

<b>RECORD</b> – Recherche coopérative sur les déchets et l’environnement .....	III
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	IV
<b>PRÉFACE</b> .....	V
<b>INTRODUCTION</b> .....	XVII
<b>CHAPITRE 1 – LES POLLUANTS CONTENUS DANS LES FUMÉES</b> ....	1
1. Conversion des unités .....	1
2. Monoxyde de carbone (CO) .....	3
3. Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) .....	8
4. Poussières .....	12
5. Chlorure d’hydrogène (HCl) .....	22
6. Fluorure d’hydrogène (HF) .....	27
7. Anhydride sulfureux (SO <sub>2</sub> ) .....	30
8. Anhydride sulfurique (SO <sub>3</sub> ) .....	36
9. Sulfure d’hydrogène (H <sub>2</sub> S) .....	40
10. Oxydes d’azote (NO <sub>x</sub> ) .....	44
11. Ammoniac (NH <sub>3</sub> ) .....	55
12. Métaux lourds .....	58
13. Dioxines/Furanes .....	80
14. Composés organiques volatils (COV) .....	89
15. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) .....	101
16. Composés bromés et iodés .....	109
17. Siloxanes .....	114
<b>CHAPITRE 2 – LES MÉTHODES DE MESURES ET D’ANALYSES DES POLLUANTS</b> .....	117
1. Aspect réglementaire et normatif .....	117
2. Traitement des données .....	119

3.	Mesure en continu .....	121
4.	Méthodes de mesures des organismes de contrôles .....	138

### **CHAPITRE 3 – LE TRAITEMENT THERMIQUE DES DÉCHETS.....** 149

1.	Généralités .....	149
2.	Destruction thermique en atmosphère oxydante (incinération) .....	150
2.1.	Les fours à grilles.....	150
2.2.	Les fours tournants.....	151
2.3.	Les fours à lit fluidisé .....	151
3.	Destruction thermique en atmosphère réductrice .....	152
4.	Législation .....	153

### **CHAPITRE 4 – LES TECHNIQUES D'ÉPURATION DES FUMÉES .....** 155

1.	Introduction .....	155
2.	Traitements secs .....	165
2.1.	Épuration par voie sèche par réactif calcique .....	165
2.1.1.	Description du procédé .....	165
2.1.2.	Nature des réactifs.....	166
2.1.3.	Réactions mises en jeu .....	167
2.1.4.	Efficacité par rapport aux différents polluants.....	167
2.1.5.	Consommation de réactifs.....	170
2.1.6.	Performances du procédé.....	170
2.1.7.	Sous-produits de la réaction.....	171
2.1.8.	Avantages et inconvénients du procédé.....	173
2.1.9.	Perspectives de développement du procédé.....	173
2.1.10.	Références d'ensembliers .....	174
2.1.11.	Installations .....	174
2.2.	Épuration par voie sèche par réactif sodique.....	175
2.2.1.	Description du procédé .....	175
2.2.2.	Efficacité par rapport aux différents polluants.....	176
2.2.3.	Consommation de réactifs.....	177
2.2.4.	Dimensionnement .....	178
2.2.5.	Performances du procédé en neutralisation des gaz acides ..	179
2.2.6.	Sous-produits de la réaction.....	179
2.2.7.	Devenir des sous-produits.....	180
2.2.8.	Avantages et inconvénients du procédé.....	181
2.2.9.	Perspectives de développement du procédé.....	181
2.2.10.	Références d'ensembliers .....	182
2.2.11.	Installations .....	182
2.3.	Comparaison des différents réactifs alcalins .....	182
3.	Épuration par voie semi-humide .....	183
3.1.	Description du procédé .....	183
3.2.	Aspect théorique .....	184
3.3.	Nature du réactif .....	184
3.4.	Technologie .....	185
3.5.	Efficacité par rapport aux différents polluants .....	186

