

CHARBON ET ÉCOLOGIE

Le point de vue américain

Dans une note récente, l'Ambassade de France à Washington * a fait le point sur les graves problèmes d'environnement que posera le recours accru au charbon dans le bilan de la consommation énergétique américaine. On trouvera, ci-après résumé, l'essentiel de ce travail des services de la Mission Scientifique.

I. Introduction

Possédant des ressources pétrolières importantes mais insuffisantes pour la consommation nationale, ayant retardé le développement de l'industrie nucléaire et consciente du fait que les technologies avancées (solaire, biomasse) ne sauraient constituer une fraction significative de la production énergétique au cours des 20 prochaines années, l'Amérique, pour cette période, mise sur le charbon et les économies d'énergie. Si ces dernières recueillent aujourd'hui l'assentiment unanime des Américains, il n'en est pas de même de l'utilisation des combustibles fossiles solides. Les groupes de protection de l'environnement s'inquiètent des conséquences néfastes que pourraient avoir l'extraction, la manutention et la combustion de quantités croissantes de charbon.

Dans ce contexte, les préoccupations écologiques constituent aujourd'hui l'élément le plus important en matière de mise en valeur des ressources charbonnières. Les études faites sur la question montrent que les problèmes sont de natures très diverses. Ils relèvent de la sécurité du travail (accidents dans les mines), de la disponibilité des ressources naturelles (eau, mais aussi sols), de la pollution atmosphérique (oxydes de soufre, d'azote, particules solides). Si certains sont assez bien analysés et quantifiés tels que les accidents liés à l'extraction ou au transport, d'autres restent mal compris (pluie acides, effet du CO₂) et font l'objet de multiples controverses dans les milieux scientifiques, industriels et gouvernementaux.

Les aspects écologiques de l'utilisation du charbon constituent donc un sujet vital pour l'équilibre énergétique de l'Amérique, mais aussi un sujet extrêmement complexe et varié du point de vue technique et auquel viennent encore s'ajouter les facteurs économiques et politiques.

II. Le rôle du charbon aux États-Unis dans le futur

Les estimations les plus récentes de Conoco (janvier 1982, tableau 1) montrent l'importance que les Américains envisagent d'accorder au charbon au cours des 20 prochaines années. Une

Tableau 1. Prévisions relatives à l'utilisation du charbon aux États-Unis (millions de tonnes/an).

	1980	1990	2000
Centrales thermiques	516	735	1 000
Métallurgie (coke)	61	73	81
Industrie (vapeur)	54	112	181
Chauffage domestique	6	11	12
Combustibles synthétiques	0	3	72
Exportations	82	137	195
Total	719	1 071	1 541

Source : R. Antonoff, Conoco, Jan. 82.

croissance moyenne de 4 % par an est prévue, et les producteurs d'électricité, avec 520 millions de tonnes en 1980 (70 % de la consommation) et environ 1 milliard de tonnes en l'an 2000, devraient rester le principal consommateur (tableaux 2 et 3).

Outre cette utilisation, le charbon devrait également progresser dans ses autres usages traditionnels (métallurgie et production de vapeur pour l'industrie, chauffage) et pénétrer le secteur des combustibles de synthèse (tableau 1).

La combustion directe du charbon dans les chaudières traditionnelles constitue la solution la plus simple et la plus rentable. Cependant, en raison des contraintes relatives à l'environnement, seuls les charbons à faible teneur en soufre peuvent être utilisés de cette façon sans nécessiter le traitement des gaz avant leur rejet dans l'atmosphère. La purification est considérée par les producteurs d'électricité comme coûteuse et relativement difficile à mettre en œuvre. Certains ont préféré éviter ce problème en utilisant des charbons peu soufrés.

La pénétration des technologies nouvelles ne saurait être importante dans les quelques années à venir. Compte tenu de la dimension des centrales thermiques, les investissements nécessaires sont élevés et les nouvelles filières doivent être essayées tout d'abord sur de petites unités (les chaudières industrielles devraient

* « Charbon et environnement aux États-Unis ». Services de la Mission scientifique de l'Ambassade de France, 2011 Eye Street N W, Washington D C 2006.

Tableau 2. La part du charbon dans la production d'électricité aux États-Unis (1980).

Combustible	Électricité (1)		Coût du combustible (\$/MM BTU) (2)
	TWh	%	
Charbon	1 161	50,8	1,35
Gaz naturel	346	15,1	2,13
Pétrole	246	10,8	4,8
Nucléaire	251	11,0	
Hydroélectrique	276	12,1	
Autre	6	0,2	
Total	2 286	100,0	

Source : (1) E.I.A. Annual Report to the Congress (1980).
(2) Edison Electrical Institute.

jouer un rôle important en cette matière), puis sur quelques usines expérimentales avant de voir leur usage se généraliser. Comme la durée de vie d'une centrale thermique est d'environ 30 ans, les technologies avancées, même si elles se révèlent intéressantes, ne sauraient donc représenter une fraction importante de l'utilisation du charbon au cours de la présente décennie. Pendant cette période

III. Exploitation et environnement

III.1. La préparation du charbon

En premier, un concasseur réduit la taille des morceaux. Ensuite le criblage permet d'homogénéiser les différents stocks afin qu'ils répondent à la demande. Tous les charbons extraits aux États-Unis passent par ces deux phases successives de traitement dont on évalue le prix de revient à moins d'un dollar par tonne.

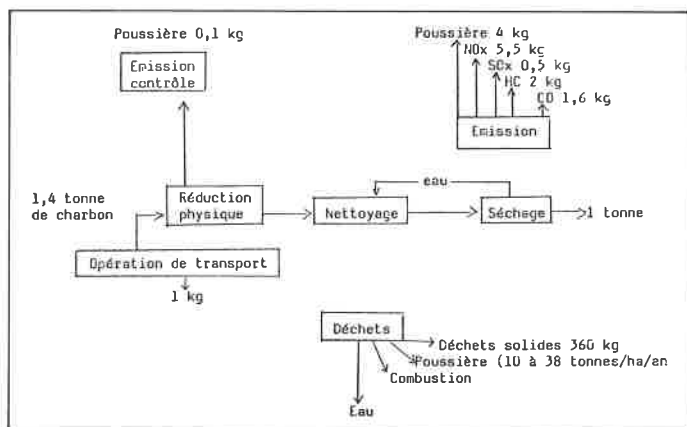


Figure 1. Rejets lors de l'extraction de 1,4 t de charbon.

Les stériles et la pyrite sont ensuite extraits par flottation grâce à leurs différences de densité, le charbon étant deux fois plus léger. Le traitement revient à environ 4 \$ par tonne. Le problème majeur qui se pose est celui des « eaux noires » résiduelles, mais des procédés de floculation permettent maintenant un recyclage de l'eau.

III.2. Le transport

L'augmentation de l'exploitation du charbon, particulièrement dans l'Ouest des États-Unis va se traduire par la nécessité d'adapter le réseau ferroviaire. L'augmentation du nombre et de la longueur des trains aura pour conséquence un accroissement du bruit, des incendies et des accidents.

Tableau 3. Prévisions relatives à la production d'électricité aux États-Unis (2000) en TWh.

Combustible	D.O.E. Août 1982	Conoco Janvier 1982
Charbon	2 060	2 105
Gaz naturel	175	150
Pétrole	85	35
Nucléaire	805	980
Hydroélectrique (et autres)	475	490
Total	3 600	3 760
Charbon (%)	57	56

et très probablement jusqu'à la fin du siècle, l'utilisation des techniques classiques de purification des gaz de combustion devrait rester la plus courante. Pourtant, d'autres filières prometteuses sont aujourd'hui considérées, essentiellement sous l'aspect du rendement de la conversion (limité à 35 % environ dans une centrale thermique classique) et des conséquences pour l'environnement.

