alumineux fondu, ou ciment d'aluminates de calcium, résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des ciments Portland.

Les mesures de réduction des émissions de NOx mises en œuvre généralement par les fabricants de ciment alumineux sont les suivantes (source : entretiens) :

- Optimisation du procédé : La conduite des fours est optimisée en fonction du produit fabriqué et des matières premières. L'optimisation des émissions de NOx repose essentiellement sur un principe de pilotage de la combustion en mode réducteur tolérable par le produit. Les systèmes experts, moins adaptés ici que dans le cas des cimenteries fabriquant du Portland, ne sont pas utilisés. En effet, un établissement Portland ne produit qu'un seul type de clinker alors qu'un établissement de ciments alumineux peut en produire 3 ou 4 dans une même année avec, de plus, des matières premières d'origines géographiques différentes (et donc de compositions différentes).
- Tuyère bas-NOx et refroidissement de la flamme par addition d'eau : la mise en œuvre de ces mesures doit prendre en compte le fait que les utilisations de ciments réfractaires n'autorisent pas d'ajouts tels que des éléments sodiques ou chlorés ou encore d'agents fondants. Certaines applications n'autorisent également pas d'atmosphère réductrice. Par ailleurs, ces deux techniques présentent des inconvénients non négligeables vis-à-vis de la production de ciments alumineux fondus : (i) moins bonne qualité de la fusion ; (ii) perte d'homogénéité du bain de fusion ; (iii) apparition de cristaux pléochroïque⁶ en atmosphère réductrice qui rendent le ciment ingâchable (raidissement rhéologique).

⁶ Différence d'absorption par un cristal de deux vibrations lumineuses polarisées différemment. Si un cristal est éclairé en lumière blanche polarisée rectilignement, sa coloration (due à l'absorption) varie avec l'orientation du polariseur et du cristal. Un tel cristal est dit pléochroïque (définition www.universalis.fr)

Les difficultés de mises en œuvre des mesures secondaires font qu'elles ne sont pas mises en œuvre à l'heure actuelle dans les fours de ciments alumineux fondus. En effet :

- Concernant la réduction par combustion arrière : cette technique ne peut pas être mise en œuvre dans un four intégré qui ne présente pas de jonction accessible comme dans les fours verticaux avec précalcinateur.
- Concernant la SNCR : cette technique est difficile à mettre en œuvre au vu de la variabilité de la fenêtre de température dans le four vertical en fonction du type de production. De plus, le cru inséré dans le four l'est sous forme de blocs alors que pour le Portland il l'est sous forme de farine, ce qui améliore considérablement l'efficacité du système.

Une optimisation produit par produit à l'aide de mesures primaires devrait être développée dans le futur. Les profils thermiques des fours seront alors plus particulièrement observés afin de faire évoluer les processus de pilotage existants. La réduction des émissions de NOx sera cependant contrainte par le maintien de la qualité des produits fabriqués.

4. ANALYSE DES EMISSIONS DE NOX DES CIMENTERIES FRANÇAISES

Ce chapitre présente le premier volet des résultats des travaux d'analyse des émissions de NOx des cimenteries françaises effectués en collaboration avec le LERNA et le CES (voir rapport en annexe I). Les données utilisées proviennent de l'enquête réalisée par l'INERIS auprès de chaque établissement de cimenterie français (questionnaire en annexe III), des bases de données EACEI, Antipol et EAE du SESSI et de la base de données de BDREP. L'objectif général de ce chapitre est (i) de caractériser la tendance des émissions de NOx provenant du secteur de la cimenterie, et (ii) d'analyser les déterminants de ces émissions afin de connaître le rôle des MTD mises en œuvre par les cimenteries sur l'évolution des émissions de NOx.

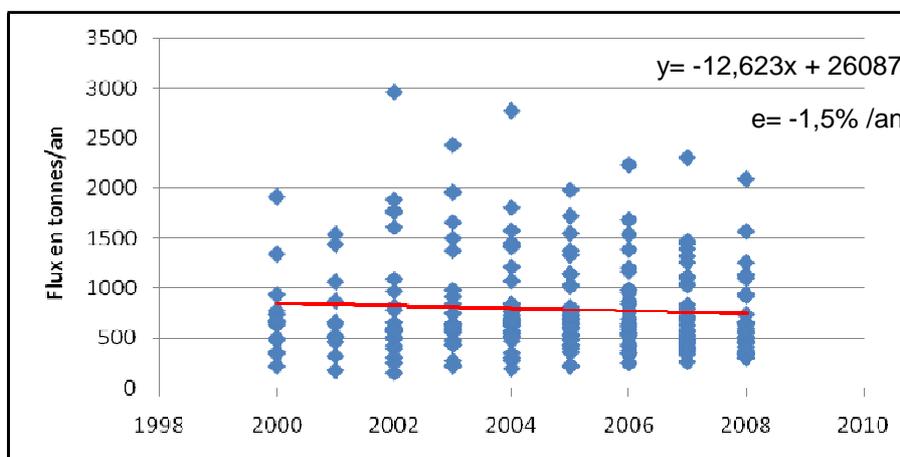
4.1 EVOLUTION DES EMISSIONS DE NOX SUR LA PERIODE 2000-2008

Cette partie présente l'évolution des émissions de NOx (flux, flux spécifiques et concentrations). Les chiffres sont d'abord présentés par four puis de façon agrégée au niveau national.

➤ Les chiffres par four

D'après le Graphique 8, le flux de NOx diminue de 1,5% par an. L'écart-type diminue également de 2,2% par an, ce qui signifie que les performances sont de plus en plus centrées autour de la moyenne des fours.

Graphique 8 : Evolution du flux annuel de NOx par four sur la période 2000-2008.



En faisant la somme des flux par four (voir *Tableau 6*), le flux total évolue de 28 370 tonnes en 2004 à 23 485 tonnes en 2008 (période sur laquelle la totalité des fours a été renseignée lors de l'enquête).

Tableau 6 : Evolution du flux national de NOx provenant des cimenteries sur la période 2004-2008

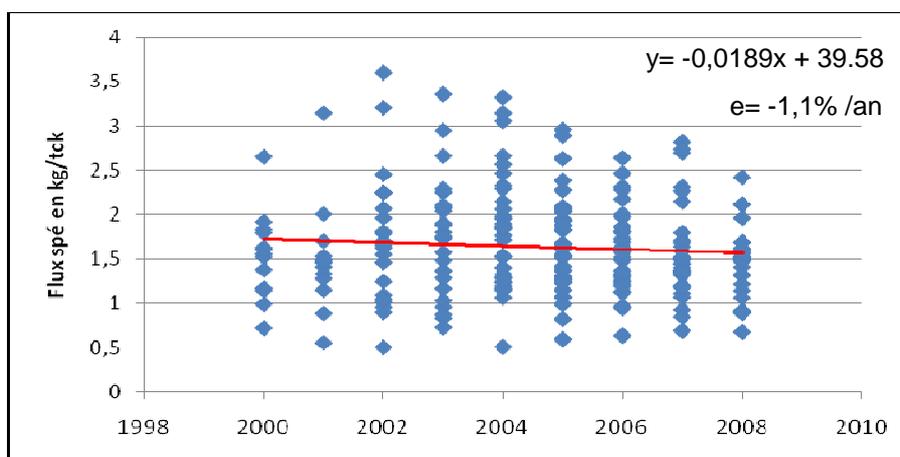
	2004	2005	2006	2007	2008*
FLUX TOTAL	28 370	26 445	25 613	25 805	23 485

*Estimation pour 4 valeurs manquantes en 2008 dues à l'absence de réponse de certains cimenteries

Source : Enquête INERIS

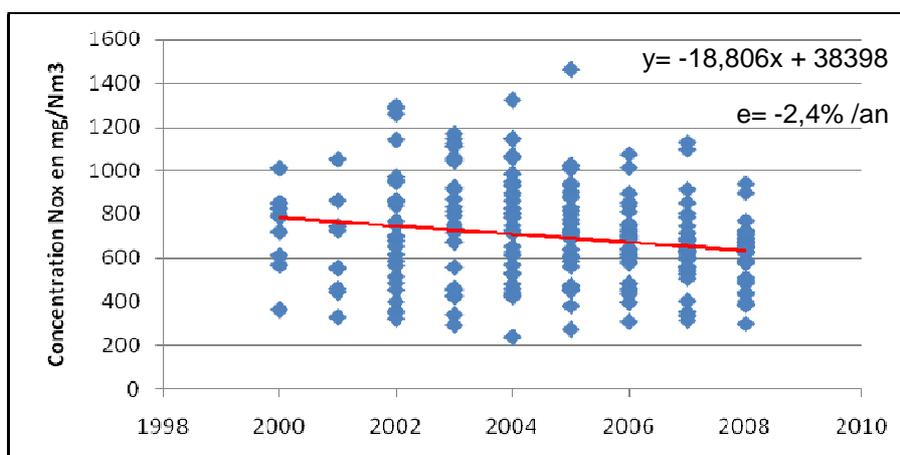
La Graphique 9 indique une diminution du flux spécifique de 1,1% par an sur la période 2000-2008. L'écart-type diminue de 3,2% par an sur la même période.

Graphique 9 : Evolution du flux spécifique de NOx calculé à partir du flux et de la production annuels par four sur la période 2000-2008



La Graphique 10 montre que la concentration diminue également (-2,4%) mais de façon un peu plus marquée que le flux et le flux spécifique. L'écart-type (-3,7% par an) sur la même période indique une diminution relativement forte des écarts de performance entre les fours.

Graphique 10 : Evolution de la concentration moyenne annuelle de NOx par four sur la période 2000-2008



Finalement, bien que ces graphiques fassent l'état d'une nette diminution des flux, flux spécifiques et des concentrations, l'intervalle des émissions entre les fours les plus performants et les moins performants reste très important. Le reste de ce chapitre est consacré à l'analyse de ces disparités et, en particulier, à l'effet des MTD sur les émissions de NOx.

4.2 MTD MISES EN ŒUVRE PAR LES CIMENTERIES

Avant de passer à l'analyse économétrique des déterminants des émissions de NOx, le bilan des techniques primaires et secondaires mises en œuvre en France est présenté à travers les deux tableaux suivants.

Tableau 7 : Bilan des techniques primaires mises en œuvre par les cimenteries françaises

Techniques primaires	Taux de mise en œuvre*	Nb. de mise en œuvre ≤1990	Nb. de mise en œuvre entre 1991 et 2000	Nb. de mise en œuvre entre 2001 et 2008
Refroidissement de la flamme	24/35	5	6	4
Brûleur bas-NOx	25/35	1	19	4
Mid-kiln	0/35			
Minéralisation	0/35			
Optimisation	24/35		1	15
Limitation d'excès d'air	2/35		2	

*Ratio (nombre de fours ayant mis en œuvre la technique sur le nombre total de fours)

Source : enquête INERIS

Tableau 8 : Bilan des techniques secondaires mises en œuvre par les cimenteries françaises

Techniques secondaires	Taux de mise en œuvre	Nb. de mise en œuvre ≤2000	Nb. de mise en œuvre entre 2001 et 2004	Nb. de mise en œuvre entre 2005 et 2008
Combustion étagée	8/35	3	2	3
SNCR classique	23/35		3	20
SNCR high-eff	0/35			
SCR	0/35			

Source : enquête INERIS

Les entretiens ont par ailleurs permis d'identifier deux stratégies de réduction des émissions de NOx chez les cimentiers, à savoir :

Stratégie 1 : Priorité aux mesures primaires

- Soit installation d'une tuyère bas-NOx puis, si nécessaire, contrôle des émissions avec un système expert, refroidissement de la flamme ou même en installant une SNCR. Egalement essai d'amélioration de la régularité du cru ;
- Soit combinaison de plusieurs mesures primaires (système expert, refroidissement de la flamme, tuyère bas-NOx, limitation d'excès d'air) puis, si nécessaire, contrôle des émissions en installant une SNCR.

Stratégie 2 : Priorité au SNCR

Installation, dans un premier temps, d'une SNCR puis, si nécessaire, amélioration de la performance par la mise en œuvre de mesures primaires (système expert, refroidissement de la flamme, dégradation des réglages de tuyère, refroidissement de la flamme) et même secondaires (combustion arrière étagée).

4.3 ANALYSE ECONOMETRIQUE DES DETERMINANTS DES EMISSIONS DE NOX

L'objectif est de mettre en relief l'impact des techniques mises en œuvre sur les émissions de NOx par rapport aux autres caractéristiques d'un établissement de cimenterie pouvant, elles aussi, avoir un impact, à savoir :

- La réglementation à laquelle est soumis l'établissement ;
- Les caractéristiques techniques (production de clinker, type de four, type de combustible utilisé,...) ;
- Les caractéristiques économiques (chiffre d'affaire HT, nombre d'employés,...).

Plus précisément, l'objectif est d'estimer une « fonction de pollution » reliant des émissions de NOx à des caractéristiques du four et de l'établissement. Trois mesures d'émissions de NOx sont considérées, ce qui conduit à l'estimation de trois fonctions d'émissions de NOx: la fonction d'émissions en flux, la fonction d'émissions en flux spécifique et la fonction d'émissions en concentration.

4.3.1 ANALYSE DES CORRELATIONS

L'analyse des corrélations vise à identifier les liens entre les caractéristiques des fours et celles des établissements. Cette analyse est essentielle afin d'identifier les caractéristiques qui seront utilisées pour estimer la fonction de pollution. Pour cela, elles devront être :

- Pertinentes pour expliquer le mieux possible l'hétérogénéité des émissions de NOx des fours étudiés ;
- Les moins corrélées possibles entre elles pour ne pas introduire trop d'endogénéité dans le modèle de pollution.

La liste des caractéristiques ou variables considérées dans cette analyse se trouve à la fin du rapport du LERNA-CES joint en annexe I.

Les résultats de l'analyse des corrélations entre les caractéristiques des fours, des établissements et des émissions de NOx sont également présentés dans le rapport du LERNA-CES.

Pour les variables continues, il a été vérifié, en particulier, que sur l'ensemble de l'échantillon :

- Les flux et, à un moindre degré, les flux spécifiques et les concentrations sont fortement corrélés au niveau de production de clinker ;
- Les flux sont, comme attendu, fortement corrélés aux flux spécifiques ;
- Les flux spécifiques sont corrélés à la consommation annuelle de coke de pétrole ;
- Le nombre de salariés dans l'établissement est fortement corrélé au niveau de production de clinker et de ciment ;
- Le chiffre d'affaire hors taxe de l'entreprise est corrélé au niveau de production de ciment et à la production de clinker par unité de capacité maximale autorisée.

Pour les variables discrètes, les liens observés sont les suivants :

- La mise en place d'un préchauffeur va de pair avec les voies sèche, semi-sèche et semi-humide ;
- L'équipement préchauffeur à cyclone est étroitement lié à la voie sèche ;
- L'équipement préchauffeur Lepol est étroitement lié à la voie semi-sèche ;
- La mise en place d'un précalcinateur est très liée à la voie sèche ;
- Les combinaisons SNCR et mesures primaires sont fréquentes en particulier avec le refroidissement de la flamme, l'optimisation et le brûleur bas-NOx.

En plus des 5 variables de MTD (refroidissement de la flamme, SNCR, optimisation, brûleur bas-NOx et combustion étagée) les variables suivantes ont finalement été sélectionnées pour l'estimation des trois fonctions de pollution :

- Le niveau de production de clinker ;
- Le type de voie du four (voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide) ;
- La VLE fixée dans l'arrêté préfectoral d'autorisation de l'établissement ;
- La part de la consommation annuelle de coke de pétrole par rapport à la consommation totale de combustible ;
- Le chiffre d'affaire HT de l'entreprise ;
- Le nombre d'employés dans l'entreprise.

4.3.2 RESULTATS DE L'ANALYSE ECONOMETRIQUE

Des estimations préalables sur un modèle de base des émissions de NOx en fonction de la production de clinker ont tout d'abord été effectuées afin d'identifier la meilleure spécification possible parmi les alternatives possibles (linéaire, log-log, quadratique,...). Il apparaît que le modèle dans lequel les émissions de NOx dépendent linéairement de la production de clinker a le pouvoir explicatif le plus élevé. C'est donc la spécification qui est retenue dans les analyses économétriques. L'objectif de ces analyses est donc d'estimer la fonction de pollution suivante :

$$Y = Cte + \alpha A + \beta B + \dots + \gamma Z$$

Avec Y le flux de NOx (ou le flux spécifique ou la concentration), $\{\alpha, \beta, \dots, \gamma\}$ les coefficients des variables techniques, économiques et réglementaires $\{A, B, \dots, Z\}$.

Les résultats sont présentés tout d'abord pour les flux, puis pour les flux spécifiques et les concentrations.

Estimation du flux

Le Tableau 9 présente une synthèse des résultats des estimations du flux. Afin d'avoir une idée de la robustesse de ces estimations, les effets de chaque variable sur le flux sont comparés sous trois « modèles » différents.

Tableau 9 : Résultats des estimations du flux

Y = Flux annuel						
Variables	modèle A R ² =75%		modèle B R ² =77%		modèle C R ² =78%	
	Coef.	P> z	Coef.	P> z	Coef.	P> z
Prod. clinker	+0,01	<0,01	+0,01	<0,01	+0,01	<0,01
Voie semi-sèche*	-230,59	<0,01	-221,36	<0,01	-218,73	<0,01
Voie semi-humide*	-135,51	0,51	-157,41	0,47	-148,97	0,47
Voie humide*	-397,01	0,05	-391,16	0,07	-401,58	0,06
Rég. ≤ 800 mg/Nm ³ **	-117,68	<0,01	-132,54	<0,01	-140,65	<0,01
Coke de pétrole			+73,82	0,33	+109,26	0,17
Chiffre d'affaire HT					+0,01	0,27
Nb. employés					+1160,08	0,42
Refroidissement***	+275,15	<0,01	+263,05	<0,01	+256,59	<0,01
SNCR***	-49,85	0,23	-62,47	0,20	-68,73	0,17
Optimisation***	-83,79	0,05	-81,37	0,06	-97,54	0,04
Brûleur bas-NOx***	+56,08	0,31	+40,23	0,50	+12,27	0,85
Combustion étagée***	-81,06	0,17	-7,25	0,91	-4,03	0,95

*par rapport à la voie sèche

**par rapport à un seuil supérieur à 800mg/Nm³ (arrêté préfectoraux)

***par rapport à l'absence de cette technique de réduction des émissions de NOx

Un « modèle » est un ensemble de variables testées en même temps pour estimer le flux. Le premier modèle (modèle A) comprend les variables suivantes :

- *Prod. Clinker* : Production de clinker (variable quantitative) ;
- *Voie semi-sèche* : four à voie semi-sèche (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Voie semi-humide* : four à voie semi-humide (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Voie humide* : four à voie humide (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Rég. ≤ 800 mg/Nm³* : VLE de l'arrêté préfectoral inférieure ou égale à 800 mg/Nm³ (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Refroidissement* : mise en œuvre de la technique de refroidissement de la flamme (variable qualitative en oui ou non) ;
- *SNCR* : mise en œuvre de la technique SNCR (variable qualitative en oui ou non)
- *Optimisation* : mise en œuvre d'un système expert (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Brûleur bas-NOx* : mise en œuvre d'un brûleur bas-NOx (variable qualitative en oui ou non) ;
- *Combustion étagée* : mise en œuvre de la combustion étagée (variable qualitative en oui ou non).

Le modèle B comprend les mêmes variables que la modèle A et la variable *Coke de pétrole* (variable quantitative représentant la part du coke de pétrole dans le bouquet de combustibles utilisés).

Le modèle C reprend les mêmes variables que le modèle B et comprend également les variables *Chiffre d'affaire HT* (variable quantitative représentant le chiffre d'affaire de la société) et *Nb. employés* (variable quantitative représentant le nombre d'employés dans la société).

Les trois modèles permettent d'expliquer la plupart de la variabilité des fours/établissements (les R² sont supérieurs ou égaux à 75%, i.e. au moins 75% de la variabilité de l'échantillon est expliquée par l'estimation).

