

AFME -- 91-04 - Doc.

CHAUDIÈRES A GAZ  
ET  
POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Tommaso CHIARABELLO

FR 920330

<b>SOMMAIRE</b>
-----------------

	page
<b>PREAMBULE</b>	1
<b>I. POLLUTION ATMOSPHERIQUE</b>	1
1.1. Composition chimique de l'atmosphère	1
1.2. Structure verticale de l'atmosphère	2
1.3. Les différents rejets	3
1.3.1. La chimie de l'atmosphère	3
1.3.1.1. Les constituants hydrogénés et azotés	3
1.3.1.2. Cycles de destruction et production de l'ozone par les constituants hydrogénés et azotés	4
1.3.1.2.1. Cycles catalytiques de destruction de l'ozone	5
1.3.1.2.2. Cycles de formation d'ozone	5
1.3.1.3. Les constituants chlorés	6
1.3.1.4. Emissions de CO <sub>x</sub>	6
1.3.1.5. Emissions de N <sub>2</sub> O	7
1.3.1.6. Emissions de SO <sub>x</sub>	8
<b>COMMENTAIRES</b>	9
<b>II. EMISSIONS DE POLLUANTS DUES AUX CHAUDIERES A GAZ</b>	9
II.1. La consommation énergétique	9
II.2. Parc des chaudières à gaz	10
II.2.1. Parc des chaudières à gaz dans le secteur résidentiel	10
II.2.2. Parc des chaudières à gaz dans le secteur tertiaire	11
II.3. Flux annuel des chaudières à gaz	11
II.4. Rejets polluants émis par les chaudières à gaz	12
II.4.1. Emissions de CO <sub>2</sub>	12
II.4.2. Emissions de CO	13

II.4.3.	Emissions de NO <sub>x</sub>	13
<b>III.</b>	<b>TECHNIQUES DE REDUCTION DES REJETS POLLUANTS</b>	<b>14</b>
III.1.	Techniques de réduction des CO <sub>x</sub>	14
III.2.	Techniques de réduction des NO <sub>x</sub>	14
III.2.1.	Mécanisme de formation du NO thermique	14
III.2.2.	Mécanisme de formation du NO combustible	15
III.2.3.	Mécanisme du NO précoce	15
III.2.4.	Techniques de réduction des NO <sub>x</sub>	15
III.3.	Commentaires	17
<b>IV.</b>	<b>ESQUISSE DE CRITERES DE POLLUTION POUR GENERATEURS PROPRES A GAZ NATUREL</b>	<b>18</b>
	<b>EPILOGUE</b>	<b>19</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>20</b>

**PREAMBULE**

Effet de serre, changement climatique imminent, pollution urbaine sont devenus les maîtres mots de tous les scénarii catastrophes. Qu'en est-il exactement?

Sans prétendre à l'exhaustivité, cette étude présente l'état de nos connaissances en pollution atmosphérique et en particulier, sur les rejets polluants émis par les chaudières à gaz domestiques.

En effet, la tenue d'un séminaire "Générateurs" à l'A.F.M.E., au mois d'octobre 1990, a permis de faire le point sur les progrès réalisés sur des brûleurs et chaudières avant le lancement d'un appel d'offres "Générateurs propres". Le service Habitat-Tertiaire de l'A.F.M.E., par ses recommandations, espère ainsi faire partager l'idée qu'énergie et environnement ne sont pas antinomiques.

Dans une première partie, nous discuterons des différents éléments entrant dans la chimie de l'atmosphère et les interactions complexes s'y déroulant.

Les émissions dues aux chaudières à gaz domestiques seront ensuite abordées dans une deuxième partie.

Enfin, les diverses techniques de réduction des polluants seront examinées et des critères de pollution pour générateurs propres à gaz naturel seront envisagés et critiqués.

**I. POLLUTION ATMOSPHERIQUE**

**I.1 - Composition chimique de l'atmosphère**

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse constituée majoritairement des gaz suivants :

- l'azote N<sub>2</sub> : 78 % )
- (gaz inerte) ) 99 %
- l'oxygène O<sub>2</sub> : 21 % )

D'autres constituants sont présents en proportion ultra-minoritaire mais leur présence est essentielle à la vie sur terre. Ce sont : l'argon, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, l'ozone O<sub>3</sub>, le méthane CH<sub>4</sub>, les oxydes d'azote et de soufre. Grâce à leurs propriétés chimiques et radiatives, ces espèces gazeuses vont permettre l'équilibre de notre environnement.

Si les teneurs en azote et en oxygène n'ont quasiment pas évolué depuis l'apparition des hominidés, il n'en a pas été forcément de même pour les autres composants atmosphériques.

L'atmosphère est, en fait, le siège d'échanges énergétiques, de matière et de réactions chimiques en constante évolution. En réalité, nous avons affaire à un des sous-systèmes ouverts de la planète elle-même assimilée à un système fermé. Les différents sous-systèmes couplés entre eux sont : les océans, l'atmosphère, les terres émergées et la biosphère animale et végétale.

Par conséquent, il s'agit, comme l'a défini G. MEGIE (1), d'un système complexe "en perpétuelle évolution dont l'équilibre climatique, passé ou présent, résulte d'échanges d'énergie et de matière entre ces différentes composantes à l'image d'un système de réservoirs couplés". Trois constituants sont indispensables à la vie sur terre : le dioxyde de carbone, l'eau et l'ozone.

La teneur en  $\text{CO}_2$  n'est que de 354 ppm mais son rôle est déterminant. La molécule de  $\text{CO}_2$  absorbe le rayonnement infra-rouge émis par la terre, et en réémet une partie vers le sol, ce qui augmente l'énergie disponible au réchauffement de la surface. Le dioxyde de carbone, évite ainsi à la planète, un refroidissement préjudiciable à la vie. En effet, si n'étaient présents que l'azote et l'oxygène, la température d'équilibre de la terre serait de  $-20^\circ\text{C}$  (elle est en moyenne de  $+15^\circ\text{C}$ ). On dit que  $\text{CO}_2$  joue un rôle de régulateur thermique.

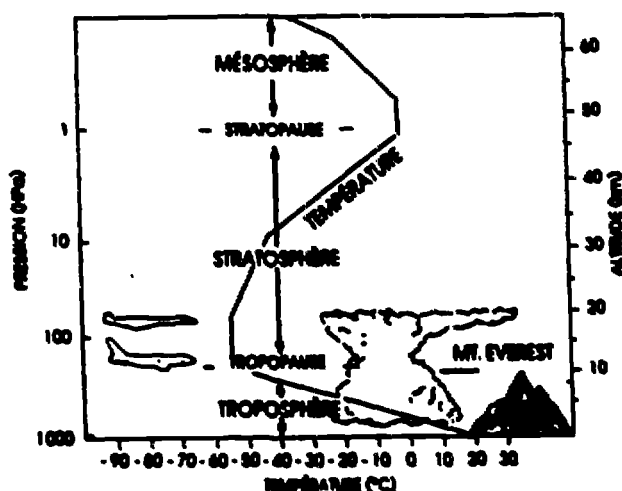
L'eau, sous forme de vapeur, empêche aussi une partie du rayonnement infra-rouge de s'échapper vers le cosmos et entre donc dans le phénomène de l'effet de serre. D'autre part, lorsque la vapeur d'eau se condense, elle cède sa quantité de chaleur latente réchauffant ainsi les masses d'air. Celles-ci se mettent en mouvement et se dirigent de l'équateur vers les pôles. Du fait de la rotation de la terre, on assiste aussi à un mouvement est-ouest ou zonage. De cette façon, il y a en permanence brassage de l'atmosphère favorisant une homogénéisation mais également, et cela peut être moins intéressant, le transport de rejets polluants éloignés de leur source d'émission.

