

Stéphane Bicocchi
Mathieu Boulinguez • Karen Diard

Les polluants et les techniques d'épuration des fumées

Cas des unités
de traitement et de valorisation des déchets

2^e édition

État de l'art



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Sommaire

RECORD – Recherche coopérative sur les déchets et l’environnement	III
REMERCIEMENTS	IV
PRÉFACE	V
INTRODUCTION	XVII
CHAPITRE 1 – LES POLLUANTS CONTENUS DANS LES FUMÉES	1
1. Conversion des unités	1
2. Monoxyde de carbone (CO)	3
3. Dioxyde de carbone (CO ₂)	8
4. Poussières	12
5. Chlorure d’hydrogène (HCl)	22
6. Fluorure d’hydrogène (HF)	27
7. Anhydride sulfureux (SO ₂)	30
8. Anhydride sulfurique (SO ₃)	36
9. Sulfure d’hydrogène (H ₂ S)	40
10. Oxydes d’azote (NO _x)	44
11. Ammoniac (NH ₃)	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
CHAPITRE 2 – LES MÉTHODES DE MESURES ET D’ANALYSES DES POLLUANTS	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
6.	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.	Stoechiométrie	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_3	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.	Stoechiométrie/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 activées	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 ₂ 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 ₂ 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 ₃	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
CONCLUSION	357
RÉFÉRENCES	359
TABLE DES TABLEAUX	375
TABLE DES FIGURES	381
INDEX	385

Afin d'appréhender les techniques d'épuration des fumées issues des unités de traitement thermique des déchets, il est nécessaire de s'intéresser aux différents composés formés lors de la combustion des déchets. Une fois ces mécanismes de formation établis, un focus sur les méthodes de mesure et d'analyse des polluants permettra au lecteur de bien comprendre les limites physiques de la surveillance de ces polluants.

La plupart des polluants étant formés lors de l'étape de combustion dans le four, nous nous attarderons sur cette problématique afin de bien cerner les enjeux de la bonne maîtrise de la combustion.

Toutes ces données étant acquises, nous pouvons alors développer les différentes techniques d'épuration des fumées en fonction des polluants à capter.

Les traitements des fumées s'articulent autour du traitement de neutralisation des polluants acides. Aussi, ceux-ci seront d'abord présentés :

- Traitements secs (réactif calcique, réactif sodique) ;
- Épuration par voie semi-humide ;
- Traitements humides ;
- Épuration par voie combinée.

Ces traitements étant détaillés, nous présenterons les différentes techniques de captation des poussières, associées aux traitements de neutralisation.

- Dépoussiéreurs mécaniques : les cyclones ;
- Laveurs ;
- Electrofiltres ;
- Dépoussiéreurs à média filtrants.

Les techniques de traitement des NO_x (oxydes d'azote) seront alors présentées.

- Réduction Sélective Non Catalytique (SNCR) ;
- Réduction Sélective Catalytique (SCR) ;
- Reburning ;
- Autres méthodes de traitement des NO_x .

Devenue rapidement la référence lors de sa première parution, cette deuxième édition – actualisée des plus récentes données technologiques – répond aux nouvelles attentes environnementales (Grenelle de l'Environnement, Meilleures Technologies Disponibles, Nouvelles dispositions réglementaires).

Les polluants et les techniques d'épuration des fumées, ouvrage exhaustif et pratique, traite d'une part des polluants contenus dans les fumées des unités de traitement et valorisation thermique des déchets et, d'autre part, des techniques permettant leur dépollution. Il est constitué de deux ensembles de monographies très structurées :

polluants

(16 composés ou famille de composés)

- caractéristiques physico-chimiques
- caractéristiques thermiques
- sources de formation
- mécanismes de formation
- valeurs et prescriptions réglementaires
- gamme de concentrations émises
- effets sur l'environnement et la santé
- émissions dans l'atmosphère

techniques d'épuration

(16 procédés ou familles de procédés)

- descriptif du procédé
- présentation technologique
- nature des réactifs
- efficacité selon différents polluants
- nature des résidus produits
- performances du procédé
- avantages, inconvénients, contraintes
- perspectives de développement
- références de constructeurs
- présentation d'installations

De plus, une partie spécifique sur les méthodes de mesures et d'analyses des polluants vient compléter ces monographies.

Outre les techniques utilisées actuellement, l'ouvrage inclut également :

- les procédés appliqués aux fumées industrielles et adaptables aux fumées issues du traitement et de la valorisation thermique des déchets ;
- les axes de développement de nouvelles technologies.

La rigueur des données présentées, la clarté des fiches réalisées, la pertinence des illustrations font de ce livre réalisé sous la direction de l'association RECORD un outil professionnel répondant avec efficacité aux questions des personnes impliquées dans le traitement et la valorisation thermique des déchets, mais également des professeurs et étudiants des cursus spécialisés en Environnement et Développement durable.

Stéphane Bicocchi

Dirigeant de Cadet international, ingénieur UTC en génie chimique, DEA Sciences et techniques de l'environnement Paris XII, ENPC et ENGREF

Mathieu Boulinguez

Ingénieur attaché d'études chez Cadet international, ingénieur UTC en génie des procédés

Karen Diard

Responsable d'agence chez Cadet international, DEA INSA de Lyon Sciences et techniques des déchets

978-2-7430-1190-1



9 782743 011901