

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ENVIRONNEMENT

Pollution atmosphérique

Causes, conséquences, solutions, perspectives

Pierre MASCLET

ellipses

PREMIERE PARTIE : ASPECTS THEORIQUES

CHAPITRE I - L'ATMOSPHERE TERRESTRE ET LA POLLUTION DE L'AIR

		Page
1	Structure de l'atmosphère terrestre	13
1.1	— Les différentes couches de l'atmosphère	13
1.2	Variation de la température et de la pression atmosphérique	14
2	Mixage et transport des espèces chimiques	14
2.1	Dans la troposphère	15
2.2	Dans la stratosphère	16
3	Temps de demi-vie des espèces chimiques dans l'atmosphère	17
4	Unités de concentrations atmosphériques	17
5	Fonctionnement du système atmosphérique	18
5.1	Emission, transport, dégradation et dépôt	18
5.2	Modèles de chimie transport	19
6	Conséquences de la pollution atmosphérique	19
Exercices		21

CHAPITRE II - SOURCES ET TRANSPORT DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

1	— Emissions anthropiques	22
1.1	Oxyde de soufre SO ₂	23
1.2	Oxydes d'azote NO _x (NO et NO ₂)	23
1.3	Particules en suspension (PM)	24
1.4	Monoxyde de carbone CO	24
1.5	Hydrocarbures non méthaniques (NMHC ou COV)	25
1.6	Plomb	25
1.7	Autres polluants	25
2	Emissions naturelles	25
2.1	Composés soufrés	26
2.2	Composés azotés	26
2.3	Matière particulaire	27
2.4	Monoxyde de carbone CO	27
2.5	Hydrocarbures non méthaniques	27
3	Récapitulatif des sources de pollution	28
3.1	Sources anthropiques	28
3.2	Sources naturelles	29
4	Cas du dioxyde de carbone et du méthane	29
5	Météorologie et pollution	29
5.1	Influence du vent	29
5.2	Influence de la chaleur et de la lumière	29
5.3	Présence de pluies	30
5.4	Couche d'inversion	30
5.5	Importance relative des phénomènes météo	31
6	Transformations physicochimiques des polluants atmosphériques	32
6.1	Les réactions de base de l'atmosphère	32
6.2	Cycle diurne des polluants	33
6.3	Photooxydation du CO	33
6.4	Photooxydation du CH ₄	34
6.5	Source des radicaux OH°	35
6.6	Réactions avec les radicaux NO ₃ °	35

7	Concentrations ambiantes et normes de pollution	35
7.1	Concentrations ambiantes	35
7.2	Normes françaises de pollution	36
8	Pluies acides	37
Exercices		38

CHAPITRE III - BILAN RADIATIF ET PHOTOCHEMIE

1	Bilan radiatif terrestre	39
1.1	Irradiation solaire	39
1.2	Exemples d'application: Los Angeles ou Le Caire	41
1.3	Calcul de la distribution spectrale solaire	42
2	Calcul des vitesses de photolyse et de réactions	44
2.1	Expression des vitesses	44
2.2	Exemple : photolyse du formaldéhyde	44
3	Espèces photolysables	46
3.1	Ozone	46
3.2	Oxyde d'azote NO_2	46
4	Réactions photochimiques avec OH°	47
Exercices		48

CHAPITRE IV - LE CYCLE TROPOSPHÉRIQUE DES GAZ ET DE L'OZONE

1	Le cycle troposphérique des gaz	50
1.1	La boîte atmosphérique	51
1.2	Temps de résidence des espèces chimiques	51
2	Les radicaux OH°	52
2.1	Provenance des radicaux OH°	52
2.2	Concentrations des radicaux OH°	52
2.3	Constantes de vitesse avec OH°	53
3	La pollution urbaine par l'ozone	53
3.1	Les polluants automobiles	54
3.2	Les cycles de pollution journalier, hebdomadaire et annuel	55
3.3	Les polluants industriels	57
3.4	Engrais et pesticides	57
4	Les sources naturelles d'ozone	58
4.1	Combustion de la biomasse	58
4.2	Respiration des plantes	58
5	Les autres photooxydants	58
5.1	Nature des autres photooxydants	58
5.2	Réactions avec les COV naturels	59
6	Vitesses de réactions photochimiques en compétition	59
7	Schémas réactionnels de la combustion photochimique	59
7.1	Photooxydation des hydrocarbures	59
7.2	Photooxydation des aldéhydes	61
7.3	Bilan de la combustion photochimique	62
8	Autres réactions d'oxydation dans l'atmosphère	62
8.1	Oxydation par l'ozone	62
8.2	Action du radical nitrate NO_3°	62
8.3	Action du radical iode I°	63
9	Stratégie de contrôle de l'ozone	63
10	Bilan troposphérique des gaz au niveau planétaire	64
10.1	Bilan global de l'ozone	64
10.2	Bilan global du méthane	65