3.6.	Consommation de réactifs .....	187
3.7.	Dimensionnement .....	187
3.8.	Performance du procédé .....	188
3.9.	Nature et quantité des sous-produits de la réaction .....	188
3.10.	Devenir des sous-produits.....	189
3.11.	Perspectives de développement du procédé.....	189
3.12.	Avantages et inconvénients du procédé.....	189
3.13.	Références d'ensembliers .....	190
3.14.	Installations.....	190
4.	Traitements humides .....	191
4.1.	Description du procédé .....	191
4.1.1.	Système de dépoussiérage.....	191
4.1.2.	Refroidissement .....	191
4.1.3.	Polluants captés.....	192
4.2.	Caractéristiques des laveurs.....	192
4.2.1.	Type de colonne.....	193
4.2.2.	Choix de la solution de lavage .....	195
4.2.3.	Vitesse et débit.....	196
4.3.	Configurations possibles.....	197
4.3.1.	Lavage à un étage.....	197
4.3.2.	Lavage à deux étages .....	198
4.4.	Devenir des effluents liquides issus du lavage .....	201
4.4.1.	Traitement physico-chimique .....	202
4.4.2.	Traitement biologique.....	204
4.4.3.	Évaporation.....	205
4.5.	Consommation de réactifs et quantité de produits obtenus .....	205
4.5.1.	Consommation d'eau et de soude .....	205
4.5.2.	Consommation de chaux.....	206
4.6.	Avantages et inconvénients du procédé.....	206
4.7.	Évolutions du procédé humide .....	206
4.7.1.	Réduction de la consommation d'eau .....	207
4.7.2.	Traitement biologique anaérobie (conversion des sulfates)...	207
4.7.3.	Application de la technologie membranaire .....	207
4.7.4.	Développement de nouvelles tours d'atomisation .....	207
4.7.5.	Optimisation de la solution de lavage.....	208
4.8.	Perspectives de développement .....	209
4.9.	Références de constructeurs .....	209
4.10.	Installations.....	209
5.	Épuration par voie combinée .....	210
5.1.	Épuration combinée semi-humide/charbon actif .....	210
5.1.1.	Description du procédé .....	210
5.1.2.	Efficacité.....	212
5.2.	Épuration combinée SEC/SCR.....	212
5.2.1.	Principe .....	212
5.2.2.	Performances.....	213
5.2.3.	Avantages/inconvénients .....	214

5.3.	Épuration combinée humide/semi-humide .....	214
5.3.1.	Description du procédé .....	214
5.3.2.	Module semi-humide .....	215
5.3.3.	Dépoussiérage .....	215
5.3.4.	Module humide .....	215
5.3.5.	Traitement d'eau .....	215
5.3.6.	Spécificités du procédé combiné .....	215
5.3.7.	Nature des réactifs.....	216
5.3.8.	Nature des polluants captés – mécanismes.....	216
5.3.9.	Consommation de réactifs.....	217
5.3.10.	Produits issus du procédé.....	218
5.4.	Performances du procédé combiné.....	218
5.5.	Observations .....	218
5.6.	Références de constructeurs.....	219
5.7.	Installations.....	219
	Techniques de dépoussiérage .....	220
6.1.	Généralités .....	220
6.1.1.	Choix du dépoussiéreur.....	220
6.1.2.	Coûts de fonctionnement .....	221
6.2.	Dépoussiéreurs mécaniques : les cyclones .....	221
6.2.1.	Principe .....	221
6.2.2.	Évolution.....	224
6.2.3.	Avantages – inconvénients .....	226
6.3.	Les laveurs .....	226
6.3.1.	Principe de fonctionnement des laveurs Venturi .....	226
6.3.2.	Efficacité et perte de charge.....	227
6.3.3.	Dimensions .....	229
6.3.4.	Caractéristiques et inconvénients d'un laveur Venturi .....	229
6.4.	Électrofiltres.....	230
6.4.1.	Principe .....	230
6.4.2.	Caractéristiques de l'électrofiltre.....	231
6.4.3.	Conditions de fonctionnement .....	231
6.4.4.	Rendement .....	232
6.4.5.	Performances.....	233
6.4.6.	Dimensions .....	234
6.4.7.	Avantages et inconvénients d'un électrofiltre.....	235
6.4.8.	Électrofiltres particuliers.....	236
6.4.9.	Perspectives d'évolution .....	240
6.5.	Dépoussiéreur à média filtrants .....	240
6.5.1.	Principe .....	240
6.5.2.	Média filtrant – Surface filtrante.....	242
6.5.3.	Température de fonctionnement .....	247
6.5.4.	Conditionnement du flux à traiter .....	247
6.5.5.	Perte de charge.....	248
6.5.6.	Particularités du filtre à manches.....	249
6.5.7.	Particularités du filtre céramique .....	250
6.5.8.	Performances.....	252

