CANADA

DEPARTMENT OF ENERGY, MINES AND RESOURCES

MINES BRANCH

OTTAWA

AIR POLLUTION: CAUSES AND CONTROL

by

H. Whaley, F. D. Friedrich, G. K. Lee and E. R. Mitchell
Canadian Combustion Research Laboratory
Fuels Research Centre

November 1968

Information Circular IC 211

FOREWORD

Economic prosperity is inexorably tied to flourishing industries. It is also true that industry looks for the cheapest source of power, which frequently involves the combustion of fuels of low quality, resulting in atmospheric pollution. The conversion of these fuels to useful heat energy in thermal power plants and the associated pollution problems have been the object of study by the Fuels Research Centre of the Mines Branch to determine how combustion source pollution can be minimized and how ambient air may be protected from nuisance levels of pollution.

It is hoped that the continuing research in this area will provide a basis for remedial action, and that this and future contributions will be welcomed by other research agencies concerned with this problem, as well as by the various regulatory bodies. Hopefully, in time, this may lead to a better understanding of air-resource management.

John Convey,
Director,
Mines Branch.

November 1968

Mines Branch Information Circular IC 211

AIR POLLUTION: CAUSES AND CONTROL

by

H. Whaley*, F. D. Friedrich**, G. K. Lee*
and E. R. Mitchell***

ABSTRACT

The Mines Branch is engaged in a dual program of controlling combustion-source air pollution. The first is an extensive combustion research program in which pollutant formation in flames is minimized and followed by the chemical neutralization, so far as possible, of suphur dioxide (SO_2), sulphur trioxide (SO_3), nitrogen oxides (NO_x), and acid soot. The effectiveness of efficient combustion and an additive for residual fuel oil are described. The second program is one of controlling ground-level concentrations of combustion gases by recommending the chimney height necessary for adequate dispersion. To do this, an empirical plume-rise equation was developed as a sound basis for the CCRL (Canadian Combustion Research Laboratory) dispersion standard which is discussed and presented in graphical form.

*Research Scientist, **Senior Scientific Officer, and ***Head, Canadian Combustion Research Laboratory, Fuels Research Centre, Mines Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

CONTENTS

Page

Foreword i

Abstract ii

Introduction 1

The Air Pollution Situation 2

Principal Combustion-Source Pollutants 2

SO_2 Removal from Combustion Gases. 4

Particulate Matter Removal 4

CCRL Air Pollution Control Program 5

Emission Prevention 5

(a) Efficient Combustion
(b) Control of Residual Oil Combustion Pollution by an Additive
(c) Control of Industrial Coal Pollutants

Dispersion of Combustion Gases and Particulate Matter. . . 7

(a) The Scope
(b) Effectiveness of Dispersion
(c) CCRL-2 Dust-Collector and Chimney-Height Standards

Application of the CCRL Design Method. 12

Acknowledgements 14

References 14

Figures 1-7. 15-25

TABLES

No.		Page
1.	Emission of Pollutants from Combustion Processes in Canada	3
2.	Oxides of Sulphur and Nitrogen from Combustion of No. 6 Fuel Oil Containing 2.5% Sulphur in CCRL Research Boiler at 15 psig Steam Pressure	6
3.	Oxides of Sulphur and Nitrogen from Combustion of Minto Coal Containing 7% Sulphur in CCRL Research Boiler at 15 psig Steam Pressure	8

FIGURES

1. The physical model of a hot gas plume 15
2. Empirical derivation of the CCRL-2 plume rise equation 16
3. Schematic variation of axial concentration with distance and wind speed 17
4. CCRL standard for estimating stack height and dust collector efficiency - severe atmosphere inversion 19
5. CCRL standard for estimating stack height - gaseous emission, severe atmospheric inversion 21
6. CCRL standard for estimating stack height and dust collector efficiency - neutral atmosphere 23
7. CCRL standard for estimating stack height - gaseous emission - neutral atmosphere 25

ooo

INTRODUCTION

Air pollution has been described as the most important scientific subject of the century (1). It is a subject on which we lack precise knowledge on monitoring methods, tolerance levels and means of control. This has resulted in confusion and timidity in legislating control measures. Thus, as industry and population rapidly concentrated in industrialized countries the full force of air pollution struck with alarming suddenness.

Polluted air flows readily across municipal, provincial and even international boundaries. Effective control requires the co-operation of many jurisdictions. With a growing urban population and rapid industrial expansion in Canada there has been a dramatic increase in the demand upon the air resource for dispersion of wastes. In some locations familiar symptoms of the pollution malady have started to appear, but even so there is widespread apathy and a refusal to believe that what has happened in the United States and other industrialized countries could happen here. While this may be largely true, the authors believe that the possibility of the development of a serious pollution situation can be prevented by proper attention to chimney-height selection to ensure adequate dispersion, in any locations, whether industrialized or not.

THE AIR POLLUTION SITUATION

Principal Combustion-Source Pollutants

Although garbage incineration and forest fires are dramatic examples of air pollution, the combustion of conventional fuels provides the largest single source of air pollution in Canada. To burn 1 lb of fuel about 14 lb of air are needed and some 15 lb of combustion gases pass to the atmosphere. The largest part of this (76% by weight) is nitrogen, which is inert and recirculates. Carbon dioxide comprises some 22% by weight and, with luck, it is transformed by vegetation through photosynthesis into oxygen. The remainder, amounting to as much as 0.3 lb/lb of fuel, includes CO, oxides of sulphur, oxides of nitrogen and hydrocarbons - all of which are harmful pollutants in concentrations well below 1%. Furthermore, a considerable quantity of particulate matter may be emitted, which is extremely harmful when saturated with condensed acid.

To understand both the magnitude of our overall pollution problem and the share attributable to the various fuels, some calculations were made on the basis of broad but realistic assumptions to arrive at the data given in Table 1. This table permits some interesting comparisons but particular attention is directed to the large amounts of SO_2, SO_3 and particulate matter (including acid soot) produced by industry and the large amounts of CO, NO_2 and particulate matter produced by automobile gasoline engines. It is the SO_2, SO_3 and acid soot that trouble most people, animals and vegetation, but CO and NO_2 are also the source of many problems especially when discharged at ground level as by automobiles.

Pollution from gasoline engines is under intensive study and improvements and innovations to reduce emission are being promised. Pollution from industrial fuels also is under intensive study but serious problems, both economic and technical, must be solved before pure air can be universally achieved. While proceeding with the research program described later, the Canadian Combustion Research Laboratory (CCRL) has kept abreast of the costly research on processes to remove SO_2 and particulate matter from combustion gases. Nor has the possibility of removing sulphur from fuels before they are

TABLE 1

Emission of Pollutants from Combustion Processes in Canada

(Based on 1966 Fuel Consumption Statistics)

Preliminary Calculations

Fuel	CO_2 lb x 10^{10}	NO_2 lb x 10^6	CO lb x 10^6	Particulates lb x 10^6	SO_2 lb x 10^6	SO_3 lb x 10^6
Domestic Fuels						
Natural gas	2.336	11.96	14.01	-	-	-
Furnace oil	7.58	94.9	38.4	60.02	329.5	8.41
Stove oil	0.554	6.95	1.835	4.40	10.35	0.164
Sub-totals	10.5	113.8	54.2	64.4	339.4	8.6
Total		105,000 x 10^6				
Commercial Fuels						
Natural gas	1.385	7.10	8.31	-	-	-
Stove oil	0.554	6.95	1.835	4.40	10.35	0.164
Diesel fuel	3.61	45.2	18.25	28.56	134.4	3.43
Motor gasoline	9.86	1176.	7180.	968.	21.32	-
Can. Bit. Coal	0.2284	2.37	0.964	39.3	14.0	0.35
Can. Sub-bit. Coal	0.1155	1.138	0.462	18.8	4.84	0.121
Can. lignite	0.03875	0.378	0.1536	6.085	2.062	0.0516
Imported anthracite	0.0923	0.876	0.3555	13.83	2.07	0.05175
Imported Bit. Coal	0.4465	4.61	1.872	75.8	17.38	0.435
Sub-totals	16.3	1244	7212	1155	206.4	4.6
Total		173,000 x 10^6				
Industrial Fuels						
Natural gas	3.89	19.92	23.3	-	-	-
Heavy fuel oil	10.35	124.1	50.4	82.25	1612.	41.11
Can. Bit. Coal	2.37	24.58	9.99	641.	145.3	3.632
Can. Sub-bit. Coal	0.646	6.365	2.582	165.5	27.1	0.6775
Can. Lignite	0.5105	4.98	2.023	126.0	27.18	0.6795
Imported anthracite	0.1901	1.805	0.733	44.8	4.27	0.1067
Imported Bit. Coal	7.835	81.0	32.82	2088.	305.	7.63
Sub-totals	25.8	262.8	121.8	3147	2120.9	53.8
Total		264,000 x 10^6				
Grand Total:		542,000 x 10^6				
% from Domestic Fuels:		19.42				
% from Commercial Fuels:		31.94	(% from Gasoline Engine 19.99%)			
% from Industrial Fuels:		48.64				

burned been overlooked, but this approach is only a partial solution because, as shown in Table 1, there are large volumes of other pollutants for dispersion in the atmosphere, as well as small amounts of polycyclic aromatic hydrocarbons that are carcinogenic irritants.