10.3	Bilan global de l'oxyde de carbone	66
10.4	Bilan planétaire des gaz	67
Exercices		68

CHAPITRE V – LES AEROSOLS ATMOSPHERIQUES

1	Nature de l'aérosol	71
1.1	Aérosol naturel	72
1.2	Aérosol de pollution	72
2	Masse, taille et nombre des aérosols	73
2.1	Données sur les aérosols	73
2.2	Taille des aérosols	73
2.3	Masse des aérosols	74
2.4	Nombre des aérosols	74
3	Modes de formation des particules	75
3.1	Nucléation des gaz	75
3.2	Condensation des gaz sur l'aérosol	75
3.3	Coagulation	76
4	Interaction des aérosols avec la vapeur d'eau	77
5	Sources d'aérosol	78
5.1	Sources crustales	78
5.2	Sources marines	78
5.3	Sources liées à la pollution (conversion gaz particule)	79
5.4	Mélange d'aérosols	79
5.5	Répartition des sources d'aérosol	80
6	Production photochimique d'aérosols - Aérosols secondaires	80
6.1	Formation des sulfates	81
6.2	Formation de la matière organique particulaire	81
7	Composition chimique de l'aérosol	82
7.1	Fraction inorganique ou minérale	82
7.2	Fraction organique	85
8	Structure probable de l'aérosol	87
9	Temps de résidence de l'aérosol	87
9.1	Modes d'abattement de l'aérosol	87
9.2	Transport des aérosols à longue distance	88
10	Distribution verticale de l'aérosol	88
11	Impact des aérosols sur le climat	89
Exercices		90

CHAPITRE VI- LA STRATOSPHERE

1	Structure de la stratosphère et trou d'ozone	92
1.1	Observation de l'ozone stratosphérique	92
1.2	Le « trou d'ozone »	94
2	Cycle de l'ozone stratosphérique - Modèle de Chapman	95
3	Perturbations du cycle de Chapman par les gaz naturels	96
3.1	Oxydes d'azote	96
3.2	Vapeur d'eau	97
3.3	Méthane	97
3.4	Composés soufrés	98
4	Destruction de l'ozone par les chlorofluorocarbures (CFC)	98
4.1	Réactions ozone chlore	98
4.2	Terminaison des réactions	99
5	Solutions	99
5.1	Traité de Montréal	99

5.2	Produits de substitution	100
6	Bilan et perspectives de l'impact des CFC sur la stratosphère	100
6.1	Destruction d'ozone en régions polaires	100
6.2	Couplage « effet de serre / trou d'ozone »	101
6.3	Modèles de simulation	101
6.4	Perspectives	102
Exercices		103

CHAPITRE VII - EFFET DE SERRE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1	Définition de l'effet de serre	104
1.1	Changement des longueurs d'onde lumineuse	104
1.2	Les gaz à effet de serre (GES)	105
1.3	Pouvoir réchauffant	105
2	Dioxyde de carbone CO₂ et méthane CH₄	106
2.1	Présence de ces deux gaz dans l'atmosphère	106
2.2	Variation des concentrations de CO ₂ et de CH ₄ depuis 200 ans	106
3	Les réservoirs de carbone	107
3.1	Atmosphère	107
3.2	Océans	108
3.3	Sols, roches et sédiments	109
3.4	Biosphère	109
4	Le cycle du carbone	110
4.1	Le cycle géochimique du carbone dans les roches	110
4.2	Les échanges du carbone entre l'atmosphère et les océans	111
5	Impact climatique de l'augmentation de la température de la terre	112
5.1	Participation des gaz et aérosols au réchauffement climatique	112
5.2	Augmentation de la température terrestre	112
5.3	Conséquences du réchauffement climatique	113
5.4	Variations naturelles de la température de la terre	115
5.5	Que conclure ?	116
Exercice		118

SECONDE PARTIE : ASPECTS TECHNIQUES

CHAPITRE VIII - METHODES DE PRELEVEMENT ET D'ANALYSE DES GAZ

1	Méthodes simples et rapides - tubes colorés et tubes passifs	119
1.1	Procédure	119
1.2	Types de tubes	120
1.3	Calibration	120
2	Prélèvements sans concentration	121
2.1	Sacs	121
2.2	Containers en verre	121
2.3	Containers en acier (canisters)	122
3	Prélèvements avec concentration	123
3.1	Méthodes par absorption (barbotage)	123
3.2	Méthodes par adsorption	124
3.3	Filtres imprégnés	126
4	Monitoring en continu des polluants réglementés	127
4.1	Mesure des oxydes d'azote par chimiluminescence	127
4.2	Mesure de l'ozone	128
4.3	Mesure du SO ₂ par fluorescence UV	129