Nous supposons que l'estimation d'une variable est significative lorsque la probabilité que l'estimation n'explique pas 95% de la variabilité de l'échantillon est inférieure à 0,05 (colonne $P > |z|$).

A partir du Tableau 9, on observe un effet robuste (le signe ne change pas d'un modèle à l'autre) et toujours significatif pour les variables suivantes :

- Plus le niveau de production de clinker est élevé, plus le flux de NOx augmente. Dans le modèle B, l'élasticité du flux par rapport à la production de clinker est estimée à +1,0207%, i.e. l'augmentation de la production annuelle de clinker de 1% a pour effet d'augmenter le flux annuel de 1,0207% (élasticité significative avec un écart type de 0,4610) ;
- La voie semi-sèche génère un flux de NOx moins élevé que la voie sèche ;
- Le fait qu'un établissement soit soumis à un seuil inférieur ou égal à 800mg/Nm³ implique une plus forte réduction du flux qu'un seuil supérieur à 800mg/Nm³, indépendamment des autres variables ;
- L'équipement du four avec un système de refroidissement de la flamme augmente le flux de NOx (par rapport à la situation où il n'y a pas de système de refroidissement).

Les variables suivantes ont un effet robuste mais légèrement moins significatif :

- La voie humide génère un flux de NOx moins élevé que la voie sèche ;
- L'équipement du four avec un système d'optimisation par système expert diminue le flux de NOx.

Chacun de ces effets doit être interprété toutes choses égales par ailleurs.

Les effets de ces variables sur le flux de NOx sont pour la plupart attendus sauf pour :

- La mesure primaire de refroidissement de la flamme qui a un effet d'augmentation du flux. Ce résultat peut éventuellement s'expliquer par le conflit qui peut exister entre générer des économies d'énergie (et donc de combustible) et réduire des émissions de NOx. En effet, une réduction de la température de combustion, qui diminue les émissions de NOx, est contradictoire avec une meilleure utilisation du combustible qui requiert au contraire d'augmenter la température de combustion. La maîtrise de cet arbitrage nécessite peut-être alors un niveau de main d'œuvre qualifié pour l'optimiser. Il n'est donc pas possible de conclure sur la contre-productivité de cette mesure tant que d'autres variables telles que la performance énergétique du four, le niveau de main d'œuvre qualifiée pour la maîtrise du refroidissement de la flamme, ne sont pas contrôlées dans le modèle ;
- Les fours à voie humide ont un effet robuste de baisse du flux. Ce résultat ne correspond pas aux attentes des cimentiers. L'explication peut se trouver dans les éventuelles corrélations entre les caractéristiques non contrôlées dans cette estimation (existence d'un préchauffeur à cyclones, d'un précalcinateur par exemple).

Estimation du flux spécifique

Le Tableau 10 présente une synthèse des résultats des estimations du flux spécifique.

Tableau 10 : Résultats des estimations du flux spécifique

Y = Flux spécifique						
Flux spécifique	modèle A R ² =25		modèle B R ² =28		modèle C R ² =41	
	Coef.	P> z	Coef.	P> z	Coef.	P> z
Prod. clinker	-0,01	0,05	-0,01	0,15	-0,01	0,01
Voie semi-sèche*	-291,82	0,05	-269,77	0,10	-263,90	0,05
Voie semi-humide*	-120,93	0,76	-166,23	0,70	-135,27	0,72
Voie humide*	+1090,81	<0,01	+1191,06	<0,01	+1109,73	<0,01
Rég. ≤ 800 mg/Nm ³ **	-94,71	0,14	-69,39	0,37	-111,11	0,17
Coke de pétrole			+187,96	0,17	+331,40	0,02
Chiffre d'affaire HT					+0,01	<0,01
Nb. employés					+6119,01	0,02
Refroidissement***	+256,60	0,03	+222,20	0,08	+201,03	0,09
SNCR***	-216,14	<0,01	-226,81	<0,01	-240,01	<0,01
Optimisation***	-118,84	0,12	-96,67	0,22	-183,74	0,03
Brûleur bas-NOx***	+128,41	0,21	+112,81	0,32	+17,68	0,88
Combustion étagée***	+18,73	0,86	+94,39	0,43	+84,02	0,48

*par rapport à la voie sèche

**par rapport à un seuil supérieur à 800mg/Nm³ (arrêté préfectoraux)

***par rapport à l'absence de cette technique de réduction des émissions de NOx

Les trois modèles expliquent moins bien la variabilité des fours que les modèles de flux (les R² sont inférieurs ou égaux à 41%, i.e. au plus 41% de la variabilité de l'échantillon est expliquée par l'estimation). Avec un R² de 41%, le modèle C explique cependant relativement bien la variabilité de l'échantillon.

On observe un effet robuste et toujours significatif pour les variables suivantes :

- La voie humide génère un flux spécifique plus élevé que la voie sèche ;
- La mise en place d'une SNCR diminue le flux spécifique.

Les variables suivantes ont un effet robuste mais légèrement moins significatif :

- Plus le niveau de production de clinker est élevé, plus le flux spécifique est faible ;
- La voie semi-sèche génère un flux spécifique moins élevé que la voie sèche ;
- Le refroidissement de la flamme augmente le flux spécifique ;
- De façon moins significative : l'optimisation par système expert diminue le flux spécifique et, par ailleurs, une part importante de coke de pétrole dans les combustibles utilisés dans l'année augmente le flux spécifique.

La relation entre le niveau de production de clinker et le flux spécifique est cependant discutable. En effet, lorsque l'on cherche à tester l'hypothèse selon laquelle le flux spécifique est constant ou s'il dépend du niveau de production de clinker⁷, la régression linéaire montre un lien non significatif entre le flux spécifique et la production de clinker. Cette absence de lien a également été vérifiée dans une comparaison entre fours différents avec un même niveau de production, ou encore, pour un type de four et plusieurs niveaux de production.

⁷ En estimant un modèle dans lequel le flux spécifique est fonction de la production de clinker uniquement. Cela permet de tester un éventuel lien entre le niveau d'activité au sens large et le « pouvoir polluant » de chaque four.

Les coefficients des variables SNCR et optimisation permettent de comparer l'importance de leur impact sur le flux spécifique. On observe donc que, quelque soit le modèle, la SNCR réduit toujours plus fortement le flux spécifique que l'optimisation.

Enfin, le chiffre d'affaire et le nombre d'employés ont un effet positif significatif, i.e. plus le chiffre d'affaire ou le nombre d'employés augmente, plus le flux spécifique est élevé, mais nous ne savons pas s'il est robuste. Dans l'état de l'information dont nous disposons, il est difficile de comprendre le mécanisme à l'origine de ces deux relations.

A noter, la production de clinker et le chiffre d'affaire représentent les effets de taille sur les émissions de NOx. La production de clinker doit cependant être préférée comme mesure de taille, le chiffre d'affaire confondant un effet de taille en volume de production et un effet d'évolution de prix.

Estimation de la concentration

Le Tableau 11 présente une synthèse des résultats des estimations de la concentration. Seul le modèle C a été estimé.

Tableau 11 : Résultats des estimations de la concentration

Y = Concentration annuelle moyenne						
Variables	modèle A R ² =25		modèle B R ² =28		modèle C R ² =40	
	Coef.	P> z	Coef.	P> z	Coef.	P> z
Prod. clinker					-0,01	0,04
Voie semi-sèche*					-94,40	0,10
Voie semi-humide*					-49,60	0,75
Voie humide*					+255,69	0,11
Rég. ≤ 800 mg/Nm ³ **					-74,94	0,02
Coke de pétrole					+129,14	0,02
Chiffre d'affaire HT					+0,01	0,03
Nb. employés					+1415,70	0,19
Refroidissement***					+101,68	0,03
SNCR***					-142,06	<0,01
Optimisation***					-112,10	<0,01
Brûleur bas-NOx***					+20,62	0,66
Combustion étagée***					+50,54	0,29

*par rapport à la voie sèche

**par rapport à un seuil supérieur à 800mg/Nm³ (arrêté préfectoraux)

***par rapport à l'absence de cette technique de réduction des émissions de NOx

Avec un R² de 40%, le modèle C explique relativement bien la variabilité de l'échantillon.

On observe un effet significatif pour les variables suivantes :

- Plus le niveau de production de clinker est élevé, plus la concentration est faible ;
- Le fait qu'un établissement soit soumis à une VLE inférieure ou égale à $800\text{mg}/\text{Nm}^3$ implique une plus forte réduction de la concentration qu'un seuil supérieur à $800\text{mg}/\text{Nm}^3$;
- Une part importante de coke de pétrole dans les combustibles utilisés dans l'année augmente la concentration ;
- Plus le chiffre d'affaire est élevé, plus la concentration est élevée ;
- L'équipement du four avec un système de refroidissement de la flamme augmente la concentration ;
- La mise en place d'une SNCR diminue la concentration ;
- L'optimisation par système expert diminue la concentration.

Les effets de ces variables sont les mêmes que pour le flux et le flux spécifique à l'exception du niveau de production de clinker. La raison du changement de signe pour ce dernier n'est pas connue.

Comme pour le flux spécifique, la technique SNCR a un impact plus important que l'optimisation sur la concentration.

Conclusion

Les estimations précédentes montrent que deux MTD ont des effets significatifs, robustes et attendus sur les émissions de NOx :

- La mise en œuvre d'un système expert d'optimisation réduit le flux, le flux spécifique et la concentration de NOx ;
- La mise en œuvre d'une SNCR réduit le flux spécifique et la concentration.

On observe aussi que la SNCR est plus efficace que l'optimisation dans la réduction des émissions en flux spécifique et en concentration de NOx.

La technique de refroidissement de la flamme a un effet inattendu sur les émissions de NOx puisque, d'après nos résultats (qui sont significatifs et robustes), elle augmente les émissions de NOx à un niveau au moins équivalent à la réduction des émissions associée à l'optimisation.

Enfin, les émissions de NOx dépendent également de façon significative et robuste des facteurs suivants :

- Le type de voie du four : les fours à voie semi-sèche sont les moins émetteurs de NOx, viennent ensuite les fours à voie sèche, puis les fours à voie semi-humide et les fours à voie humide ;
- La réglementation : les établissements soumis à une VLE inférieure ou égale à $800\text{mg}/\text{Nm}^3$ émettent moins de NOx (en concentration et en flux) que les établissements soumis à une réglementation moins sévère ;
- L'utilisation de coke de pétrole : les établissements qui utilisent plus de coke de pétrole que les autres ont des émissions de NOx plus élevées (en concentration et en flux spécifique).
- Le niveau de production de clinker a un effet significatif et robuste sur le flux de NOx (plus la production est élevée, plus le flux est élevé). Son effet sur le flux spécifique et la concentration est plus difficile à identifier. Il semblerait, cependant, qu'il n'y ait pas de relation significative entre la production de clinker et le flux spécifique.

5. SIMULATION DE L'IMPACT DE SCENARIOS TECHNICO-ECONOMIQUES DE MOYEN TERME SUR LES EMISSIONS DE NOX DU SECTEUR DE LA CIMENTERIE

Ce chapitre présente le second volet des résultats des travaux réalisés en collaboration avec le LERNA et le CES. L'objectif est de construire des scénarios caractérisant techniquement et économiquement le secteur de la cimenterie à l'horizon 2020, puis, de simuler l'effet de ces scénarios sur les émissions de NOx de ce secteur. La première partie (5.1) explique quel est le modèle de simulation choisi, les raisons de ce choix et finalement les variables qui devront être explicitées dans les scénarios que l'on souhaite simuler à partir de ce modèle. La deuxième partie (5.2) décrit brièvement la méthode de construction des scénarios et les caractéristiques des scénarios qui seront simulés. La dernière partie (5.3) présente les résultats des simulations.

5.1 LE MODELE DE SIMULATION CHOISI

5.1.1 MODELE VISE INITIALEMENT

La démarche initiale de cet exercice de simulation consistait à pouvoir simuler l'effet de scénarios d'évolution des facteurs d'adoption des différents techniques de réduction des émissions de NOx (la production de clinker, la réglementation-normative ou incitative, par exemple) sur les émissions de NOx du secteur. Le modèle de simulation aurait alors été choisi parmi les modèles d'émissions de NOx estimés dans le 3^{ème} chapitre de ce rapport, et, une probabilité d'adoption estimée pour les techniques les plus intéressantes au regard de leur performance de réduction des émissions de NOx (SNCR et SCR) aurait été greffée à ce modèle. Le manque d'observations de l'adoption de la SCR en France n'a cependant pas permis de construire ce type de modèle.

Néanmoins, l'estimation de la probabilité d'adoption de la SNCR a été effectuée afin de mieux connaître les facteurs d'adoption de cette technique et fournir des éléments pour la construction des scénarios de la partie 5.2. Les résultats de cette estimation sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Résultats de l'estimation de la probabilité d'adopter la SNCR (Pseudo $R^2=0,60$)

Probabilité d'adopter la SNCR	Coef.	P> z
Voie semi-sèche	+0,37	0,50
Voie semi-humide	+3,42	0,01
Voie humide	+6,35	<0,01
Conc. Moy. NOx*	+0,01	<0,01
Production Moy. clinker**	-1,10e-06	0,27
≥ 2006	+1,07	0,01
Rég. ≤ 800 mg/Nm ³	+2,98	<0,01
Chiffre d'affaire HT	+3,64e-06	0,02
Effectif moyen salariés***	-0,01	0,23
Coke de pétrole	+0,05	0,96
Brûleur bas-NOx	-1,56	0,02
Optimisation	+1,42	<0,01

*Concentration moyenne de NOx sur les années précédant la mise en œuvre de la technologie

**Production moyenne de clinker sur les années précédant la mise en œuvre de la technologie,

***Effectif moyen de salariés dans l'établissement entre 2000 et 2007

Dans la mesure où la variable à expliquer n'est plus continue, comme dans les modèles d'émissions du chapitre 4, mais discrète (adoption/non adoption), il est nécessaire de recourir à des modèles adaptés à la nature « binaire » de cette variable. Le modèle d'adoption de la SNCR choisi dans ce cas a pour variable dépendante une variable indicatrice qui prend la valeur 1 si la SNCR est adoptée pour le four en question et la valeur 0 si la SNCR n'est pas installée. Ainsi, il ne s'agit pas de prédire à quel moment la SNCR est adoptée⁸ mais de comparer des établissements équipés de SNCR avec des établissements non équipés.

Les estimations du Tableau 12 reposent sur un modèle Probit⁹. Il permet d'estimer la probabilité que la variable à expliquer (adopter ou non la SNCR) soit égale à 1, comme une fonction des variables explicatives (caractéristiques technico-économiques et réglementaires de l'établissement). L'interprétation des paramètres estimés associés aux variables explicatives, s'effectue en examinant leur signe (influence positive ou négative sur la probabilité d'adoption) et la valeur des effets marginaux (la variation moyenne de la probabilité d'adoption, consécutive à la variation de la variable explicative).

D'après le Tableau 12, les variables suivantes ont un effet significatif sur la probabilité d'adopter la SNCR :

- Un four faisant face à une VLE inférieure ou égale à 800 mg/Nm³ a une probabilité plus forte d'adopter la SNCR qu'un four pour lequel cette valeur est supérieure à 800mg/Nm³ ;
- Plus la concentration en NOx des fumées est élevée, plus la probabilité d'adoption est élevée ;
- La variable indicatrice des années 2006 et plus augmente la probabilité d'adoption. En effet, ce n'est qu'à partir de fin 2005 que la VLE de 800mg/Nm³ est applicable en France pour les fours co-incinérateurs ;
- Plus le chiffre d'affaires de l'établissement est élevé, plus la probabilité d'adoption est élevée ;
- Les fours à voie humide ou semi-humide ont une plus forte probabilité d'adopter la SNCR par rapport à un four à voie sèche ;
- Un four déjà équipé d'un système d'optimisation a une probabilité plus forte d'adopter la SNCR. Cela peut refléter le choix de n'investir dans une technique coûteuse (SNCR) que si les techniques moins coûteuses, déjà installées, ne permettent pas d'atteindre la VLE ;
- Un four déjà équipé d'un brûleur bas-NOx a une probabilité plus faible d'adopter une SNCR. Cela peut refléter un choix d'investissement, étant donné que l'installation d'un brûleur bas-NOx a un coût très élevé tout comme la SNCR.

Il est surprenant que la variable indiquant le niveau de production de clinker ne soit pas significative et qu'elle ait, de plus, un signe négatif (mais très faible). Cela peut être expliqué par la forte corrélation de cette variable avec le chiffre d'affaire (le chiffre d'affaire capte peut-être l'effet production de clinker).

⁸ Trop de facteurs non observables pourraient alors perturber la règle de décision que l'on cherche à identifier. En effet, l'adoption de la SNCR peut être décidée, par exemple, sur la base d'un niveau de production particulier sur une période antérieure donnée (depuis trois ans, par exemple), mais être différée de plusieurs années pour des raisons indépendantes de ce dernier (recherche de financement complémentaire, autorisations administratives,...).

⁹ En fonction de l'hypothèse faite sur le terme aléatoire représentant l'intensité inobservée de la propension à adopter, on peut se baser sur un modèle Probit (distribution normale) ou Logit (distribution logistique). Ici, nous supposons une distribution normale (les queues de distribution ne sont pas épaisses, contrairement à une distribution logistique).

Il faut noter que les variables sur la réglementation et la concentration de NOx sont corrélées. Le tableau 11 montre en effet que la réglementation, variable exogène, explique significativement la concentration.

Une dernière note doit être faite concernant l'éventuelle endogénéité des variables de production de clinker et de concentration de NOx avec le choix d'adopter la SNCR. En effet, les déterminants de l'adoption incluent le volume moyen de concentration de NOx et de production de clinker (avant adoption éventuelle), alors que ces derniers sont eux-mêmes liés à l'adoption de la SNCR. Afin de vérifier que l'éventuelle simultanéité des choix de production émission et d'adoption n'entraîne un biais (endogénéité), la probabilité prédite d'adoption de la SNCR a été calculée. Puis, la variable indicatrice de la mise en œuvre de la SNCR dans les équations d'émissions (flux totaux et spécifiques) a été remplacée par la probabilité prédite correspondante afin de tester si des différences significatives apparaissaient. Le test de spécification présenté par Wooldridge (2001) ne conclut pas à un rejet de l'hypothèse selon laquelle les deux modèles sont similaires. Par conséquent, le modèle de départ est retenu dans la mesure où l'exogénéité de la variable indicatrice de la mise en œuvre de la SNCR dans les équations d'émissions n'est pas rejetée.

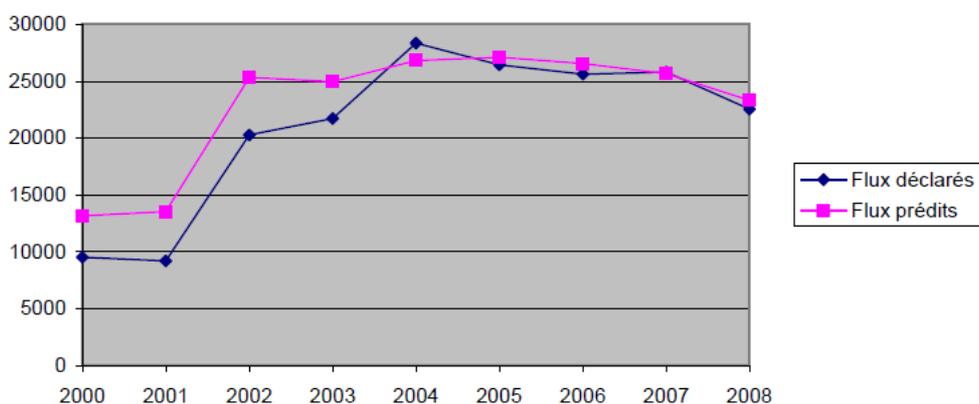
5.1.2 LE MODELE CHOISI

Puisqu'il n'est donc pas possible d'intégrer une probabilité d'adopter la SCR dans le modèle de simulation, celui-ci repose simplement sur un des modèles d'émissions estimés dans le chapitre 4. Le choix a été orienté vers le modèle dans lequel les variables explicatives sont observées jusqu'en 2008, à savoir le modèle A. Les variables représentant la part de coke de pétrole dans la consommation annuelle de combustibles, le chiffre d'affaire et la part de l'effectif salarié de l'établissement dans l'effectif salarié total sont donc exclues.