SO_2 Removal from Combustion Gases

The removal of small quantities of SO_2 from vast quantities of combustion gases constitutes the most serious problem in air-pollution control. Nonetheless, research throughout the world has progressed to the first generation of pilot plants. In the United States the Bureau of Mines operates an alkalyzed alumina pilot plant that recovers elemental sulphur. Another, in which the Monsanto Chemical Company has a major interest, catalyzes SO_2 to SO_3 and produces sulphuric acid at the Seward Power Station in Pennsylvania. The Wellman-Lord recovery process has been advertised but details of its cycle have been kept secret. A German Reinluft process uses a fixed adsorbent bed of activated char and the final product is sulphuric acid. A number of scrubbing and recovery plants of considerable technical interest have also been built in Britain and Japan.

Even if these processes prove to be technically perfect, their high cost remains a barrier even for utilities and heavy industry, hence the erection of full-scale plants may be slow in coming. Thus, it is expected that huge quantities of SO_2 will continue to be poured into the atmosphere at an increasing rate and our present hope for acceptable ambient air lies in the adequate dispersion of combustion gases by means of properly designed chimneys.

Particulate Matter Removal

The science of electrostatic precipitation is well advanced and proprietary equipment can be supplied for practically any coal fly ash. Furthermore, respirable dusts below 0.5 μ may be collected by commercial bag filters and water scrubbers. Thus, with one notable exception, means exist to collect any particulate matter. The exception is oily carbon soot. However, work at the CCRL has shown that this problem can be solved through the use of an additive, as will be described later.

CCRL AIR POLLUTION CONTROL PROGRAM

Emission Prevention

(a) Efficient Combustion

The first step in air pollution control is to provide efficient combustion, and in this way eliminate or minimize the formation of pollutants such as carbon monoxide, unburned hydrocarbons and carbon soot. The CCRL is now designing a tunnel furnace to facilitate research on flame aerodynamics as a key to efficient combustion. However, combustion of residual oil will still produce large amounts of SO_2, NO_2 possibly SO_3 and acid soot, while the combustion of coal, depending on its origin, will still produce large quantities of particulate matter, and possibly SO_2 and SO_3. These must be controlled by other means.

(b) Control of Residual Oil Combustion Pollution by an Additive

In a research program, initiated for the purpose of elucidating the mechanism of oil-ash deposition, a magnesia/alumina fuel oil additive was developed to control slagging of superheater tubes (2). During the past two years this program was extended to study the effectiveness of the additive in chemically neutralizing SO_3, NO_2 and SO_2. Results have been good, and the additive's effectiveness has been widely acclaimed where it has been applied to large utility steam generators in the United States and to small heating boilers in Canada. In quantitative terms, the data in Table 2 show that, in the CCRL research boiler, the additive was effective in chemically neutralizing from 13 to 30% of the oxides of nitrogen, 71 to 80% of free SO_3 in the gas stream, and up to 100% of the acid condensed on boiler surfaces and in carbon soot.

Particulate matter such as carbon soot is wet and gummy when it contains sulphuric acid. However, neutralizing the acid with additive results in a dry powder having increased electrical resistivity. This means that the particulate matter can be collected in electrostatic precipitators at a reasonably high efficiency. Thus, the additive not only renders corrosive acids harmless, it also makes it possible to collect soot from residual oil

TABLE 2

Oxides of Sulphur and Nitrogen from Combustion of No. 6 Fuel Oil Containing 2.5% Sulphur in CCRL Research Boiler at 15 psig Steam Pressure

(Data for 5% O_2 in flue gases and not to be extrapolated to other conditions)

Fuel Oil	Firing Rate	Heat Release Rate, Btu/cu ft/hr	Nitrogen Oxides		Free SO_3 in Gas Stream		SO_3 in Particulate Matter and Deposits*	
			Measured, ppm by vol	Neutralized by Additive, %	Measured, ppm by vol	Neutralized by Additive, %	Equivalent, ppm by vol	Neutralized by Additive, %
Untreated	Normal	49,700	258	0	10.4	0	19	0
	High	66,250	260	0	16.1	0	27	0
1/1500 treated	Normal	49,700	181	30	3.0	71	26	100
	High	66,250	227	13	3.2	80	39	67

*(a) Particulate matter and deposits from untreated oil are mixtures of free, corrosive SO_3 and carbon soot.

(b) Particulate matter and deposits from 1/1500 treated oil are mixtures of totally neutralized sulphate (in the form of magnesium sulphate), untreated additive and carbon soot.

Remarks: To summarize, the additive reduces NO_x and SO_3 in the gas stream and neutralizes SO_3 in particulate matter and deposits.

flames and ensures that whatever soot escapes to the atmosphere is chemically neutral.

(c) Control of Industrial Coal Pollutants

Work on coal additives has not been as rewarding as that on residual oil but, in the CCRL studies, it has been established that there are cations in the natural ash of many coals which serve as built-in additives (3). As shown in Table 3, the cations of a particular coal ash neutralized 74% of the SO_3 adsorbed by fly ash and ash deposits, leaving 26% or 167 ppm unreacted. To add additional inert additive material (ash) to accomplish complete neutralization of adsorbed SO_3 is not economically attractive in most cases. Therefore, good dust collectors combined with adequate dispersion seem to be the logical means of pollution control.

Dispersion of Combustion Gases and Particulate Matter

(a) The Scope

In the foregoing, brief reference has been made to the extent to which pollution can be minimized through good combustion practices, by the use of a fuel-oil additive and by the natural ash of coal. However, it appears that until an economic means is found for removing SO_2 in dilute concentrations it will be necessary to provide adequate dispersion of gaseous plumes from both industrial and commercial fuel-fired plants.

(b) Effectiveness of Dispersion

The concept that a stack merely transfers a given pollution problem from one area to another is quite wrong. While it is true that the point of maximum concentration may be displaced as the stack height increases, it is a fact that the magnitude of ground level concentrations decreases everywhere as stack height increases. This has been proven in Britain where pollution has been abated by higher stacks (4). The trend to higher stacks is becoming evident in the United States where, as an example, the Mitchell Power Station will have a 1200-ft stack for 1600-MW capacity. After minimizing pollutants at the source the problem becomes one of selecting the correct dust-collector

TABLE 3

Oxides of Sulphur and Nitrogen from Combustion of Minto Coal

Containing 7% Sulphur in CCRL Research Boiler at 15 psig Steam Pressure

(Data for 5% O_2 and not to be extrapolated to other conditions)

Firing Rate	Btu Heat Release Rate, Btu/cu ft/hr	Nitrogen Oxides	SO_2		Free SO_3 in Gas Stream	SO_3 in Particulate Matter and Deposits	
		Measured ppm by vol	Theoretical ppm by vol	Measured ppm by vol	Measured ppm by vol	Equivalent ppm by vol	Potential Neutralization by Cations in Ash, %
Normal	50,000	420	5843	5201	52	590	74

efficiency for a given fuel and the height of stack required to sufficiently disperse the combustion gases so that statutory quality standards for ambient air at ground level are met.

(c) CCRL-2 Dust-Collector and Chimney-Height Standards

The CSA Air Pollution Control Committee, under the chairmanship of W. B. Drowley, assigned to E. R. Mitchell the task of developing a control standard for particulate-matter emission that would incorporate the principal parameters of plume buoyancy and efflux velocity, chimney height, critical wind velocity and critical meteorological conditions.

A working sub-committee was called together following which the senior author of this paper undertook an exhaustive study of the available literature on the elevation and dispersion of atmospheric pollutants contained in hot chimney effluents. It was intended that the knowledge and factual information gained from this study would provide the basis for a graphical method of estimating stack height which would be easy to use and flexible in application. Cognizance had been taken of standards in use in Europe and the United States and it was felt by the sub-committee that a design standard more applicable to Canadian conditions was required. Therefore, it was undertaken to relate the emission of the particulate and gaseous pollutants contained in hot chimney plumes to the ambient levels produced, in order that statutory pollution concentrations be not exceeded (5).

It is useful at this point to consider the physical nature of plume elevation and dispersion. Figure 1 shows that the plume, although it starts to disperse as soon as it enters the atmosphere, can be split into two main stages. Initially, due to buoyancy and momentum, the plume rises to a certain height above the stack, defined as the plume rise, and then it disperses from this height, eventually falling back to the ground in the process, sometimes resulting in objectionable levels of dust or gaseous pollutants. The physical processes of plume rise and dispersion are extremely complex, involving factors described by many interrelated yet highly specialized subjects such as meteorology and climatology, orography and topography, natural aerodynamics and the relative motion between particles and gases, heat transfer by convection,

radiation and diffusion, to name a few. Consequently, the number of variables which can be brought to bear on any theoretical or empirical approach to the problem are enormous. In the literature on this subject, the neglect of influential parameters or the simplifying assumptions made in theoretical treatments has resulted in a large scatter in virtually every theoretical or empirical correlation. Therefore it is extremely difficult to obtain sufficiently precise information that would enable a designer to calculate a stack height so that any stipulated ambient-pollution level would never be exceeded.

It is logical to suppose that in a complex subject which has this degree of uncertainty, safety factors would be applied to reduce the incidence of failure to meet specified conditions. It is surprising to find that nearly all atmospheric pollution regulations in various parts of the world specify maximum allowable concentrations in a neutral atmosphere. A neutral atmosphere, which seldom occurs in practice, ranges between stable conditions on the one hand, and turbulent or inversion conditions on the other. Consequently, both control authorities and industry realize that their allowable concentrations will be often exceeded. The condoning of this situation is an invitation to pollution of the ambient air, the consequences of which have become so distasteful to most people that a reasonable factor of safety should be incorporated into both ambient regulations and design methods. It is for this reason that when applying diffusion equations in the CCRL design standard an adverse meteorological condition, that of an inversion, was chosen. It is hoped that air-pollution authorities, as well as stipulating ambient levels of pollution concentration for neutral conditions, will apply similar regulations for inversion conditions.