4.4	Mesure du CO par infrarouge non dispersif	129
5	Les méthodes de haute technologie	130
5.1	Cellule à long trajet	130
5.2	Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)	132
5.3	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRFT)	133
5.4	Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS)	134
5.5	Mesure des radicaux OH° par Laser Induced Fluorescence (LIF)	134
6	Prélèvements à l'émission industrielle – canne isocinétique	135

CHAPITRE IX - METHODES DE PRÉLEVEMENT ET D'ANALYSE DES AEROSOLS

1	Méthodes d'échantillonnage	137
1.1	Systèmes de filtration totale	138
1.2	Autres systèmes de collecte	140
2	Mesure des paramètres physiques des particules	143
2.1	Détermination de la masse des particules	143
2.2	Détermination de la forme des particules	144
2.3	Détermination du nombre de particules	144
3	Méthodes d'analyse chimique	146
3.1	Analyse de la matière organique	146
3.2	Analyse des éléments inorganiques et des métaux	147
3.3	Analyse des ions	148
3.4	Mesure du carbone total par la méthode opto thermique	148

CHAPITRE X - LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

1	Politique et méthodes de travail des réseaux	150
1.1	Objectifs	150
1.2	Cahier des charges	151
1.3	Polluants mesurés	151
1.4	Matériels et méthodes	153
2	Normes de pollution atmosphérique	154
2.1	Sites de proximité et sites de fond	154
2.2	Indice ATMO	155
2.3	Alertes	155
3	Quelques réseaux nationaux et internationaux	156
3.1	Réseau AIRPARIF	156
3.2	Réseau APPA	156
3.3	Réseau Air Normand	157
3.4	Réseau DEFORPA	157
3.5	Réseaux internationaux	157
4	Relations Pollution Santé	158
5	Statistiques	158
5.1	Evolution des concentrations de SO ₂ en France entre 1975 et 1991	158
5.2	Niveaux de pollution en France en 1996	160
5.3	Commentaires	161
5.4	Evolution depuis l'année 2000	161

CHAPITRE XI - POLLUTION VEHICULAIRE ET INDUSTRIELLE

1	Pollution véhiculaire	163
---	------------------------------	-----

1.1	Polluants émis par les véhicules	163
1.2	Réglementation européenne	164
1.3	Pollution par les automobiles à essence	167
1.4.	Solutions techniques pour réduire la pollution automobile	168
1.5	Pollution par les véhicules diesel	170
1.6	Les nouveaux carburants	171
1.7	Véhicules électriques	171
2	Pollution par les installations de combustion	172
2.1	Taxes parafiscales TGAP et TPPA	172
2.2	Réductions des émissions d'oxyde de soufre	172
3	Pollution par les incinérateurs de déchets	173
3.1	Nature des polluants émis	173
3.2	Normes pour les incinérateurs	175
3.3	Rejets solides	176

CHAPITRE XII - METHODES DE DEPOLLUTION INDUSTRIELLE

1	Méthodes de dépollution des gaz à l'émission	177
1.1	Problématique	177
1.2	Méthodes par absorption	178
1.3	Méthodes par adsorption	180
1.4	Procédés par condensation	181
1.5	Procédés par oxydation (ou réduction)	182
1.6	Exemple de traitement: limitations des émissions gazeuses de SO ₂	183
2	Méthodes de dépollution des particules – électrofiltres	186

CHAPITRE XIII - EFFETS DES POLLUANTS SUR LA SANTÉ

1	Polluants gazeux réglementés	187
1.1	Monoxyde de carbone	187
1.2	Oxydes d'azote	188
1.3	Oxyde de soufre	189
2	Les Composés organiques volatils	189
2.1	Hydrocarbures non aromatiques	189
2.2	Hydrocarbures monoaromatiques (BTEX)	189
3	Les polluants très dangereux	190
3.1	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	190
3.2	Dioxines	191
4	Les Photoxydants	192
4.1	Ozone	192
4.2	Aldéhydes	192
4.3	PAN	193
5	Les Polluants particulaires	193
5.1	Poussières émises hors combustion	194
5.2	Poussières de combustion	194
6	Impact environnemental du CO₂	195
7	Etudes épidémiologiques	195

ANNEXE : PROBLEMES - REALISATION DE CAS CONCRETS 197

Problème n°1 : étude des émissions polluantes par un incinérateur de déchets	198
Problème n°2 : étude de la pollution photooxydante et particulaire en région PACA	202
Problème n°3 : étude de la pollution en Basse Seine	206
Problème n°4 : étude de la pollution dans les vallées alpines	209