6.5.9.	Avantages et inconvénients des filtres à manches .....	254
6.5.10.	Fournisseurs .....	254
6.5.11.	Évolution.....	254
6.6.	Comparaison des électrofiltres et des filtres à manches .....	255
6.6.1.	Performances.....	255
6.6.2.	Coûts d'investissement .....	256
6.6.3.	Frais d'exploitation .....	257
6.6.4.	Surveillance.....	257
6.6.5.	Influence de la température.....	257
6.6.6.	Capacité d'évolution .....	258
6.6.7.	Utilisation dans les installations de traitement thermique des déchets .....	258
6.7.	Perspectives d'évolution : La thermophorèse.....	258
6.8.	Fournisseurs des traitements de poussières .....	260
7.	Réduction Sélective Non Catalytique (SNCR) .....	261
7.1.	Description.....	261
7.1.1.	Réactions mises en jeu .....	261
7.1.2.	Influence de la température.....	262
7.1.3.	Technologie.....	263
7.2.	Injection d'une solution ammoniacquée.....	264
7.2.1.	Principe .....	264
7.2.2.	Mise en œuvre.....	264
7.2.3.	Stœchiométrie .....	265
7.2.4.	Choix du réactif ammoniacal.....	265
7.3.	Émissions de polluants secondaires.....	266
7.4.	Devenir des sous-produits de la réaction .....	268
7.4.1.	Généralités .....	268
7.4.2.	Traitement du NH <sub>3</sub> .....	268
7.5.	Évolution .....	269
7.5.1.	Utilisation des micro-ondes .....	269
7.5.2.	Adaptation : Injection de billes d'urée solide .....	269
7.5.3.	Le système ECOTUBE.....	270
7.6.	Dimensions et consommation de réactif .....	272
7.7.	Performances .....	273
7.8.	Avantages et inconvénients du procédé SNCR .....	274
7.9.	Références de constructeurs.....	274
7.10.	Installations.....	274
8.	Réduction Sélective Catalytique (SCR) .....	276
8.1.	Description du procédé.....	276
8.2.	Principe général .....	276
8.3.	Catalyseur .....	277
8.3.1.	Principe .....	277
8.3.2.	Durée de vie – désactivation .....	278
8.3.3.	Régénération .....	279
8.4.	Réactions mises en œuvre.....	280
8.5.	Températures .....	280
8.6.	Polluants traités.....	281

8.7.	Comparaison des différents placements possibles.....	281
8.7.1.	SCR « High Dust » .....	282
8.7.2.	SCR à haute température .....	282
8.7.3.	SCR à basse température .....	282
8.8.	Stœchiométrie/consommations de réactifs/dimensions.....	283
8.9.	Performances .....	285
8.10.	Avantages et inconvénients .....	286
8.11.	Perspectives de développement .....	286
8.12.	Références de constructeurs.....	287
8.13.	Installations SCR .....	287
9.	Reburning .....	290
9.1.	Présentation.....	290
9.2.	Principe .....	290
9.3.	Combustibles utilisés .....	292
9.4.	Température de Reburning .....	292
9.5.	Performances .....	293
9.6.	Avantages et inconvénients .....	294
10.	Autres méthodes de traitement des NOX .....	295
10.1.	Hybrid reburn et Advanced Reburn .....	295
10.1.1.	Principe .....	295
10.1.2.	Avantages et inconvénients.....	295
10.1.3.	Perspectives d'évolution .....	295
10.1.4.	Références de sociétés .....	296
10.1.5.	Installations.....	296
10.2.	Les techniques primaires .....	296
10.2.1.	Combustion étagée.....	296
10.2.2.	Recirculation des fumées .....	296
10.2.3.	Injection d'oxygène .....	297
10.3.	Les filtres à manches catalytiques .....	297
10.3.1.	Principe .....	297
10.3.2.	Traitements des NOX .....	298
10.3.3.	Traitements des dioxines/furanes.....	298
10.3.4.	Avantages et inconvénients.....	300
10.4.	Filtres céramiques catalytiques.....	300
10.4.1.	Principe .....	300
10.4.2.	Efficacité .....	301
10.4.3.	Avantages et inconvénients.....	301
11.	Procédés par adsorption .....	302
11.1.	Description du procédé .....	302
11.2.	Réactifs utilisés .....	302
11.3.	Les adsorbants .....	303
11.3.1.	Le charbon actif .....	303
11.3.2.	Les mélanges chaux-charbon actif .....	303
11.3.3.	Le coke de lignite.....	303
11.3.4.	Les zéolithes.....	303
11.3.5.	Les gels de silice .....	304
11.3.6.	Les aluminés activés .....	304