It is indicated from available information that plume rise can be predicted within a factor of two. However, the secondary stage of dispersion from an elevated source has been the subject of much research and suffers less from the wide scatter of experimental data than does the primary stage of plume rise. It follows that the accuracy of any predicted concentration can only be within the cumulative experimental error of these two stages.

The number of measurements of plume rise is large enough to be

reliable despite the scatter, but it has not been satisfactorily correlated in a simple manner that is useful for a design standard. A correlation of plume rise data was attempted using the major parameters of heat emission from the stack and wind velocity while keeping in mind that neglect of other parameters could cause a large deviation. This correlation, identified as CCRL-2, is after the form of Lucas and is shown in Figure 2 (6). From this figure it can be seen that the experimental scatter is appreciable and it is possible to have a plume rising between 5 and 50 m above a stack of constant heat emission in a 5 m/sec wind. This plume rise variation would make an appreciable difference in the actual concentration levels downstream from the stack. Thus the argument for an inbuilt safety factor by designing for inversion conditions becomes obvious.

It is proposed that the CCRL-2 plume-rise equation together with the Pasquill diffusion equations (7) modified for inversion conditions be used to predict maximum ground-level concentrations downwind from stacks. For this purpose a number of simplifications can be made which considerably reduce the complexity of the equations. The diffusion equations derived by Pasquill were simplified by assuming flat terrain and classical atmospheric inversion conditions. These assumptions are reasonable since unusual topographical features merit individual attention and deviations from an idealized inversion condition will result in lower than predicted concentrations. It should be pointed out here that deviations from a neutral atmosphere will cause lower or higher concentrations depending whether the atmosphere becomes more or less stable respectively.

Mathematical simplification of the combined plume-rise and dispersion equations may be effected by selecting for the graphical design method the overall maximum concentrations with respect to both wind speed and axial distance downwind from the stack. The variations of concentration with these two interrelated parameters are given in Figure 3 which shows schematically the variation of axial concentration with distance downwind and wind velocity from which a simple mathematical procedure establishes the overall maximum concentration expected from a proposed stack. Figures 4 and 5 for particulates and gases are the authors' recommended design graphs based on atmospheric inversions since these have the most adverse effect on pollution levels. Using

these graphs it is possible to select a stack height so that any stipulated gaseous or particulate pollution levels will not be exceeded in any atmospheric condition. At the present time it is necessary to differentiate between gaseous and particulate design standards, because it is impractical to obtain a reliable sample of particulates in a 3-min period which is adequate for gases. It has been shown that the gaseous diffusion laws may be applied to small particulates (< 60μ) in which the settling velocity may be neglected (5). Since these laws are based on a 3-min sampling period which is only practical for gases, Figure 4 differs from Figure 5 in that it incorporates an experimentally substantiated concentration decay with sampling time. In selecting a stack height to meet both particulate and gaseous ambient pollution levels, common sense dictates that the highest value obtained from the two estimations must be chosen to avoid the risk of pollution.

It may be some time before control authorities are prepared to enforce pollution limits under atmospheric inversion conditions; so, as an interim measure, it was decided to include design graphs for a neutral atmosphere to meet the statutes widely enforced at the present time. These are given in Figures 6 and 7 for particulates and gases with the authors' advice to designers that, before using these graphs, they should take the precaution of ensuring that it is feasible to design a stack for a neutral atmosphere in any specific location.

Application of the CCRL Design Method

To give an example, consider an existing stack of height 150 m which emits dust from a coal of 14% ash content when the firing rate is 100 kg/sec (comparable to 1000 MW plant). If the present collection efficiency of the dust is 98% it can be calculated that if all other dust escapes this will represent 0.28 kg/sec. If the heat emission from the stack is 3.5×10^4 kcal/sec, using Figure 4 it is found that E/C'_{omax} is 2.33×10^{-3}. This gives C'_{omax} as 120 $\mu g/nm^3$ (30 min inversion), which is high by present standards. In order to bring the concentration down to a more acceptable level it would be necessary to either increase the stack height, increase the dust-collector efficiency, or reduce the ash content of coal being used.

In order to select a stack height, knowing the size of plant and type of fuel and whether dust or sulphur dioxide is likely to be the major offender, the procedure is given in the following example.

It is required to design a stack and collection equipment for an intended 500-MW coal-fired plant burning 50 kg/sec of 10% ash fuel. The stack heat emission will be 2×10^4 kcal/sec. The information which will be useful to make a cost optimization analysis between expensive dust-collection equipment and high stacks, is the relationship of collection efficiency to stack height. The standard may be used to obtain this information.

Suppose the design ambient dust level is 50 $\mu g/nm^3$ (30 mins, inversion) and initially no collection equipment is intended. This would result in all the ash being emitted to the atmosphere at a rate of 5 kg/sec. The parameter E/C'_{omax} can be calculated to be 5/50 = 0.1. It can be seen from Figure 4 that this falls outside the range of conditions expected and in fact the stack would have to be 7400 m high. Obviously this is a ridiculous extreme. Now consider the case with 90% collection efficiency installed. E/C'_{omax} becomes 0.5/50 = 0.01 and the stack height is 740 m. Similarly, with equipment of 99% efficiency the height is reduced another order of magnitude to 74 m. The same procedure may also be applied to design for emission and ambient levels of SO_2. Knowing the cost-efficiency data for collector equipment and the cost of additional stack height it is possible to find the most efficient and economical combination.

The above examples using Figure 4 are all applicable to particulate pollution during inversions but the same method of estimation may be applied to estimate gaseous dispersion in a neutral atmosphere using Figure 7. Consider a 1,000,000-lb/hr steam plant that will burn 12 kg/sec of low-ash, 3% sulphur coal. The heat loss up the stack is estimated at 1.2×10^4 kcal/sec (6% stack loss). Pollution control authorities have stipulated that the plant must contribute less than 0.25 ppm (3 min) to the background SO_2 concentration during neutral atmospheric conditions. The SO_2 emission rate is calculated at 0.72 kg/sec and the permitted SO_2 level is equivalent to 715 $\mu g/nm^3$. The parameter E/C'_{omax} is therefore 1.01×10^{-3} in the appropriate units. Interpolating at $Q = 1.2 \times 10^4$ kcal/sec in Figure 7 gives a stack height of 85 m. When appropriate, Figures 5 and 6 may also be used as illustrated above.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks are due the Dominion Coal Board for research grants-in-aid and encouragement that have helped immeasurably in the conduct of this work.

REFERENCES

1. Proceedings of The Third National Conference on Air Pollution, Washington, D.C., December 12-14, 1966.

2. Lee, G.K., Mitchell, E.R., Grimsey, R.G., and Benn, D.H., Formation of Oil Ash Deposits on Boiler Surfaces and Control by an Additive; Proc. 1966 American Power Conference, pp 613-631, and Mines Branch Reprint Series RS 45, 1967.

3. Lee, G.K., Friedrich, F.D., and Mitchell, E.R., Effect of Fuel Characteristics and Excess Combustion Air on Sulphuric Acid Formation in a Pulverized-Coal-Fired Boiler; Jour. Inst. Fuel, 40, pp 397-405, 1967, and Mines Branch Reprint Series RS 41, 1967.

4. Stone, G.N., and Clarke, A.J., British Experience for Air Pollution Control on Large Fossil-Fuelled Power Plant; American Power Conference, Chicago, Illinois, April 1967.

5. Whaley, H., A Proposed Canadian Standard for Estimating Atmospheric Dispersion of Combustion Source Pollution from Chimneys. In course of preparation for publication.

6. Lucas, D.H., Moore, D.J., and Spurr, G., The Rise of Hot Plumes from Chimneys; Int'l Jour. Air and Water Poll., Vol. 7, pp 473-500, 1963.