III.3. La santé des mineurs

C'est un lieu commun d'écrire que le métier de mineur a toujours été l'un des plus dangereux qui soient. Depuis 1952, le Gouvernement fédéral s'est occupé des problèmes de sécurité et de santé à l'échelle nationale, mais il a fallu attendre 1969 pour que le Coal Mine Health and Safety Act soit voté (CMHSA). Le but de cette loi était de réduire les catastrophes souterraines en limitant à 2 mg/m³ les rejets maximaux de poussières dans les galeries et en instituant des réglementations sur la ventilation, l'éclairage fixe et l'étayage.

Il faut préciser qu'à la suite de cette loi, le nombre de morts est passé de 0,6/million de tonnes en 1967-69 à 0,39/million de tonnes en 1975-77. En contrepartie, le nombre d'accidents corporels mineurs a crû durant la même période de 23,7 à 37,8 par million de tonnes.

Trois hypothèses peuvent expliquer cette tendance. Les accidents qui jusqu'alors étaient mortels sont devenus moins graves. Le CMHSA s'est traduit dans les faits par une diminution de la productivité qui a été compensée par un accroissement du nombre de mineurs inexpérimentés et souvent mal encadrés, ce qui a augmenté d'autant les chances d'accidents. Enfin, les compagnies doivent maintenant rapporter au niveau fédéral tout accident, ce qui n'était pas le cas auparavant.

La silicose est toujours la maladie typique du mineur, mais on espère qu'elle régressera grâce aux nouvelles normes sur la pollution ambiante des galeries. Les problèmes auditifs semblent en réduction grâce à la mise au point et à l'utilisation d'engins pneumatiques peu bruyants.

III.4. L'eau

C'est le problème essentiel lié à l'exploitation. Les impacts à tous les niveaux sont nombreux. On peut citer des modifications d'écoulements, le lessivage, l'érosion... L'acidification est généralement due à l'oxydation des pyrites qui conduit à la formation d'acide sulfurique. La diminution du pH entraîne un accroissement de la solubilité d'éléments tels que l'arsenic, le plomb

et le mercure. La neutralisation et la floculation sont les deux méthodes classiques employées pour le traitement de ces eaux. Cependant, il est à remarquer que la plupart des mines produisent des déchets alcalins, pauvres en métaux toxiques. Dans ces deux cas, les compagnies doivent se plier aux réglementations sur la qualité de leurs effluents, mais les mines continuent à polluer les rivières.

La contamination des eaux souterraines se produit naturellement mais aussi à travers les fissures produites lors de l'explosion de charges. Par ailleurs, les exploitations affectent l'hydrologie souterraine, en asséchant par exemple des puits.

Depuis le vote du Clean Water Act, en 1977, un certain nombre d'améliorations se sont produites. Les eaux rejetées doivent obligatoirement avoir un pH proche de la neutralité et les suspensions solides être réduites. En fait, le recyclage est actuellement la méthode qui présente le moins de risque.

III.5. Le sol

En 1975, 228 000 hectares étaient couverts par les carreaux et les terrils. En 1985, 32 000 nouveaux hectares seront touchés par l'exploitation du charbon. L'Ouest deviendra la zone la plus exploitée, mais l'impact sur la surface, du fait de l'épaisseur des couches, sera relativement plus faible que dans l'Est.

Tableau 4. Prévisions de l'impact de l'exploitation 1975-2000.

	Exploitation à ciel ouvert		Exploitation souterraine	
	10 ⁶ tonnes	ha touchés	10 ⁶ tonnes	ha touchés
Appalaches	4 156	337 000	6 982	742 000
Centre.	1 737	135 000	4 194	330 000
Gulf	1 319	63 000	0	0
Ouest	8 218	110 000	874	59 000
Total.	15 430	645 000	12 050	1 131 000

D'après le GAO.

IV. Les techniques actuelles d'utilisation du charbon

Le secteur des transports est responsable de la majorité de la pollution atmosphérique aux États-Unis. Il importe cependant de remarquer que l'oxyde de carbone représente plus des trois quarts de ce total et que, si les sources de pollution fixes sont d'une

Tableau 5. Origine des émissions d'oxydes de soufre aux États-Unis.

Source	Oxydes de S (millions de tonnes)	Oxydes de S (%)
Centrales thermiques	17,6	64,2
Industries (vapeur).	3,2	11,7
Métallurgie.	2,4	8,8
Industrie chimique.	1,8	6,6
Résidentiel	1,6	5,8
Transports	0,8	2,9
Total	27,4	100,0

Source : E.P.A., décembre 1978.

Le Surface Mining Control and Reclamation Act impose aux sociétés minières de restaurer le terrain lors de la fermeture des mines. Il s'avère que dans des zones sensibles les résultats sont décevants. En revanche, des terrains ont été remis en culture ou en forêt après exploitation temporaire dans des régions peu accidentées où l'érosion est négligeable.

En l'an 2000, l'exploitation souterraine du charbon ne devrait représenter que 35 % de la production totale mais cette pratique interviendrait pour 60 % dans les problèmes touchant au sol.

La subsidence est sans aucun doute le problème majeur lié à l'exploitation souterraine du charbon. Dans l'Est des États-Unis, 25 % des 3,2 millions d'hectares situés sur des galeries se sont affaissés; ce qui se traduit par des destructions de bâtiments, de routes et par un réseau hydraulique modifié et instable. Les mines abandonnées présentent le plus grand danger, car elles ne sont pas surveillées et souvent mal répertoriées. Les éboulements se produisent alors inopinément sans qu'il soit possible de limiter leur ampleur.

On estime qu'il y a entre 3 000 et 5 000 terrils dans l'Est, avec une masse totale de 3 milliards de tonnes. Des accidents catastrophiques peuvent se produire. Ainsi, un glissement à Buffalo Creek a entraîné, en 1971, la mort de 125 personnes.

Si le nombre d'accidents mortels dans les mines demeure constant et voisin de 0,4 par million de tonnes de charbon exploité en sous-sol, on atteint annuellement avec le transport un total de 600 décès par an, soit plus de 10 000 d'ici la fin de ce siècle.

Il ne semble pas que ce sérieux problème soit actuellement pris en considération avec la vigueur nécessaire par les responsables américains.

Les accidents dans les mines passent souvent inaperçus et ne prêtent plus guère qu'à des entrefilets dans les journaux. En revanche, le long terme et le sensationnel sur les rejets de SO_x, les pluies acides et l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère que nous discutons très largement par la suite, sont le thème de nombreuses publications et l'objet de congrès à travers les États-Unis et le Canada. Retenant constamment l'attention de la presse et des médias, ces questions sont journalièrement présentées au grand public.

Il faut donc prendre garde de tirer trop hâtivement des conclusions sur les effets à long terme de certains phénomènes mal compris, alors que le quotidien est souvent délaissé.

manière générale moins importantes en valeur absolue, elles sont responsables de la majorité des émissions d'oxydes de soufre (82 %) et d'oxydes d'azote (56 %) et ont une contribution significative en matière de particules solides (39 %).