Le pouvoir prédictif de ce modèle pour le flux, le flux spécifique et la concentration peut être examiné dans les trois graphiques suivants.

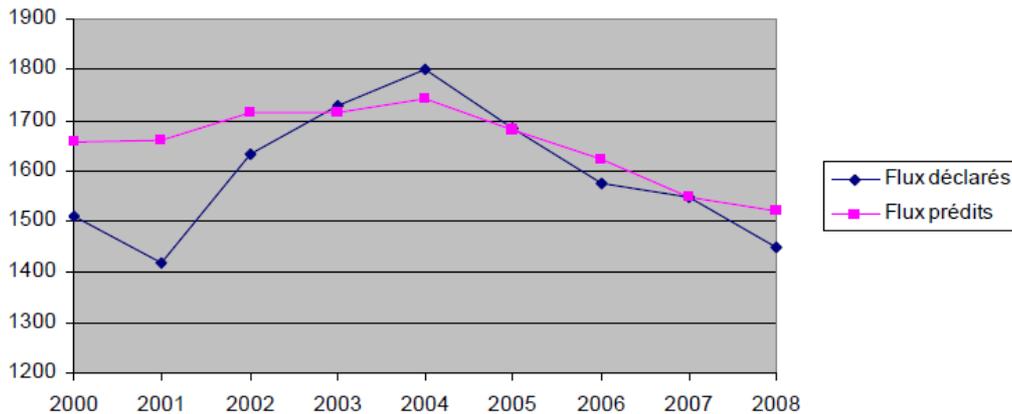
Le Graphique 11 présente les flux totaux déclarés (observés) entre 2000 et 2008 par l'ensemble des sociétés (en bleu) et les flux simulés par le modèle (en rouge). Comme illustré par le graphique, les flux simulés suivent bien de près les valeurs des flux déclarés, avec cependant une surestimation au début de la période.

Graphique 11: Modèle de flux (émissions totales), en tonnes de NOx



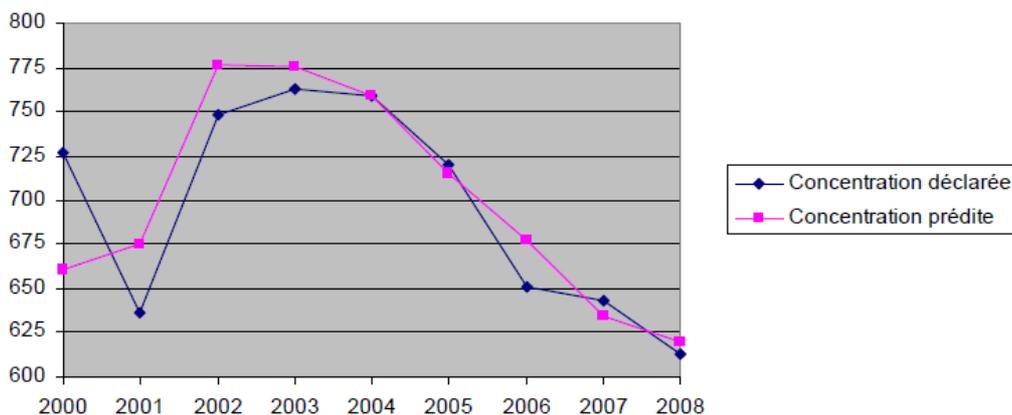
Les flux spécifiques simulés (Graphique 12) suivent bien les flux spécifiques déclarés entre 2003 et 2008, avec encore une fois une tendance à la surestimation entre 2000 et 2003, et une performance de simulation moins forte.

Graphique 12: Modèle de flux spécifiques (grammes de NOx par tonne de clinker)



Finalement, la concentration simulée de NOx dans les fumées du four est présentée dans le Graphique 13. A part la chute de concentration de 2000 à 2001, la concentration simulée suit très bien la concentration déclarée de NOx.

Graphique 13: Modèle décrivant la concentration de NOx (mg/Nm³)



5.2 CONSTRUCTION DES SCENARIOS TECHNICO-ECONOMIQUES

Cette partie présente, dans un premier temps, la méthodologie de construction des scénarios, puis, les différents scénarios qui seront simulés dans la partie 5.3.

5.2.1 METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DES SCENARIOS

Les scénarios doivent être construits à partir des variables représentées dans le modèle de simulation choisi (modèle A), à savoir :

- La production de clinker ;
- Le type de voie ;
- La VLE établie dans l'arrêté préfectoral;
- La technologie de réduction des émissions de NOx mise en œuvre parmi : le refroidissement de la flamme, la SNCR, l'optimisation, le brûleur bas-NOx et la combustion étagée.

Le type de voie étant dépendant des caractéristiques du cru provenant de la carrière à côté de laquelle est installée la cimenterie, il y a peu de chances qu'il évolue d'ici à 2020. Les scénarios seront alors élaborés en supposant que les fours en place en 2008 ne seront pas remplacés par des fours avec des voies différentes.

Concernant la variable VLE, nous supposons que tous les fours seront soumis à une VLE de $800\text{mg}/\text{Nm}^3$ maximum d'ici à 2020.

Les scénarios, à proprement parler, sont donc construits en croisant des hypothèses d'évolution de la production de clinker avec des hypothèses d'évolution de l'adoption des techniques de réduction des émissions de NOx. Ces hypothèses sont caractérisées comme suit.

Hypothèses d'évolution de la production de clinker

La caractérisation de l'évolution de la production de clinker à l'horizon 2020 est basée sur l'étude BCG (2008) et sur la tendance 2000-2008 observée en France.

Dans un premier temps, le BCG considère que, dans le cas où les quotas de CO₂ restent gratuits dans le secteur de la cimenterie, la demande européenne de ciment déterminerait la demande de clinker et par conséquent la production de clinker. En partant de là, il a également été considéré que les importations de ciment n'évolueraient pas sur cette même période.

La demande européenne de ciment a ensuite été projetée à l'horizon 2020 en prenant en compte trois facteurs importants de la demande : la consommation de ciment par habitant, le PIB par habitant et la démographie. La projection indique une hausse de la demande de ciment de 1,7% par an, ce qui est légèrement plus faible que la croissance du PIB européen estimée à 2,5% par an. L'évolution de la production de clinker étant supposée très proche de celle de la demande de ciment, la production de clinker évolue de la même manière.

En France, la production de clinker augmente de 1,2% par an (voir Graphique 1) sur la période 2000-2008. Cette tendance est plus forte avant la crise des subprimes de 2008. En supposant que les effets de la crise s'estompent sur la période 2010-2020, l'hypothèse du BCG d'évolution de la production européenne de clinker de +1,7% par an est conservée en tant qu'hypothèse optimiste. Deux autres hypothèses de production, moins optimistes, sont également considérées : augmentation de la production de clinker de 1,2% par an et de 0,7% par an.

Hypothèses d'évolution de l'adoption des techniques de réduction des émissions de NOx

Nous nous intéressons à deux techniques en particulier : la SNCR et la SCR. La SNCR est privilégiée par rapport aux autres techniques testées dans les modèles d'émissions de NOx du chapitre 4 parce qu'elle est la plus efficace (la SNCR réduit toujours plus fortement le flux spécifique et la concentration que l'optimisation par exemple). Concernant la SCR, bien que non encore appliquée en France, les exemples en Europe donnent des résultats encourageants et méritent d'être projetés en France (voir annexe IV).

Afin d'élaborer les hypothèses d'évolution de l'adoption de la SNCR et de la SCR, nous avons identifié, dans un premier temps, les facteurs d'adoption de ces techniques. D'après les résultats de l'estimation de la probabilité d'adoption de la SNCR (Tableau 12), les facteurs d'adoption de la technique qui pourraient être amenés à évoluer d'ici à 2020 sont¹⁰ :

- La réglementation (plus la VLE est basse, plus la probabilité d'adopter est élevée) ;
- Le niveau de concentration en NOx des fumées (plus ce niveau est élevé, plus la probabilité d'adopter est élevée) ;
- Le chiffre d'affaires de l'établissement (plus il est élevé, plus la probabilité d'adopter est élevée).

Pour la SCR, ce type d'analyse n'a pu être réalisé en raison de l'impossibilité d'observer des cimenteries françaises équipées de cette technique. Cependant, certains facteurs d'adoption ont pu être identifiés à partir des informations notamment disponibles dans les rapports d'activité des entreprises européennes ayant investi dans cette technique (voir annexe IV pour plus de détails) :

- La présence d'ammoniac dans le cru ;
- Pression exercée par le voisinage et concurrence élevées ;
- Possibilité de financement public.

Bien que les facteurs d'adoption de la SCR et de la SNCR ne semblent pas les mêmes, nous basons sur les facteurs identifiés quantitativement pour la SNCR, à savoir la réglementation et la concentration en NOx des fumées, pour projeter le taux d'adoption de chaque technique à l'horizon 2020. Le chiffre d'affaire n'est pas pris en compte par manque d'informations financières sur le secteur. Les hypothèses d'évolution de l'adoption de la SNCR et de la SCR seront donc fonction de :

- La réglementation :
 - o Soit la VLE reste inchangée (on reste aux niveaux fixés par la Directive incinération 2000/76/CE) ;
 - o Soit la VLE est fixée à 500 mg/Nm³ (seuil se situant dans la fourchette des valeurs préconisées dans le BREF ciment révisé en 2009).
- Du niveau de concentration en NOx des fumées en sortie de four et à partir duquel le cimentier prend sa décision : nous prenons le niveau de concentration de 2008.

Le fait que la VLE réglementaire détermine le niveau de concentration de NOx (démontré dans le tableau 11) sera pris en compte dans le montage des scénarios (voir les hypothèses techniques **H. Tech. B, C et D** de la section suivante).

5.2.2 LES SCENARIOS

Comme évoqué dans la méthodologie, trois postulats de base sont considérés :

P1 : Une augmentation de la demande en ciment de x% se traduit par une augmentation de x% de la production de clinker.

P2 : Tous les fours sont soumis à une VLE de, au maximum, 800mg/Nm³ à partir de 2009.

¹⁰ Des travaux postérieurs à cette étude viseront à améliorer le modèle d'émissions de NOx en y intégrant la probabilité d'adoption de la SNCR et, aussi, un paramètre de coût des techniques. Il sera alors possible de simuler des scénarios uniquement économiques et de ne plus « fabriquer » des scénarios techniques d'adoption.

P3 : La SNCR conduit à une réduction de la concentration de NOx de 17,6% en moyenne et la SCR conduit à une réduction de 90%¹¹.

Les scénarios sont construits à partir des hypothèses d'évolution de la production de clinker et des hypothèses d'évolution de l'adoption des techniques SCR et SNCR présentées dans la section précédente et que l'on peut décliner comme suit :

- Pour la production de clinker :

H. Prod. A : Augmentation de la production de clinker de 1,7% par an ;

H. Prod. B : Augmentation de la production de clinker de 1,2% par an ;

H. Prod. C : Augmentation de la production de clinker de 0,7% par an ;

- Pour l'adoption des techniques :

H. Tech. Statu quo : Les techniques de réduction des émissions de NOx déjà mises en œuvre en 2008 n'évoluent pas et restent identiques.

H. Tech. A : Tous les fours adoptent la technologie SNCR (l'indicatrice SNCR passe de 0 à 1 pour les 14 fours qui n'ont pas de SNCR en 2008 ; cette indicatrice est ensuite multipliée par le coefficient de l'indicatrice SNCR estimée dans le modèle d'émission)

H. Tech. B : Les fours dont la concentration en 2008 est supérieure à 500mg/Nm³ adoptent la technologie SNCR (ceux qui étaient en SNCR en 2008 y restent).

H. Tech. C : Les fours dont la concentration en 2008 est supérieure à 500mg/Nm³ adoptent la technologie SCR (ceux qui étaient en SNCR en 2008 y restent).

H. Tech. D : Tous les fours dont la concentration en 2008 est supérieure à 500mg/Nm³ adoptent la technologie SCR (y compris ceux qui avaient déjà installé la SNCR).

H. Tech. E : Tous les fours adoptent la technologie SCR.

Les hypothèses d'évolution de l'adoption des techniques B, C et D sont des combinaisons des hypothèses sur la réglementation et sur le niveau de concentration en NOx des fumées en 2008. Les hypothèses A et E sont des hypothèses « extrêmes » qui permettront d'observer l'évolution des émissions de NOx lorsque tous les fours sont en SNCR ou lorsqu'ils sont tous en SCR. Enfin, l'hypothèse de « Statu quo » sert de benchmark.

Finalement, le Tableau 13 présente les différents scénarios qui sont simulés dans la partie suivante.

Tableau 13: Les scénarios technico-économiques

	H. Tech. Statu quo	H. Tech. A	H. Tech. B	H. Tech. C	H. Tech. D	H. Tech. E
H. Prod. A	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
H. Prod. B	Scénario 7	Scénario 8	Scénario 9	Scénario 10	Scénario 11	Scénario 12
H. Prod. C	Scénario 13	Scénario 14	Scénario 15	Scénario 16	Scénario 17	Scénario 18

¹¹ Le modèle A indique que l'adoption de la technologie SNCR conduit à une réduction de la concentration de NOx de 17,6% en moyenne. Sachant que l'adoption de la technologie SCR conduit à une réduction moyenne des émissions de 90%, on considère que le coefficient associé à une technologie SCR (hypothétique) serait de magnitude égale au coefficient associé à la technologie SNCR multiplié par 90/17,6.

5.3 RESULTATS DES SIMULATIONS

Le Tableau 14 présente le flux total de NOx en 2020 résultant de la somme des flux individuels par four ainsi que, entre parenthèse dans le tableau, les variations en % de flux total entre le statu quo et le scénario en question.

Tableau 14: Flux total de NOx, en tonnes par an

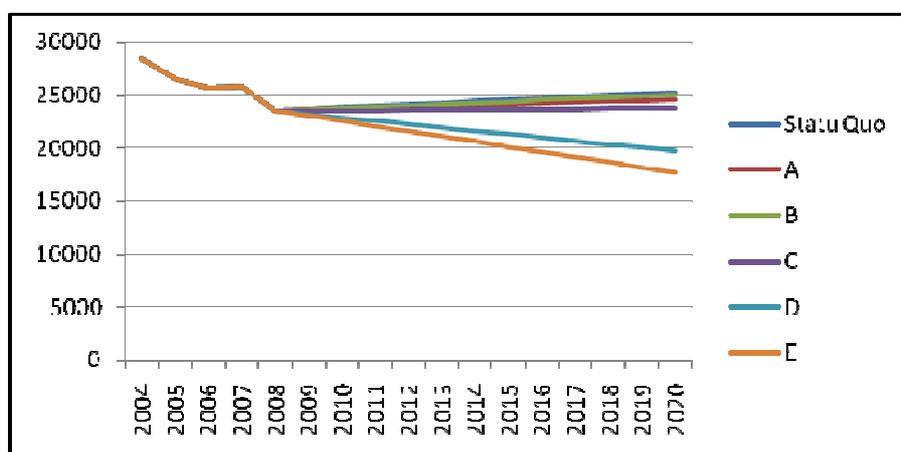
	Statu Quo	H. Tech A	H. Tech B	H. Tech C	H. Tech D	H. Tech E
1,7% par an	25 243	24 535 (-2,8)	24 940 (-1,0)	23 692 (-6,1)	19 740 (-21,8)	17 671 (-30,0)
1,2% par an	23 652	22 945 (-3,0)	23 349 (-1,3)	22 101 (-6,5)	18 149 (-23,2)	16 081 (-32,0)
0,7% par an	22 146	21 438 (-3,2)	21 843 (-1,3)	20 595 (-7,0)	16 643 (-24,8)	14 574 (-34,2)

Les flux de NOx sous le statu quo sont obtenus en supposant que tous les fours sont soumis à une VLE de 800mg/Nm³. Si on suppose au contraire que les VLE de 2008 restent inchangées, les flux sont de 27 892 t/an, 26 302 t/an et 24 795 t/an respectivement pour les hypothèses de production de clinker de A, B et C. Dit autrement, imposer une VLE de 800 mg/Nm³ sur tous les fours permet de réduire les émissions totales de 10 à 12% par rapport à 2008 où les fours ne sont pas encore tous soumis à cette VLE. On peut montrer également qu'une augmentation de la production de clinker de 0,84% par an conduirait à une hausse du flux qui serait exactement contrebalancée par une application uniforme de la VLE à 800 mg/Nm³.

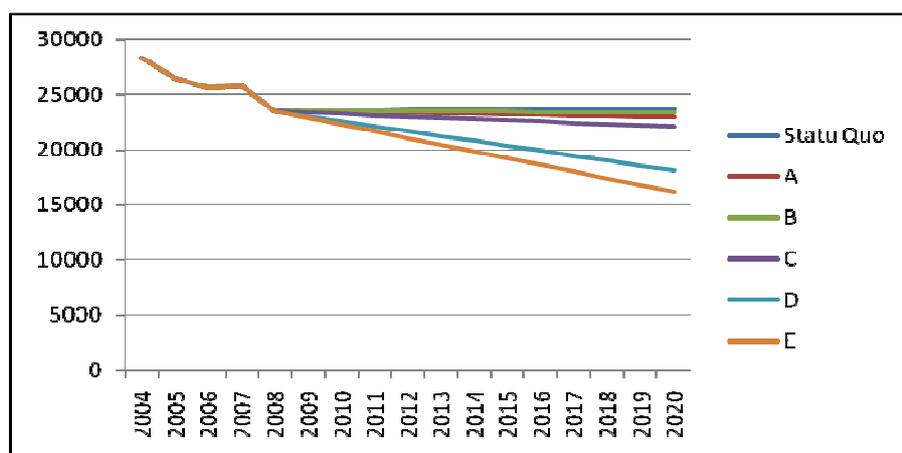
Si tous les fours adoptent la technologie SNCR (hypothèse A), on obtient des réductions de flux comprises entre 2,8% et 3,2% selon les hypothèses d'évolution de production de clinker. Par comparaison, lorsque les fours dont la concentration en 2008 est supérieure à 500mg/Nm³ adoptent la technologie SCR et ceux qui sont en SNCR en 2008 ne changent pas (hypothèse C), les flux varient entre une diminution de 6,1% et 7% par an. L'adoption par une partie des fours de la technologie la plus performante, la SCR, permet ainsi de doubler les réductions de flux du secteur par rapport au statu quo. Si l'on prend l'hypothèse d'adoption D, dans laquelle tous les fours dont la concentration en 2008 est supérieure à 500mg/Nm³ adoptent la technologie SCR (y compris ceux qui avaient déjà installé la SNCR), les réductions de flux du secteur par rapport au statu quo sont de l'ordre de 21% à 25%.

Les trois graphiques qui suivent permettent d'illustrer ces propos.

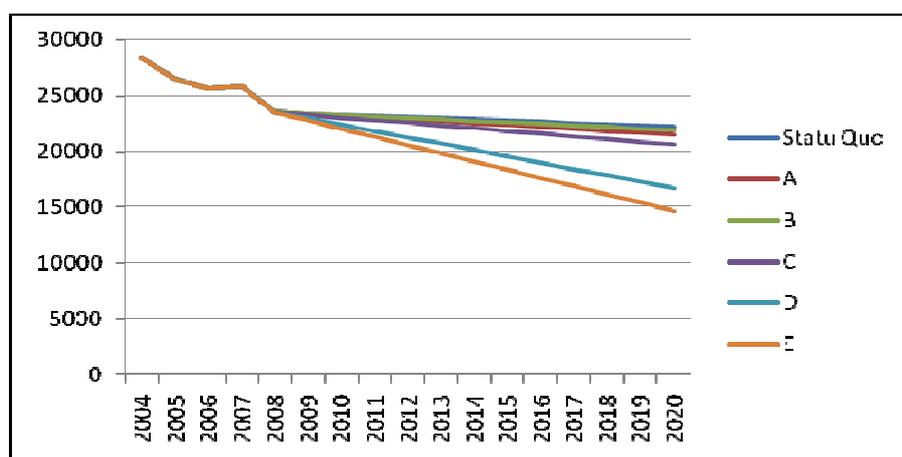
Graphique 14: Simulation des scénarios 1 à 6 (hypothèse de production de clinker de +1,7% par an)



Graphique 15: Simulation des scénarios 7 à 12 (hypothèse de production de clinker de +1,2% par an)



Graphique 16: Simulation des scénarios 13 à 18 (hypothèse de production de clinker de +0,7% par an)



Les réductions potentielles du flux total de NOx du secteur de la cimenterie, qui peuvent donc aller jusqu'à 8 911 tonnes dans le scénario le plus optimiste (Scénario 18 : 0,7% de croissance de production de clinker et tous les fours en SCR)¹², peuvent être mises en perspective en les comparant aux réductions demandées à la France dans le cadre de la directive européenne 2001/81/CE sur les plafonds nationaux d'émissions, à savoir 485 000 tonnes d'ici à 2010¹³.