Enfin, l'ozone, oxydant assez puissant, en faible teneur 3 à 4 ppm, est un filtre des rayons ultra-violet B et constitue une couche protectrice. Nous le constaterons, par la suite, ce n'est pas toujours une espèce chimique bénéfique pour l'homme.

## 1.2 Structure verticale de l'atmosphère

On distingue trois régions qui se différencient par leur température et leur composition chimique :

- la région, en contact avec le sol, est la troposphère siège du brassage permanent des masses d'air. Elle s'étend, en moyenne, de 0 à 10 km et la température diminue lorsqu'on monte en altitude jusqu'à un minimum de  $-60^\circ\text{C}$  sous nos latitudes,
- au-dessus, de 10 à 50 km, en moyenne, nous trouvons une suite de couches formant la stratosphère dans laquelle les mouvements verticaux ont une amplitude faible. Dans cette zone, il y a réchauffement des couches.
- au-delà, nous sommes en présence de la mésosphère surtout riche en hydrogène, gaz le plus léger, à partir de 50 km.



### 1.3 Les différents rejets

Ils sont à la fois d'origine naturelle et anthropique. Les principaux rejets sont :

- > Les composés azotés : le monoxyde d'azote NO, le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>, le protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O. Leur provenance est naturelle (activité bactérienne des sols) ou provoquée par les activités humaines (combustion),
- > Les composés soufrés tel SO<sub>2</sub> : activités industrielles et éruptions volcaniques,
- > Les composés chlorés provenant de l'activité volcanique et des chlorofluorocarbures (CFC),
- > Les hydrocarbures : méthane, oléfiniques, carbonyles, aromatiques,
- > Les oxydes de carbone, CO<sub>2</sub> et CO : brûlage de la végétation, échanges biosphère-atmosphère ou océans, production énergétique,
- > Les poussières : fumées industrielles et volcans.

Mis à part les chlorofluorocarbures et les solvants, les rejets, dits polluants, sont régulièrement émis par des activités naturelles. Ils sont la conséquence de transformations permanentes, plus ou moins rapides, de la terre. Les émissions de produits chimiques sont à comparer avec l'évolution tectonique pouvant être lente ou accélérée. Dans le dernier cas, la transformation est brutale à l'échelle humaine. Il s'agit de veiller à ce que l'Homme ne favorise pas de tels changements aux conséquences incalculables. Ainsi, en toute hypothèse, sans céder au catastrophisme, la diminution des rejets polluants est, d'ores et déjà, à envisager. Des dispositions réglementaires internationales ont été prises en ce qui concerne les CFC avec le protocole de MONTREAL du 15 septembre 1987, enrichi depuis.

Nous allons envisager, par la suite, les différentes actions ou réactions chimiques des rejets dans l'atmosphère. Assez contradictoirement, certaines substances sont à la fois sources de vie et délétères.

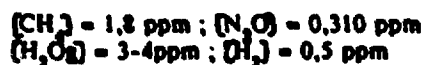
#### 1.3.1. La chimie de l'atmosphère

A notre avis, il s'agit de comprendre que tout système a tendance à aller vers un état d'équilibre et, en réalité, le passage d'un état d'équilibre à un autre peut mettre en danger l'espèce humaine si cette transition est trop rapide à son échelle.

Nous allons essayer d'expliciter les divers mécanismes réactionnels à l'origine des cycles assurant l'équilibre chimique de l'atmosphère.

##### 1.3.1.1. Les constituants hydrogénés et azotés

En plus de constituants inertes chimiquement tels l'azote, les gaz rares (Argon, Krypton, Néon), nous sommes en présence de constituants ultra-minoritaires dont la concentration relative est de l'ordre du millionième voire du milliardième. Leurs valeurs sont les suivantes :

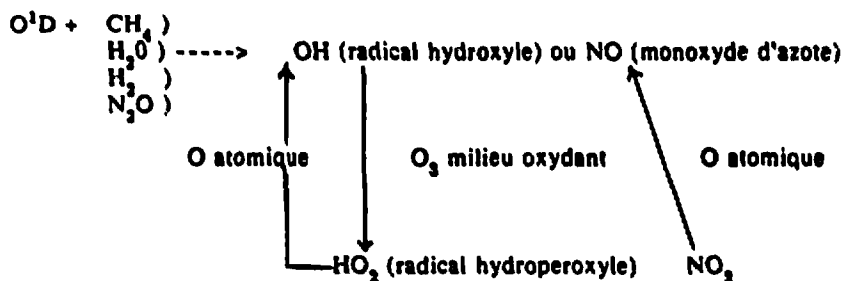


Ces constituants plus lourds que l'oxygène ou l'azote, excepté l'hydrogène moléculaire, peuvent atteindre des altitudes supérieures de l'atmosphère jusqu'à 100 km. Au delà la rareté des collisions et les effets de la densité entraînent qu'à partir de 500 km d'altitude, l'hydrogène atomique est le principal constituant.

La concentration relative de ces espèces ultra minoritaires est quasiment stable dans la troposphère. Par contre, dès que l'on franchit la tropopause, l'abondance relative du méthane, du protoxyde d'azote  $N_2O$  ou de l'hydrogène moléculaire diminue rapidement. Par conséquent, un mécanisme de destruction dans la basse stratosphère doit avoir lieu.

L'ozone est détruit par le rayonnement solaire suivant la réaction :  $O_3 \xrightarrow{h\nu} O_2 + O$  et ceci pour une longueur d'onde inférieure à 1100 nm. Ainsi, si le rayonnement est dans le domaine de l'U.V., il reste une énergie supplémentaire capable d'être cédée à  $O_2$  ou  $O$ .

L'état fondamental de l'oxygène atomique  $O$  est l'état triplet  $O^3P$ . Pour passer à l'état excité  $O^1D$ , état singulet, une quantité d'énergie est nécessaire. Celle-ci est apportée par l'énergie supplémentaire de la réaction de destruction de l'ozone.  $O^1D$  de réactivité beaucoup plus importante que  $O^3P$  va procéder à des réactions d'oxydation vis-à-vis des espèces azotées et hydrogénées, d'autant plus qu'il est présent entre 20 et 40 km d'altitude. Les réactions induites par  $O^1D$  sont les suivantes :



$HO_2$  réagit avec l'oxygène atomique  $O$ , ce dernier étant dans ce cas le réducteur et pouvant provenir de la dissociation de l'ozone, pour redonner  $O_3$  et le radical  $OH$ . Il en est de même avec  $NO_2$  réduit par l'oxygène atomique, pour restituer  $O_3$  et  $NO$ .