Les centrales thermiques à elles seules émettent près des 2/3 du SO₂ (tableau 5), et ce problème constitue actuellement l'élément de loin le plus important en matière de pollution atmosphérique par le charbon. Pour cette raison, c'est vers le contrôle des oxydes de soufre que sont concentrés la majorité des efforts à l'échelle industrielle. Les oxydes d'azote et les particules solides font l'objet de recherches au niveau du laboratoire, mais leur contrôle dans la pratique reste très limité. Quant aux éléments à l'état de traces présents dans les charbons, ils ne constituent aujourd'hui en matière de pollution qu'un sujet d'intérêt académique.

IV.1. Les oxydes de soufre

La combustion directe du charbon est le procédé le plus utilisé à l'heure actuelle et elle devrait rester prépondérante au cours des années 80. Pourtant, cette technique présente des difficultés importantes en matière d'environnement. Les solutions retenues

actuellement pour y faire face restent relativement rudimentaires. Le problème principal est lié à la teneur en soufre des matières premières disponibles.

Schématiquement, trois grands types de procédés sont actuellement disponibles : l'utilisation de charbon à faible teneur en soufre, le lavage du charbon et la désulfuration des gaz de combustion. Dans certains cas, ces deux dernières techniques peuvent être employées ensemble.

IV.1.1. Utilisation de charbons peu soufrés

Afin de tourner la difficulté, certains utilisateurs préfèrent brûler des charbons dont la teneur en soufre, assez faible, permet une combustion directe, sans adjonction d'aucun dispositif de désulfuration.

Les réserves de charbon à faible teneur en soufre connues aux États-Unis sont extrêmement importantes. Cependant, plus de 60 % de celui-ci est situé à l'Ouest du Mississipi, alors qu'environ 90 % des centrales thermiques à charbon sont à l'Est. Il en résulte que l'utilisation de ces ressources se heurte au problème du transport.

Certaines compagnies de production d'électricité préfèrent cependant cette solution considérée comme plus simple et plus fiable. Il est intéressant à ce titre de constater que 7 des 8 centrales thermiques de la société Commonwealth Edison qui opère dans un État possédant d'énormes ressources charbonnières (Illinois) utilisent un combustible provenant du Montana et du Wyoming pour éviter le problème de la désulfuration des gaz.

Cette possibilité ne s'applique cependant qu'aux centrales construites avant 1978. En effet, les réglementations récentes (1980) de l'E.P.A. impliquent que toute nouvelle unité soit munie de dispositifs de désulfuration. Outre son intérêt écologique, cette législation aurait bénéficié de l'appui des producteurs de charbon de l'Est, et des syndicats de mineurs de cette région qui craignent qu'une limitation quantitative unique en matière d'émission de SO_x ne constitue une vive incitation à utiliser les charbons peu soufrés provenant de la région des Rocheuses.

Une solution intermédiaire consiste à utiliser des mélanges de charbon. Un combustible à faible teneur en soufre est ajouté à un charbon plus sulfuré en quantité juste suffisante pour abaisser la teneur en soufre jusqu'à un niveau acceptable. Cette solution, qui implique un appareillage de mélange dans des proportions contrôlées, est, selon les estimations de la revue *Power Engineering*, actuellement employée par un nombre croissant de producteurs d'électricité. A titre d'exemple, Union Electric dans sa centrale de Labadie (Missouri) a utilisé un tel mélange dont un des constituants peu soufré (0,35 % de S), est relativement coûteux (\$ 1,80 million de BTU) alors que l'autre, à 2,83 % de soufre, est nettement plus économique (\$ 0,80 million de BTU).

IV.1.2. Lavage des charbons

L'emploi de cette méthode avait diminué au cours des années pendant lesquelles le coût du brut en rendait la mise en œuvre économiquement peu intéressante. Aujourd'hui cette tendance est lentement renversée.

On estime que 15 à 20 % des 520 millions de tonnes brûlées annuellement dans des centrales thermiques sont préalablement lavées. Cette technique, qui permet d'éliminer diverses impuretés d'origine minérale, donne des résultats très différents selon les charbons traités. Cependant, d'une manière générale, elle ne permet d'extraire qu'approximativement 1/3 du soufre.

Les avantages de cette technique sont mis à profit lorsque l'utilisation du charbon lavé permet d'abaisser la teneur en soufre jusqu'à des valeurs qui, en permettant d'éviter l'adjonction de dispositifs de désulfuration des gaz, entraînent des économies d'investissement substantielles.

Par ailleurs, divers travaux sont consacrés à l'étude de la désulfuration du charbon par des méthodes chimiques, mais les budgets consacrés à ce problème restent limités (quelques millions de dollars). General Electric étudie un procédé à micro-ondes et T.R.W. poursuit une voie faisant appel à des bases fondues (NaOH ou KOH) qui permettraient d'entraîner le soufre organique et la pyrite dans des proportions pouvant atteindre 90 %.

L'intérêt économique de ces procédés reste cependant à démontrer. Divers observateurs sont sceptiques sur leurs débouchés. L'auteur d'un article récent publié dans *Coal Age* n'hésitait pas à affirmer : « il n'y a pas de procédé simple et efficace disponible actuellement pour purifier le charbon par voie chimique ».

IV.1.3. La désulfuration des gaz

En 1980, l'E.P.A. a établi une nouvelle norme en matière d'émission de SO_2 pour les centrales thermiques à charbon dont la construction a commencé après 1978. Selon cette législation, le pourcentage de désulfuration des gaz, calculé en fonction de la teneur en soufre du charbon et de son pouvoir calorifique, doit être d'au moins 90 % (et ne pas excéder 0,545 g de SO_2 rejeté par million de BTU) ou de 70 % dans la mesure où la quantité de SO_2 rejetée n'excède pas 0,270 g par million de BTU. A titre d'exemple, cette législation implique pour une unité qui utilise un charbon à 3 % de soufre d'éliminer 75 à 80 % du SO_2 contenu dans les gaz avant le rejet dans l'atmosphère.

Ces réglementations impliquent que toute nouvelle unité soit munie de dispositifs de désulfuration. Par conséquent, c'est vers cette solution que devraient s'orienter les producteurs d'électricité dans le futur.

Aujourd'hui, près d'un millier de centrales utilisent aux États-Unis des combustibles fossiles et moins d'une centaine sont munies d'absorbants à oxyde de soufre. 13,8 % de la capacité installée utilisant le charbon (soit environ 5,7 % de la capacité totale de la production d'électricité) comportait des absorbants à SO_2 à la fin de 1981 et cette valeur ne devrait guère dépasser 28,7 % en 1999.

La méthode consistant à absorber les oxydes de soufre par une solution de chaux est aujourd'hui la plus utilisée (tableau 6). Il s'agit là d'un procédé relativement ancien, qui a été initialement développé en Grande-Bretagne dans les années 30. Il est considéré actuellement par les opérateurs de centrales thermiques américains comme relativement simple à mettre en œuvre et d'une fiabilité acceptable.

Le soufre sous forme de sulfite et de sulfate est extrait en continu sous forme de suspension aqueuse. Cette solution implique de disposer, à proximité de l'unité, d'un espace de stockage.

Une trentaine d'unités essayées aux États-Unis à la fin des années 70 ont montré que l'efficacité du procédé est comprise entre 50 et 90 % pour des charbons contenant 0,3 à 5 % de soufre.

Tableau 6. Répartition statistiques des différents systèmes (%).