Le

Tableau 15 présente le flux spécifique moyen en 2020 sous les différents scénarios.

¹² Cette variation de flux est calculée en faisant la différence entre le flux de 2008 (23 485 t) et le flux obtenu avec le scénario le plus optimiste. Dans le scénario le plus pessimiste (Scénario 1 : 1,7% de croissance de production de clinker et équipement des fours inchangé), on observe une augmentation du flux de 4 407 tonnes. Ce n'est qu'à partir du Scénario 5 que l'on observe une réduction du flux par rapport à 2008.

¹³ Le plafond d'émissions français est de 810 000 tonnes de NOx en 2010. Selon le CITEPA, les émissions françaises totales de NOx étaient de 1 295 kilotonnes en 2008 (1 345 kt en 2007), soit une réduction nécessaire de 485 000 tonnes de NOx d'ici à 2010.

Tableau 15: Flux spécifiques moyens, en grammes / tonne de clinker

	Statu Quo	H. Tech A	H. Tech B	H. Tech C	H. Tech D	H. Tech E
1,7% par an	1 370	1 267	1 326	1 149	664	368
1,2% par an	1 383	1 280	1 339	1 161	676	379
0,7% par an	1 395	1 291	1 350	1 172	687	390

Les simulations des flux spécifiques sont une représentation du caractère polluant de la production de clinker. Ici, la production de clinker joue sur les flux spécifiques de manière négative mais non significative. C'est pour cette raison que, plus la production de clinker augmente, plus les flux spécifiques diminuent et c'est pourquoi les variations des flux spécifiques prédits entre les lignes pour une même colonne sont assez faibles.

Finalement, il est important de noter que les flux spécifiques n'étant pas influencés de façon importante par le niveau de production de clinker, des hypothèses sur la croissance économique à un horizon de plusieurs décennies se traduiront essentiellement par une variation de la production de clinker, à multiplier par un flux spécifique prédéterminé en fonction des techniques de réduction des émissions de NOx mises en œuvre. Il n'en demeure pas moins que le postulat P1 demanderait à être validé empiriquement, afin de s'assurer de la proportionnalité exacte entre des variations de la demande de ciment (au niveau du marché pertinent pour les cimenteries de l'échantillon) et des variations consécutives de la production de clinker. Pour ce faire, une relation devrait être préalablement estimée entre la demande en ciment et la production de clinker au niveau national (données INSEE ou d'organisations professionnelles, par exemple). Enfin, des données sur les coûts des mesures (investissements nécessaires et charges opérationnelles) obtenues par ailleurs pourraient être mobilisées pour estimer, mais de façon relativement peu précise *a priori*, le volet financier des réductions d'émissions décrites ci-dessus.

6. EVALUATION DE L'IMPACT DE LA MISE EN ŒUVRE DES MTD SUR LA COMPETITIVITE DU SECTEUR

Ce dernier chapitre consiste à évaluer l'effet de la mise en œuvre des MTD plus ambitieuses et plus coûteuses (SCR par exemple) sur la compétitivité du secteur cimentier français. La définition de la compétitivité utilisée ici est celle de la Commission européenne, à savoir : « la compétitivité industrielle est la capacité d'un secteur industriel à défendre et/ou à gagner des parts de marché dans des marchés internationaux ouverts à la concurrence en reposant sur le prix et/ou la qualité des biens (European Commission, 2004) ». L'objectif de ce chapitre est donc d'évaluer l'impact de la mise en œuvre des MTD sur :

- Le niveau de compétitivité-prix du secteur cimentier : par compétitivité-prix, nous entendons toute diminution du prix de la tonne de ciment par rapport au prix de la tonne du même ciment chez le concurrent (un établissement étranger par exemple);
- Le niveau de compétitivité-produit du secteur cimentier : la compétitivité-produit repose sur toute amélioration de la qualité du ciment par rapport à celle du concurrent. La qualité peut prendre différentes formes : qualité intrinsèque du produit, qualité du procédé de production, sécurité et traçabilité.

Les deux premières parties de ce chapitre sont consacrées à l'évaluation du niveau de la compétitivité-prix (6.1) et de la compétitivité-produit (6.2) du secteur de la cimenterie française aujourd'hui. La partie 6.3 propose une évaluation de l'impact de la mise de œuvre des MTD sur le niveau des compétitivités prix et produits.

6.1 EVALUATION DU NIVEAU DE LA COMPETITIVITE-PRIX DU SECTEUR

Le BREF ECME recommande l'utilisation de la théorie des 5 forces de Porter (Porter, 1980) afin d'évaluer le niveau de la compétitivité-prix puis l'impact de la mise en œuvre des MTD sur ce niveau de compétitivité. Bien que cette méthodologie fut initialement développée pour évaluer l'état de santé d'une entreprise et permettre aux gestionnaires de faire des choix stratégiques pour le futur, certains éléments peuvent être utiles à la compréhension de la capacité des secteurs industriels à absorber ou transmettre le coût de la mise en œuvre des MTD (Vercaemst and De Clercq, 2003).

Selon Porter, le niveau de compétitivité-prix est déterminé par 5 « forces » (« les 5 forces de Porter »), à savoir : la rivalité entre les sociétés, le pouvoir de négociation des fournisseurs de la société, le pouvoir de négociation des clients de la société, la menace de produits de substitution et la menace de nouveaux entrants. Afin d'établir le niveau de compétitivité-prix d'une cimenterie, chacune de ces forces est définie et caractérisée en suivant la méthodologie du BREF ECME. Lorsque l'information nécessaire n'était pas disponible, nous avons eu recours à la littérature théorique et empirique dans le secteur de la cimenterie ou dans d'autres secteurs. La caractérisation de certaines forces est cependant à considérer avec beaucoup de précaution eu égard à la qualité de l'information sur laquelle l'évaluation a été réalisée.

6.1.1 LA RIVALITE ENTRE LES SOCIETES

La rivalité entre les sociétés peut être évaluée, notamment, en fonction du niveau de concentration et du niveau d'exploitation de la capacité de production (définition de ces facteurs de rivalité en annexe V). Le BREF ECME préconise d'évaluer également le niveau des barrières à l'entrée, or, l'information nécessaire n'a pas pu être rassemblée pour cela.

➤ **Niveau de concentration :**

La filière française compte aujourd'hui quatre sociétés de fabrication de ciment Portland (Lafarge-France, Calcia-Italie, Holcim-Suisse, Vicat-France) et une société de fabrication de ciments alumineux fondus et spécialisés (Kerneos-France). Son organisation autour de quelques grandes sociétés remonte à la période de reconstruction des années 70. Des compagnies régionales puis nationales ont émergé à ce moment là en fusionnant avec les producteurs locaux (SESSI, 2005). Cette vague de concentration s'est poursuivie à l'international par l'achat d'entreprises dans des zones à fort potentiel de croissance (SESSI, 2005).

Nous utilisons l'indice de Herfindahl-Hirschmann (HHI)¹⁴ pour déterminer le niveau de concentration du secteur de la cimenterie en France (la production de ciments spécialisés n'est pas prise en compte). Cet indice est calculé à partir des volumes de production de ciment (données provenant de l'enquête INERIS) en supposant que les cimentiers adaptent leur production en fonction des volumes demandés (autrement dit, la totalité de la production est vendue) :

HHI(2005)= 2913 ; HHI(2008)= 2820

La valeur de l'index en 2005 et 2008 est supérieure à 1800, ce qui reflète un niveau de concentration élevé avec une très faible tendance à la diminution. Le risque de rivalité entre sociétés relatif à ce niveau de concentration serait donc faible.

➤ **Niveau de surcapacité :**

L'évolution du niveau de surcapacité du secteur est évaluée à partir du taux d'utilisation de la capacité des fours¹⁵ (voir Tableau 16) et du taux moyen d'utilisation de la capacité des fours¹⁶ (voir Tableau 17).

Tableau 16: Taux d'utilisation de la capacité des fours

Taux d'utilisation du four	% de fours			
	2005	2006	2007	2008
≤ 75%	21	26	18	15
75% < x ≤ 85%	32	26	33	42
85% < x ≤ 95%	29	32	30	24
> 95%	18	15	18	18
Total	100	100	100	100
Nb. Observations	34	34	33	33

Sources : données BDREP

¹⁴ Cet indice est le résultat de la somme des pourcentages au carré des parts de marché de toutes les sociétés du secteur. Un marché dans lequel le HHI est entre 1000 et 1800 points est considéré comme étant peu concentré. Celui dans lequel le HHI est supérieur à 1800 points est considéré comme concentré (Carlton and Perloff, 1990) : $HHI = \sum Si^2$ $\sum Si = 100\%$

¹⁵ Taux d'utilisation de la capacité du four = production annuelle du four en kg divisée par la capacité annuelle de production du four en kg.

¹⁶ Taux moyen d'utilisation de la capacité des fours = somme des taux d'utilisation de la capacité des fours de l'année n divisée par le nombre de fours de l'année n .

Tableau 17: Taux moyen d'utilisation de la capacité du four

	2005	2006	2007	2008
Taux moyen d'utilisation des fours	84,2%	83,8%	84,7%	84,3%

Entre 2005 et 2008, on peut observer deux types de comportement : (i) pour environ quatre cinquième des fours, une tendance à un taux d'utilisation de la capacité du four compris entre 75 et 85% (et donc un niveau de surcapacité moyen à élevé), (ii) pour les autres fours, un taux d'utilisation stable et supérieur à 95% (et donc un niveau de surcapacité plutôt faible). On remarque, par ailleurs, que le taux moyen d'utilisation des fours est stable entre 2005 et 2008 (ce qui est normal vu la stabilité de la production totale et du nombre de fours sur la même période). Le niveau de surcapacité des fours est donc globalement moyen et stable que l'on se place dans l'un ou l'autre des types de comportements et cela laisse penser que la rivalité entre les sociétés de cimenterie françaises est peu affectée par le niveau et les variations de surcapacité des fours.

➤ **Synthèse des facteurs de rivalité :**

Tableau 18: Synthèse des facteurs de rivalité

Facteurs de rivalité	Interprétation	Etat du facteur dans le secteur	Niveau de rivalité en fonction de l'état du facteur
Concentration	Plus le niveau de concentration est élevé, moins il y a de rivalité	Concentration élevée	Rivalité faible
Surcapacité	Plus il y a de surcapacité de production, plus il y a de rivalité	Surcapacité moyenne et stable	Rivalité moyenne et stable
Barrières sortie	Plus il y a de barrières à la sortie, plus il y a de rivalité	N.D.	N.D.

6.1.2 LE POUVOIR DE NEGOCIATION DES FOURNISSEURS

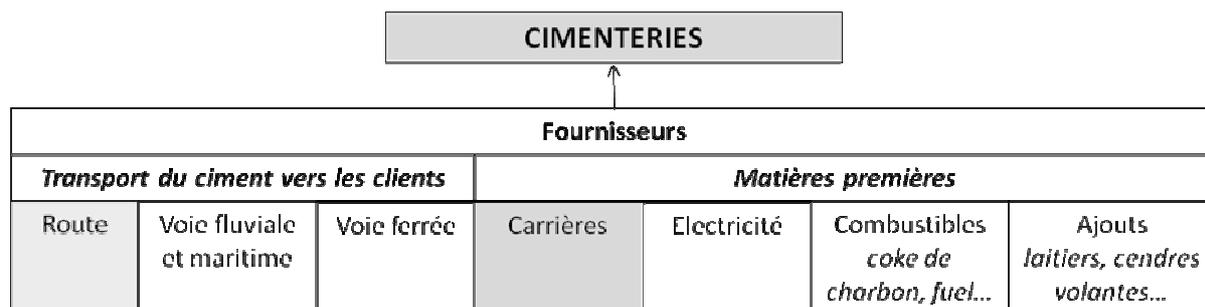
Le pouvoir de négociation des fournisseurs peut être évalué en fonction des paramètres suivants :

- Nombre de fournisseurs par rapport au nombre de clients potentiels ;
- Coût du changement de fournisseur pour un cimentier ;
- La part de marché associée à une cimenterie par rapport à l'ensemble des débouchés du même fournisseur.

La définition de ces facteurs est détaillée en annexe V.

➤ **Ratio (Nombre de fournisseurs par rapport au nombre de clients potentiels) :**

Afin d'identifier les fournisseurs d'un établissement de cimenterie, la figure ci-dessous a été établie à partir de l'information récoltée lors des entretiens et de la revue de la littérature. Elle illustre les relations entre une cimenterie et son amont.



En grisé, les activités qui sont en général intégrées (en tout ou partie) par les sociétés de cimenterie.

Source : INERIS

Figure 1: Relations entre les cimenteries et leurs activités amont

Le cru, les combustibles et le transport du ciment vers les clients devraient théoriquement être les postes les plus importants de la part variable du prix du ciment¹⁷. La plus grande partie des cimenteries contrôle la source des matières premières et ils contrôlent souvent, directement ou indirectement, des entreprises de transport du ciment. La question du pouvoir de négociation ne se pose donc pas pour les fournisseurs de cru et de transport routier.

La consommation de combustibles par les cimenteries s'est diversifiée ces dernières années avec le développement de la co-incinération. En effet, malgré le coût élevé de l'équipement d'incinération, la totalité des établissements est aujourd'hui équipée (enquête INERIS). L'analyse des arrêtés préfectoraux d'autorisation à incinérer montre que ce mouvement a commencé bien avant l'instauration des quotas de CO₂, dès la crise de la construction du début des années 80. Il est maintenant courant d'utiliser une dizaine de combustibles différents dans la même année pour un même four (charbon de coke, farines animales, pneumatiques, fioul,...¹⁸). On peut penser que cette diversité de fournisseurs de combustibles permet aux cimenteries de réduire les risques de fluctuation des prix en faisant appel à un fournisseur plutôt qu'à un autre en fonction des prix qui sont proposés. Le nombre de fournisseurs de combustibles est cependant très faible par rapport au nombre de clients, et cela d'autant plus que l'on utilise des combustibles fossiles. Avec la co-incinération, le nombre de fournisseurs potentiels de combustible a augmenté, ce qui devrait relever le pouvoir de négociation des cimenteries et abaisser celui des fournisseurs.

Les ajouts, et notamment de laitier de haut fourneaux, ont une part de plus en plus importante dans la composition des ciments et leurs provenances sont variées et sont fonction de leur disponibilité. On pourrait alors comparer le cas des ajouts à celui des combustibles non fossiles.

Depuis l'ouverture du marché électrique le 1^{er} juillet 2007, l'augmentation du nombre de fournisseurs devrait théoriquement relever le pouvoir de négociation des cimenteries dans ce domaine.

L'accès au marché du fret ferroviaire est libéralisé depuis le 1^{er} avril 2006, ce qui devrait également relever le pouvoir de négociation des cimenteries. Enfin, le transport maritime offre un large éventail de possibilités aux cimenteries et on peut supposer un certain équilibre de pouvoir de négociation entre cimenteries et affréteurs.

¹⁷ Selon http://admi.net/eur/loi/leg_euro/fr_394D0815.html, les coûts fixes et les coûts variables pourraient être plus ou moins égaux, chaque type de coûts représentant environ 50% du coût total.

¹⁸ Source : enquête GEREP

➤ **Coût du changement de fournisseur pour le cimentier:**

Le coût de changement de fournisseur de combustible est certainement le plus élevé. Il comprend essentiellement le coût de l'équipement/adaptation du système d'incinération, la variation du coût de transport et le temps d'adaptation à ce nouveau combustible. Le temps nécessaire pour obtenir l'autorisation d'incinérer un nouveau combustible est aussi à considérer. Cela nous laisse penser que le coût du changement de fournisseur de combustible est relativement élevé et que le pouvoir de négociation des cimentiers face aux fournisseurs de combustibles est abaissé par ce facteur.

Concernant la fourniture d'électricité, depuis l'ouverture du marché en 2007, tous les fournisseurs peuvent proposer des offres au prix de marché, en revanche, seuls les opérateurs historiques peuvent proposer des tarifs réglementés. Ainsi, la souscription à une offre de marché peut ne plus permettre d'être à nouveau titulaire d'un contrat au tarif réglementé. Dans ce cas, le changement de fournisseur d'électricité peut se révéler assez coûteux, ce qui est à l'avantage des fournisseurs.

Le coût du changement de fournisseur d'ajouts dépend de la différence de distance entre l'ancien et le nouveau fournisseur. Il peut aussi comprendre le coût lié à un éventuel changement de formulation en fonction de la composition du nouvel ajout.

Un nouveau fournisseur de transport ferroviaire ou maritime ne va pas forcément amener le cimentier à devoir livrer sa marchandise dans une région différente et donc à supporter des coûts de transport significativement plus élevés.

➤ **Part de marché représentée par une cimenterie par rapport à l'ensemble des débouchés du même fournisseur:**

Que ce soit pour les fournisseurs de combustibles, d'électricité et de transport ferroviaire ou maritime, le secteur de la cimenterie ne représente pas une part significative de leurs débouchés¹⁹. Cela est moins le cas pour les fournisseurs de laitier de haut fourneau. Globalement, la part de marché que représente un cimentier chez ses fournisseurs ne permet certainement pas à ce cimentier d'avoir un pouvoir de négociation très élevé.

¹⁹ Cela est moins vrai pour les fournisseurs de combustibles « pneu usagés ». En effet, d'après le rapport d'activité d'Aliapur, près de 40% des débouchés des pneus usagés sont en valorisation énergétique et très principalement en cimenterie (http://www.aliapur.fr/media/files/societe/PDF/Rapport_Aliapur_2008.pdf).

➤ **Synthèse des facteurs de pouvoir de négociation des fournisseurs :**

Tableau 19: Synthèse des facteurs de pouvoir de négociation des fournisseurs

Facteurs de pouvoir de négociation des fournisseurs	Interprétation	Etat du facteur dans le secteur	Niveau de pouvoir de négociation des fournisseurs en fonction de l'état du facteur
Ratio (Nb. fournisseurs/Nb. cimentiers)	Plus le ratio est faible, plus le pouvoir de négociation des fournisseurs est élevé	Ratio très faible pour les combustibles fossiles. Ratio faible pour l'électricité et le transport ferroviaire. Ratio faible à moyen pour les ajouts et les combustibles non fossiles. Ratio moyen pour transport maritime. Contrôle sur les carrières et le transport routier.	Elevé pour les fournisseurs de combustibles fossiles, d'électricité et de transport ferroviaire. Elevé à moyen pour les fournisseurs d'ajouts et de combustibles non fossiles. Moyen pour les fournisseurs de transport maritime. Les carrières et le transport routier sont sous le contrôle des cimentiers.
Coûts du changement de fournisseur pour le cimentier	Plus les coûts sont élevés, plus le pouvoir de négociation du fournisseur est élevé	Coûts faibles pour transport ferroviaire et maritime. Coûts faibles à moyens pour électricité. Coûts moyens pour les ajouts. Coûts élevés pour les combustibles.	Faible pour les fournisseurs de transport ferroviaire et maritime. Faible à moyen pour les fournisseurs d'électricité, Moyen pour les fournisseurs d'ajouts. Elevé pour les fournisseurs de combustibles.
Part de marché du débouché cimenterie chez les fournisseurs	Plus la part est importante, plus le pouvoir de négociation du fournisseur faible	Part faible pour combustibles, électricité, transport ferroviaire et maritime. Part moyenne pour les ajouts.	Elevé pour les fournisseurs de combustibles, électricité, transport ferroviaire et maritime. Moyen pour les fournisseurs d'ajouts.