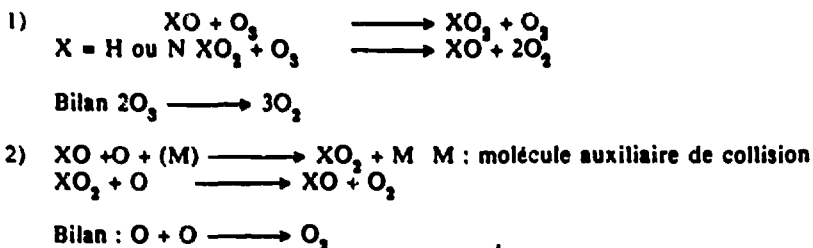
Ces espèces de formule  $NO_x$  et  $HO_x$  peuvent être éliminées ou réagissent entre elles pour donner des composés stables telles les formes acides le peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$  ou l'acide nitrique  $HNO_3$ . Ces constituants vont diffuser vers la basse stratosphère puis vers la troposphère où, solubles dans l'eau, ils seront éliminés.

### 1.3.1.2. Cycles de destruction et production de l'ozone par les constituants hydrogénés et azotés

Selon le schéma réactionnel précédent, nous avons pu observer que de nombreuses entités réactives étaient impliquées dans un cycle avant d'être éliminées. En réalité, elles jouent le rôle de catalyseur dans ces cycles dénommés cycles catalytiques.

**1.3.1.2.1 Cycles catalytiques de destruction de l'ozone**

Plusieurs cycles sont possibles, mais nous allons illustrer cette destruction par deux types d'exemples :

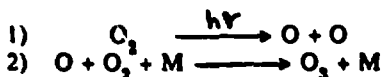


Dans le premier cas, la destruction touche directement la molécule d'ozone alors que dans le deuxième exemple, la consommation d'oxygène atomique manquera à la formation d'ozone comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

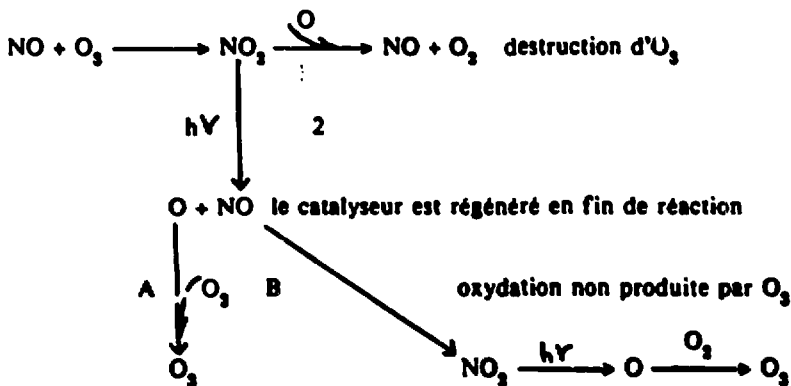
Les HOx et NOx régénérés après un premier cycle catalytique peuvent donc éliminer les Ox impairs (O et O<sub>3</sub>). Tout dépend de leur durée de séjour τ dans le réservoir stratosphérique. Si τ > t temps nécessaire pour accomplir un cycle catalytique, l'opération peut se renouveler plusieurs fois. En effet, les couples HOx et NOx peuvent accomplir 1000 ou 10.000 cycles efficaces selon l'altitude puis disparaître sous forme d'acides. Il est à noter que la concentration relative d'O<sub>3</sub> est 10<sup>3</sup> à 10<sup>4</sup> fois plus élevée que celle des XOx (X = H ou N). Nous comprenons mieux maintenant pourquoi le rejet de quantités relativement faibles de NOx par rapport au volume considéré de l'atmosphère, peut avoir d'importantes conséquences.

**1.3.1.2.2. Cycles de formation d'ozone**

Plusieurs voies sont possibles, l'une d'entre elles ne fait pas intervenir de catalyseurs mais l'oxygène moléculaire, inerte chimiquement, peut être photodissocié suivant le schéma :



Par conséquent, la présence d'oxygène atomique est nécessaire à la formation d'ozone. La production d'ozone est possible également par l'intermédiaire du cycle catalytique :





Si les voies 2 et A sont suivies, nous remarquons que le bilan chimique est nul. Par contre, si les voies 2, A et B se déroulent, la production d'ozone est en excès. Dans la stratosphère, cette opération est bénéfique puisqu'elle tendrait à maintenir voire épaissir la couche d'ozone protectrice contre les U.V. "B". A l'inverse, dans la troposphère, la formation de l'ozone par dégradation des NOx présente des inconvénients. En effet, l'ozone est un gaz irritant les yeux, engendrant des maladies respiratoires et provoquant des dommages aux arbres et cultures. D'autre part, il favorise l'effet de serre.

#### 1.3.1.3. Les constituants chlorés

Les principaux composés organochlorés sont d'origine anthropique, seul le chlorure de méthyle  $\text{CH}_3\text{Cl}$  est d'origine naturelle. Nous répertorions les solvants comme le tétrachlorure de carbone  $\text{CCl}_4$ , le trichloroéthane  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  et les chlorofluorocarbures CFC. Ces différentes espèces ne dépassent pas 2 ppb au niveau du sol et sont inertes chimiquement. Ainsi, ils atteignent la stratosphère dans laquelle ils sont photodissociés avec libération d'atomes de chlore. Ceux-ci sont oxydés par l'ozone en monoxyde de chlore.

Ce dernier est attaqué par les atomes d'oxygène pour régénérer le chlore. Nous avons à nouveau un cycle catalytique de destruction de l'ozone. Ce cycle est cinq fois plus efficace que celui induit par les constituants azotés, d'où l'importance draconienne spécifiée par le protocole de MONTREAL.

D'après des études menées dans l'Arctique et l'Antarctique, certains auteurs (2) émettent l'hypothèse que l'accumulation de monoxyde de chlore ClO favoriserait la formation d'un dimère ClOClO dont les produits de dissociation réduiraient la couche d'ozone. Cette réduction serait d'autant plus facilitée que les produits nitrés seraient piégés dans les nuages stratosphériques.

En effet, les composés nitrés sont des inhibiteurs de l'action oxydante des produits chlorés, la réaction du ClO avec  $\text{NO}_2$  donnant du nitrate de chlore  $\text{ClONO}_2$ . Ainsi, sont bloqués les NOx et ClOx responsables de la destruction de l'ozone. Par conséquent, ne plus permettre cette interaction salvatrice pour l'ozone entraîne une recrudescence de sa destruction et ce phénomène perturbateur se rencontre, essentiellement, sous les latitudes polaires.

Une autre possibilité d'élimination du chlore passe par la formation du chlorure d'hydrogène HCl, soluble dans l'eau, rejeté, sous forme d'acide chlorhydrique, dans la troposphère. De toute évidence, l'atmosphère a des propriétés autonettoyantes pouvant être remises en cause par des émissions relativement conséquentes et permanentes.