7. Pasquill, F., Atmospheric Diffusion, D. Van Nostrand Co., London, 1962; also The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Met. Mag., Vol. 90, pp 33-49, 1961.

ooo

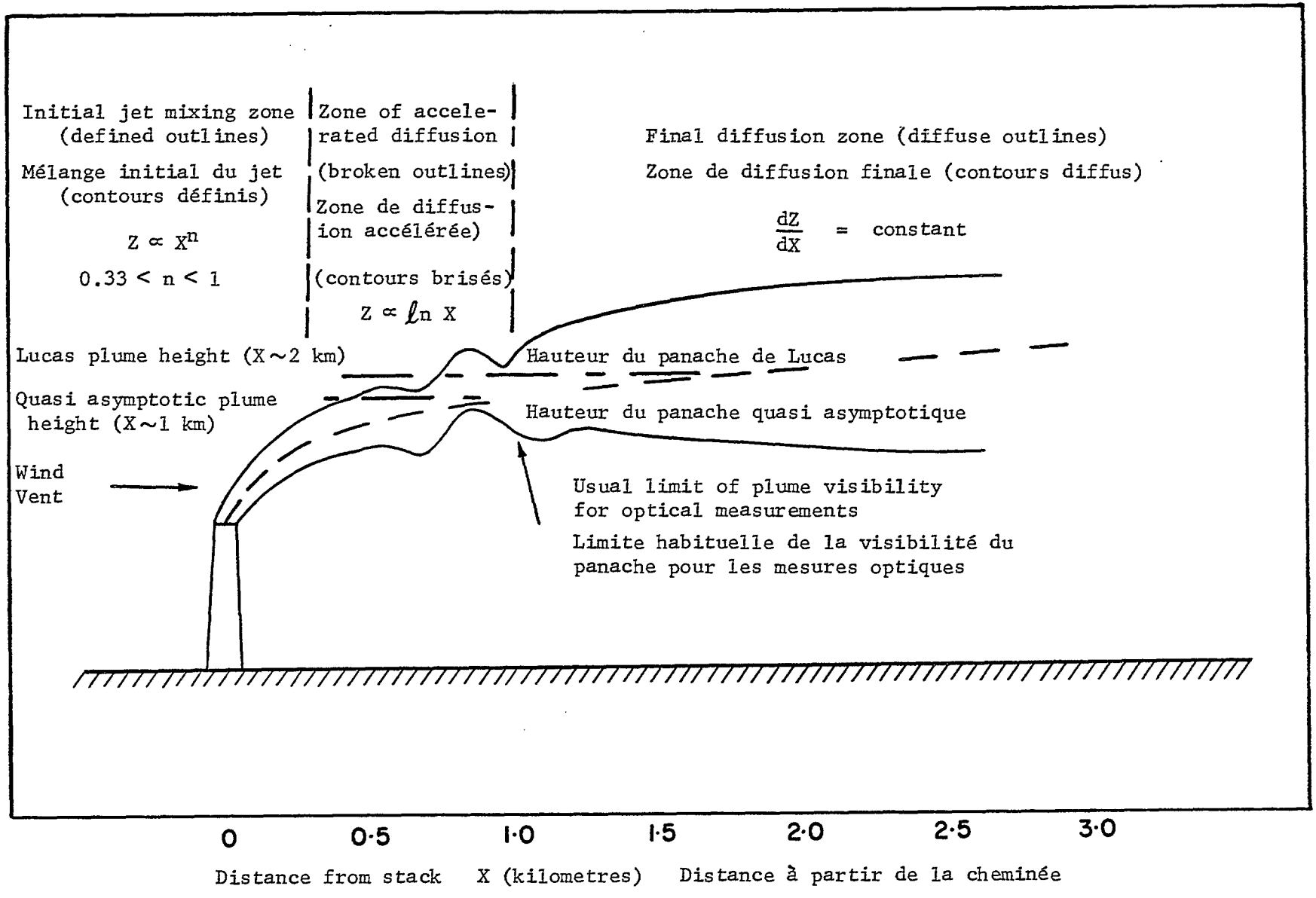

Figure 1. The physical model of a hot gas plume.
Modèle physique d'un panache de gaz chaud.

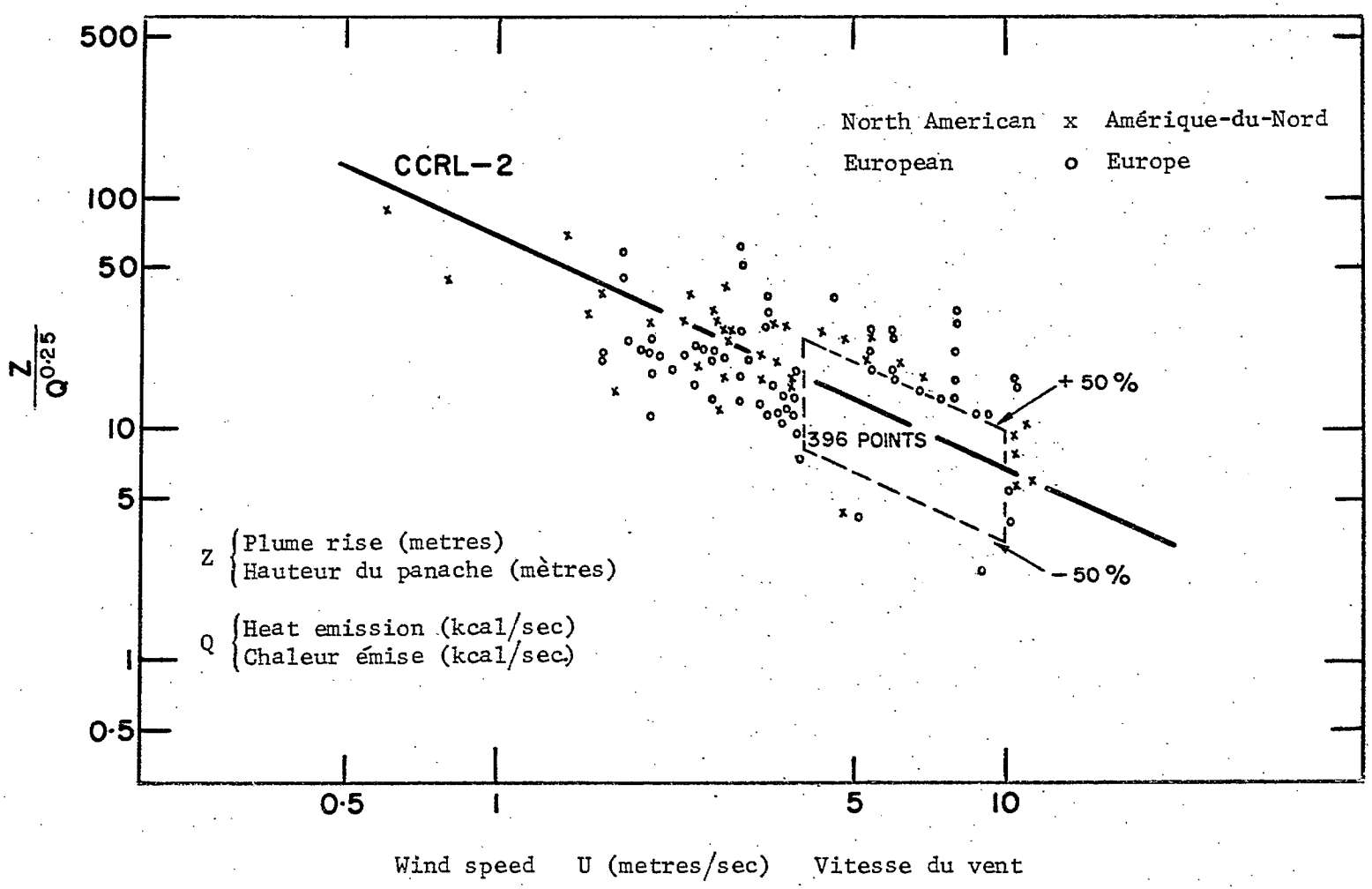

Figure 2. Empirical derivation of the CCRL-2 plume rise equation.
Dérivation empirique de l'équation CCRL-2 sur l'élévation du panache.