	Sept. 1981	Déc. 1999
• Systèmes sans régénération :		
Suspension aqueuse {		
CaO	36,8	20,6
CaCO ₃	48,7	36,9
Autres	7,7	10,3
Solides {		
CaO	0,3	3,4
CaO/Na ₂ CO ₃		0,1
Na ₂ CO ₃	1,4	0,4
• Systèmes à régénération		3,7
• Systèmes non encore choisis		24,6

IV.2. Les oxydes d'azote

Bien qu'également importante en terme de volume de polluants rejetés à l'atmosphère (tableau 7), l'émission d'oxyde d'azote a reçu moins d'attention que celle des oxydes de soufre. L'élimination de NO_x , qui semble cependant prendre depuis quelque années une importance croissante, est un problème beaucoup plus difficile à maîtriser que celle du SO_2 . Une situation analogue existe d'ailleurs en matière de purification des gaz d'échappement automobile.

Aucune solution satisfaisante n'existe aujourd'hui pour traiter efficacement les gaz de combustion sous cet angle. Divers procédés ont été étudiés mais la méthode qui semble la plus couramment admise consiste à éviter la formation de NO_x au niveau de la combustion plutôt qu'à réduire ultérieurement les concentrations dans les gaz rejetés à l'atmosphère.

IV.2.1. Contrôle de la combustion

La cinétique de formation des oxydes d'azote qui détermine la concentration dans le mélange gazeux est une fonction de la concentration en oxygène par rapport au charbon, de la température de flamme, de la géométrie du brûleur ainsi que de la vitesse des gaz.

Une solution employée dans la pratique consiste à faire recirculer une fraction des gaz de combustion. Cette technique, qui provoque à la fois une diminution de température et de concentration en oxygène, permet de diminuer d'une manière significative la teneur en oxydes d'azote. C'est ainsi que la réinjection de 20 % des gaz dans un courant contenant 15 % d'air en excès permet de réduire d'environ 12 % la teneur en NO_x .

La conception de brûleurs de formes appropriées permet également de progresser dans ce sens.

IV.2.2. Les méthodes de « dénitrification »

Bien qu'encore au stade du développement, diverses méthodes sont actuellement employées pour éliminer les oxydes d'azote dans les gaz de combustion. Il s'agit là d'un problème difficile, d'une part, du point de vue chimique (par suite de la réactivité limitée de NO_x), d'autre part, du point de vue physique dans la mesure où les concentrations en NO_x sont le plus souvent très faibles (500 ppm) et nettement inférieures à celles en oxydes de soufre.

La décomposition directe de NO_x constituerait la solution idéale. Malheureusement, aucun système catalytique n'a été trouvé qui présente une activité acceptable dans les conditions pratiques. Pour cette raison, les travaux actuels sont orientés vers la réduction ou la fixation des oxydes d'azote.

La réduction catalytique

Divers réactifs, tels que l'hydrogène, l'oxyde de carbone, l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré et le méthane, peuvent être utilisés pour réduire catalytiquement les oxydes d'azote. Les masses de contact les plus actives sont appelées des métaux de la mine du platine (Pt, Pd) et sont d'un coût élevé. Dans ce domaine, comme dans celui des catalyseurs de gaz d'échappement, des recherches importantes ont été faites pour essayer de s'affranchir des métaux nobles. Divers oxydes métalliques (Ni, Cu) ont été préparés mais leur activité semble limitée et les progrès en cette matière restent lents.

Aujourd'hui, la solution faisant appel à la réduction par l'ammoniac sur un catalyseur au platine est celle qui semble la plus généralement considérée pour ce problème dans les années à venir.

L'adsorption

L'adsorption sur du charbon actif ou sur des oxydes divisés constitue une autre méthode qui a été envisagée. Du point de vue technique, ceci est réalisable mais, par suite des énormes volumes de gaz qu'il faut véhiculer au travers des lits d'adsorbants et des problèmes que pose la régénération du charbon actif, l'intérêt économique de cette solution n'est pas évident.

IV.3. Les particules solides

Le contrôle des particules constitue un problème général à beaucoup d'industries et divers programmes ont pour but d'améliorer l'efficacité des précipitateurs électrostatiques.

La technique des « chambres à manches » (baghouse) constituée par un nombre élevé (parfois plusieurs centaines) de manchons en fibres tissées (le plus souvent en fibre de verre) dont le diamètre

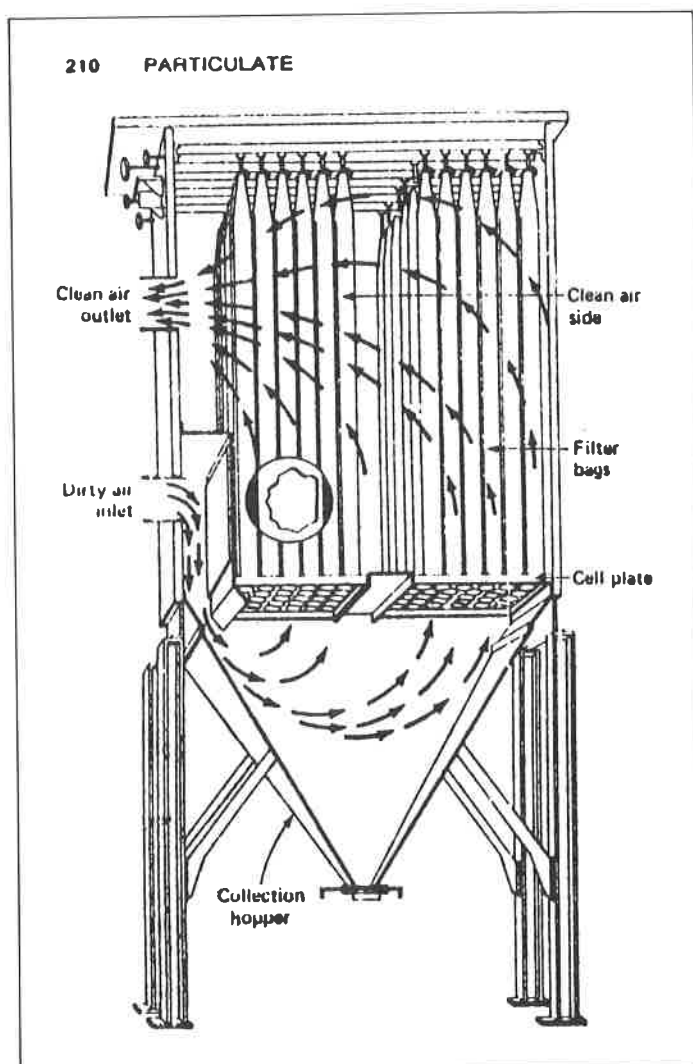


Figure 2. Chambre à manche typique.

peut atteindre 30 cm et la longueur jusqu'à 10 mètres (figure 2) retient actuellement l'intérêt de nombreux chercheurs et techniciens.

IV.4. Les éléments à l'état de trace

Les charbons contiennent un grand nombre de composés minéraux à l'état de trace. Certains sont particulièrement toxiques et, compte tenu des volumes importants de charbon utilisés, peuvent représenter des quantités significatives. L'arsenic, le béryllium, le mercure et le sélénium constituent les éléments les plus dangereux. Une étude de l'E.P.A. estime à plusieurs kilos par jour la quantité de ces polluants émis par une centrale brûlant 7 000 t/jour de charbon illinois n° 6.

Parce que représentant des concentrations de plusieurs ordres de grandeur inférieures à celles des oxydes de soufre, ce problème a été beaucoup moins étudié.