#### 1.3.1.4. Emissions de COx

Le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  n'intervient que dans l'effet de serre car il est inerte chimiquement. Il représente 50% de l'effet de serre mais son impact relatif est moindre que d'autres constituants. Il est absorbé par la biosphère végétale et les océans qui en est le plus grand régulateur.

L'eau dissoudrait 45% du  $\text{CO}_2$  émis dans l'atmosphère grâce aux algues et autres microorganismes. Mais par absorption et dissolution du  $\text{CO}_2$ , les eaux s'acidifient ce qui réduit leur capacité d'absorption. D'autre part, le dioxyde de carbone capté par l'océan reste prisonnier des cents premiers mètres et seulement 10% se dépose sur le fond sous forme de carbonates.

Par l'intermédiaire de la photosynthèse, la forêt absorbe aussi le dioxyde de carbone. Afin d'éliminer le  $\text{CO}_2$  émis en France, d'aucuns affirment qu'il faudrait reboiser les 4/5 du territoire.

Les conséquences climatiques d'un tel effet sont parfois contradictoires selon les modèles. Le réchauffement de l'atmosphère provoquerait la montée des océans, essentiellement par dilatation, des chutes de pluie dans certaines zones et la sécheresse dans d'autres.

Dans le passé des périodes de réchauffement ont eu lieu, mais à l'échelle géologique, avec des concentrations en  $\text{CO}_2$  importantes mais inférieures à celles observées de nos jours.

Le monoxyde de carbone  $\text{CO}$  participe également à l'effet de serre et son impact relatif serait plus important que celui de  $\text{CO}_2$ . Le monoxyde de carbone peut avoir des effets néfastes sur la santé, en particulier, parce qu'il perturbe l'absorption de l'oxygène par les globules rouges.

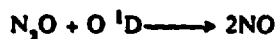
### 1.3.1.5. Emissions de $\text{N}_2\text{O}$

L'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote est émis naturellement par l'activité bactérienne des sols, amplifiée par la décomposition des engrais azotés et aussi par la mer (3).

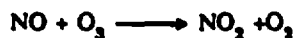
Il est également émis par les combustions : il est formé à partir de l'azote constitutif des combustibles ou de la réduction du monoxyde d'azote  $\text{NO}$  par des espèces sulfurées.

Depuis une décennie, son accroissement a été de l'ordre de 0,3% par an et sa concentration relative est égale à 306 ppb. Sa grande durée de vie (170 ans) lui permet d'atteindre la stratosphère.

Ainsi, le protoxyde d'azote agit surtout entre 20 et 40 km d'altitude c'est-à-dire aux altitudes où l'ozone est le plus abondant. Sous l'effet du rayonnement, le protoxyde d'azote détruit l'ozone selon les réactions suivantes :



et dans l'étape suivante attaque de l'ozone par le monoxyde d'azote  $\text{NO}$



Nous retrouvons ainsi le cycle catalytique de destruction de l'ozone par le monoxyde d'azote.

$\text{N}_2\text{O}$  est donc le précurseur de la destruction de l'ozone.

A fortes doses, le protoxyde d'azote est un gaz hilarant et narcotique mais il est négligeable aux concentrations rencontrées dans l'atmosphère du point de vue de la santé humaine.

Malgré sa faible concentration, il intervient pour 6 % dans l'effet de serre.

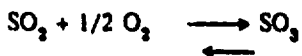
En conclusion, le protoxyde d'azote a une influence néfaste sur la couche d'ozone et participe à l'effet de serre. Le gaz naturel ne contenant pas de composés organiques azotés, la production de protoxyde d'azote est quasiment inexistante.

### 1.3.1.6. Emissions de SOx

Ils sont rejetés par les activités naturelles (volcans) et anthropiques. Nous les trouvons sous la forme de SO<sub>2</sub> et SO<sub>3</sub>. Le dioxyde de soufre provient de l'oxydation du soufre du combustible par l'oxygène de l'air selon la réaction suivante :



Une partie du dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> est, à son tour, oxydée en SO<sub>3</sub> selon le schéma :



Cette réaction d'oxydation dépend des conditions de combustion.

Les SOx sont surtout à l'origine des pluies acides, retombées sous la forme d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, responsables du dépérissement des forêts vosgiennes, du Nord-Ouest des USA et du Canada ainsi que de certains lacs scandinaves et américains.

Aussi la quasi-absence de composés soufrés dans le gaz naturel est d'un grand intérêt pour la protection de l'environnement.

<b>COMMENTAIRES</b>
---------------------

Sans être exhaustif, ce premier chapitre a essayé de montrer la complexité de la chimie de l'atmosphère et les conséquences prévisibles de rejets inconsidérés de polluants. S'il est certain que la majorité des espèces polluantes est émise de façon naturelle, et parfois en quantité appréciable, l'intervention humaine peut accentuer certains déséquilibres régionaux ou à l'échelle terrestre.

## **II - EMISSIONS DE POLLUANTS DUES AUX CHAUDIERES A GAZ**

La quasi totalité des données citées proviennent ou du CEREN ou de l'Observatoire de l'Energie du Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. Cette partie s'est aussi inspirée de l'étude de R. ANGIOLETTI du service Habitat-Tertiaire de l'AFME : parcs et consommations d'énergie en secteur Habitat et Tertiaire (octobre 1990).

### **II.1. La Consommation énergétique**

La consommation d'énergie en France dans le secteur résidentiel et tertiaire a progressé de façon importante de 1960 à 1989 ; de 20,7 MTep nous avons atteint 76,1 MTep soit une progression de + de 271 %. C'est le secteur économique dont la consommation énergétique a crû le plus vite. Aujourd'hui, elle représente 44 % de la consommation finale contre moins de 30 % en 1960.

En 1988 (climat réel) la part du résidentiel était de l'ordre de 67 % de la consommation contre 33 % pour le tertiaire. Ces chiffres ont dû évoluer à la hausse dans le secteur tertiaire les constructions neuves ayant fortement progressé (+ 22 % en 1988).

Depuis 1960, la répartition, par forme d'énergie, dans le secteur résidentiel et tertiaire, a évolué suivant deux tendances (voir tableau 1).

La première va de 1960 à 1973 avec prédominance des produits pétroliers et baisse du charbon. A partir de 1973, il y a renversement de tendance avec diminution de la part des produits pétroliers et augmentation de celles du gaz (doublement de la part entre 1973 et 1988) et de l'électricité (plus du double entre 1973-1988) grâce au programme électro-nucléaire, la proportion de charbon étant plus faible que celle des énergies renouvelables.

Ainsi en 1989, la consommation de gaz naturel, en habitat résidentiel et tertiaire, s'est élevée à 13,9 MTep représentant 18,3 % de la consommation totale en énergie primaire.