6.1.3 LE POUVOIR DE NEGOCIATION DES CLIENTS

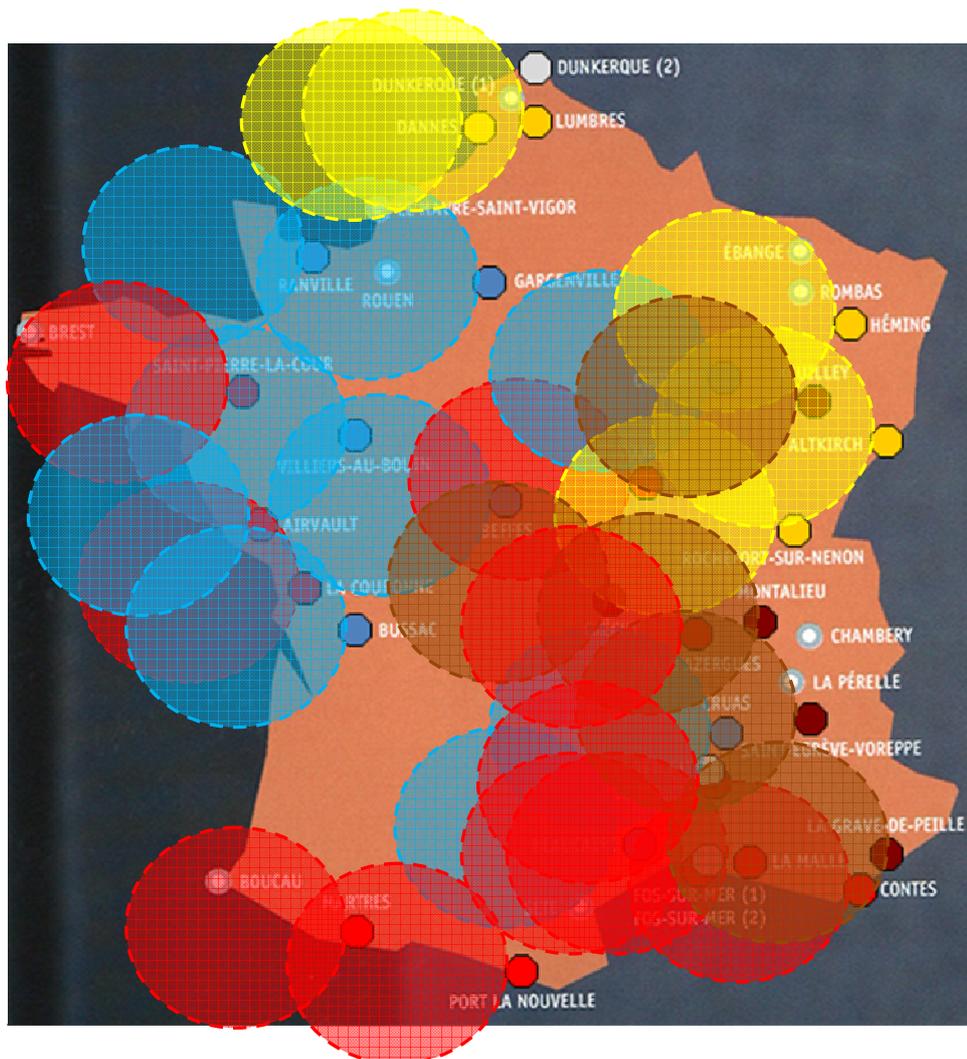
Le pouvoir de négociation des clients peut être caractérisé à travers :

- Le ratio (nombre de clients par rapport au nombre de fournisseurs de ciments) ;
- Le coût du changement de fournisseur de ciment pour le client ;
- La part du marché représentée par chaque client par rapport à l'ensemble des débouchés du même fournisseur de ciment.

La définition de ces facteurs est détaillée en annexe V.

➤ **Ratio (nombre de clients par rapport au nombre de fournisseurs de ciments):**

Afin d'identifier les clients, leur nombre et le nombre de cimenteries pouvant les approvisionner, il est tout d'abord nécessaire de connaître le rayon de chalandise d'une cimenterie. La Figure 2 permet de repérer les zones de chalandise de chaque établissement de cimenterie en France. Ces zones ont été établies sur la base du rayonnement moyen du transport de la marchandise estimé par la profession lors des entretiens, c'est-à-dire à environ 150 km.



Source : INERIS

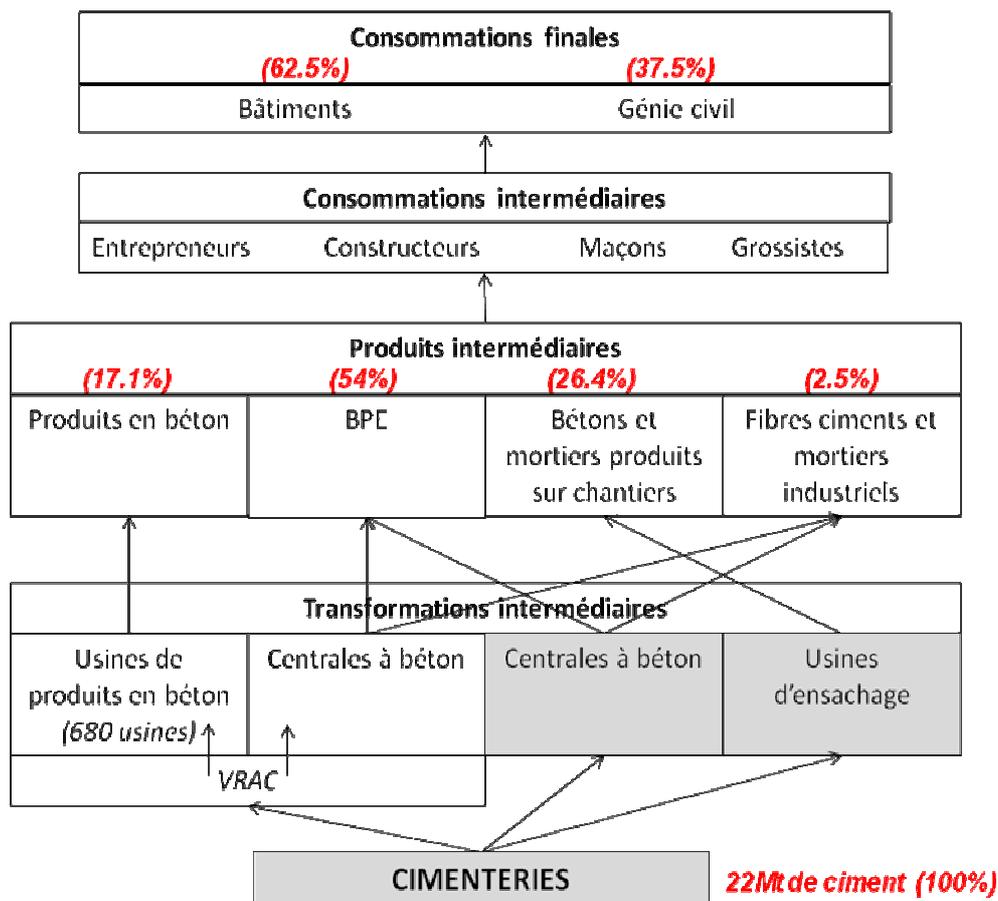
Figure 2: Zones de chalandise des cimenteries françaises

Excepté dans la vallée du Rhône, les périmètres ainsi délimités assurent à chaque société un relatif monopole géographique de leur activité. Cela revient à dire que, dans la plupart des régions en France, à moins de payer des coûts de transport significativement plus élevés, les acheteurs de ciments ne peuvent s'adresser qu'à un seul établissement de cimenterie. On peut alors s'attendre à un très faible pouvoir de négociation des clients sur l'ensemble du territoire avec cependant une certaine mise en concurrence dans la vallée du Rhône²⁰.

A titre indicatif et pour appuyer cet argument, l'enquête INERIS montre que 5 établissements sur 29 au total vendent leur production au niveau national et 3 au niveau européen ou mondial.

Nous avons ensuite cherché à illustrer les relations entre une cimenterie et son aval (voir la Figure 3) pour avoir un aperçu plus micro-économique de la situation.

²⁰ Sur le même sujet, une enquête de la Commission Européenne est en cours auprès de plusieurs sociétés de cimenterie pour organisation de cartel illégal. La Commission européenne avait déjà sanctionné en 1994 plus de 40 entreprises actives dans le ciment en Europe pour s'être entendues sur un partage du marché.



En grisé, les activités intégrées (en tout ou partie) par les sociétés de cimenterie.

Les pourcentages indiquent la part de ciment consommé par les consommateurs intermédiaires et finaux.

Source : INERIS

Figure 3: Relations entre les cimenteries avec leurs activités aval

On peut y voir que la plupart des sociétés de cimenterie ont intégré certaines activités de transformation du ciment, essentiellement usines d'ensachage et centrales à béton. Elles sont en revanche peu présentes dans la fabrication de produits en béton, une activité au coût d'entrée accessible et encore faiblement concentrée en France.

Les sociétés de cimenterie vendent généralement les sacs de ciment et de Béton Prêt à l'Emploi aux maçons, grossistes, constructeurs et entrepreneurs par l'intermédiaire de négociants. Elles sont en revanche en relation directe avec les usines de produits en béton qui ne travaillent très souvent qu'avec un seul fournisseur de ciment, la localisation déterminant le choix du fournisseur. L'ensemble de ces caractéristiques (intégration à l'aval, absence de transparence des prix et monopole géographique), soutient l'idée d'un pouvoir de négociation très faible des clients.

Il est par ailleurs important de noter que la demande de ciment est relativement rigide face à des variations de prix²¹. De ce fait, la solution classique de diminuer les prix en période de chute des ventes se présente pour les cimentiers comme une solution difficilement viable. L'industrie du ciment en elle-même ne peut, en effet, avoir qu'une très faible influence sur les facteurs conditionnant la demande qui reflètent l'état général de l'économie²². Cette dernière remarque vient nuancer les arguments précédents quant à la faiblesse du pouvoir de négociation des clients.

➤ **Coûts du changement de cimentier pour le client:**

Le transport routier n'est pas adapté à la contrainte pondérale du ciment, ce qui est la principale raison pour laquelle les clients ne changent pas de fournisseur à moins de payer les coûts de transport. En revanche, le transport maritime est en pleine expansion. Les importations françaises proviennent essentiellement de Chine, Turquie et Maghreb (source : entretiens).

La variation des caractéristiques du ciment d'un établissement à l'autre intervient également dans l'arbitrage du client, qui préférera en général utiliser un ciment de caractéristiques constantes et rester par conséquent fidèle à son fournisseur (source : entretiens).

Ces 2 éléments font que les coûts relatifs à un changement de cimentier sont importants, ce qui place le client en position de faiblesse face au cimentier. Dans certains cas, cependant, cette relation d'« exclusivité » entre le client et le cimentier favorise une forme de collaboration. C'est le cas, par exemple, des relations cimentier-usine de produits en béton où on peut observer la mise en place de cahiers des charges et d'une certaine aide dans les montages de formule de composition du béton²³.

➤ **Part de marché représentée par chaque client:**

L'enquête INERIS montre que les établissements de cimenterie ont un portefeuille de clients très diversifié. La quasi-totalité d'entre eux vend sa production aux bétonniers, entrepreneurs, préfabricants, constructeurs, maçons et grossistes. Ils sont légèrement moins nombreux à travailler directement avec les collectivités territoriales et l'Etat. Les parts de chaque client dans le portefeuille d'un cimentier n'étant pas connues il est difficile de conclure quant à l'effet de ce facteur sur le pouvoir de négociation des clients. La diversité du portefeuille permet cependant de penser que les cimentiers ont ainsi des débouchés assurés même s'ils perdent un client ce qui vient donc abaisser le pouvoir de négociation des clients.

²¹ Source : http://admi.net/eur/loi/leg_euro/fr_394D0815.html

²² Ces facteurs sont, pour l'essentiel, les taux d'intérêts, la politique des emprunts, l'évolution du pouvoir d'achat réel, le niveau des investissements publics ainsi que la rentabilité du commerce et de l'industrie en général.

²³ Les cimentiers ont aussi une activité d'adjuvants.

➤ **Synthèse des facteurs de pouvoir de négociation des clients :**

Tableau 20: Synthèse des facteurs de pouvoir de négociation des clients

Facteurs de pouvoir de négociation des clients	Interprétation	Etat du facteur dans le secteur	Niveau de pouvoir de négociation des clients en fonction de l'état du facteur
Ratio (Nb. client / Nb. cimentiers)	Plus le ratio est élevé, plus le pouvoir de négociation des clients est faible.	Ratio très élevé	Très faible avec cependant un effet conjoncturel de la demande venant relever le pouvoir de négociation des clients
Coûts changement cimentier	Plus les coûts sont élevés, plus le pouvoir de négociation des clients est faible.	Coûts très élevés	Très faible
Part de marché représentée par chaque client	Plus la part de marché représentée par chaque client est élevée, plus le pouvoir de négociation du client en question est élevé.	Part de marché moyenne à faible	Moyen à faible

6.1.4 LA MENACE DE PRODUITS DE SUBSTITUTION

La menace de produits de substitution peut être caractérisée à travers:

- L'évolution de la demande ;
- Le prix du produit de substitution par rapport à celui du ciment ;
- La capacité de la filière du produit de substitution à répondre aux besoins du marché par rapport à celle du ciment.

La définition de ces facteurs est détaillée en annexe V.

Les informations sur le substituant bois étant plus disponibles que sur les briques et les autres produits de substitution, l'état des facteurs de menace de substitution est décrit pour le bois et dans le domaine de la construction uniquement (le parpaing de béton sert de comparatif pour le ciment).

➤ **Evolution de la demande :**

Au regard des préoccupations environnementales, notamment climatiques, le choix de matériaux naturels et renouvelables ou recyclables, tels que le bois ou la brique, dans la construction devient un objectif important. De plus, les signaux politiques et réglementaires laissent présager une hausse importante de la demande de matériaux de construction en bois (accord cadre Bois-Construction-Environnement de 2001, l'éclosion de la démarche HQE, le Grenelle de l'Environnement).

En parallèle, la demande de ciment évolue vers plus de fonctionnalités (abrasivité, rapidité de prise, rapidité de cristallisation, réfractivité, expansivité, couleurs), plus d'efficacité et plus de durabilité à l'usage. La filière des ciments alumineux fondus est historiquement placée sur le marché des ciments spécialisés. Or, la filière des ciments Portland, produit dont les caractéristiques se rapproche de celles d'une commodité, est en train d'adapter son offre à cette demande. On observe d'ailleurs de plus en plus de substitutions techniques entre la filière des ciments alumineux fondus et le ciment Portland (entretiens).

➤ **Prix du produit de substitution²⁴ :**

Le coût d'un mur en parpaing de bois massif est de l'ordre de 145€/m² de mur.

Celui d'un mur en parpaing béton est de l'ordre de 45€/m² de mur.

➤ **Capacité de la filière bois à répondre aux besoins du marché:**

Les besoins en bois bruts s'élèvent à 45 Mm³ par an. Les trois quart sont assurés par la récolte française. La filière bois française (comprend le bois de trituration ou encore d'ameublement) souffre donc d'un déficit structurel en volume correspondant à environ un quart des besoins en bois brut. On constate par ailleurs un solde constamment négatif de la balance commerciale oscillant entre -2,3 et -3,4 milliards d'euros depuis 1975 (Savini et Cristofini, 2001). Ces chiffres laissent penser que la filière ciment-béton, a une capacité à répondre aux besoins du marché plus importante que la filière bois.

➤ **Synthèse des facteurs de menace de substitution :**

Tableau 21: Synthèse des facteurs de menace de substitution

Facteurs de menace de substitution	Interprétation	Etat du facteur dans le secteur	Niveau de menace de produits de substitution en fonction de l'état du facteur
Evolution de la demande	Plus la demande évolue vers de nouvelles performances, plus la menace est élevée.	Vers une certaine diversification de la demande.	Moyen à élevée
Prix du substituant (bois) par rapport au béton	Plus le prix du substituant est élevé, plus la menace est faible.	Prix du bois supérieur à celui du béton.	Faible
Capacité à répondre aux besoins du marché (bois) par rapport au béton	Plus la filière de substitution est capable de répondre aux besoins du marché, plus la menace est élevée.	Capacité du bois inférieure à celle du béton.	Moyenne à faible

6.1.5 LA MENACE DE NOUVEAUX ENTRANTS

La menace de nouveaux entrants peut être caractérisée à travers:

- Les barrières financières ;
- Les barrières réglementaires ;
- Les barrières d'accessibilité.

La définition de ces facteurs est détaillée en annexe V.

²⁴ Source : http://fr.ekopedia.org/Parpaing_bois_massif

➤ **Barrières financières :**

Le coût d'une cimenterie neuve équivaut à trois années de chiffre d'affaire, ce qui la classe parmi les industries à intensité capitaliste les plus fortes (BREF ciment). Cette contrainte associée à un contexte d'économie en récession (faibles opportunités d'expansion pour amortir le financement) vient donc réduire considérablement la menace de nouveaux entrants français ou en provenance de la zone euro. En revanche, elle pourrait provenir de l'extérieur de l'UE. Nous comparons dans le Tableau 22, le coût de production du clinker avec le coût de production des concurrents auquel les coûts de transport sont ajoutés. Ces coûts proviennent de l'étude BCG (2008) :

Tableau 22: Comparaison du coût de production d'une tonne de clinker en France, Turquie, Afrique du Nord et en Chine

Chiffres pour 2006 (€/t de clinker)	France	Turquie	Afrique du Nord	Chine
Matière première	5,1			
Salaires	5,5			
Energie	13			
Maintenance	4,9			
G&A	2,1			
Amortissement	4			
Coûts de prod, total	34,6	28	23	22
Transport	-	27-41	25-40	49-63
Coût Total	34,6	55-69	48-63	71-85

Source : BCG, 2008

Ces chiffres montrent que le coût total de la tonne de clinker français est inférieur à celui de son concurrent le moins cher (48€/t pour le clinker d'Afrique du Nord) en 2006. On peut cependant penser que cet écart est en train de se resserrer vu l'augmentation des importations sur la période 1996-2006 (voir Tableau 23).

Tableau 23: Balance commerciale de chaque continents (exports-imports en milliers de tonnes)

	Afrique	Amérique	Asie	Océanie	Europe	France
1996	-10097	-1205	-7173	-574	21022	699
1997	-9473	-5793	-1724	-627	21148	880
1998	-13764	-13819	10246	-406	17959	637
1999	-16162	-20903	27493	-383	13568	-73
2000	-15801	-20541	24743	-867	12177	-753
2001	-19423	-17702	26021	-386	12077	-393
2002	-16942	-15395	25777	-1554	9350	-1069
2003	-14013	-14484	23055	-1646	9691	-740
2004	-9870	-18175	20175	-2648	8850	-801
2005	-11983	-23123	32285	-2333	7977	-1296
2006	-15106	-25711	45816	-2377	1159	-2037

Source : Cembureau

L'Asie est le seul continent où la balance commerciale est positive et croissante.

➤ **Barrières réglementaires :**

La réglementation européenne, notamment IPCE, représente une barrière à la création de site dans la zone euro non négligeable. La menace de nouveaux entrants installés à l'extérieur des frontières européennes pourrait s'accroître avec le niveau d'exigence des MTD par exemple.

La mise en place du marché de quotas de CO₂ peut également constituer une menace dans l'hypothèse où l'allocation des quotas de CO₂ ne serait plus gratuite dans le futur.