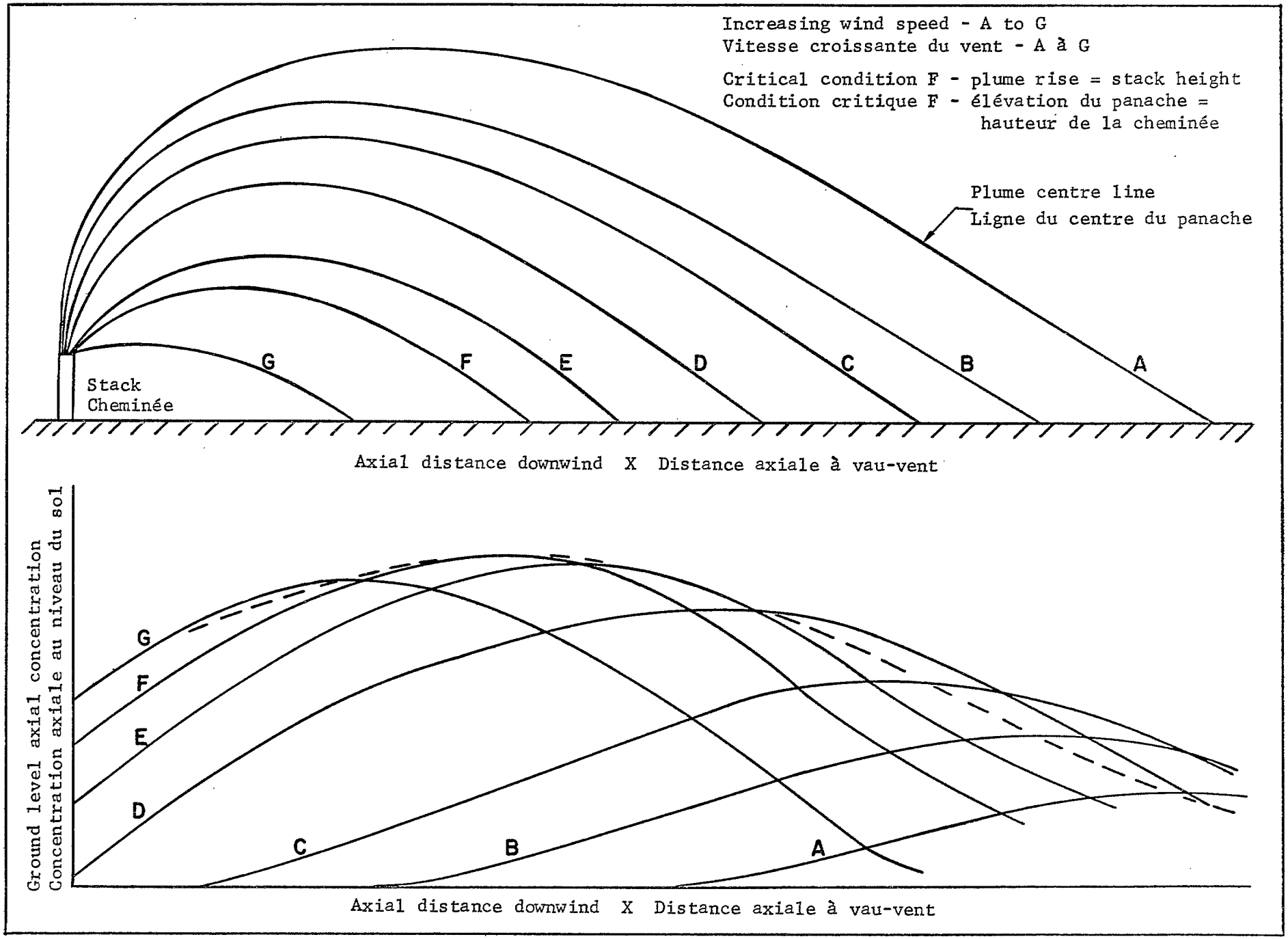

Figure 3. Schematic variation of axial concentration with distance and wind speed.
Variation schématique de la concentration axiale selon la distance et la vitesse du vent.

CANADA

MINISTÈRE DE

L'ÉNERGIE, DES MINES ET DES RESSOURCES

DIRECTION DES MINES

OTTAWA

LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE, SES CAUSES ET SA RÉDUCTION

par

H. Whaley, F. D. Friedrich, G. K. Lee et E. R. Mitchell

Laboratoire canadien de recherches sur la combustion
Centre de recherches sur les combustibles

Novembre, 1968

Circulaire d'information IC 211

AVANT-PROPOS

La prospérité économique est inexorablement liée aux industries florissantes. Il est vrai aussi que l'industrie recherche la source d'énergie la moins coûteuse, ce que implique fréquemment l'utilisation de combustibles de qualité inférieure, causant de la pollution atmosphérique. La conversion de ces combustibles en énergie calorifique utile dans des centrales thermiques, ainsi que les problèmes connexes de pollution, ont fait l'objet d'études au Centre de recherches sur les combustibles, Direction des mines, afin de déterminer comment rendre minimum la pollution provenant de la combustion et comment l'air ambiant peut être protégé de la pollution excessive.

On espère que les recherches en cours dans ce domaine fourniront les données de base de mesures réparatrices, et que cette contribution, de même que les suivantes, sera appréciée par les autres groupes de recherche intéressés à ce probleme, ainsi que par les divers organismes de réglementation. Il est souhaitable qu'éventuellement cela puisse conduire à une meilleure compréhension de la gestion des ressources atmosphériques.

John Convey,
Directeur,
Direction des Mines,

Novembre, 1968

Direction des mines

Circulaire d'information IC 211

LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE: SES CAUSES ET SA RÉDUCTION

H. Whaley*, F.D. Friedrich**, G.K. Lee*
et E.R. Mitchell***

RÉSUMÉ

La Direction des mines est engagée dans un double programme de contrôle de la pollution atmosphérique provenant de la combustion. Le premier est un vaste programme de recherche sur la combustion, dans lequel la formation d'agents de pollution dans les flammes est réduite au minimum et suivie de la neutralisation chimique, aussi complète que possible, de l'anhydride sulfureux (SO_2), l'anhydride sulfurique (SO_3), les oxydes d'azote (NO_x) et la suie acide. On décrit ici l'efficacité d'une bonne combustion ainsi qu'un additif pour mazout résiduel. Le second programme en est un de contrôle des concentrations des gaz de combustion au niveau de sol en recommendant la hauteur de cheminée nécessaire pour une dispersion adéquate. Pour ce faire, on a élaboré une équation empirique d'élévation du panache comme base saine pour les normes de dispersion CCRL (Laboratoire canadien de recherche sur la combustion). Cette norme est discutée et présentée sous forme graphique.

---

*Chercheur scientifique, **Officier scientifique principal et ***Chef, Laboratoire canadien de recherche sur la combustion, Centre de recherches sur les combustibles, Direction des mines, ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Ottawa, Canada.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Avant-Propos	iF
Résumé	iiF
Introduction	1F
La Pollution Atmosphérique Actuelle	2F
Principaux polluants provenant de la combustion . . .	2F
Élimination du SO_2 contenu dans les gaz de combustion	3F
Élimination des particules	3F
Programme du CCRL Contre la Pollution Atmosphérique . . .	5F
Élimination des émissions	5F
(a) Combustion efficace (b) Élimination à l'aide d'additifs de la pollution provoquée par la combustion des résidus de distillation (c) Élimination des polluants du charbon industriel	
Dispersion des gaz de combustion et des particules . .	6F
(a) Portée du sujet (b) Efficacité de la dispersion (c) Normes CCRL-2 relatives au dépoussiéreurs et à la hauteur des cheminées	
Application de la méthode de conception CCRL	13F
Remerciements	15F
Bibliographie	15F
Figures 1-7	15-25

ooo

TABLEAUX

N°		Page
1.	Polluants émis par la combustion au Canada	4F
2.	Oxydes de soufre et d'azote provenant de la combustion de mazout n° 6 renfermant 2.5 p. 100 de soufre, dans la chaudière expérimentale du CCRL à 15 psig de pression de vapeur	7F
3.	Oxydes de soufre et d'azote provenant de la combustion de charbon Minto contenant 7 p. 100 de soufre, dans la chaudière expérimentale du CCRL à 15 psig de pression de vapeur	8F

FIGURES

1.	Modèle physique d'un panache de gaz chaud	15
2.	Dérivation empirique de l'équation CCRL-2 sur l'élévation du panache.	16
3.	Variation schématique de la concentration axiale selon la distance et la vitesse du vent	17
4.	Norme CCRL pour l'estimation de la hauteur de la cheminée et de l'efficacité du dépoussiéreur - forte inversion atmosphérique	19
5.	Norme CCRL pour l'estimation de la hauteur de la cheminée selon l'émission gazeuse - forte inversion atmosphérique	21
6.	Norme CCRL pour l'estimation de la hauteur de la cheminée et l'efficacité du dépoussiéreur - atmosphère neutre	23
7.	Norme CCRL pour l'estimation de la hauteur de la cheminée selon l'émission des gaz - atmosphère neutre	25

ooo

INTRODUCTION

La pollution atmosphérique a été présentée comme le problème scientifique le plus important du siècle (1). L'imprécision de nos connaissances sur les méthodes de surveillance, les seuils critiques de tolérance et les moyens de prévention a cependant provoqué la confusion et le manque d'assurance dans l'élaboration de lois préventives. C'est pourquoi, à la suite de la concentration rapide de l'industrie et de la population dans les pays industrialisés, la menace de la pollution atmosphérique s'est abattue avec une brutalité alarmante.

L'air pollué traverse facilement les limites des villes, des provinces et même des pays; l'efficacité de la lutte contre la pollution dépend de la coopération de nombreuses juridictions. En raison de la rapide expansion de la population urbaine et de l'industrie au Canada, la dispersion de déchets dans l'atmosphère soumet l'air à des demandes fortement accrues. Certaines agglomérations sont déjà victimes de la pollution; cela ne suffit cependant pas pour secouer l'apathie générale ou empêcher les gens de croire que nous ne subirons pas le même sort que les Etats-Unis ou d'autres pays industrialisés. Cette opinion peut être bien fondée mais, à notre avis, il serait possible d'empêcher la situation de s'aggraver en se préoccupant de la hauteur des cheminées, permettant ainsi une bonne dispersion de la fumée dans n'importe quelles regions, qu'elles soient industrialisées ou non.

LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ACTUELLE

Principaux polluants provenant de la combustion

L'incinération des rebuts et les incendies de forêt sont des exemples impressionnants de la pollution atmosphérique; cependant, les combustibles classiques en sont les principaux responsables au Canada. Il faut environ 14 livres d'air pour brûler 1 livre de carburant, et 15 livres de gaz de combustion se dissipent dans l'atmosphère. L'azote, gaz inerte, en constitue la plus grande partie (76 p. 100 du poids) et se remet en circulation, tandis que la photosynthèse végétale transforme l'anhydride carbonique (environ 22 p. 100 du poids) en oxygène. Le reste (jusqu'à 0.3 de livre par livre de carburant) comprend de l'oxyde de carbone CO, des oxydes de soufre, des oxydes d'azote et des hydrocarbures: toutes ces substances sont nocives en concentrations bien inférieures à 1 p. 100. Il peut aussi y avoir d'importantes émissions de particules devenant extrêmement toxiques lorsqu'elles sont saturées d'acide condensé.