Tableau n° 1 : Part de marché des différentes énergies dans le résidentiel et tertiaire

Énergie	(en %)				
	1960	1973	1979	1985	1988
Charbon	58	9	6	4	3
Produits pétroliers	19	56	42	27	25
Gaz	8	9	14	17	18
Électricité	16	23	34	47	49
Énergies renouvelables	-	3	4	5	5
Consommation finale du résidentiel-tertiaire	100	100	100	100	100

## 11.2. Parc des chaudières à gaz

Il est impossible de connaître les données relatives au nombre de chaudières à gaz dans le parc existant. En effet, celles-ci sont uniquement exprimées en nombre de logements ou en m<sup>2</sup>. Par conséquent, le nombre de chaudières à gaz naturel a été évalué dans le secteur logements collectifs et tertiaire.

### 11.2.1. Parc des chaudières à gaz dans le secteur résidentiel

En 1989, il y avait 25,2 millions de logements collectifs et individuels confondus se répartissant de la façon suivante :

- 82 % : résidences principales
- 10 % : résidences secondaires
- 8 % : logements vacants

D'autre part, 77 % des résidences principales ont été construites avant 1975 et 23 % après. Les maisons individuelles représentent 56 % du total résidentiel. 6 736,5 10<sup>5</sup> logements sont chauffés au gaz naturel soit 26,7 % du total résidentiel. La répartition est la suivante depuis 1986 :

R.P. + R.S. + L.V. 10 <sup>3</sup> Log. <sup>ts</sup>	Juin 1986	Juin 1987	Juin 1988	Juin 1989	Variation en % 89/86
Immeubles collectifs					
Chauf. central collec. gas	1788,6	1890,3	1988,7	2100,6	+ 17,5
Chauf. central indiv. gas	1819,0	1911,7	2001,9	2083,5	+ 14,8
Maisons individuelles chauf. gas	2163,2	2291,2	2419,9	2547,4	+ 17,8
<b>TOTAL</b>	<b>5770,7</b>	<b>6093,2</b>	<b>6410,5</b>	<b>6736,5</b>	<b>+ 16,7</b>

Tableau n° 2 : Variation du parc logements chauffés au gaz naturel entre 1986 et 1989

En 3 ans, le nombre de logements utilisant le gaz naturel a augmenté de près de un million de logements (+ 16,7 %) tandis que la part des maisons individuelles, dans le total logements, est restée pratiquement identique 37,8 % en 1989 contre 37,5 % en 1986.

A partir de ces données, nous avons pu connaître l'ordre de grandeur du parc des chaudières à gaz naturel dans le secteur résidentiel.

Un logement individuel correspondant à une chaudière, le nombre de chaudières est rapidement accessible et il est égal à 4635,9 10<sup>5</sup>.

Si nous considérons une chaudière pour 10 logements, nous obtenons 210.000 chaudières à gaz dans le logement collectif et le total s'élève à 4636,32 x 10<sup>5</sup> chaudières à gaz.

Si nous évaluons 50 logements pour une chaudière, nous notons qu'il y a 42.000 chaudières soit au total  $4636,11 \times 10^3$  chaudières à gaz.

La différence étant faible, nous pouvons admettre que le parc des chaudières à gaz naturel est de l'ordre de 4,846 millions en 1990 (augmentation supposée entre 1989 et 1990 de 210.000 chaudières, la moyenne, calculée à partir des logements individuels, sur 3 ans étant de 218.000).

### II.2.2. Parc des chaudières à gaz naturel dans le secteur tertiaire

La surface occupée par le tertiaire représente  $625,3 \times 10^6 \text{ m}^2$  (1988). Pour apprécier le nombre de chaudières à gaz dans ce secteur, nous avons procédé de la manière suivante : un logement collectif disposant en moyenne de  $66 \text{ m}^2$  de surface habitable, nous avons transformé les surfaces occupées du tertiaire en nombre-équivalent de logements collectifs. Celui-ci se monte donc à 9,474 millions de logements.

En raisonnant comme ci-dessus, c'est-à-dire 1 chaudière pour 10 logements ou 1 chaudière pour 50 logements, nous obtenons respectivement 950.000 ou 190.000 chaudières. En voie de conséquence, le parc total (résidentiel + tertiaire) se situerait dans l'intervalle suivant :  $5,036 \times 10^6 < x < 5,796 \times 10^6$

Pour la suite de l'étude, nous choisirons le nombre de 5,5 millions, qui, à notre avis, nous semble être un ordre de grandeur acceptable.

### II.3. Flux annuel des chaudières à gaz

Des sources à notre disposition, nous n'avons pu prendre connaissance que des données relatives aux différents types d'installations. Il s'agit des chaudières au sol ou murales. Suivant la terminologie technologique, aucune donnée chiffrée si ce n'est en chiffre d'affaires (voir BIPE Juin 1989).

En effet, nous pouvons distinguer 3 types de chaudières à gaz : la chaudière traditionnelle dont le rendement se situe autour de 87 % PCI, la chaudière à gaz de condensation avec un rendement supérieur à 94 % voire à 100 % PCI et la chaudière à haut rendement de l'ordre de 93 % PCI.

Le marché de la chaudière à condensation, commercialisée en France en 1982, après un certain succès, s'écroule depuis 1988 comme nous l'indiquent les données du BIPE (Juin 1989) :

- 1989 :  $338 \times 10^6$  Francs
- 1988 :  $407 \times 10^6$  Francs
- 1987 :  $557 \times 10^6$  Francs

En réalité, les chaudières actuelles à haut rendement sont, de plus en plus, des chaudières mixtes c'est-à-dire combinant l'amélioration des échanges de chaleur entre produits de combustion et l'eau de chauffage et, la récupération de la chaleur latente de l'eau formée au cours de la condensation. Elles se substituent ainsi rapidement à la chaudière traditionnelle et son chiffre d'affaires, en francs courants, a pratiquement doublé en 2 ans (+82 %).

Données BIPE Juin 1989 :

- 1989 :  $750 \times 10^6$  Francs
- 1988 :  $617 \times 10^6$  Francs
- 1987 :  $412 \times 10^6$  Francs

Par conséquent, nous ne donnerons que le flux annuel en France des chaudières à gaz selon le type d'installation :

Chaudières chauffage central à gaz (hors murales) :

- 1988 : 41.272 (e)
- 1987 : 43.298

Chaudières chauffage central murales à gaz :

- 1990 : 254.400 (e)
- 1989 : 365.500
- 1988 : 534.900

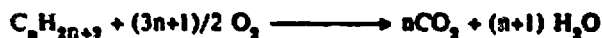
(e) : estimations

Nous notons un affaïssement du marché d'environ 50 % en 2 ans. Cette tendance doit toucher, même si nous ne possédons pas le détail des livraisons, aussi bien l'existant que les constructions nouvelles.

#### II.4. Rejets polluants émis par les chaudières à gaz

Le gaz naturel est certainement le combustible fossile le plus "propre". De faible teneur en soufre, il est épuré et contient en très grande proportion du méthane (97,3 % pour le gaz de Lacq et 82,9 % pour celui de Groningue, gaz le moins pur), des hydrocarbures saturés  $C_2$  à  $C_4$  et de l'azote.

La combustion théorique d'un hydrocarbure saturé produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau :



Dans la réalité, la combustion est incomplète et nous avons également rejet de monoxyde de carbone.