V. Les résultats attendus de ces techniques

Divers travaux ont été faits pour estimer les améliorations qu'on peut attendre de la mise en œuvre des techniques avancées de contrôle de polluants. Une étude de l'E.P.R.I. estime que des résultats spectaculaires peuvent être obtenus (tableau 7) moyennant un investissement dans les dispositifs de dépollution

diminution notable en valeur relative si on considère l'augmentation importante de la quantité du charbon utilisée (tableau 1). Au contraire, les rejets d'oxydes d'azote devraient continuer à croître en raison essentiellement de l'absence actuelle d'une technologie satisfaisante pour leur contrôle.

Tableau 7. Technologies pour le contrôle des émissions d'une centrale thermique (1985-1990).

	Après combustion			Après purification	
	ppm	tonne/heure		ppm	tonne/heure
SO ₂	3 300	15	Absorbeur à CaCO ₃	170	0,8
NO _x	525	1,8	Réduction catalytique NH ₃	20	0,07
Particules		25	Filtration (baghouse)		0,02

Charbon, Illinois à 4 % de soufre, 16 % de cendres. Source : E.P.R.I., 1980.

Tableau 8. Investissements (\$ 1980).

	Charbon Illinois 4 % S	Charbon Wyoming 0,48 % S
Particules solides	43-53	73-92
Absorbeur à SO ₂	142-181	90-117
Contrôle de NO _x	6-11	6-12
Coût total « environnement » *	273-387	234-326
Coût total de l'unité	850-1110	831-1074
Contrôle de l'environnement (%).	32-35	28-30

* Ceci comprend : traitement des eaux, refroidissement, résidus solides, contrôle du bruit.

Source : E.P.R.I., 1980.

représentant environ 1/3 du coût total de l'unité (tableau 8), soit environ \$ 300/kW de puissance installée.

Compte tenu de la durée de vie d'une centrale thermique, de l'augmentation sensible de la quantité de charbon brûlé aux États-Unis dans les 20 années à venir, de la situation actuelle et des délais de mise en œuvre des méthodes de contrôle des polluants, les progrès espérés restent modestes. Les analystes du D.O.E. envisagent une amélioration sensible en valeur absolue en ce qui concerne les émissions d'oxydes de soufre et de particules solides d'ici la fin du siècle (tableaux 9 et 10), ce qui représenterait une

Tableau 9. Émissions des centrales thermiques à charbon (millions de tonnes/an).

	1975	1985	2000
SO ₂	18,6	16,2	14,9
Particules solides	3,3	1,3	1,2
NO _x	4,1	6,2	7,9

Source : D.O.E.

Tableau 10. Émissions des centrales thermiques à charbon (% des émissions totales aux USA).

	1975	2000
SO ₂	63	48
NO _x	21	32
Particules solides	24	11

Source : D.O.E.

Pourtant, et cela est une indication de l'ampleur du problème, les producteurs d'électricité consacrent des budgets très sensiblement supérieurs aux autres industriels pour le contrôle de la pollution. En 1980, près de 10 % de leurs investissements étaient consacrés à ce secteur alors que la moyenne de l'industrie américaine dépensait à peine 3 %.

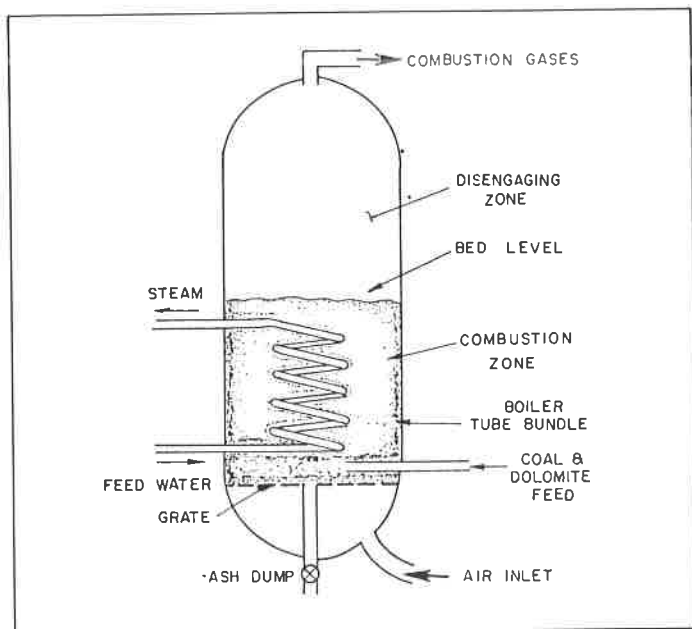
VI. Les techniques actuellement à l'étude

VI.1. La combustion en lit fluidisé

Le principe de la combustion en lit fluidisé, schématiquement représenté sur la figure 3, consiste à alimenter un réacteur avec une suspension de charbon en poudre mélangé à un solide incombustible dans un courant d'air ascensionnel. Cette technique, bien connue de l'industrie chimique qui y fait largement appel pour les réactions gaz-solides, a comparativement fait l'objet de beaucoup moins de travaux dans le domaine de la combustion. Depuis quelques années, son intérêt se précise, dans la mesure où l'utilisation d'un diluant réagissant avec les oxydes de soufre dans

les conditions physiques régnant au niveau du brûleur, permet de fixer ceux-ci par réaction chimique in situ. Dans le cas actuellement considéré, le solide incombustible est constitué par des carbonates alcalino-terreux naturels (calcaire ou dolomite) disponibles en grandes quantités et à faible coût. Les oxydes de soufre fournis se combinent pour donner des sulfates de calcium et de magnésium qui sont éliminés sous forme solide, en même temps que les cendres de charbon et l'excès de carbonate.

En théorie, cette technologie présente divers avantages. Elle permet de s'affranchir des dispositifs de désulfuration des gaz et, selon les



Source : Argonne National Lab.

Figure 3. Représentation schématique d'un réacteur à lit fluidisé.

estimations du D.O.E., serait globalement plus économique. Les impuretés soufrées sont éliminées sous forme d'une poudre solide d'une manutention plus aisée que les suspensions aqueuses les plus souvent utilisées dans les procédés de désulfuration. Par ailleurs, la combustion en présence d'un diluant s'effectuant à plus basse température, la production d'oxydes d'azote est très sensiblement réduite.

Divers problèmes restent cependant à résoudre au niveau de ce type de réacteur. La tenue à la corrosion des tubes échangeurs immergés dans le lit fluidisé est mal connue pour de longues durées de fonctionnement. Par ailleurs, ce procédé générerait des quantités énormes de résidus solides (700 000 t/an pour une unité de 1 000 MW), soit plus du double des masses de cendres habituelles, et le stockage impliquerait des surfaces considérables. Diverses études envisagent la régénération des sulfates avec production de soufre et réutilisation du carbonate. Pourtant, les travaux dans ce sens restent relativement peu avancés. Les recherches effectuées à l'Argonne National Laboratory indiquent que la qualité du produit se dégrade rapidement après quelques cycles.

En 1976, une première unité pilote de puissance significative (30 MW) pour la production d'électricité a été mise en service à Riversville (Virginie Occidentale) par la société Foster-Wheeler, en coopération avec le D.O.E. Une unité de démonstration de 200 MW

est en cours de développement. Parallèlement, plusieurs petites chaudières industrielles fonctionnent, par exemple à Georgetown University (Washington D.C.) ou à Great Lakes Novel Training Center (Chicago).

VI.1.1. Lit fluidisé sous pression

Une variante intéressante de cette technologie consisterait à effectuer la combustion en lit fluidisé sous pression. Les gaz chauds, après dépoussiérage, pourraient alimenter une turbine à gaz puis, ultérieurement, générer l'énergie nécessaire à l'alimentation d'une turbine à vapeur.