➤ **Barrières d'accessibilité :**

Les ressources nécessaires à la production de ciments, et notamment les carrières, sont disponibles en France et dans le monde en abondance. Les autorisations d'exploiter sont, en revanche, certainement plus difficiles à obtenir en UE qu'hors UE.

L'accès à un centre de broyage de même que son ouverture en zone portuaire pour les producteurs de ciment indépendants (français ou étrangers) qui s'approvisionnent à l'étranger est en pleine mutation (voir Encart 2) et peut représenter une menace sérieuse. On observe néanmoins le développement de cette activité dans les sociétés de cimenteries françaises également.

L'accès au réseau de distribution français de ciment/béton est certainement un obstacle à l'arrivée de nouveaux producteurs de ciment, vu le contrôle des sociétés actuelles sur l'activité transport.

Encart 2: Effet du combustible sur les émissions de NOx

Ni Lafarge, ni Holcim n'envisagent d'ouvrir des cimenteries en France. Lafarge, qui voulait contrecarrer le projet de Paul Albrecht à Sète, va, en revanche, mettre en service un centre de broyage à la fin 2010 dans... le port héraultais. De son côté, Holcim ouvre un centre de broyage à Grand-Couronne (Seine-Maritime) à la mi-2010 et projette de le faire bientôt à La Rochelle (Charente-Maritime). Les deux groupes affirment ne pas avoir l'intention d'importer de clinker, sauf dans le cas où la consommation excéderait les capacités de production, comme ce fut le cas en 2007.

Source : Usine Nouvelle su 19 mars 2010

➤ **Synthèse des facteurs de menace de nouveaux entrants :**

Tableau 24: Synthèse des facteurs de menace de nouveaux entrants

Facteurs de menace de nouveaux entrants	Interprétation	Etat du facteur dans le secteur	Niveau de menace de nouveaux entrants en fonction de l'état du facteur
Barrières financières	Plus les barrières financières sont élevées, plus la menace est faible.	Barrières élevées en Europe. Un peu moins élevées hors UE.	Faible mais existence d'une menace provenant des pays hors UE.
Barrières réglementaires	Plus les barrières réglementaires sont élevées, plus la menace est faible.	Barrières élevées en Europe. Moyennes à faibles hors UE.	Faible mais menace non négligeable provenant des pays hors UE.
Barrières d'accessibilité	Plus l'accès aux ressources et réseaux de distribution est difficile, plus la menace est faible.	Barrières élevées mais en mutation pour l'activité de broyage de clinker importé.	Faible mais menace sérieuse provenant de producteurs de ciment indépendants français ou étrangers.

6.2 EVALUATION DU NIVEAU DE LA COMPETITIVITE-PRODUIT DU SECTEUR

La compétitivité-produit repose sur toute amélioration de la qualité du produit par rapport à celle du concurrent. La qualité d'un produit est déterminée par les préférences du consommateur. Elle peut dépendre d'au moins 2 types d'attributs :

- Les attributs intrinsèques du produit : plus les performances du produit se rapprochent des préférences du consommateur par rapport à son concurrent, plus il est valorisable auprès du consommateur et plus il est compétitif;
- Les attributs du procédé de production : plus les performances du procédé de production répondent aux préoccupations sociales et environnementales du consommateur par rapport à son concurrent, plus le produit est valorisable auprès du consommateur et plus il est compétitif.

L'impact de la mise en œuvre des MTD sur la compétitivité-produit du ciment est évalué en analysant l'impact de ces MTD sur les attributs intrinsèques du ciment et les attributs du procédé de production du ciment par rapport à son concurrent le bois. Autrement dit, nous allons chercher à savoir si la mise en œuvre des MTD peut améliorer ou non ce qui constitue la qualité du produit selon le consommateur. Si la mise en œuvre des MTD améliore une ou plusieurs performance(s) intrinsèque(s) du ciment, elle contribuera alors à la compétitivité du produit. Si la mise en œuvre des MTD améliore une ou plusieurs performance(s) du système de production du ciment, elle contribue alors aussi à sa compétitivité-produit.

Remarquons que pour que le consommateur puisse choisir un produit par rapport à un autre, il doit pouvoir connaître les performances de ces produits. Nous supposons alors, pour cette analyse, que des systèmes de labellisation existent et permettent au consommateur de reconnaître les caractéristiques des différents produits qui se présentent à lui.

Comme avec les 5 forces de Porter pour la compétitivité-prix, les attributs intrinsèques et les attributs du procédé de production vont nous permettre d'évaluer le niveau de compétitivité-produit du ciment par rapport au bois dans le cadre de la même utilisation, à savoir la construction des bâtiments habitables. Cette analyse est cependant beaucoup moins poussée que celle du niveau de la compétitivité-prix.

6.2.1 ATTRIBUTS INTRINSEQUES DU PRODUIT

Ces attributs correspondent aux diverses performances du produit. Nous avons identifié et évalué 9 performances (parfois de façon sommaire) que les consommateurs de ciment/béton et de bois semblent valoriser sur le marché. Les informations présentées proviennent, pour la plupart, du site http://fr.ekopedia.org/Parpaing_bois_massif.

Performance thermique : Le bois est environ 7 fois plus isolant que le béton. Pour une épaisseur de 20 cm, la résistance thermique du bois est de 1,83 m².K/W alors que celle du béton est de 0,275 m².K/W. En pratique, les performances thermiques du béton sont améliorées par la mise en place d'une isolation. Depuis le Grenelle Environnement, une résistance thermique équivalente à celle préconisée dans le label BBC 2005 est envisagée d'ici à 2012, c'est-à-dire une consommation maximale de 50 kWh/m²/an. La résistance thermique pour 2020 sera ensuite envisagée en mettant en œuvre le concept de Bâtiment à Energie Positive (BEP). Le matériau bois, du fait de sa bonne résistance thermique semble adapté au respect de cette future réglementation.

Performance acoustique : Par son inertie, le béton obtient de bonnes performances dans l'isolation acoustique lorsqu'il est associé à un isolant "mou" (laine de verre par exemple). En revanche, un mur de béton nu produit une acoustique réverbérante. Sur ce plan, le bois donne de meilleurs résultats que le béton.

Air intérieur : Le traitement chimique du bois pose plus de problèmes de qualité de l'air que le béton (INERIS). Cependant, il ne faut pas omettre la nécessité de faire appel à une isolation fibreuse avec le béton qui, elle aussi, pose des problèmes d'air intérieur.

Utilisation des ressources naturelles : Le bloc béton est composé principalement de sable et de cailloux, disponibles en abondance sur tout le territoire. La fabrication du bloc béton étant bien répartie, le transport jusqu'à son lieu d'utilisation s'en trouve réduit. Cependant, la fabrication du ciment requiert l'utilisation de grosses quantités de combustibles fossiles (bien que les combustibles alternatifs soient de plus en plus utilisés). L'utilisation de bois dans la construction fait appel à l'exploitation des forêts, une ressource renouvelable, à condition qu'elle soit bien gérée. L'utilisation de bois tropicaux en revanche, allonge des distances de transport, ce qui détériore le bilan carbone de la filière. Nous n'allons pas, dans cette étude, aller au-delà de cette analyse sommaire.

Entretien-maintenance : Le béton et le bois sont des matériaux pérennes. Certains bois nécessitent cependant d'être traités régulièrement.

Recyclage : Le bois et le béton sont recyclables.

Energie grise (somme de toutes les énergies nécessaires à la production, à la fabrication, à l'utilisation et enfin au recyclage des matériaux) : L'énergie grise du bois (0,1 à 0,5 MWh/m³) est inférieure à celle du béton (0,7 MWh/m³).

Applicabilité : Le délai d'exécution des travaux avec un matériau bois est court parce qu'il est directement sec alors que le béton demande un certain temps de séchage.

Technicité de pointe : Certaines formulations de ciments (ciments spécialisés en particulier) peuvent apporter des performances de dureté, résistance au milieu marin... que n'ont pas les bois.

Le Tableau 25 permet de comparer les performances du béton et du bois dans la construction de bâtiments habitables.

Tableau 25: Bilan des performances du bois et du béton de construction habitable

Types de performance	Produit ayant l'avantage compétitif
Thermique	Bois
Acoustique	Béton (avec isolant)
Air intérieur	Béton (même avec isolant)
Utilisation ress. naturelles	Bois
Entretien-maintenance	Béton
Recyclage	Bois et béton
Energie grise	Bois
Applicabilité	Bois
Technicité de pointe	Béton

6.2.2 ATTRIBUTS DU PROCÉDE DE PRODUCTION

Le consommateur de ciment peut porter un intérêt sur les attributs sociaux, économiques et environnementaux du procédé de production adopté par l'entreprise. Par manque de données, nous ne faisons que décrire certaines performances sociales et environnementales sur lesquelles les sociétés de cimenterie communiquent sur leur site internet :

- Politique de sécurité des sites/ prévention des accidents ;
- Mise en œuvre de système de management environnemental ISO 14001 ;
- Mise en œuvre de cahiers des charges environnementaux (ISO 14001) et/ou de qualité (ISO 9001). Le Tableau 26 présente le taux d'adoption de différentes certifications environnementales ;
- Co-incinération et valorisation des déchets industriels (et autres) ;
- Actions ponctuelles de type réaménagement de carrière en milieu naturel équilibré et auto-évolutif.

Tableau 26: Taux d'adoption des différentes certifications environnementales par les cimenteries françaises

Certifications des établissements	Taux d'adoption
<i>Norme EN</i>	<i>35/35</i>
<i>Label CE</i>	<i>35/35</i>
<i>ISO 9001</i>	<i>32/35</i>
<i>ISO 14001</i>	<i>31/35</i>

Source : enquête INERIS

Il existe certainement d'autres performances que les cimenteries essayent de développer. Le but de cette partie est essentiellement de montrer que ce type de performance, parce que les cimenteries communiquent dessus, peuvent être valorisées par les clients et augmenter la compétitivité-produit du ciment.

6.3 IMPACTS DE LA MISE EN ŒUVRE DES MTD SUR LA COMPÉTITIVITE DU SECTEUR

Les niveaux de la compétitivité-prix et produit du ciment étant à présent caractérisés, cette partie consiste à évaluer l'impact de la mise en œuvre des MTD sur ces niveaux de compétitivité. L'impact sur la compétitivité-prix est tout d'abord présenté puis celui sur la compétitivité-produit.

6.3.1 IMPACT SUR LA COMPÉTITIVITE-PRIX

L'impact de la mise en œuvre des MTD sur la compétitivité-prix du secteur est évalué en fonction des possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont ou vers l'aval de la cimenterie. Nous supposons en effet que la compétitivité actuelle d'une société ne sera pas menacée lorsqu'elle pourra :

- Transmettre le coût des MTD vers l'aval (hausse du prix du ciment) sans réduire les quantités de ciment vendues ;
- Transmettre le coût des MTD vers l'amont (baisse du prix des intrants) sans perdre ses fournisseurs ;
- Internaliser le coût des MTD (baisse de la marge de la société) sans se mettre en danger.

Chacune de ces possibilités étant dépendante de l'état des forces de Porter analysées précédemment.

Le tableau suivant fait une synthèse des possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont ou l'aval de la cimenterie. Lorsque l'état d'une force de Porter fait que les possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont ou l'aval sont nulles, nous considérons que la mise en œuvre des MTD diminue, dans ce cas précis, la compétitivité-prix.

Tableau 27: Synthèse des possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont ou l'aval de l'entreprise de cimenterie

Force et de facteurs de force	Etat du facteur dans le secteur de la cimenterie	EFFET du facteur sur le NIVEAU DE LA COMPETITIVITE-PRIX Vert: augmente la compétitivité Noir: effet neutre sur la compétitivité Rouge: diminue la compétitivité	Possibilité de transmission du coût des MTD vers l'amont ou l'aval sans menacer la compétitivité:		
			FAIBLES	MOYENNES	ELEVEES
RIVALITE					
Concentration	Concentration élevée.	Rivalité faible			X
Surcapacité	Surcapacité relativement élevée et en hausse.	Rivalité moyenne et stable		X	
POUVOIR DE NEGOCIATION DES FOURNISSEURS					
Ratio (Nb. fournisseurs/Nb. clients)	Ratio <<1 pour combustibles fossiles. Ratio <1 pour électricité et transport ferroviaire.	Pouvoir de négociation des fournisseurs élevé pour les combustibles fossiles, l'électricité et les transports ferroviaires.	X	X	
	Ratio >1 pour ajouts et déchets à incinérer (combustibles non fossiles).	Pouvoir de négociation des fournisseurs faible pour les ajouts et les déchets à incinérer.			
	Ratio ≈1 pour transport maritime.	Pouvoir de négociation des fournisseurs moyen pour le transport maritime.			
	Les sociétés de cimenteries contrôlent les carrières et le transport routier.	Les carrières et le transport routier sont, très souvent, des activités intégrées aux sociétés de cimenterie			
Coûts du changement de fournisseur pour les cimentiers	Coûts faibles pour transport ferroviaire et maritime.	Pouvoir de négociation des fournisseurs faible pour le transport ferroviaire et maritime.		X	X
	Coûts faibles à moyens pour électricité.	Pouvoir de négociation des fournisseurs faible à moyen pour l'électricité.			
	Coûts moyens pour les ajouts.	Pouvoir de négociation des fournisseurs moyen pour les ajouts.			
	Elevés pour les combustibles.	Pouvoir de négociation élevé pour les combustibles.			
Part de marché représentée par les cimentiers chez les fournisseurs	Part faible chez les fournisseurs de combustibles, électricité, transport ferroviaire et maritime.	Pouvoir de négociation des fournisseurs élevé pour les combustibles, l'électricité, les transports ferroviaire et maritime.	X		
	Part moyenne chez les fournisseurs d'ajouts.	Pouvoir de négociation moyen pour les ajouts.			

POUVOIR DE NEGOCIATION DES CLIENTS					
Ratio (Nb. clients/Nb. cimentiers)	Ratio >> 1	Pouvoir de négociation des clients très faible. Cependant, baisse conjoncturelle de la demande qui vient relever le pouvoir de négociation des clients.		(X)	X
Taille des parts de marché des clients	Parts de marché de chacun des clients moyennes à faibles	Pouvoir de négociation des clients moyen à faible.			X
Coûts changement cimentier	Coûts très élevés	Pouvoir de négociation des clients très faible.			X
MENACE DE PRODUITS DE SUBSTITUTION					
Evolution de la demande	Vers une certaine diversification de la demande (bois, brique)	Menace de produits de substitution moyenne à élevée	X	X	
Prix du substitut (bois versus béton)	Prix du substitut bois plus élevé que le béton	Menace de produits de substitution faible			X
Capacité du substitut à répondre aux besoins du marché (bois versus béton)	Capacité de réponse du substitut bois plus faible que le béton	Menace de produits de substitution moyenne à faible			X
MENACE DE NOUVEAUX ENTRANTS					
Barrières financières	Barrières financières élevées en UE et un peu moins élevées hors UE.	Menace de nouveaux entrants faible. Cependant, existence d'une menace provenant des pays hors UE.		(X)	X
Barrières réglementaires	Barrières réglementaires élevées en UE et moyennes à faible hors UE.	Menace de nouveaux entrants faible. Cependant, menace non négligeable provenant des pays hors UE.		(X)	X
Barrières d'accessibilité	Barrières d'accessibilité élevées en France.	Menace de nouveaux entrants faible. Cependant, menace en devenir provenant de producteurs de ciment indépendants français et étrangers par l'achat de centres de broyage de clinker étranger en zone portuaire.		(X)	X

Le bilan ci-dessus montre que :

- **Les possibilités de transmission vers l'amont**, principalement déterminées par le pouvoir de négociation des fournisseurs, **sont relativement faibles**. En effet, d'une part, la fourniture de cru et de transport routier sont des activités appartenant aux sociétés de cimenterie et une transmission de coût se traduirait par une réduction de la marge de la société. Les fournisseurs de combustibles fossiles, d'électricité et de transport ferroviaire sont peu nombreux sur le marché et ont un pouvoir de négociation très fort sur les prix, ce qui rend difficile l'obtention de baisse de prix. Il se pourrait que les pouvoirs de négociation entre cimentier et fournisseurs d'ajouts, de combustibles non fossiles et de transport maritime soient plus équilibrés. **Par conséquent, l'état de ces facteurs favoriserait une baisse de la compétitivité-prix si des MTD plus ambitieuses et coûteuses étaient mises en œuvre, i.e. le coût de ces MTD ne peut pas facilement être transmis vers l'amont (réduction du prix des intrants) sans que les fournisseurs ne se rétractent.**
- **Les possibilités de transmission vers l'aval**, déterminées par la rivalité, le pouvoir de négociation des clients, la menace de produits de substitution et la menace de nouveaux entrants, **sont beaucoup plus nombreuses bien que des facteurs de menace soient de plus en plus présents**. Les clients sont en effet en position de faiblesse face aux cimentiers, puisqu'un client n'a en général qu'une société de cimenterie à laquelle il peut s'adresser, ou alors il supportera des coûts de transport de la marchandise très élevés. De plus, un établissement de cimenterie possède un portefeuille de clients très varié, ce qui lui permet de se retourner vers un autre client lorsqu'un client souhaite baisser le prix du ciment.
Les possibilités de transmission vers l'aval pourraient se trouver menacées par une évolution de la demande vers des matériaux dits plus respectueux de l'environnement tels que le bois ou les briques par exemple. Les performances de ces matériaux sont discutées dans la partie suivante concernant la compétitivité produit. Ces matériaux sont cependant plus chers que les produits à base de ciment et la capacité de réponse de leur filière n'est pas aussi importante que celle du ciment. La menace pourrait par ailleurs provenir de nouveaux entrants sur le marché français tels que les producteurs d'Afrique du Nord ou d'Asie. Les coûts de production dans ces pays sont moins élevés qu'en France ou en Europe et la réglementation (normalisation et environnement) y est moins contraignante. La menace pourrait aussi provenir du développement des centrales de broyage de clinker importé en zone portuaire par des producteurs de ciment indépendants français ou étrangers. Il faut finalement remarquer que la majorité des cimenteries françaises sous-exploitent leur capacité de production (taux d'utilisation de leur capacité de production compris entre 75 et 85%) alors que les importations augmentent. Ce dernier constat révèle une certaine hausse de la rivalité dans le secteur alors qu'elle a été très faible jusqu'au début des années 2000. La transmission du coût des MTD vers l'aval aisé dans le passé, l'est de moins en moins aujourd'hui. **Par conséquent, par l'état de l'ensemble de ces facteurs, la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et coûteuses ne devrait pas produire d'impact significatif sur la compétitivité-prix, i.e. le coût de ces MTD pourrait être transmis vers l'aval (hausse du prix du ciment) sans que les volumes vendus ne diminuent significativement. Les menaces de nouveaux entrants et de produits de substitution devraient cependant être évaluées plus en profondeur.**

Afin de connaître les possibilités d'internalisation, le coût de production du clinker est comparé au coût de la mise en œuvre des MTD et au prix de vente du clinker. Ces chiffres sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 28: Possibilités d'internalisation du coût des MTD

	Valeurs pour 2006 (€/t de clinker)
Matière première	5,1
Salaires	5,5
Energie	13
Maintenance	4,9
Frais généraux	2,1
Amortissement	4
Coût de production	34,6 (source : BCG, 2008)
Coût de la mise en œuvre des MTD	SNCR : 0,7 à 1,8€/t SCR : 1,9 à 3,6€/t (source : ATILH-ADEME, 2003)
Coût total	Avec SNCR : 35,3 à 36,4€/t Avec SCR : 36,5 à 38,2€/t
Prix de vente	> 86€/t ciment (valeur de 2001) (source : ATILH-ADEME, 2003)

Cette base d'informations est trop incomplète pour arrêter une conclusion. On peut néanmoins avancer que, en comparant les coûts de la SNCR et de la SCR avec le coût de production d'une tonne de clinker présenté dans le Tableau 28, la mise en œuvre de la SNCR peut représenter 2,0 à 5,2% du coût de production du clinker et la SCR de 5,5 à 10,4%. Ces ratios sont loin d'être négligeables. En revanche, les coûts de ces deux techniques doivent être aussi comparés à la marge brute afin de savoir s'ils peuvent être absorbés par l'entreprise. Cette dernière étape n'est malheureusement pas réalisable avec l'information dont nous disposons.