Afin de saisir l'ampleur du problème de la pollution au Canada et de connaître le rôle des différents combustibles, certains calculs ont été fait à partir d'hypothèses, générales mais réalistes, qui ont fourni les données du tableau 1. Ce tableau permet d'établir d'intéressantes comparaisons bien que l'accent soit placé sur l'importance des quantités d'anhydride sulfureux (SO_2), d'anhydride sulfurique (SO_3) et de particules (dont les suies acides) d'origine industrielle, ainsi que sur la grande quantité d'oxyde de carbone (CO), de peroxyde d'azote (NO_2) et de particules qu'émettent les moteurs à essence des automobiles. Le SO_2, le SO_3 et les suies acides sont les principaux polluants nuisibles pour l'homme, les animaux et les plantes, bien que l'oxyde de carbone (CO) et le peroxyde d'azote (NO_2), surtout émis au ras du sol, soient également la cause d'un bon nombre de problèmes.

La pollution provoquée par les moteurs à essence fait l'objet d'études approfondies et les recherches visant à réduire l'émission de substances nocives sont en bonne voie. La pollution d'origine industrielle est aussi à l'étude mais d'importants problèmes techniques et économiques sont encore à résoudre avant que le monde entier puisse jouir d'un air

purifié. Tout en poursuivant le programme de recherches décrit plus loin, le Laboratoire canadien de recherches sur la combustion (CCRL) s'est maintenu à la pointe des recherches coûteuses portant sur l'élimination de l'anhydride sulfureux (SO_2) et des particules que renferment les gaz de combustion. L'élimination du soufre avant la combustion n'a pas été négligée non plus, mais il ne s'agit là que d'une solution partielle car, comme l'indique le tableau 1, l'atmosphère contient de grands volumes d'autres polluants et de petites quantités d'hydrocarbures aromatiques policycliques de nature cancérigène.

Élimination du SO_2 contenu dans les gaz de combustion

Le gaz de combustion qui existe en grandes quantités renferme peu de SO_2 dont l'élimination est l'un des principaux problèmes de la lutte contre la pollution. Dans le monde entier, cependant, la recherche a atteint le premier stade des usines-pilotes. Aux États-Unis, le Bureau of Mines exploite une usine-pilote d'alumine alcalisée où l'on récupère le soufre. Une autre usine, dont la majorité des actions appartiennent à la Monsanto Chemical Company, catalyse le SO_2 et le SO_3 et fabrique de l'acide sulfurique à la Seward Power Station en Pennsylvanie. On a annoncé la mise en service de la méthode de récupération Wellman-Lord mais les détails du cycle restent secrets. Un procédé allemand Reinluft utilise un lit fixe adsorbant de résidu de carbonisation activé et produit de l'acide sulfurique. Le Japon et l'Angleterre possèdent aussi des usines de récupération et de purification d'un intérêt technique considérable.

Le coût élevé de ces procédés même s'ils se révèlent parfaits demeure un obstacle pour les services publics et l'industrie lourde, et la construction de grandes installations peut prendre un certain temps à démarrer. L'on s'attend donc à ce que d'énormes quantités de SO_2 continuent à polluer l'atmosphère à un rythme croissant. C'est pourquoi nous pensons que la façon la plus souhaitable de purifier l'air actuellement est de construire des cheminées bien conçues qui disperseront les gaz de façon adéquate.

Élimination des particules

Les progrès des recherches sur les précipitations électrostatiques

TABLEAU 1

Polluants émis par la combustion au Canada
(D'après les données statistiques de la consommation de combustibles en 1966)

Chiffres préliminaires (lb = livre)

Combustibles	CO_2 lb x 10^{10}	NO_2 lb x 10^6	CO lb x 10^6	Particules lb x 10^6	SO_2 lb x 10^6	SO_3 lb x 10^6
Combustibles domestiques						
Gaz naturel	2.336	11.96	14.01	-	-	-
Huile de chauffe (fournaise)	7.58	94.9	38.4	60.02	329.5	8.41
Mazout (poële)	0.554	6.95	1.835	4.40	10.35	0.164
Totaux partiels	10.5	113.8	54.2	64.4	339.4	8.6
Total		105,000 x 10^6				
Combustibles commerciaux						
Gaz naturel	1.385	7.10	8.31	-	-	-
Huile de chauffe(poële)	0.554	6.95	1.835	4.40	10.35	0.164
Fuel à moteur diesel	3.61	45.2	18.25	28.56	134.4	3.43
Essence à moteur	9.86	1176.	7180.	968.	21.32	-
Charbon bit. Can.	0.2284	2.37	0.964	39.3	14.0	0.35
Charbon sub-bit. Can.	0.1155	1.138	0.462	18.8	4.84	0.121
Lignite Canadien	0.03875	0.378	0.1536	6.085	2.062	0.0516
Anthracite importé	0.0923	0.876	0.3555	13.83	2.07	0.05175
Charbon bit.importé	0.4465	4.61	1.872	75.8	17.38	0.435
Totaux partiels	16.3	1244.	7212.	1155.	206.4	4.6
Total		173,000 x 10^6				
Combustibles industriels						
Gaz naturel	3.89	19.92	23.3	-	-	-
Fuel-oil lourd	10.35	124.1	50.4	82.25	1612.	41.11
Charbon bit. Can.	2.37	24.58	9.99	641.	145.3	3.632
Charbon sub-bit. Can.	0.646	6.365	2.582	165.5	27.1	0.6775
Lignite Canadien	0.5105	4.98	2.023	126.0	27.18	0.6795
Anthracite importé	0.1901	1.805	0.733	44.8	4.27	0.1067
Charbon bit. importé	7.835	81.0	32.82	2088.	305.	7.63
Totaux partiels	25.8	262.8	121.8	3147.	2120.9	53.8
Total		264,000 x 10^6				
Total général		542,000 x 10^6				

% des combustibles domestiques: 19.42
% des combustibles commerciaux: 31.94 (% d'essence à moteur 19.99%)
% des combustibles industriels: 48.64

ont permis la construction d'équipement convenant à chaque sorte d'escarbilles de charbon. Il est possible aussi de recueillir des poussières respirables de dimensions inférieures à 0.5μ dans des filtres-sacs industriels et des épurateurs à eau. Il existe donc des moyens de recueillir toutes les particules, à l'exception notable des suies huileuses de carbone. Le CCRL a cependant démontré que ce problème était soluble par l'emploi d'additifs, comme il sera décrit plus loin.

PROGRAMME DU CCRL CONTRE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Élimination des émissions

a) Combustion efficace

La première étape de la lutte contre la pollution consiste à assurer une combustion adéquate, et à éliminer ou réduire ainsi la formation de polluants comme l'oxyde de carbone, les hydrocarbures imbrûlés et les suies de carbone. Le CCRL étudie actuellement un four en tunnel, destiné aux recherches sur l'aérodynamique des flammes pour permettre une bonne combustion. Néanmoins, la combustion du résidu pétrolier de distillation produira encore de considérables quantités de SO_2, de NO_2, peut-être de SO_3 et de suies acides, tandis que le charbon produira, selon son origine, un volume important de particules et peut-être aussi du SO_2 et du SO_3. Ces substances devront être éliminées autrement.

b) Élimination à l'aide d'additifs de la pollution provoquée par la combustion des résidus de distillation

Au cours d'un programme de recherches sur le mécanisme de formation de dépôts de cendres pétrole, on a mis au point un additif de magnésie et d'alumine à ajouter au mazout afin de réduire la formation de scories dans les tuyaux des surchauffeurs (2). Au cours des deux dernières années, on a étendu ce programme à l'étude de l'efficacité de l'additif pour neutraliser chimiquement le SO_3, le NO_2 et le SO_2. Les résultats ont été bons et l'efficacité de l'additif a été reconnue partout où il a été utilisé, dans les génératrices thermiques des services publics américains et dans des chaudières de petites dimensions au Canada.

Le tableau 2 indique les quantités que l'additif a réussi à éliminer dans la chaudière expérimentale CCRL: 13 à 30 p. 100 des oxydes d'azote, 71 à 80 p. 100 du SO_3 libre dans le gaz en circulation, et jusqu'à 100 p. 100 de l'acide condensé sur les surfaces de la chaudière et dans les suies de carbone.

Les particules comme les suies de carbone sont humides et gommeuses lorsqu'elles renferment de l'acide sulfurique. Après la neutralisation de l'acide à l'aide d'additifs, ces particules sont réduites en poudre et leur résistance électrique s'accroît. Il devient donc possible de les recueillir en quantités raisonnables par précipitation électrostatique. L'additif permet donc non seulement de neutraliser les acides corrosifs mais aussi de recueillir les suies que renferment les résidus de distillation en combustion, tout en donnant l'assurance que toute suie s'échappant dans l'atmosphère est chimiquement neutre.

c) Élimination des polluants du charbon industriel

L'emploi d'additifs avec le charbon n'a pas donné d'aussi bons résultats qu'avec les résidus de distillation. Les recherches menées par le CCRL ont cependant établi que les cendres d'un bon nombre de charbons renfermaient des cations jouant le rôle d'additifs (3). Comme l'indique le tableau 3, les cations contenus dans les cendres d'un certain charbon ont neutralisé 74 p. 100 du SO_3 adsorbé par les escarbilles et les dépôts de cendres, laissant 26 p. 100 (167 ppm) inaltérés. Il n'est généralement pas économique d'ajouter des substances inertes supplémentaires (cendres) afin d'achever la neutralisation du SO_3 adsorbé. Il est donc logique de combiner de bons dépoussiéreurs avec une dispersion adéquate afin de lutter contre la pollution.