Ayant subi un traitement de désulfuration, le gaz naturel émet très peu de  $SO_2$  et  $SO_3$  et leurs émissions sont généralement considérées comme nulles (4). Il s'agit aussi d'une combustion sans poussières. Le gaz naturel contribue moins que le fioul et le charbon à l'effet de serre avec des émissions de  $CO_2$  inférieures respectivement de 30 % et 50 %. D'autre part, les rejets de  $NO_x$  sont inférieurs de 30 % à ceux du fioul.

##### II.4.1. Emissions de $CO_2$

Quelque soit le type de chaudière, la moyenne d'émission de  $CO_2$  estimée est de 2,4 t/Tep consommé et par an. Le secteur habitat-tertiaire ayant consommé 13,9 Mtep en 1989, nous obtenons une quantité de 33.360 kt de  $CO_2$  rejetés dans l'atmosphère. En 1988 (dernières données connues du CITEPA), les émissions de dioxyde de carbone en France et dans le secteur résidentiel-tertiaire, se sont élevées à 82.010 kt. Ainsi, nous évaluons la contribution polluante en  $CO_2$  des chaudières à gaz domestiques à hauteur de 40 % environ.

#### 11.4.2. Emissions de CO

Devant l'absence de données relatives au facteur d'émission du monoxyde de carbone des chaudières à gaz, nous avons choisi, arbitrairement, comme référence le label "Ange bleu" de R.F.A. indiquant une valeur de 100 mg/kwh pour une chaudière à gaz à brûleur atmosphérique utilisant du gaz de Lacq. D'après une étude du CETIAT (5), 50 % des chaudières atmosphériques installées en France seraient conformes au seuil "Ange bleu" et la moyenne des facteurs d'émission était égale à 144 mg/kwh. Nous avons majoré cette valeur, afin d'approcher la réalité si cela est possible, et nous avons retenu un facteur d'émission  $F_{CO} = 150$  mg/kwh.

Ainsi, les émissions de CO rejetées par l'ensemble des chaudières à gaz dans le secteur habitat-tertiaire en 1989 a été de l'ordre de 9,4 kt. Le calcul a été effectué comme suit :

$$E_{CO} = F_{CO} \times C \text{ avec}$$

$E_{CO}$  : émission totale de CO en kt  
 $F_{CO}$  : facteur d'émission de CO en mg/kwh  
 $C$  : consommation énergétique de gaz naturel en Habitat-Tertiaire en kwh

$$E_{CO} = 150 \times 62.550 \times 10^6 = 9,4 \text{ kt}$$

En 1987, les émissions de CO par les sources fixes, toute énergie confondue, se sont élevées en France à 1818 kt (Données O.C.D.E. sur l'environnement 1989) ce qui nous donne une émission relative en CO de l'ordre de 5 %. Cette valeur tend à nous montrer que la diminution en CO par les chaudières à gaz, si elle est souhaitable, n'est pas une priorité.

#### 11.4.3. Emissions de NOx

Le gaz naturel ne contenant pas de constituants azotés, l'émission de protoxyde d'azote  $N_2O$  n'est pas favorisée (6).

Par contre, les oxydes d'azote NO et  $NO_2$  sont produits en faible quantité mais ils jouent un rôle non négligeable en particulier dans la pollution atmosphérique urbaine.

Nous avons évalué ces quantités en nous basant sur le facteur d'émission NOx recommandé par le label "Ange Bleu" pour les chaudières à gaz atmosphériques dont les rejets en NOx sont les plus importants (5).

La quantité totale émise de NOx est donc égale à :

$$E_{NOx} = F_{NOx} \times C \text{ avec } F_{NOx} : \text{facteur d'émission de NOx exprimé en mg/kwh}$$

$C$  : consommation énergétique de gaz naturel dans le secteur habitat-tertiaire

$E_{NOx}$  : émission totale de NOx par les chaudières à gaz

$$E_{NOx} = 175 \times 62.550 \times 10^6 = 10,95 \text{ kt}$$

Cette quantité représente 16,8 % du total émis en NOx dans le secteur Habitat-Tertiaire, toute énergie confondue, en 1989 (65 kt), ce qui n'est pas négligeable.

Ceci précisé, d'après les données du CITEPA, entre 1980 et 1989, les quantités rejetées par le secteur Habitat-Tertiaire ont diminué de 32 %. En 1987, 480 kt de NOx ont été émis en France par les sources fixes. Ainsi, la part du gaz naturel dans l'émission des NOx est de l'ordre de 2,3 %.



### III. TECHNIQUES DE REDUCTION DES REJETS POLLUANTS

#### III.1. Techniques de réduction des COx

Les techniques de réduction des rejets des COx n'existent pas. Les seuls moyens à notre disposition, sont essentiellement le réglage de la combustion permettant un gain sur la consommation d'énergie primaire, grâce à l'augmentation du rendement de la chaudière.

Par voie de conséquence, une baisse des quantités de COx est attendue.

#### III.2. Techniques de réduction des NOx (6), (7)

Avant d'envisager les techniques de réduction des rejets, d'oxydes d'azote, nous allons présenter succinctement leurs mécanismes de formation.

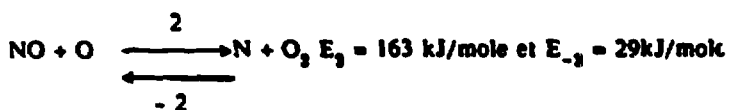
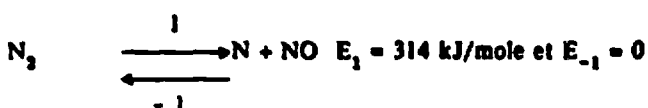
Les oxydes d'azote sont formés à partir de trois réactions distinctes selon la nature de l'azote impliqué. L'azote provient de deux sources possibles ou de l'azote de l'air atmosphérique et il s'agit de l'azote moléculaire  $N_2$  ou des composés organiques azotés contenus dans les combustibles.

Selon la source et la zone réactionnelle, nous aurons affaire à l'un des trois mécanismes suivants.

##### III.2.1. Mécanisme de formation du NO thermique

Ce mécanisme est un mécanisme lent, impliquant l'azote moléculaire de l'air et se déroulant principalement dans les produits de combustion.

Un nombre complexe de réactions y participe et sa cinétique est dominée par les réactions de ZELDOVITCH (8) dont le mécanisme simplifié est représenté ci-dessous :



La vitesse de réaction est une fonction croissante de la température dans la zone de combustion et dépend également de la concentration des espèces  $N_2$  et  $O_2$ .

$NO_2$  va se former à température relativement basse  $T < 600^\circ C$  par oxydation de  $NO$  par l'oxygène de l'air.

Ce mécanisme a lieu quel que soit le type de combustible (gaz, fioul ou charbon).

### III.2.2. Mécanisme de formation du NO combustible

Ce mécanisme fait intervenir les composés organiques azotés présents dans les combustibles fossiles tels les charbons et les fiouls, le gaz naturel en est dépourvu et ne suit pas ce type de mécanisme.