Dans l'hypothèse où l'allocation des quotas de CO₂ ne serait plus gratuite, le coût des quotas équivaldrait entre 21 et 29€ par tonne de clinker (soit entre 61 et 84% du coût de production du clinker)²⁵. Dans le cas de la mise en œuvre de la SCR, la consommation d'énergie augmente et le coût de production d'une tonne de clinker augmenterait de 0,05-0,07€²⁶. Finalement, en ramenant le coût total de la SCR à la tonne de NOx évitée, nous obtenons un coût équivalent à 2200€/tNOx évitée lorsque les quotas sont alloués gratuitement, et un coût se situant entre 2511€ et 4635€/tNOx évitée lorsque les quotas sont payants. Dans les deux cas, le coût se trouve dans la fourchette des coûts maximum observés pour réduire les émissions de NOx tout secteur confondu (1950-5000€/t de NOx évitée, prix de référence BREF ECME)²⁷. Le haut de la fourchette pourrait toutefois dépasser les 5000€ en cas de prix de la tonne de CO₂ supérieur à 35€.

²⁵ Pour un coût de la tonne de CO₂ compris entre 25 et 35€ (projections BCG) et des émissions de CO₂ de 832 kg par tonne de clinker (BCG).

²⁶ Calculs effectués sur la base d'une réduction des émissions de NOx de 70 tonnes par an, de 12,4 tonnes de CO₂ émis par tonne de NOx évitée (ADEME, 2004), de 430000 tonnes de clinker produit par an, et pour un coût de la tonne de CO₂ compris entre 25 et 35€ (projections BCG).

²⁷ Le calcul est effectué comme suit : 2200€ la tonne de NOx évitée (ATILH-ADEME, 2003) + 311-435€ pour l'achat des quotas de CO₂ de par l'augmentation de la consommation d'énergie par le catalyseur. Au total, le coût de la tonne de NOx évitée avec la SCR se situe entre 2511 et 4635€.

6.3.2 IMPACT SUR LA COMPETITIVITE-PRODUIT

Concernant les attributs intrinsèques, la mise en œuvre de technologies consommatrices d'énergie (SCR, SNCR, ou encore le refroidissement de la flamme) pourrait détériorer la performance de l'attribut « Energie grise » du ciment. Les performances techniques de pointe de certains ciments pourraient également souffrir de la mise en œuvre de certaines MTD (refroidissement de la flamme, mid-kiln, minéralisation). Cependant, les cimentiers insistent sur le fait qu'ils adaptent le réglage de ces techniques de façon à ce que les performances du clinker restent les mêmes. De façon générale, nous considérons que ces deux exemples d'impact pourraient réduire, théoriquement, la valeur du ciment aux yeux du consommateur et par conséquent la compétitivité-produit du ciment.

Concernant les attributs du système de production, la mise en œuvre de l'optimisation du procédé et de la SCR améliore les performances environnementales en plus des émissions de NOx (la SCR perd cependant un peu de son intérêt en considérant la totalité de son cycle de vie – voir ADEME, 2004). En revanche, celle d'un brûleur bas-NOx, du mid-kiln et de la SNCR détériore certaines performances environnementales en dehors des émissions de NOx.

Les effets de la mise en œuvre des MTD sur le niveau de compétitivité-produit du ciment par rapport au bois sont résumés dans le tableau suivant. Il s'agit d'une évaluation assez théorique et les effets mentionnés sont probablement peu voire non détectables.

Tableau 29: Synthèse de l'impact de la mise en œuvre des MTD sur la compétitivité-produit du ciment par rapport au bois

Attributs	Etat de l'attribut	EFFET de l'ATTRIBUT sur le niveau de la COMPETITIVITE-PRODUIT	EFFET des MTD sur l'attribut et sur le niveau de la COMPETITIVITE-PRODUIT
		Vert: augmente la compétitivité Noir: effet neutre sur la compétitivité Rouge: diminue la compétitivité	Vert: augmente la compétitivité Noir: effet neutre sur la compétitivité Rouge: diminue la compétitivité
ATTRIBUTS INTRINSEQUES			
« Energie grise » du Ciment par rapport au Bois	Production d'énergie grise du Béton > Bois	La performance du bois est meilleure que celle du ciment	SCR, SNCR, Refroidissement de la flamme: Détérioration de la performance « énergie grise » (techniques consommatrices d'énergie)
Technicité de pointe du Ciment par rapport au Bois	Technicité de pointe du Béton > Bois	La performance du ciment est meilleure que celle du bois	Refroidissement de la flamme, Mid-kiln et Minéralisation: Détérioration de la performance « technicité de pointe »
ATTRIBUTS DU SYSTÈME DE PRODUCTION			
Autres émissions polluantes lors de la production de Ciment par rapport à celle du Bois	Ciment (SO ₂ , NO _x , COV, CO ₂ , ammoniac, poussières) > Bois (produits de traitement du bois)	La performance du ciment est moins bonne que celle du bois	Système expert et SCR: Réduction des autres émissions polluantes Brûleur bas-NOx, Mid-kiln et SNCR: Augmentation des autres émissions polluantes

7. CONCLUSION

En 2009, 23 fours sur 35 sont équipés de SNCR. Les émissions françaises de NOx sont passées de 28 370 tonnes en 2004 à 23 485 tonnes en 2008. La tendance des émissions par four en flux, flux spécifique et concentration est à la baisse, mais il existe une très grande disparité de performance entre les fours.

L'analyse ex-post de l'impact des techniques de réduction des émissions de NOx met en évidence le rôle significatif et robuste de deux MTD, à savoir le système expert d'optimisation et la SNCR, cette dernière ayant l'efficacité la plus élevée. Un résultat étonnant concerne la technique de refroidissement de la flamme qui, d'après nos résultats (qui sont statistiquement significatifs et robustes) augmente les émissions de NOx à un niveau au moins équivalent à la réduction des émissions associée à l'optimisation. Les résultats de cette analyse montrent également que les émissions de NOx dépendent, de façon robuste, du type de voie du four (meilleure efficacité des fours à voie semi-sèche), de la VLE à laquelle l'établissement est soumis et du combustible utilisé (le coke de pétrole augmente les émissions). Le niveau de production de clinker a un effet significatif difficile à identifier sur les concentrations et les flux spécifiques de NOx.

L'analyse ex-ante propose une évaluation de l'impact de scénarios technico-économiques sur les émissions de NOx à l'horizon 2020. Les scénarios simulés sont basés sur des hypothèses d'évolution de la production de clinker et d'évolution de l'adoption des techniques SNCR et SCR. Les simulations sont effectuées avec, parmi les postulats de base, une VLE de 800mg/Nm³ maximum pour tous les fours. Les résultats sont à comparer au scénario de statu quo dans lequel les émissions passent de 23 485t en 2008 à une fourchette entre 22 146t et 25 243t en 2020 selon l'hypothèse de production de clinker. Pour le scénario radical en SNCR (tous les fours adoptent la SNCR), les émissions de NOx diminuent de 2,8 à 3,2% par rapport au statu quo (selon l'hypothèse de production de clinker). Pour le scénario radical en SCR (tous les fours adoptent la SCR), les émissions diminuent de 30,0 à 34,2% par rapport au statut quo. Enfin, pour le scénario le plus proche du BREF ciment révisé, les émissions diminuent de 1,0 à 1,3% par rapport au statut quo.

L'analyse de l'impact de la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et plus chères sur la compétitivité du secteur distingue la compétitivité-prix de la compétitivité-produit. Concernant l'impact sur la compétitivité-prix, les possibilités de transmission du coût des MTD vers l'amont en négociant à la baisse le prix des inputs, sans que le fournisseur ne se rétracte, sont relativement faibles. La fourniture de cru et de transport routier sont, en effet, des activités appartenant aux sociétés de cimenterie et elle ne peuvent absorber le coût sans réduire la marge de la société. Les fournisseurs de combustibles fossiles, d'électricité et de transport ferroviaire sont peu nombreux sur le marché et ont un pouvoir de négociation très fort sur les prix. En revanche, les possibilités de transmission vers l'aval en augmentant le prix du ciment, sans que les volumes de ciment vendus diminuent, sont beaucoup plus nombreuses. Les clients sont, en effet, en position de faiblesse face aux cimentiers, en cela qu'un client n'a en général qu'une société de cimenterie envers laquelle il peut s'adresser, ou alors il supportera des coûts de transport de la marchandise très élevés. De plus, un établissement de cimenterie possède un portefeuille de clients très varié, ce qui lui permet de se retourner vers un autre client lorsqu'un client souhaite baisser le prix du ciment. Les possibilités de transmission vers l'aval pourraient se trouver cependant menacées par une évolution de la demande vers des matériaux dits plus respectueux de l'environnement tels que le bois ou les briques par exemple. Ces matériaux sont en revanche plus chers que les produits à base de ciment et la capacité de réponse de leur filière n'est pas aussi importante que celle du ciment. La menace pourrait aussi provenir de nouveaux entrants sur le marché français tels que les producteurs d'Afrique du Nord ou d'Asie. Enfin, on peut observer une certaine hausse de

la rivalité entre les sociétés françaises par la hausse des importations. Ces menaces pourraient alors entraîner une internalisation du coût des MTD (réduction de la marge de la société) afin de ne pas réduire la compétitivité-prix.

Notre analyse de l'impact sur la compétitivité-produit, beaucoup plus sommaire et assez théorique soit, montre que, dans quelques cas, les attributs intrinsèques du ciment peuvent être détériorés, ce qui peut entraîner une baisse de la compétitivité-produit. Par exemple, la mise en œuvre de MTD consommatrices d'énergie (SCR, SNCR, refroidissement de la flamme) pourrait réduire la performance de l'attribut « Energie grise » du ciment. La mise en œuvre du refroidissement de la flamme, du mid-kiln et de la minéralisation peut réduire certaines performances techniques de pointe. Les cimentiers insistent cependant sur le fait qu'ils adaptent le réglage de ces techniques de façon à ce que les performances du clinker restent les mêmes. Concernant les performances environnementales du système de production de clinker, l'optimisation du procédé et de la SCR peuvent réduire d'autres émissions polluantes que les NOx, ce qui pourrait être valorisé par les clients et augmenterait la compétitivité-produit. En revanche, le brûleur bas-NOx, le mid-kiln et la SNCR peuvent augmenter certaines émissions polluantes (ammoniac, CO₂,...).

La compétitivité-prix comme la compétitivité-produit ne semblent donc pas immédiatement menacées par la mise en œuvre de MTD plus ambitieuses et coûteuses telles que la SNCR et même la SCR. Cette conclusion est cependant à nuancer en présence des menaces de substitution par le bois et la brique et de l'arrivée progressive des concurrents produisant du ciment et du clinker hors UE. La mise en place du marché de quotas de CO₂ peut également constituer une menace dans l'hypothèse où l'allocation des quotas de CO₂ ne serait plus gratuite dans le futur. Dans ce cas, avec un coût de la tonne de CO₂ compris entre 25 et 35€ (projections BCG), le coût des quotas équivaldrait entre 21 et 29€ par tonne de clinker (à comparer avec le coût de production d'une tonne de clinker : 34,6€ ; et le coût de la SCR ramené à la tonne de clinker: de 1,9 à 3,6€). Il faut enfin noter que le coût de la tonne de NOx évitée avec la SCR (2200€ la tonne de NOx évitée + 311-435€ pour l'achat des quotas de CO₂ de par l'augmentation de la consommation d'énergie par le catalyseur²⁸) se situe dans la fourchette des coûts maximum observés pour réduire les émissions de NOx tout secteur confondu (1950-5000€/t de NOx évitée, prix de référence BREF ECME).

²⁸ Au total, le coût de la tonne de NOx évitée avec la SCR se situe entre 2511 et 4635€.

8. REFERENCES

ADEME, 2004. Analyse économique et environnementale de différentes options de réduction des rejets de NOx émis par les incinérateurs (de déchets municipaux), Synthèse du rapport final après revue critique, 10p.

ATILH, ADEME, 2003. Guide d'actions de réduction des NOx de l'industrie française, Convention ADEME-Industrie cimentière sous l'égide du MEDD, 37p.

ATILH, 2003. Méthodologie pour la déclaration annuelle des émissions polluantes de l'industrie cimentière en France)

BREF, 2009. Cement Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, Draft Reference Document of May 2009, 493p.

BREF, 2006. Economics and Cross-Media Effects, Reference Document of July 2006, 175p.

European Commission, 2004. European Competitiveness Report, Enterprise and Industry Publications, SEC(2004)1397, 277p.

SESSI, 2005. La filière béton en France : Au cœur de la filière, les groupes de cimentiers, Le 4 pages des statistiques industrielles, 208, 4p.

Leibacher et al., 2006. Leibacher U., Bellin C., Tallahassee A.A., 2006. High dust SCR solutions. http://www.cementeriadimonselice.it/pdf/HD_SCR_solutions.pdf

ERG Inc, 2006. Assessment of NOx emissions reduction strategies for cement kilns – Ellis County, report prepared for the Texas Commission on Environmental Quality, 170p.

Soleille S., 2004. Installations IPPC en France et valeurs limites d'émission, Rapport pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Rapport d'étude N° **INERIS** DRC/MECO - 2004 – 45991, INERIS, 72p.

Armendariz, 2008. The costs and Benefits of Selective Catalytic Reduction on Cement Kilns for Multi-pollutant Control, report of the department of Environmental and Civil Engineering, Southern Methodist University, Dallas, 22p.

BCG, 2008. Assessment of the impact of the 2013-2020 ETC Proposal on the European cement industry, Report for Cembureau, 53p.

Porter M. E., 1980. Competitive strategy: techniques for analyzing industries and competitors, Free Press, New York, 396p.

Vercaemst P. and De Clercq, L., 2003. Porter's 5 forces proposal for chapter 5, Personal communication

Carlton D.W. and Perloff J.M., 1990. Modern industrial organization. , Little Brown, Glenview, IL.

Savini I., Cristofini B., 2001. Des scénarios d'avenir pour la forêt, l'industrie du bois et leurs liaisons au territoire, Courrier de l'environnement de l'INRA, 42, pp 5-14.

Wooldridge J.M., 2001. Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data, MIT Press, Cambridge.

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Rapport du LERNA-CES	48
Annexe 2	Avantages et inconvénients de la SNCR et de la SCR	6
Annexe 3	Questionnaire INERIS	6
Annexe 4	Exemples de mise en œuvre de la SCR en Europe	2
Annexe 5	Définitions des facteurs de forces de Porter	2

ANNEXE 1

Annexe 1 : Rapport du LERNA-CES

ANNEXE 2

Annexe 2 : Avantages et inconvénients de la SNCR et de la
SCR

	SNCR classique	SNCR high-efficiency	SCR (low dust)
Efficacité de réduction des émissions de NOx	Taux de réduction de 10-50 avec des émissions atteignant <200-800mg/Nm ³ (BREF révisé). En combinant mesures primaires, il est possible d'atteindre moins de 500mg/Nm ³ même lorsque le niveau initial d'émission est au dessus de 2000mg/Nm ³ (BREF révisé).	Taux de réduction de plus de 80 pour des émissions atteignant 200 mg/Nm ³ (Suède) avec un niveau initial d'émission de 800-1000mg/Nm ³ (BREF révisé). Des émissions inférieures ou égales à 500 mg/Nm ³ ont pu être atteintes de façon constante en Allemagne, Des tests préliminaires ont montré que des valeurs entre 200 et 500 mg/Nm ³ peuvent être atteintes lorsque les conditions sont optimales (BREF révisé).	Taux de réduction de 85-95 (BREF révisé) avec des émissions atteignant 50 à 500 mg/Nm ³ . L'installation allemande (Linero, 2006) ²⁹ permet de réduire les NOx de 1200 à 800 mg/Nm ³ .
Co-effets environnementaux directs	Effets négatifs : Emissions d'ammoniac : niveau d'émissions corrélé avec la quantité de réactif. Emissions plus importantes avec l'urée comme réactif qu'avec l'ammoniac. Emissions de CO : l'urée peut être à l'origine d'émission de formation de CO (BREF révisé). Emissions de N ₂ O : peu élevées (entre 1 et 5 mg/Nm ³), ce qui correspond quasiment à la limite de détection, et elles sont plus susceptibles d'apparaître lorsque l'agent réducteur utilisé est l'urée (Bolwerk et al, 2006).	Effets négatifs : La distribution d'eau ammoniacuée étant plus efficace, les fuites d'ammoniac et la consommation d'eau ammoniacuée sont réduites, Dans les fours suédois, il n'a pas été repéré de hausse significative des émissions de N ₂ O ni de CO (BREF révisé).	Effets positifs : Détruit les dioxines et furannes Réduit les émissions de COVs. les émissions d'ammoniac provenant du combustible et/ou du cru. La SCR équipée d'un dispositif de lavage, peut réduire les émissions de mercure provenant de la combustion du charbon. Effets négatifs : Consommation d'énergie (réchauffage des gaz d'échappement après leur dépoussiérage).
Co-effets environnementaux indirects	Les composants et l'énergie nécessaires en amont du cycle de vie de la SNCR sont à prendre en compte. L'usage d'urée se distingue en revanche de celui de l'ammoniac. Le premier permet d'effectuer un recyclage de déchets agricoles alors que le second nécessite un procédé de production. Dans les deux cas, le transport est cependant à prendre en compte. La durée de vie utile de la SNCR est longue, Il n'existe pas de filière de recyclage des composants de cette technique.		Mêmes remarques que pour la SNCR. Il faut également considérer la composition et la production du catalyseur, de même que sa durée de vie relativement courte.
Complexité de mise en	Peut en principe être mis en œuvre dans	Le système high efficiency a été mis en	La SCR n'a été testée que sur des

²⁹ Linero A. Trip Report on SCR Experiences at Solnhofer Portland Zementwerke, Cementeria di Monselice, and ASM Brescia Waste-to-Energy Plant." July 31, 2006. <http://lyle.smu.edu/~aja/2007-ozone-report/Linero3.pdf>