Dispersion des gaz de combustion et des particules

a) Portée du sujet

Les lignes précédentes ne font que mentionner le rôle que peuvent jouer les méthodes de combustion utilisant des additifs au mazout et des centres non-traitées de charbon. En attendant de trouver un moyen économique d'éliminer le SO_2 en faibles concentrations, il sera nécessaire d'assurer la

TABLEAU 2

Oxydes de soufre et d'azote provenant de la combustion de mazout n° 6 renfermant 2.5 p. 100 de soufre, dans la chaudière expérimentale du CCRL à 15 psig de pression de vapeur

(Les données correspondent à 5 p. 100 de O_2 dans les gaz de carneau et ne sont pas valables sous d'autres conditions.)

Fuel Oil	Taux de combustion	Taux d'émission de chaleur, Btu/pi. cu./hre	Oxydes d'azote		SO_3 libre dans le courant gazeux		SO_3 en particules et dépôts*	
			Mesurés en ppm par volume	Neutralisé par additif, %	Mesuré en ppm par volume	Neutralizé par additif, %	Equivalent ppm par volume	Neutralisé par additif, %
Non-traité	Normal	49,700	258	0	10.4	0	19	0
	Elevé	66,250	260	0	16.1	0	27	0
Traité à 1/1500	Normal	49,700	181	30	3.0	71	26	100
	Elevé	66,250	227	13	3.2	80	39	67

*(a) Les particules et les dépôts à partir de mazout non traité sont des mélanges de SO_3 corrosif à l'état libre et de suie de carbone.

(b) Les particules et les dépôts qui proviennent du mazout traité à 1/1500 sont des mélanges de sulfate totalement neutralisé (sous la forme de sulfate de magnésium), d'additif non-traité et de suie de carbone.

Note: En résumé, l'additif réduit le NO_x et le SO_3 dans le courant gazeux et neutralise le SO_3 contenu dans les particules et dans les dépôts.

TABLEAU 3

Oxydes de soufre et d'azote provenant de la combustion de charbon Minto contenant 7 p. 100 de soufre, dans la chaudière expérimentale du CCRL à 15 psig de pression de vapeur

(Les données correspondent à 5 p. 100 de O_2 et ne sont pas valables sous d'autres conditions.)

Taux de combustion	Taux de dégagement de chaleur, Btu/pi. cu./hre	Oxydes d'azote	SO_2		SO_3 libre dans le courant de gaz	SO_3 en particules et dépôts	
		Mesurés en ppm par volume	Théorique en ppm par volume	Mesuré en ppm par volume	Mesuré en ppm par volume	Équivalent ppm par volume	Neutralisation possible par les cations contenus dans les cendres, %
Normal	50,000	420	5843	5201	52	590	74

dispersion adéquate des panaches gazeux qu'émettent les installations de combustion industrielles et commerciales.

b) Efficacité de la dispersion

Il est erronné de croire qu'une cheminée ne fait que déplacer un danger de pollution d'une région à l'autre. Bien que le point de concentration maximale se déplace en fonction de la hauteur de la cheminée, il est également établi que les concentrations au niveau du sol sont plus faibles là où les cheminées sont plus hautes. Ce dernier fait a été constaté en Angleterre où l'accroissement de la hauteur des cheminées a réduit la pollution (4). Aux États-Unis, l'on tend actuellement à bâtir des cheminées plus hautes: c'est ainsi que la centrale Mitchell, d'une capacité de 1,600 MW, possédera une cheminée de 1,200 pieds. Après élimination maximale des polluants à la source, il s'agit de choisir un dépoussiéreur en fonction du combustible et une hauteur de cheminée qui permettra de disperser les gaz de combustion selon les normes concernant l'atmosphère au niveau du sol.

c) Normes CCRL-2 relatives aux dépoussiéreurs et à la hauteur des cheminées

Le Comité de lutte contre la pollution de l'air de la Canadian Standards Association, dont le président est M. W.B. Drowley, a confié à M. E. R. Mitchell la tâche d'établir une norme relative à l'émission de particules de matière; cette norme devait tenir compte des principaux paramètres de la poussée du panache de fumée et de la vitesse du dégagement, de la hauteur de la cheminée, de la vitesse critique du vent et des conditions météorologiques critiques.

Un sous-comité de travail a été réuni, à la suite de quoi le principal auteur du présent rapport a entrepris une étude exhaustive de la documentation disponsible sur l'élévation et la dispersion des agents de pollution de l'atmosphère contenus dans les déchets chauds évacués par les cheminées. Les connaissances et les données ainsi recueillies devaient fournir les fondements d'une méthode graphique d'estimation de la hauteur de la cheminée, dont l'application serait à la fois facile et souple. Après avoir pris connaissance des normes en usage en Europe et aux États-Unis, le sous-comité a jugé qu'il était nécessaire d'établir une norme convenant mieux aux

conditions canadiennes. On a donc décidé d'établir la relation entre l'émission des particules et gaz polluants, contenus dans les fumées chaudes des cheminées, et les taux de pollution ambiante qui en résultent, afin de ne pas dépasser les degrés de pollution prévus par la loi (5).

Il est utile ici de considérer les aspects physiques de l'élévation et de la dispersion du panache. La figure 1 indique que le panache, dont la dispersion débute dès son arrivée dans l'atmosphère, peut être divisé en deux parties principales. Tout d'abord, à cause de sa poussée et de sa vitesse, le panache s'élève jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de la cheminée, appelée élévation du panache, et il se disperse ensuite à partir de cette hauteur, retombant éventuellement sur le sol et entraînant parfois des quantités désagréables de poussière et de polluants gazeux. Les processus physiques de l'élévation et de la dispersion du panache sont extrêmement complexes et impliquent des facteurs décrits par de nombreux domaines du savoir étroitement reliés entre eux, tout en étant hautement spécialisés, comme la météorologie et la climatologie, l'orographie et la topographie, l'aérodynamique de la nature et le mouvement relatif des particules et des gaz, la transmission de la chaleur par convection, rayonnement et diffusion, pour n'en nommer que quelques-uns. Le nombre de variables auquel tout mode de solution, théorique ou empirique, du problème peut faire appel, est donc énorme. Dans la documentation relative à ce sujet, la négligence de paramètres importants ou les suppositions simplificatrices faites en théorie ont entraîné une importante dispersion dans presque toutes les corrélations théoriques ou empiriques. Il est donc extrêmement difficile d'obtenir des renseignements assez précis pour permettre à un ingénieur de calculer la hauteur d'une cheminée afin de ne jamais dépasser aucun taux de pollution ambiante stipulé.

Il est logique de supposer que, dans un sujet complexe qui comporte ce degré d'incertitude, des facteurs de sécurité soient utilisés pour réduire la fréquence des insuccès dans le respect de conditions spécifiées. Il est surprenant de découvrir que presque tous les règlements relatifs à la pollution de l'air dans les diverses parties du monde indiquent les concentrations maximales permises dans une atmosphère neutre. L'atmosphère neutre, qu'on ne rencontre que rarement, en pratique, varie de la stabilité aux turbulences et inversions de température. Par conséquent, les autorités de

réglementation et l'industrie se rendent compte que les concentrations permises seront souvent dépassées. La tolérance de cette situation est une invitation à la pollution de l'air ambiant, fléau dont les conséquences sont devenues si désagréables à la plupart des gens qu'un facteur de sécurité raisonnable devrait être incorporé à la fois aux règlements relatifs à l'air ambiant et aux méthodes de conception. C'est pourquoi une condition météorologique défavorable, celle de l'inversion, a été choisie lors de l'application des équations de diffusion dans la norme de conception du Laboratoire canadien de recherche sur la combustion. On espère qu'éventuellement, les autorités de réglementation sur la pollution de l'air, tout en stipulant les taux de pollution dans l'air ambiant dans des conditions neutres, appliqueront aussi des règlements semblables pour les conditions d'inversion de température.

Les renseignements disponibles indiquent que l'élévation du panache peut être prévue à un facteur de deux près. Toutefois, la seconde étape, soit la diffusion à partir d'une source élevée, a fait l'objet de nombreuses recherches et les résultats expérimentaux sont alors moins dispersés que ceux de l'élévation du panache. Il s'ensuit que l'exactitude de toute concentration prévue ne peut qu'être assujettie à l'erreur expérimentale cumulative de ces deux étapes.

Le nombre de mesures de l'élévation du panache est assez élevé pour être fiable, en dépit de la dispersion des résultats, mais la corrélation n'a pu être effectuée sous une forme assez simple pour être utile dans l'établissement d'une norme de conception. On a tenté de réaliser la corrélation de l'élévation du panache en se servant des principaux paramètres de l'émission de chaleur de la cheminée et de la vitesse du vent, tout en se rappelant que l'omission d'autres paramètres pourrait entraîner une déviation expérimentale considérable. Cette corrélation, identifiée par le sigle CCRL-2, suit l'allure générale de celle de Lucas et est illustrée sur la figure 2 (6). On peut voir à l'aide de cette figure que la dispersion expérimentale est appréciable et il est possible d'avoir un panache s'élevant entre 5 et 50 mètres dans un vent de 5 m/sec. au-dessus d'une cheminée dont l'émission de chaleur est constante. Cette variation de l'élévation du panache pourrait engendrer une différence appréciable dans les taux de concentration réels en aval de la cheminée. Il devient alors évident l'argument, qui milite en faveur d'un facteur de sécurité incorporé obtenu à l'aide d'une conception,

orientée vers des conditions d'inversion thermique.