Le principal problème auquel se heurte cette technique est constitué par le dépoussiérage à haute température des gaz de combustion jusqu'à un niveau compatible avec les tolérances d'une turbine. Des filtres en céramique ou en métal sont envisagés dans ce but. Par ailleurs, des matériaux plus performants sont également étudiés pour la construction des rotors. Pourtant, cette technologie est actuellement mal connue et loin d'être maîtrisée.

La combustion en lits fluidisés semble plus adaptée aux chaudières industrielles de petite dimension qu'aux centrales thermiques. Cette technologie pourrait apparaître dans l'industrie dans les années 80. La mise en œuvre des lits fluidisés dans le secteur des centrales thermiques dépendra du développement des lits fluidisés sous pression. Ceci apparaît comme relevant du futur lointain. Des lits fluidisés sous pression utilisables commercialement ne sont pas prévus avant l'an 1995.

VI.2. Combustibles de synthèse et environnement

L'industrie des combustibles de synthèse est le premier grand secteur industriel qui se développe en tenant compte, outre des considérations techniques et économiques, des facteurs écologiques.

Tableau 11. Comparaison des pollutions produites par deux unités de capacité identique.

	Gazéification du charbon	Centrale thermique
Particules solides (kg/h)	80	485
SO ₂	200	1 950
NO _x	800	9 450
CO ₂	40	540
Hydrocarbures	15	160
Résidus solides (tonnes/jour)	1 400	5 100
Eau	6 300	54 300

Tableau 12. Pollutions associées à diverses technologies (normalisées à 50 000 barils d'équivalent pétrole par jour).

Type de technologie	Teneur en S du charbon (%)	Émissions atmosphériques (tonnes/jour)				CO ₂ milliers t/jour	Eau nécessaire
		SO _x	NO _x	CO ₂	H.C.		
Centrale thermique *	2,0	76	35	0	0	31	17
E.D.S.	4,0	17	5	1	0,5	14	8
S.R.C. II	3,5	7	10	2	1,5	14	6
Mobil M	0,45	12	7	—	—	21	12
Fisher Tropsch	0,45	12	7	—	—	21	11
Gazéification	0,60	35	16	—	—	29	9

* Avec absorbeur à SO₂.

D'après : D.O.E., Juin 1980.

A ce titre, ce domaine se différencie très nettement des autres grandes industries polluantes qui ont dû, ultérieurement, ajouter des dispositifs de dépollution ou modifier leurs procédés de fabrication pour satisfaire aux réglementations votées par le Congrès.

Pour la première fois, cet aspect d'une technologie nouvelle est largement étudié dès sa conception et a pris une importance considérable au cours de son développement.

Plutôt que de « distribuer » les impuretés avec le charbon jusqu'à l'utilisateur, celles-ci peuvent être éliminées en grande partie au niveau de l'usine de production du combustible liquide ou gazeux. Cette concentration des polluants en rendrait le contrôle plus aisé (tableaux 11 et 12).

Pour de multiples raisons cependant, quels que soient leurs avantages en matière d'environnement, la contribution des combustibles de synthèse à l'amélioration de ces problèmes restera modeste au cours du XX^e siècle. Ces technologies doivent être considérées plus comme porteuses d'espoir pour le siècle prochain que comme solution pour les 20 prochaines années.

VI.3. Les centrales à cycles combinés

En fait, de nombreuses centrales mettent aujourd'hui à profit cette technologie, mais toutes utilisent des combustibles d'origine pétrolière, et par conséquent restent dépendantes de l'approvisionnement en brut ou en gaz naturel.

Le principe des cycles combinés (figure 4) consiste à alimenter une turbine à gaz actionnant un alternateur avec les produits de combustion d'un carburant liquide ou gazeux. Dans ces conditions, environ 30 % de l'énergie initiale, l'énergie thermique des gaz d'échappement à une température comprise entre 500 et 600 °C, est ensuite utilisée pour produire de la vapeur qui alimente une turbine à vapeur avec un rendement de 15 à 18 %. En terme de rendement global, environ 40 % du contenu énergétique du combustible initial sont ainsi transformés en électricité. Cette techni-

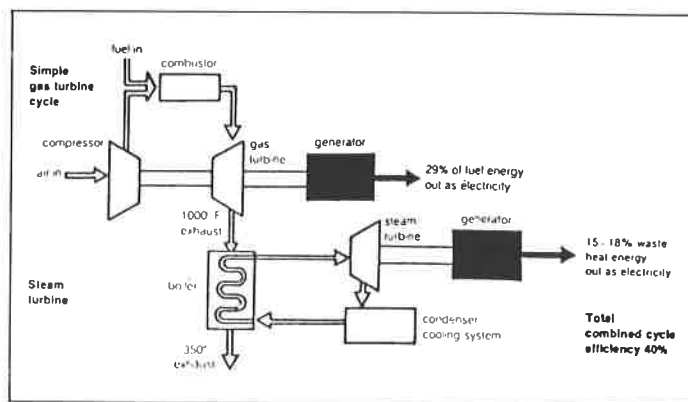


Figure 4.

que permet donc d'atteindre une efficacité de conversion sensiblement supérieure à celle qu'on peut attendre d'une centrale à charbon conventionnelle (35 % environ).

Le principe des cycles combinés est particulièrement intéressant dans le cadre des utilisations avancées du charbon dans deux cas précis. La mise au point de la combustion en lits fluidisés sous pression permet d'obtenir, à la sortie du brûleur, un gaz chaud sous une dizaine d'atmosphères qui, dans la mesure où il pourrait être dépoussiéré, alimenterait directement une turbine à gaz.

De la même manière, la production à partir du charbon de combustibles liquides ou gazeux de synthèse qui peuvent aisément se substituer au gaz naturel ou au fuel permet de mettre à profit aisément les avantages des cycles combinés. L'amélioration ainsi obtenue ne suffira probablement pas à compenser les pertes énergétiques associées à la conversion du charbon dont le rendement est estimé à 60 ou 70 % selon les procédés. Elle représente cependant, ajoutée aux autres considérations en matière de pollution, un élément important pour le développement de ces techniques.

VII. Les conséquences atmosphériques

VII.1. Les pluies acides

Le problème des pluies acides, largement discuté depuis quelques années aux États-Unis, a fait l'objet de vigoureuses attaques de la part des groupes de protection de l'environnement. Particulièrement aigu dans la région des Grands Lacs, il a pris une dimension internationale lorsque les responsables gouvernementaux canadiens se sont inquiétés des conséquences de cette pollution qu'ils disent venir des grands centres industriels américains et qu'ils considèrent maintenant comme un holocauste écologique.

Les pluies sont naturellement acides, et leur pH normal est de 5,65. Des observations, effectuées tant aux États-Unis qu'au Canada, montrent des pH bien inférieurs; en particulier l'Est et la région des Grands Lacs semblent les plus touchés (voir figure 5).

En fait, le phénomène est très complexe et mal compris; schématiquement, on pense qu'il serait la conséquence d'une suite de réactions au niveau des oxydes de soufre et d'azote. Ceux-ci réagissent sur le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) présent en quantité suffisante dans les nuages pour former des acides sulfurique et nitrique.

Les émissions de SO_x, qui proviennent à 61,9 % de la combustion du charbon, sont, semble-t-il, considérées comme les précurseurs de l'acide sulfurique, mais aucune quantification n'a jusqu'à ce jour été établie.

Il semble que l'action de certains catalyseurs comme le vanadium et le manganèse, qui sont émis à l'état de trace par les centrales thermiques, devrait être prise en considération dans cette formation.

