

|   |      |
|---|------|
| <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<br/>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<br>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 |
| <br>  |     |
| <b>CONCLUSION</b> .....                           | 357 |
| <b>RÉFÉRENCES</b> .....                           | 359 |
| <b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....                   | 375 |
| <b>TABLE DES FIGURES</b> .....                    | 381 |
| <b>INDEX</b> .....                                | 385 |