On propose que l'équation CCRL-2, l'élévation du panache, ainsi que les équations de Pasquill sur la diffusion (7), modifiées pour des conditions d'inversion, soient utilisées pour prédire les concentrations maximales au niveau du sol à vau-vent des cheminées. A cette fin, un certain nombre de simplifications peuvent être effectuées, ce qui réduit considérablement la complexité des équations. Les équations de diffusion dérivées par Pasquill (7) ont été simplifiées en supposant un sol plat et des conditions d'inversion atmosphérique typiques. Ces hypothèses sont raisonnables étant donné que les accidents topographiques inhabituels doivent être étudiés individuellement et que les déviations à partir de conditions idéales d'inversion entraînent des concentrations plus basses que prévues. Il faut souligner ici que les déviations à partir d'une atmosphère neutre occasionnent des concentrations plus basses ou plus hautes, selon que l'atmosphère est plus ou moins stable respectivement.

La simplification mathématique des équations combinées de l'élévation du panache et de la diffusion peut être effectuée, lors de l'élaboration de la méthode graphique de conception, par le choix des concentrations maximales pour l'ensemble en ce qui a trait à la vitesse du vent et à la distance axiale à vau-vent de la cheminée. Les variations de concentration selon ces deux paramètres liés entre eux sont données à la figure 3, qui montre par un schéma la variation de la concentration axiale selon la distance à vau-vent de la cheminée et la vitesse du vent. Grâce à ces données, un simple calcul permet d'établir la concentration maximale d'ensemble prévue pour une cheminée à l'étude. Les figures 4 et 5 sont les graphiques de conception recommandés par les auteurs pour les particules et les gaz; ils sont fondés sur des conditions d'inversion atmosphérique, vu que celles-ci sont les plus susceptibles d'élever les taux de pollution. Il est possible, en se servant de ces graphiques, de choisir une hauteur de cheminée qui permette de respecter n'importe quel taux de pollution stipulé pour les particules et les gaz, sous n'importe quelle condition atmosphérique. Il est maintenant nécessaire de bien établir la différence entre les considérations de conception relatives aux gaz et aux particules à cause de l'équipement pratique nécessaire à une plus longue période d'échantillonnage dans le cas des particules. On a montré que les lois sur la diffusion des gaz peuvent être appliquées aux petites

particules (<60μ) pour lesquelles la vitesse de décantation peut être négligée (5). Étant donné que ces lois sont fondées sur une période d'échantillonnage de 3 minutes qui n'est pratique que pour les gaz, la igure 4 diffère de la figure 5 du fait qu'elle incorpore à durée d'échantillonnage une diminution de concentration démontrée expérimentalement. En choisissant une hauteur de cheminée qui respecte en même temps les taux de pollution ambiante relatifs aux particules et aux gaz, il faut évidemment prendre la plus haute des deux valeurs obtenues afin d'éviter tout risque de pollution.

Il pourrait s'écouler un certain temps avant que les autorités de réglementation soient prêtes à appliquer les limites sur la pollution sous des conditions d'inversion atmosphérique, et comme mesure temporaire nous avons décidé d'inclure des graphiques de conception pour une atmosphère neutre afin d'aider à l'application des règlements qui sont actuellement les plus répandus. Ces graphiques sont donnés aux figures 6 et 7 pour les particules et les gaz, et les auteurs conseillent aux ingénieurs de s'assurer, avant de se servir de ces graphiques, qu'il est possible de concevoir une cheminée pour une atmosphère neutre dans un endroit donné.

Application de la méthode de conception CCRL

A titre d'example, prenons une cheminée existante qui s'élève à 150 mètres et qui émet de la poussière provenant d'un charbon contenant 14 p. 100 de cendre quand le taux de combustion est de 100 kg/sec. (taux comparable à celui d'une usine de 1000 MW). Si le rendement du dépoussiéreur est de 98 p.100, on peut calculer que si le reste de la poussière s'échappe, le poids de la poussière ainsi évacuée sera de 0.28 kg/sec. Si la chaleur émise par la cheminée est de 3.5×10^4 kcal/sec., en se servant de la figure 4, on trouve que $E/C'_{omax} = 2.33 \times 10^{-3}$. Ce résultat donne une C'_{omax} de 120 $\mu g/nm^3$ (inversion, 30 minutes), ce qui est élevé selon les normes actuelles. Afin de réduire la concentration à un taux plus acceptable, il faudrait accroître la hauteur de la cheminée, élever le rendement du dépoussiéreur, ou réduire la teneur en cendre du charbon utilisé.

L'exemple suivant illustre la façon de choisir la hauteur d'une cheminée lorsqu'on connaît la puissance de l'usine, le type de combustible utilisé et lorsqu'on sait si la principale source de pollution sera la

poussière ou l'anhydride sulfureux.

Le problème consiste à concevoir une cheminée et un équipement de dépoussiérage pour une usine projetée de 500 MW alimentée au charbon et brûlant 50 kg/sec. de combustible contenant 10 p.100 de cendre. La chaleur émise par la cheminée sera de 2×10^4 kcal/sec. Afin de déterminer par une analyse des coûts s'il est plus profitable d'acquérir un équipement de dépoussiérage dispendieux ou de hautes cheminées, il faut connaître le rapport qui existe entre l'efficacité du dépoussiérage et la hauteur de la cheminée. La norme peut être utilisée pour obtenir ces reseignements.

Supposons que le taux prévu de concentration de la poussière ambiante soit de 50 $\mu g/nm^3$ (30 minutes, inversion) et qu'au début aucun équipement de dépoussiérage ne soit prévu. La totalité de la cendre serait donc projetée dans l'atmosphère à un taux de 5 kg/sec. Le calcul du paramètre E/C'_{omax} donne 5/50 = 0.1. On peut voir, à l'aide de la figure 4, que cette valeur dépasse les conditions prévues et, de fait, la cheminée devrait avoir une hauteur de 7,400 mètres. Il s'agit évidemment d'un extrême ridicule. Étudions maintenant le cas où un équipement de dépoussiérage dont l'efficacité est de 90 p. 100 est installé. E/C'_{omax} devient 0.5/50 = 0.01, et la cheminée s'élève maintenant à 740 mètres. De la même façon, avec un équipement d'une efficacité de 99 p. 100, la hauteur est réduite d'un autre ordre de grandeur et atteint 74 m. La même méthode peut être appliquée lors de la conception pour tenir compte de l'émission de SO_2 et des critères relatifs à l'air ambiant. En connaissant les rapports coûts-efficacité pour l'équipement de dépoussiérage et le coût d'une hauteur de cheminée plus élevée, il est possible de trouver la combinaison optimale et la moins coûteuse.

Les exemples précités faisant appel à la figure 4 sont tous applicables à la pollution due aux particules au cours d'inversions, mais la même méthode d'évaluation peut être appliquée pour estimer la dispersion gazeuse dans une atmosphère neutre en se servant de la figure 7. Prenons, par exemple, une usine de vapeur de 1,000,000 lb/h. qui consomme 12 kg/sec. de charbon à faible teneur en cendre et contenant 3 p. 100 de soufre. La perte de chaleur à la sortie de la cheminée est évaluée à 1.2×10^4 kcal/sec. (perte de 6 p. 100 par la cheminée). Les autorités responsables de la lutte contre la pollution ont stipulé que l'usine doit ajouter moins de 0.25 ppm

(3 min) à la concentration ambiante de SO_2 dans des conditions atmosphériques neutres. Le taux d'émission de SO_2 s'établit à 0.72 kg/sec. et le taux de SO_2 permis équivaut à 715 $\mu g/nm^3$. Le paramètre E/C'_{omax} est donc 1.01×10^{-3} dans les unités appropriées. L'interpolation à $Q = 1.2 \times 10^4$ kcal/sec. dans la figure 7 donne une hauteur de cheminée de 85 mètres. Quand il convient de le faire, les figures 5 et 6 peuvent aussi être utilisées comme pour les exemples précités.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Office fédéral du charbon pour ses subventions à la recherche et ses encouragements, qui ont aidé infiniment à la réalisation de la présente étude.

BIBLIOGRAPHIE

1. Proceedings of The Third National Conference on Air Pollution, Washington, D.C., December 12-14, 1966.

2. Lee, G.K., Mitchell, E.R., Grimsey, R.G., et Benn, D.H., Formation of Oil Ash Deposits on Boiler Surfaces and Control by an Additive; Proc. 1966 American Power Conference, pp.613-631, et Mines Branch Reprint Series RS 45, 1967.

3. Lee, G.K., Friedrich, F.D., et Mitchell, E.R., Effect of Fuel Characteristics and Excess Combustion Air on Sulphuric Acid Formation in a Pulverized-Coal-Fired Boiler; Jour. Inst. Fuel, 40, pp. 397-405, 1967, et Mines Branch Reprint Series RS 41, 1967.

4. Stone, G.N., et Clarke, A.J., British Experience for Air Pollution Control on Large Fossil-Fuelled Power Plant; American Power Conference, Chicago, Illinois, April 1967.

5. Whaley, H., A Proposed Canadian Standard for Estimating Atmospheric Dispersion of Combustion Source Pollution from Chimneys. En cours de préparation pour publication.

6. Lucas, D.H., Moore, D.J., et Spurr, G., The Rise of Hot Plumes from Chimneys; Int'l Jour. Air and Water Poll., Vol. 7, pp. 473-500, 1963.

7. Pasquill, F., Atmospheric Diffusion, D. Van Nostrand Co., London, 1962; et The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Met. Mag., Vol. 90, pp. 33-49, 1961.

oooo