<p>place</p>	<p>les fours rotatifs, la zone d'injection variant en fonction du type de four. Dans les fours à voie humide, il est plus difficile de trouver la bonne fenêtre de température et un temps de contact favorable.</p>	<p>œuvre dans en Suède (2 sites) et en Allemagne (1 site). Ces usines sont équipées d'un four à voie sèche avec préchauffeur à cyclones et précalcinateur.</p>	<p>fours avec préchauffeur à cyclones et avec grille Lepol mais il est en principe applicable à tous les types de fours. Seul le système SCR high dust a été mis en place. Les systèmes low dust utilisés dans les autres industries ne sont en effet pas adaptés au niveau élevé de concentration en poussière des gaz de cimenterie. Les 3 installations montrent que le système high dust est d'ailleurs bien adapté aux échappements gazeux des cimenteries. Enfin, l'installation du catalyseur nécessite un espace important.</p>
<p>Complexité d'exploitation</p>	<p>L'ammoniac en solution (25% NH₃) est l'agent le plus utilisé mais son transport et son stockage nécessitent des mesures de sécurités supplémentaires. L'efficacité de cette technique est dépendante de la maîtrise de température du four, La bonne fenêtre de température est facile à obtenir avec des fours avec préchauffeurs à cyclones, fours avec précalcinateurs et fours avec grille Lepol (Bolwerk et al., 2006). L'efficacité de cette technique dépend également du rapport molaire NH₃/NO et du temps de résidence des gaz utilisé dans le lit du catalyseur (ERG Inc, 2006). La SNCR semble bien adaptée à une valeur limite d'émission de 800mg/Nm³, En revanche, si cette valeur venait à baisser, plusieurs problèmes apparaîtraient: limite de capacité de stockage de l'ammoniac/urée; conséquences néfastes sur le procédé de fabrication du clinker (et notamment avec une grille Lepol); détérioration de la qualité du clinker.</p>		<p>L'expérience des centrales thermiques montrent que la SCR peut être conçu de façon à atteindre 85 de réduction des émissions de NO_x même si le débit est très élevé avec un taux de NO_x élevé et un chargement de poussière relativement élevé (ERG Inc, 2006). L'installation SCR de Solnhofer semble marcher sans problème majeur pendant les 9000 premières heures après quelques modifications des conditions d'exploitation (réchauffage de l'air de décolmatage, circulation des gaz à contre courant pendant 20 du temps). Le catalyseur peut être souillé ou désactivé par les particules présentes dans les gaz. Dans le cas des cimenteries, la présence d'alkali et de calcium, de même que</p>

		de SO2 dans les gaz pose des problèmes de désactivation du catalyseur. Des SCR tolérantes au SO2 ont cependant été récemment développées. De même, des souffleries peuvent être utilisées pour prévenir l'accumulation de poussière dans le catalyseur (rapport TEXAN).
Coûts financiers	<p>L'installation d'un traitement SNCR coûte de l'ordre de 500 000 à 1 000 000€ (ATILH-ADEME, 2003).</p> <p>Selon le BREF révisé, l'installation d'une SNCR avec solution ammoniacquée est de l'ordre de 500 000 à 1 200 000€ pour un four d'une capacité de 3000tck/jour avec un niveau initial d'émission de NOx de 2000 mg/Nm³ et en les réduisant de 85, i.e. environ 300 mg/Nm³. Cet investissement est fortement dépendant de la réglementation sur le stockage des solutions ammoniacquées. A titre d'exemple, 50% des investissements sont dédiés au stockage de la solution ammoniacquée. Autre exemple en Belgique, dans un four où les émissions de NOx sont passées de 1200mg à 800mg avec l'installation de la SNCR, jusqu'à 20t d'urée peuvent être nécessaires chaque jour avec une capacité de stockage de 3 jours (entretiens).</p> <p>L'enquête INERIS indique des investissements allant de 150 000€ à 1 040 000€ (moyenne de 705 882€). Les frais de maintenance (changement canne/pompe) par an vont de 11 000 à 60 000€. Les coûts de réactif par an</p>	<p>Pour les high efficiency SNCR en Suède, les investissements pour un de ces fours étaient de l'ordre de 1 200 000€ (650 000€ pour la SNCR et 550 000€ pour le stockage de la solution ammoniacquée). Pour un autre de ces fours, les investissements étaient de l'ordre de 550 000€.</p> <p>Selon le BREF révisé, les coûts opérationnels représentent 0,55€/tck. Le coût de l'urée équivaut à une hausse du prix du clinker moins de 0,6€/tck.</p>
		<p>Contrairement à la SNCR, la SCR est dominée par les coûts d'investissement qui sont 4 à 9 fois plus élevés que pour la SNCR (BREF révisé). Des études de faisabilités en Autriche, Allemagne, Pays-Bas et Suède observent que le coût des investissements est très variable en fonction des coûts de production du système et de la durée de vie du catalyseur.</p> <p>L'utilisation de catalyseur augmente les coûts de maintenance car il doit être recyclé ou jeté. Le premier catalyseur de l'usine allemande était garanti 2 ans avec une durée de vie espérée de 3-4 ans. Il est arrivé en fin de vie après une durée de fonctionnement de plus de 4,5 ans.</p> <p>Selon le BREF révisé, les investissements estimés par l'UBA en Allemagne s'élèvent à 2,5€/tck sur le site de Solnhofen, Les investissements atteignent 4,5€/tck sur le site Italien. Les coûts opérationnels correspondent à 1,75 -2€/tck. Une étude hollandaise de 1999</p>

	<p>peuvent aller de 30 000€ à 500 000€. Cette dernière estimation correspond à une consommation de 400l/h d'urée. Le prix de l'urée est en hausse. Selon le BREF révisé, les coûts opérationnels représentent 0,3 à 0,5€/tck, ce coût étant fortement déterminé par le coût de l'agent réducteur.</p> <p>Le coût de l'urée équivaut à une hausse du prix du clinker de 1€/tck pour passer de 1100 à 800mg/Nm³. Les autres coûts de maintenance et d'investissement ne sont pas encore pris en compte dans le calcul de la variation du prix du clinker car il n'y a pas suffisamment de recul dans le temps.</p>		<p>montre que l'installation d'une SCR dans une cimenterie aux Pays-Bas aurait un coût d'environ 2500€/t de NOx abattu. Or, les Pays-Bas ont une politique sur les émissions de NOx dans laquelle des coûts d'abattement allant jusqu'à 5€/kg de NOx abattu sont considérés comme raisonnables. La SCR est ainsi considérée comme une technique coût efficace pour le secteur de la cimenterie dans ce pays (BREF révisé).</p>
<p>Ratio coût/prix du ciment (source : ADEME-Cement Industry-MEDD, 2002³⁰) Le prix de vente moyen de la tonne de ciment est de 86 € en 2001.</p>	<p>0,7 à 1,8 €/t de ciment (480 à 820 €/t de NOx évitée)</p>		<p>1,9 à 3,6 €/t de ciment (2200 €/t de NOx évitée)</p>

³⁰ ADEME-Cement Industry-MEDD, 2002. The French Cement Industry Guide to NOx Emission Reduction Measures, 33p.

Le tableau suivant compare les coûts de la SNCR et de la SCR dans différents secteurs :

Secteur	Niveau de réduction des émissions	SNCR		SCR	
		Coût par tonne de NOx réduit	Coût de la technologie	Coût par tonne de NOx réduit	Coût de la technologie
Incinération des déchets (ADEME, 2004)	passage de 400 à 200mg/Nm ³	2015€/tNOx	2015*200=403 000€	8480€/tNOx	8480*200=1 696000€
Incinération des déchets (BREF incinération des déchets)				1000 à 4500€/TNOx	
Grandes installations de combustion (BREF GIC)	passage de 250-400 à 100 mg/Nm ³ (installation électrique)			1442-3016€/tNOx (investissement et coûts opérationnels)	
Cimenterie (étude UBA, Germany + étude Linero, 2006)	passage de 1000 à 200mg/Nm ³ avec capacité de 1500tck/jour	450€/tNOx	450*800=360 000€	470€/tNOx	470*80=376 000€
Cimenterie (BREF Ciment révisé)	passage de 200 à ? avec capacité de 5800tck/jour			5500-7300€/tNOx	

Une Analyse de Cycle de Vie a été réalisée dans l'étude ADEME (2004) pour chacune des technologies, Les principaux résultats sont les suivants (mais il faudrait aller plus loin et regarder l'étude au complet) :

- la réduction des émissions de NOx par la SNCR ou la SCR agit positivement sur l'environnement par la réduction de l'acidification de l'air, de l'oxydation photochimique, de l'eutrophisation et du nombre d'années humaine perdues ;
- la réduction des émissions de NOx par la SNCR ou la SCR agit négativement sur l'environnement par l'augmentation de la consommation d'énergie primaire, de l'effet de serre, par l'épuisement des ressources, la destruction de l'Ozone stratosphérique, l'augmentation de la toxicité humaine, de l'écotoxicité aquatique, des sédiments et terrestre, l'augmentation des métaux dans l'eau, l'air et les sols, et, la production de déchets.

Le tableau suivant présente les résultats de l'ACV pour chaque technologie pour le même scénario que précédemment (passage de 400 à 200mg/Nm³, gaz sec) et pour les indicateurs environnementaux les plus significativement affectés. Dans les 2 cas, le réactif est l'ammoniac :

	SNCR	SCR
Acidification de l'air (SO ₂ eq.)	-404 kg	-415 kg
Eutrophisation des eaux (PO ₄ eq.)	-111 kg	-122 kg
Consommation d'énergie primaire	55 618 MJ	257 951 MJ
Effet de serre (CO ₂ eq.)	2 778 kg	12 443 kg

Source : ADEME, 2004

Le choix entre SCR et SNCR dépend des caractéristiques de l'installation (ADEME, 2004 + DeChefdebien-CITEPA³¹) :

- Du niveau initial des émissions de NOx et du niveau objectif ;
- Du type de réactif utilisé : l'urée et l'eau ammoniacale peuvent être utilisés pour détruire les NOx, cependant, l'urée augmente la consommation de réactif et d'énergie mais elle est économiquement plus légère que l'ammoniac. D'autres considérations peuvent également entrer dans l'arbitrage ;
- Installation neuve ou existante ou « faciles » : « facile » c'est-à-dire existante pour lesquelles l'implantation des équipements requis sont faciles à implanter. On ne peut pas toujours installer une SNCR dans un four existant, il n'y a pas toujours la place à côté du traitement des fumées pour la SCR).

Le débat SCR-SNCR existe également aux Etats-Unis. Un groupe d'experts indépendants (Blue ribbon panel créé par la Commission texane de la qualité environnementale) a évalué différentes technologies de contrôles des émissions de NOx et les a classés en 3 catégories : disponible, transférable, innovante pour le secteur des cimenteries. Selon ce panel, une technologie est « disponible » lorsque la technologie est commercialement disponible et utilisable sur des types de four à ciment similaires ». Leur rapport conclut que le système SCR est disponible pour les fours à voie sèche et transférable pour les fours à voie humide. Par ailleurs, Cemex (troisième rang mondial) considère le système SCR comme une technologie disponible afin d'atteindre la valeur limite d'émission réglementée par l'Etat de Californie pour l'ouverture d'un site sur son territoire (Armendariz, 2008).

³¹ De Chefdebien H. et Descat M., 2004. Dé-NOx SNCR ou SCR ? 200 ou 80 mg/Nm³ ? : cas du plan de protection de l'atmosphère (PPA) d'Ile de France, 33p.

ANNEXE 3

Annexe 3 : Questionnaire INERIS

ANNEXE 4

Annexe 4 : Exemples de mise en œuvre de la SCR en
Europe

La SCR a été mise en place dans 3 cimenteries en Europe : deux en Italie (Italcementi et un producteur indépendant) et une en Allemagne (Deutsche Zementindustrie).

Italie 1 (Italcementi) ³²
<i>Capacité du four</i> 690 tck/j
<i>Type de four</i> Voie semi-sèche avec grille Lepol
<i>Co-incinération</i> Oui
<i>Ammoniac dans le cru</i> Oui
<i>Certification environnementale</i> ISO 9001, ISO 14001
<i>Date de mise en service de la SCR</i> Janvier 2007
<i>Premiers résultats</i> Au bout d'un an d'exploitation, ni la poussière ni les émissions de phosphore provenant de la combustion des farines animales ont été signalé pour avoir réduit l'activité du catalyseur (Armendariz, 2008). Italcementi n'a pas encore publié de rapport sur le fonctionnement de ce système mais les premières évaluations sont positives.
<i>Remarques</i> Cette usine émet un flux de seulement 497 mg/Nm ³ en 2005 (site EPER Italien). Elle a pu investir dans la SCR pour essentiellement réduire les émissions d'ammoniac provenant du cru.
Italie 2 (Indépendant) ³³
<i>Capacité du four</i> 1900 tck/j
<i>Type de four</i> Voie sèche avec préchauffeur
<i>Co-incinération</i> Non
<i>Ammoniac dans le cru</i> Oui
<i>Certification environnementale</i> ISO 9001, ISO 14001, EMAS
<i>Date de mise en service de la SCR</i> Juin 2006
<i>Premiers résultats</i> Après 1000 heures de fonctionnement, il a été observé une réduction des émissions de NOx de 1500 à moins de 200 mg/Nm ³ , une réduction des émissions de NH3 de 50 à moins de 5 mg, une réduction des émissions de COT (Composés Organiques Totaux) d'environ 75%, et, lorsque utilisé dans les incinérateurs, réduction des émissions de PCDD/PCDF de plus 99% (Linero, 2006). La valeur limite d'émission réglementaire pour cette usine est de 800mg.
<i>Remarques</i> La province de Padova où est implantée l'usine, connaît des niveaux élevés de brouillard photochimique en été et met en place de larges programmes d'assistance dans le domaine de l'environnement (Armendariz, 2008). En suivant les conclusions du rapport de l'Agence Régionale Vénitienne de Protection de l'Environnement de 2005, la réglementation régionale est orientée, notamment, vers une réduction des émissions de précurseurs d'O3 (NOx et COV). Deux autres cimenteries sont implantées dans la commune de Monselice où est implanté cette usine : Italcementi Monselice (flux de NOx de 1208 mg en 2005 ³⁴ ; ISO 9001 ; ISO 14001) et

³² Source : http://www.italcementi.it/NR/ronlyres/000EED87-6C80-41AB-97E0-1398D3B37953/0/Sarche_presentazioneaprile2007.pdf

³³ Source: Leibacher U., Bellin C., Tallahassee A.A., 2006. High dust SCR solutions. http://www.cementeriadimonselice.it/pdf/HD_SCR_solutions.pdf

³⁴ Source: <http://www.eper.sinanet.apat.it/site/it-IT/>

<p>Cementizillo- Este (flux de NOx de 1245 mg/Nm³ en 2005 ; ISO 14001). Le flux de NOx enregistré en 2005 dans l'usine qui nous concerne n'est que de 1085 mg/Nm³. Il semblerait que la conjugaison de la pression du voisinage et de la concurrence immédiate avec les 2 autres cimenteries ait poussé l'usine à investir dans le SCR.</p>
<p>Allemagne (Deutsche Zementindustrie)³⁵</p>
<p><i>Capacité du four</i> 1600 tck/j</p>
<p><i>Type de four</i> Voie sèche avec préchauffeur</p>
<p><i>Co-incinération</i> Non</p>
<p><i>Ammoniac dans le cru</i> Non</p>
<p><i>Certification environnementale</i> ?</p>
<p><i>Date de mise en service de la SCR</i> 2001</p>
<p><i>Premiers résultats</i> Le catalyseur est arrivé en fin de vie en 2006 après une durée de fonctionnement de plus de 4,5 ans. Depuis, l'usine dispose de nouveaux catalyseurs mais elle a préféré revenir au système SNCR qui permet également de respecter la limite d'émission fixée par le gouvernement allemand (500mg).</p>
<p><i>Remarques</i> L'usine a conclu un accord avec l'Agence fédérale de l'environnement de Bavière pour installer une SCR et atteindre une limite de 500 mg/Nm³ d'NOx. Le financement public de 5 ans est arrivé à échéance en 2006. Le rapport de l'Agence sur ce projet n'est pas encore publié (le chapitre sur l'analyse économique est actuellement en révision avec, notamment, une comparaison entre les SCR et SNCR installées sur le site de Solnhofer). L'Agence prévoit par ailleurs de renouveler l'expérience de Solnhofer dans d'autres cimenteries.</p>

³⁵ Source : ETUDE UBA (ALLEMAGNE) QUI EST CITEE DANS LE BREF REVISE

ANNEXE 5

Annexe 5 : Définition des facteurs de force de Porter

Les 5 forces de Porter :

La rivalité entre les sociétés : Une rivalité forte entre les entreprises d'un même secteur augmente la compétitivité sur les prix et peut réduire les marges de profit et, ainsi, la capacité du secteur à absorber ou à transmettre les coûts de la mise en œuvre des MTD en amont ou en aval du secteur.

Le BREF ECME identifie 3 facteurs de rivalité dans le secteur de la cimenterie :

- le niveau de concentration (nombre de sociétés dans le marché). Plus le nombre de sociétés dans le marché est faible, plus le secteur est concentré, plus la rivalité dans le secteur est faible.
- le niveau d'exploitation de la capacité de production (surcapacité versus sous-capacité). Plus il y a de surcapacité, plus les possibilités de gagner des parts de marché sont limitées et plus il y a de rivalité dans le secteur.
- Le niveau des barrières à la sortie de marché (coûts de la fermeture d'un établissement/société). Plus les coûts de fermeture d'un site sont élevés, plus le niveau de surcapacité de la production sera maintenu longtemps et plus la rivalité est maintenue dans le secteur.

Le pouvoir de négociation des fournisseurs : Le pouvoir de négociation des fournisseurs sur les prix des intrants de la production de ciment va permettre ou non au cimentier de transmettre le coût de la mise en œuvre des MTD vers l'amont de la filière. Lorsque le pouvoir de négociation de l'amont est faible, le cimentier pourra abaisser le coût de ses intrants et ainsi transmettre le coût des MTD vers l'amont.

Le BREF ECME identifie 3 facteurs de pouvoir de négociation des fournisseurs :

- le nombre de fournisseurs par rapport au nombre de clients producteurs : lorsque le taux est élevé, la compétition entre fournisseurs est importante et les clients producteurs sont en position de force pour négocier les prix.
- les coûts de changement de fournisseur (coûts générés par le renouvellement de l'équipement, les coûts de transport de cet équipement par exemple): lorsque ces coûts sont élevés, autrement dit, lorsque le producteur ne peut pas changer de fournisseurs facilement, le fournisseur est en position de force pour négocier les prix.
- Part du débouché cimenterie parmi l'ensemble des débouchés du fournisseur : lorsque le secteur n'est qu'un faible débouché pour le fournisseur, le fournisseur est en position de force pour négocier les prix.

Le pouvoir de négociation des clients : De la même façon qu'en amont du secteur, le pouvoir de négociation des clients sur les prix des ciments produits par le secteur va permettre ou non au cimentier de transmettre le coût de la mise en œuvre des MTD vers l'aval de la filière. Lorsque le pouvoir de négociation de l'aval est faible, le cimentier pourra augmenter le prix de ses outputs et ainsi transmettre le coût des MTD vers l'aval.

Les facteurs de pouvoir de négociation des clients ci-dessous reprennent pour partie ceux du BREF ECME :

- le nombre de clients par rapport au nombre de producteurs : lorsque le taux est faible, la compétition entre producteurs est élevée et les clients sont en position de force pour négocier les prix.
- La part de marché représenté par chaque client : Lorsqu'un client représente une part de marché importante pour un cimentier, ce client est en position de force pour négocier les prix.

-
- les coûts de changement de producteur: lorsque ces coûts sont faibles, autrement dit, lorsque le client ne peut pas changer de producteur facilement (cas lorsque le produit est standard et lorsque le coût de transport est faible), le client est en position de force pour négocier les prix.

La menace de produits de substitution : Lorsque qu'il existe des produits alternatifs de substitution qui puissent intéresser le client, les opportunités de transmettre le coût des MTD vers l'aval se réduisent.

Nous avons identifié 3 facteurs de menace de produits de substitution :

- Evolution de la demande : lorsque la demande évolue vers de nouvelles fonctionnalités du produit, la menace de produits de substitution devient plus élevée.
- Prix du produit de substitution par rapport à celui du produit issu du secteur : lorsque le prix du produit de substitution est comparable ou est plus faible à celui du produit initial, la menace de produits de substitution s'élève.
- Capacité de la filière du produit de substitution à répondre aux besoins du marché : lorsque la filière alternative a une capacité élevée de réponse à la demande, la menace de produits de substitution s'élève.

La menace de nouveaux entrants : Les marchés qui génèrent des profits importants ont tendance à attirer de nouveaux entrants et par conséquent une rivalité accrue entre les sociétés du secteur. Il devient alors plus difficile de transmettre le coût des MTD vers l'amont ou l'aval. Cette tendance diminue cependant lorsqu'il existe des barrières à l'entrée, i.e. investissements élevés, accès difficile aux réseaux de distribution, permis d'exploitation,... Dans le contexte des établissements IPPC, cela suppose que les coûts de mises en œuvre des MTD viennent s'ajouter aux autres coûts à l'entrée et viennent ainsi élever les barrières à l'entrée.

Nous avons identifié 3 facteurs de menace de nouveaux entrants :

- Barrière financière : Les coûts à l'entrée dans le marché sont les obstacles financiers que l'entreprise doit surmonter afin de se lancer sur un nouveau marché. Plus ces coûts à l'entrée dans un marché sont élevés, moins il y a de chances d'avoir de nouveaux concurrents dans ce marché.
- Barrière réglementaire : Là où les règles de sécurité, de normalisation, de protection de l'environnement sont moins exigeantes, les barrières réglementaires à l'entrée sont plus faibles.
- Barrière d'accessibilité : Les difficultés d'accès aux ressources spécifiques ou aux canaux de distribution nécessaires viennent également élever les barrières à l'entrée dans un marché.