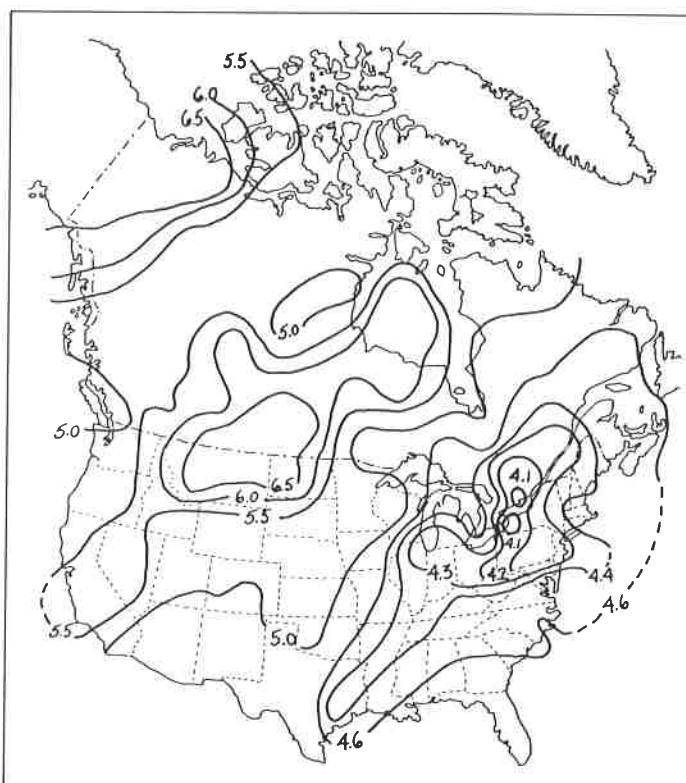


Figure 5.

Environ 35.10⁶ tonnes de SO_x sont rejetées naturellement dans l'atmosphère lors des décompositions bactériennes de composés organiques. Quant au NO_x, la masse se situerait entre 40.10⁶ tonnes et 108.10⁶ tonnes. Comme nous l'avons vu (tableau 5), les émissions des centrales américaines seraient donc significatives mais ne devraient pas être considérées comme l'unique source de rejet. Il faut cependant noter qu'une certaine concentration géographique des émissions correspond aux zones les plus touchées. Les 26 États à l'Est du Mississippi interviennent pour 71 % du rejet total de SO_x, l'Ohio ayant le triste privilège d'avoir le record d'émission avec 3,26 millions de tonnes par an.

Après l'émission au niveau des centrales, la dispersion s'accompagne souvent d'une transformation chimique. L'agent polluant peut être neutralisé ou au contraire réagir et former une molécule acide ou basique. D'après les Canadiens, et grâce à des observations sur plusieurs années, 50 % de leurs pluies acides proviendraient de la vallée de l'Ohio. On peut toutefois préciser que cette valeur devrait être revue, car on s'accorde à penser que les dépôts secs sont égaux à ceux véhiculés par la pluie.

Le Congrès s'est bien entendu saisi de la question. D'après l'Office of Technology Assessment, il coûtera au contribuable américain \$ 3,3 à \$ 3,5 milliards pour atteindre, d'ici 1995, le but fixé par le nouveau « Clean Air Act » (pas encore voté), c'est-à-dire une réduction de 50 % des émissions.

L'Administration Carter avait imposé à la Cleveland Electric Illuminating une réduction des rejets émis par ses nouvelles centrales d'East Lake et Avon Lake. En fait, la C.E.I., au lieu de s'alimenter en charbon riche en soufre de l'Ohio, s'était tournée vers le Kentucky et la Virginie de l'Ouest où les charbons sont peu soufrés.

Des milliers de mineurs du Middle West furent ainsi mis à pied; l'emploi d'épurateurs fut envisagé mais leur installation aurait entraîné une augmentation moyenne de \$ 4/mois par foyer. Malgré la protestation des responsables d'États mitoyens, le Président Carter, à la veille des élections, annonça un relâchement des normes pour ces deux centrales.

Un rapport du Council of Environmental Quality, publié sous l'Administration Carter, estimait à \$ 2,2 milliards les dommages entraînés par les pluies acides au niveau des habitations et des matériaux. Le dernier rapport du C.E.Q., publié après l'accession au pouvoir du Président Reagan, est beaucoup plus prudent. Aucune évaluation n'est faite. En revanche, il est précisé que l'« Administration n'ignore pas le problème et est décidée à accroître et accélérer l'effort de recherche sur les pluies acides pour déterminer leurs causes, leurs effets et trouver des solutions ».

Battelle, le Stanford Research Institute et l'Argonne National Laboratory développent trois programmes afin de prévoir et d'étudier, à l'échelle régionale, les oxydes de soufre émis par les centrales. Cette modélisation permettra peut-être de comprendre un phénomène qui jusqu'à présent a été constaté mais qui demeure mal compris.

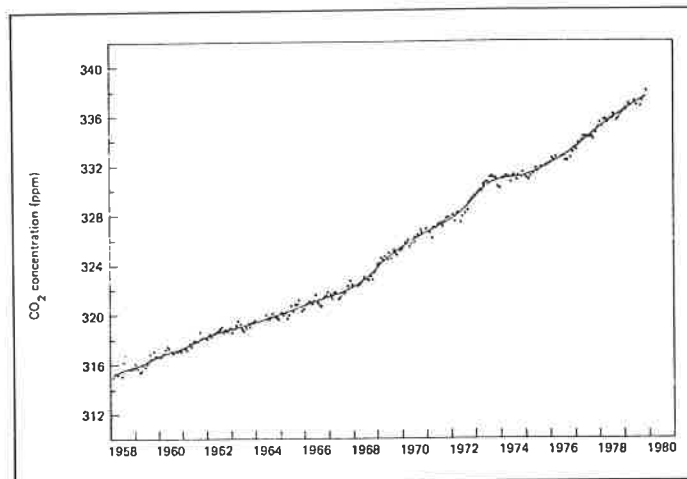
Le Canada souhaite donc que les États-Unis reconnaissent qu'ils doivent prendre en considération le point de vue de leur voisin du Nord et ne plus considérer que les problèmes de l'environnement sont négligeables par rapport aux intérêts économiques. Quant à l'Administration Reagan, elle souhaite comprendre le phénomène avant de réglementer. Le Clean Air Act (1983) sera-t-il voté et les 50 % de réduction des émissions pourront-ils être atteints ?

Ce problème est devenu politique entre les États-Unis et le Canada. Les études et estimations sont souvent contradictoires, les impacts sur les végétaux varient suivant les espèces. Certains rendements sont réduits, d'autres croissent comme pour le soja par exemple. Quant au sol, il semble peu affecté du fait de son pouvoir tampon.

On peut toujours arguer que les pluies acides n'ont jamais tué personne alors que l'exploitation du charbon cause tous les ans des centaines de morts et qu'un effort de sécurité serait nécessaire au niveau des mines et du transport. Il n'en reste pas moins qu'elles présentent à moyen et long termes un danger pour les biotopes à équilibre fragile.

VII.2. Le problème du CO₂

Le gaz carbonique (CO₂) est une molécule essentielle de l'atmosphère terrestre: en effet, lors de la photosynthèse, elle est décomposée à la lumière par les plantes vertes en carbone (C) qui est ainsi assimilé et en oxygène (O₂) qui est rejeté dans l'atmosphère. Avant la révolution industrielle (1800), la concentration de CO₂ était d'environ 290 ppm. Depuis cette date, l'augmentation est estimée entre 15 et 25 %, avec un accroissement de 7 % entre 1958 et 1979.