Ces composés sont généralement des pyridines et des pyrroles (ils contiennent dans leur squelette des cycles benzéniques et des liaisons  $C=N$  entre autres). Ces molécules lourdes sont cassées lors de la pyrolyse des combustibles en molécules plus petites appartenant au groupe des cyanures (dérivés de  $HCN$ ) et des amines légères (dérivés de  $NH_3$ ).

Ces espèces azotées sont soumises à un ensemble de réactions d'oxydo-réduction faisant intervenir des radicaux  $O$  et  $OH$  et un composé azoté (le plus souvent  $NO$  lui-même) les transformant respectivement en  $NO$  et  $N_2$ .

Le mécanisme du  $NO$  combustible se déroule, pour l'essentiel, dans la zone d'oxydation de la flamme et sa cinétique est plus rapide que celle caractérisant le  $NO$  thermique.

### III.2.3. Mécanisme du NO précoce

Le mécanisme du  $NO$  précoce est un cas particulier du mécanisme du  $NO$  combustible. En effet, l'azote moléculaire se comporte comme un azote du combustible en présence de radicaux hydrocarbonés. Ces derniers sont à même de rompre la triple liaison de  $N_2$  par des réactions moins endothermiques que la réaction 1 (voir III.2.1.). Ainsi, elles sont plus rapides car nécessitant des températures d'activation moins élevées. Ces réactions ont lieu dans la zone d'oxydation de la flamme.

### III.2.4. Techniques de réduction des NOx

Les paramètres influençant l'émission des polluants  $NO_x$  sont au nombre de quatre :

- La température de la flamme
- Le temps de séjour des molécules dans la zone de réaction
- La pression partielle en  $O_2$
- La teneur en azote du combustible

En ce qui concerne le dernier facteur, nous ne le retrouvons pas dans le cas du gaz naturel puisque celui-ci en est dépourvu.

Par conséquent, afin de réduire les rejets des oxydes d'azote, les solutions préconisées doivent porter sur l'abaissement de la température de flamme, le raccourcissement du temps de séjour à haute température et l'abaissement de la pression partielle en oxygène.

D'autres paramètres, dits secondaires (excès d'air, conception de la chambre de combustion ....), ont une influence sur la formation des  $NO_x$  mais ils s'exercent à travers l'un des quatre paramètres de base.

Les différents procédés mis au point par les industriels font appel, en général, à la modification de la combustion. D'autres techniques mettent en oeuvre un traitement des produits de combustion, mais, à notre connaissance, elles n'ont pas encore reçu d'application au niveau des chaudières à gaz domestiques. Les solutions disponibles à l'heure actuelle sont les suivantes :

- Les systèmes de barres de refroidissement

Pour les chaudières à gaz atmosphérique uniquement, un système de barre métallique cylindrique, par refroidissement de la flamme et réduction de l'air secondaire, permet de réduire les NOx jusqu'à 40 %. L'inconvénient réside dans une augmentation de CO mais les valeurs restent inférieures au seuil du label "Ange Bleu", label allemand très contraignant.

D'autre part, l'utilisation de ces barres ne constitue qu'une solution aux brûleurs atmosphériques jusqu'à 50 kw.

- Les brûleurs Thermomax

Ce brûleur, développé en partie par la Ruhrgas, est conçu comme un brûleur atmosphérique dans lequel le mélange est réalisé stoechiométriquement avant la combustion. On peut atteindre ainsi des excès d'air, jusqu'à 1,1. Les réductions possibles en NOx peuvent être de l'ordre de 90 %.

Ils peuvent s'adapter aussi bien sur des chaudières à air soufflé, qu'atmosphériques, de puissance inférieure à 100 kw.

- Les brûleurs gaz radiant

Les NOx produits par ce type de brûleurs sont des NOx précoces probablement dus à des niveaux de température plus bas. Les facteurs d'émissions varient entre 18 et 50 mg/kwh. Il s'agit contrairement aux émissions constatées pour les autres techniques de combustion essentiellement des émissions de NO<sub>x</sub>.

- La recirculation des gaz de combustion

Une partie des produits de combustion pris directement dans la chambre de combustion est remélangée au gaz. La re-circulation permet ainsi de diminuer la pression partielle d'oxygène. Deux familles de solution à recirculation existent :

- Re-circulation interne : le mélange gaz + combustible sortant à grande vitesse de la chambre de combustion ré-aspire une partie des fumées comme un injecteur. L'efficacité d'un tel système est plutôt réduite compte tenu de la température encore élevée des produits de combustion.
- Re-circulation externe : on renvoie les gaz pris dans le conduit d'évacuation vers la zone de combustion ou dans le mélange. Ce système est plus efficace mais nécessite un ventilateur. Cette technique à re-circulation intégrée est utilisée en Italie pour des puissances allant jusqu'à 310 kw (gaz).

- La chaudière à combustion pulsatoire

Elle est constituée d'un moteur à combustion pulsatoire, c'est-à-dire à combustion interne sans piston mécanique, associé à un échangeur adapté.

La combustion est complète, très intense et les écoulements des gaz brûlés, par leurs mouvements oscillants, donnent lieu à des transferts de chaleur élevés. Elle permet ainsi de très hauts rendements, le rendement utile pouvant atteindre 107 %. Elle conduit également à des températures de combustion relativement basses. Le résultat est une émission réduite des oxydes d'azote mais aussi de CO (taux de réduction de 66 % dans les deux cas par rapport à une chaudière à condensation classique).

- Réduction par injection d'eau

Par injection d'eau, un refroidissement s'opère car la chaleur de vaporisation est prélevée dans la flamme et d'autre part, la présence de vapeur d'eau augmente le rayonnement de la flamme.

Des réductions de 50 % de NOx ont été observées lors d'expérimentations menées par le GWI (Gas Wärme International). Aucune précision sur les rendements n'a été fournie.

- La combustion catalytique

La combustion est une réaction chimique d'oxydation qui s'amorce en portant le mélange combustible/comburant à une température supérieure à celle d'inflammation. Une combustion vive a lieu et une flamme à haute température se développe.

En présence d'un catalyseur, cette même réaction peut se faire à des températures beaucoup plus basses, et sans qu'il y ait inflammation.

Il y a, par ailleurs, accélération des réactions car les énergies d'activation d'un processus catalytique sont inférieures à celles d'un processus non catalytique. Ainsi, les basses températures obtenues réduisent les émissions de NOx, réduction pouvant atteindre 95 %.

La technologie utilisée est la suivante :

Des surfaces poreuses constituées d'une matière en fibre de céramique, par exemple, sont insérées dans la chaudière. A travers ces surfaces le mélange combustible/comburant est envoyé pendant la combustion. D'après J. SCHWEITZER et al. (7), cette technique ne serait pas encore au point.

- La combustion étagée

L'intérêt de la combustion étagée, est de réaliser une combustion tout d'abord en défaut d'air, puis ensuite, en excès d'air, ce qui permet d'éviter la température de flamme maximale. Il s'agit dans ce cas d'une technique d'étagement d'air mais il est également possible de réaliser un étagement du combustible.

Les taux de réduction sont respectivement de 80 à 90 % et environ 70%.