11.3.7.	Les adsorbants à base de polymères .....	304
11.4.	Capacité d'adsorption et porosité .....	304
11.4.1.	Caractéristiques des adsorbants .....	304
11.4.2.	Modèle de langmuir .....	305
11.4.3.	Synthèse .....	305
11.5.	Types de polluants captés .....	306
11.6.	Solutions technologiques utilisées .....	307
11.6.1.	Réacteur à lit fixe type ADIOX® .....	307
11.6.2.	Filtres à bain statique .....	309
11.6.3.	Réacteur en lit mobile .....	310
11.6.4.	Réacteur de transport .....	311
11.6.5.	Réacteur à lit fluidisé circulant .....	314
11.7.	Dimensions .....	315
11.8.	Performances des procédés d'adsorption.....	315
11.9.	DéDiox catalytique par voie humide .....	317
11.9.1.	Principe .....	317
11.9.2.	Performances.....	317
11.10.	Perspectives .....	317
11.10.1.	Généralités .....	317
11.10.2.	Tissus de carbone activé et électrodésorption.....	318
11.10.3.	Adsorption-ozonation .....	318
11.10.4.	Charbon actif imprégné de catalyseur.....	318
11.11.	Régénération .....	319
11.12.	Références de constructeurs.....	320
11.13.	Installations .....	320
12.	Épuration par oxydation thermique – Post Combustion .....	322
12.1.	Principe .....	322
12.2.	Destruction thermique récupérative.....	325
12.3.	Destruction thermique régénérative.....	325
12.4.	Destruction thermique catalytique.....	327
12.5.	Avantages et inconvénients .....	327
12.6.	Références de constructeurs.....	328
13.	Épuration par condensation .....	329
13.1.	Description du procédé .....	329
13.2.	Principe de fonctionnement .....	329
13.3.	Condensation de surface .....	329
13.3.1.	Généralités .....	329
13.4.	Consommations .....	330
13.4.1.	Consommation de chaux.....	330
13.4.2.	Consommation d'eau .....	330
13.5.	Nature des polluants captés.....	330
13.6.	Performances du procédé.....	331
13.7.	Condensation de contact .....	331
13.7.1.	Principe .....	331
13.7.2.	Efficacité.....	332
13.8.	Condensation des COV.....	334
13.8.1.	Systèmes de compression .....	334

13.8.2.	Condensation à l'azote liquide .....	334
13.9.	Efficacité de condensation des solvants.....	334
13.10.	Perspectives de développement de l'épuration par condensation.....	335
13.10.1.	Généralités .....	335
13.10.2.	Dépoussiéreur électrostatique à condensation .....	335
13.11.	Avantages et inconvénients .....	335
13.12.	Références de constructeurs.....	335
13.13.	Installations.....	336
14.	Traitement du dioxyde de carbone .....	337
14.1.	Problématique .....	337
14.2.	Valorisation énergétique.....	337
14.3.	Valorisation chimique.....	337
14.4.	Capture du CO <sub>2</sub> produit .....	338
14.4.1.	Absorption .....	338
14.4.2.	Adsorption .....	338
14.4.3.	Séparation cryogénique .....	338
14.4.4.	Séparation membranaire .....	338
14.4.5.	Devenir du CO <sub>2</sub> capté .....	338
14.5.	Évolution.....	339
15.	Bioprocédés .....	340
15.1.	Généralités .....	340
15.2.	Conditions opératoires .....	340
15.2.1.	Température .....	340
15.2.2.	Humidité .....	341
15.2.3.	pH.....	341
15.2.4.	Polluants.....	341
15.3.	Polluants traités.....	341
15.3.1.	Dioxines et furanes .....	342
15.3.2.	Composés Organiques Volatils.....	343
15.4.	Types de réacteurs .....	343
15.4.1.	Biofiltre .....	343
15.4.2.	Filtre percolateur.....	345
15.4.3.	Biolaveur.....	346
15.4.4.	Synthèse .....	347
15.5.	Polluants générés .....	348
15.6.	Évolution.....	348
15.6.1.	Filtration membranaire.....	348
15.6.2.	Solvant organique/minéral .....	349
15.6.3.	Épuration du NH <sub>3</sub> .....	350
15.7.	Avantages et inconvénients .....	351
15.8.	Références de constructeurs.....	351
15.9.	Références.....	351
16.	Nouvelles technologies .....	352
16.1.	L'épuration par plasma semi-humide .....	352
16.1.1.	Principe .....	352
16.1.2.	Efficacité.....	353
16.2.	Épurateur d'huile .....	354



16.3. Traitement du mercure .....	354
16.3.1. Injection de bromure de sodium [190].....	354
16.3.2. Mercox [294] .....	354
<b>CONCLUSION</b> .....	357
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	359
<b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....	375
<b>TABLE DES FIGURES</b> .....	381
<b>INDEX</b> .....	385