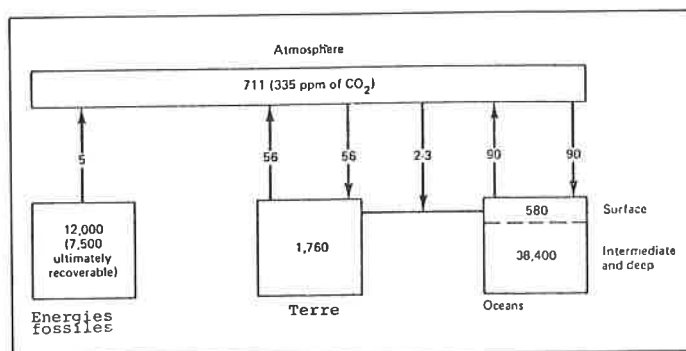


Source : C.D. Keeling and co-workers, Scripps Institution of Oceanography.

Figure 6. Variation de la concentration en CO₂.

Le carbone est réparti entre 4 réservoirs : l'atmosphère, les océans, la biosphère et les énergies fossiles. Les échanges sont complexes mais on considère que la combustion des énergies fossiles est la principale cause de l'accroissement du taux de CO₂; on évalue qu'en 2075, la concentration dans l'atmosphère aura doublé par rapport à l'ère pré-industrielle.

En fait, comme on le voit sur la figure 7, l'utilisation des énergies fossiles est responsable d'un excédent de rejet qui peut être évalué entre 2 à 3.10⁹ tonnes par an. L'Académie des Sciences a conclu que l'effet de serre sera le principal problème; si les estimations sont confirmées, on devrait avoir, d'ici la fin du XXI^e siècle, une augmentation de la température à la surface de la terre située entre 1,5 et 1 °C. Le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de Princeton University avance, quant à lui, une augmentation de + 2 °C.



Réservoirs en 10⁹ tonnes. Flux en 10⁹ tonnes/an.

Source : World Meteorological Organization, « Report of the Scientific Workshop on Atmospheric Carbon Dioxide ». Washington, D.C., November 28 - December 3, 1976, Report No.474 (Geneva, 1977), reprinted with permission.

Figure 7. Échange entre les divers réservoirs à carbone.

En fait, au niveau de l'équateur, l'accroissement ne devrait être que de quelques dixièmes de degré. Au contraire au niveau du Pôle Nord, on pourrait avoir en hiver une amplitude située entre + 7 à + 10 °C par rapport aux observations actuelles. Si ces différences géographiques se produisent, des courants et surtout le déplacement des fronts seraient très affectés sans qu'on puisse à l'heure actuelle en prévoir les conséquences. Une modélisation serait donc nécessaire, mais on est encore bien loin de maîtriser mathématiquement les variables et il faudrait, lors d'études, prendre en considération l'évolution des autres gaz comme l'ozone et les composés chlorofluorés.

L'augmentation de la température entraînera une pluviosité accrue dans certaines régions. Voici 4000 ans, le réchauffement de 1 à 3 °C à la surface de la terre a eu des conséquences climatiques très importantes. Le Sahara, l'Inde du Sud et la Chine sont devenus alors

des zones tempérées; en revanche, les États-Unis ont connu une vague de sécheresse. Que deviendrait le Middle West si l'on allait vers un climat semi-aride? Quant à la Floride, elle serait presque totalement immergée par l'élévation de 8 m du niveau de la mer.

Une reforestation et une mise en culture de zones désertiques pourraient réduire le CO₂ atmosphérique. Enfin, certains climatologues pensent que la terre va vers une période de refroidissement; l'augmentation du CO₂ entraînerait un effet de serre qui compenserait le précédent.

A la 8^e session de l'United Nations Environment Program, il a été décidé que ce problème devrait être considéré comme une des priorités et que des recherches devraient être effectuées pour comprendre le phénomène et déterminer si la combustion des énergies fossiles en était bien la cause.

VIII. Conclusions

L'analyse des contraintes liées à l'utilisation du charbon montre que les problèmes à surmonter sont sérieux. Pourtant, on constate que l'attention est concentrée sur les aspects les plus spectaculaires et les moins bien connus de la pollution, et, paradoxalement, beaucoup moins sur certains problèmes anciens et particulièrement graves. On parle beaucoup aux États-Unis des pluies acides, mais les accidents au

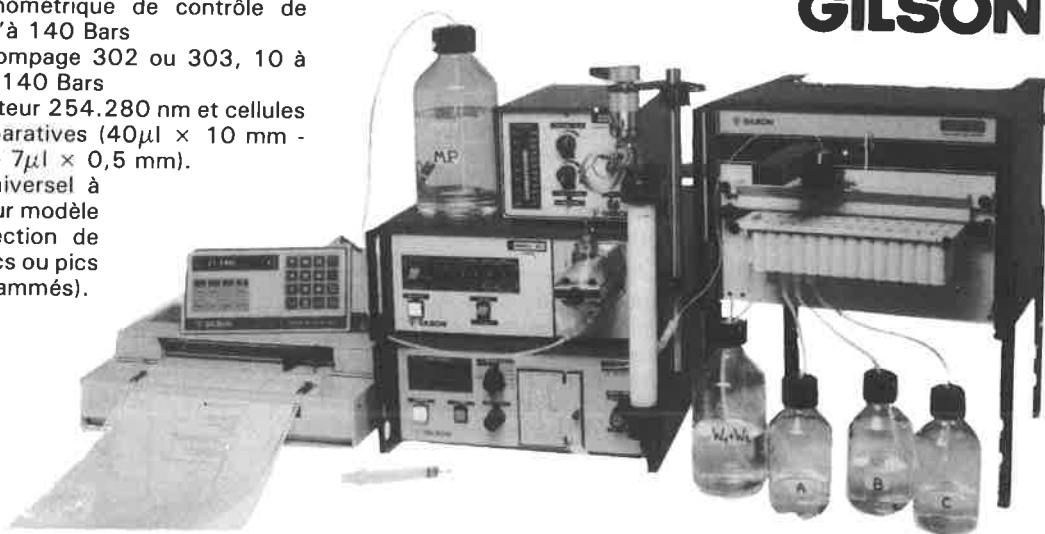
niveau de l'extraction ou du transport, qui sont responsables de plusieurs centaines de morts chaque année, sont en comparaison peu discutés. Certains observateurs indiquent qu'il leur paraîtrait plus logique et plus efficace, au moins à court terme, d'améliorer le réseau ferroviaire pour en augmenter la sécurité que de concentrer les efforts sur des phénomènes dont les effets néfastes sont moins quantifiés.

CHROMATOGRAPHIE LIQUIDE SEMI PREP. OU PREPARATIVE DE ROUTINE

• Ensemble isocratique GILSON

- 1 module manométrique de contrôle de pressions jusqu'à 140 Bars
- 1 module de pompage 302 ou 303, 10 à 100 ml/mn - 0-140 Bars
- 1 module détecteur 254.280 nm et cellules de mesure préparatives (40µl × 10 mm - 10µl × 2 mm - 7µl × 0,5 mm).
- 1 collecteur universel à micro-processeur modèle 201 pour collection de pics (tous les pics ou pics choisis et programmés).

Ensemble pour l'isocratique préparative.



GILSON

GILSON France un constructeur français à votre service

72, rue Gambetta 95400 VILLIERS LE BEL Tél: (3) 990-54-41