### III.3. Commentaires

De toute évidence, le gaz naturel serait l'un des combustibles fossiles le moins polluant, certains comme GAZ de FRANCE n'hésitant pas à affirmer qu'il ne participe qu'à hauteur de 1 % de la pollution.

En effet, les principales émissions sont celles de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> (N<sub>2</sub>O excepté) et leur impact relatif, en tenant compte de la consommation énergétique, est peu élevée.

Toutefois, le marché des chaudières à gaz naturel tend à supplanter celui des chaudières à fioul. Par conséquent, malgré un effritement du marché, le souci premier des industriels et du législateur serait de rechercher, de façon concomitante, l'efficacité énergétique et la réduction des rejets en NOx, CO et CO<sub>2</sub>.

En effet, nous avons pu constater qu'il y a un gisement potentiel de réduction d'émissions polluantes en COx et NOx.

Pour cela, les actions de recherche et d'optimisation des procédés réducteurs de pollution, prioritairement en direction des brûleurs, doivent être poursuivies et encouragées par des incitations financières s'il le faut.

D'autre part, il serait souhaitable de maîtriser réellement le parc des chaudières en distinguant bien les différents types de brûleurs. Si cela n'existe pas déjà, un contrôle avant commercialisation des rejets polluants émis par les chaudières, quel que soit le mode d'énergie utilisé, devrait être institué.

Dans ces conditions est-il possible de définir un optimum ou des critères minima de rejets pour générateurs propres à gaz naturel ?

#### **IV. ESQUISSE DE CRITERES DE POLLUTION POUR GENERATEURS PROPRES A GAZ NATUREL**

Définir un effet global de pollution atmosphérique par combustion dans le secteur Habitat-Tertiaire, tel qu'il est suggéré par le cabinet BEGO (9), me paraît sinon erroné du moins difficile. Si leur démarche semble logique, le modèle proposé aurait dû être confronté à la réalité. Ce n'est malheureusement pas le cas. Le manque de données fiables en est peut-être la cause. Sans entrer dans le détail, la formulation de cet effet global repose sur les facteurs d'émission, les consommations d'énergie et le nombre de générateurs propres ainsi que leur variation.

Un autre paramètre est introduit mais il n'a pas été défini : il s'agit de la criticité  $c(p)$  devant caractériser les pollutions atmosphériques telle que  $\sum c(p) = 1$ .

BEGO a certainement essayé d'affecter à chaque type de polluant un facteur pondéral mais, de toute évidence, ces facteurs restent à chiffrer. D'autres questions sont posées : devons-nous faire une distinction entre effet de serre et pollution atmosphérique ? Les deux effets ne sont pas totalement indépendants mais dans quelle mesure pouvons-nous les mettre sur le même plan ?

Les chaudières à gaz naturel ne rejettent pas à proprement dit du méthane mais des fuites ont lieu, en particulier, lors de l'extraction et du transport. Ne faudrait-il pas en tenir compte et les comptabiliser comme rejets induits ?

Il apparaît mal aisé de recommander précisément des contraintes chiffrées sans aucun rapport avec les progrès technologiques. Les données citées font ressortir que des réductions, pouvant aller jusqu'à 90 %, sont envisageables. Sans retenir ce chiffre, il pourrait être envisagé de proposer, d'ici 5 ans, une réduction en NOx de 30 % par une adaptation technique sur les chaudières existantes, incitée par une détaxation par exemple, et la conformité aux normes européennes futures pour les nouvelles installations.

L'application de ces techniques ne doit pas entraîner, d'autre part, l'augmentation du rejet de monoxyde de carbone CO. Si cela n'est possible, les facteurs d'émission de CO ne devraient pas dépasser les normes les plus contraignantes existantes.

A ce sujet, d'autres problèmes, non techniques, sont posés. Quelles normes adopter et sur quoi reposent-elles ? Suprématie technique ou économique permettant d'acquérir le monopole du marché des chaudières ? Nous le voyons, d'autres éléments entrent en ligne de compte et ne sont pas du ressort des avis techniques soumis à l'A.F.M.E.

Les différentes réductions en NOx et CO ne doivent pas non plus se produire au détriment du rendement de la chaudière. Nous avons pu constater qu'un gain de rendement implique une diminution de la consommation d'énergie primaire, et par voie de conséquence, celle d'émissions de dioxyde de carbone.

### **EPILOGUE**

De cette étude doit ressortir l'idée que la lutte contre la pollution atmosphérique et la connaissance de ce phénomène ne peuvent être envisagés de façon partielle et encore moins partielle.

Si, depuis quelques années, la complexité de la chimie de l'atmosphère est de mieux en mieux comprise, ce qui ne signifie pas maîtrisée, des efforts et des essais sont à mener sur le plan des données (parc des chaudières, facteurs d'émission réels...).

L'impact relatif des différentes sources d'énergie et des technologies utilisées est aussi à mieux prendre en compte par une approche plus globale. La notion de cycle doit être retenue même si elle apparaît délicate à manier étant donné les interactions nombreuses et complexes mises en jeu.

Ainsi, il nous semblerait judicieux de compléter nos informations sur les impacts relatifs des émissions des différentes espèces chimiques étudiées. En effet, à ce jour, les coefficients cités sont, de l'avis même des spécialistes, sujets à caution.

BIBLIOGRAPHIE
---------------

- (1) : G. MEGIE "Ozone l'équilibre rompu", Presses du C.N.R.S., 1989.
- (2) : L. MOLINA, M. MOLINA, J. Phys. Chem. 91, 443, 1987.
- (3) : J.C. GALLOO "Pollution atmosphérique par les oxydants photochimiques : études sur le terrain et par simulation numérique au moyen d'un modèle lagrangien" These de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. Université des Sciences et Techniques de LILLE, 1985.
- (4) : P. LOCANETTO "La combustion du gaz naturel et l'environnement" Rev. Gen. Therm. Fr. n° 314, Février 1988, p. 119-123.
- (5) : J. SCHWEITZER "Etude statistique des émissions d'oxyde d'azote des chaudières domestiques gaz et fioul" CETIAT, Novembre 1988, NTV 88.096.
- (6) : G.G. DE SOETE "Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion" Rev. Gén. Therm. Fr. n° 330-331, Juin-Juillet 1989, p. 353-373.
- (7) : J. SCHWEITZER, J.L. ARMAND "Mécanismes de formation et moyens de réduction des oxydes d'azote dans le cas des chaudières domestiques" CETIAT, étude bibliographique, Novembre 1989, n° de contrat AFME : 9.04.00.18.
- (8) : Ya.B. ZELDOVITCH, P.Ya. SADOVNIKOV et D.A. FRANK-KAMENETSKII "Oxidation of nitrogen in combustion" Académie des Sciences de l'U.R.S.S., Institute of Chemical Physics, Moscou-Léningrad, 1947.
- (9) : G. OLIVE, A. HIRECHE, A. SERKHANE, T. GOMES-PLAN. Volet technique d'un dossier d'appel d'offres "Générateurs propres pour l'habitat et le tertiaire", Lettre de commande AFME n° 0.04.0035, Octobre 1990.