

coordonnateur
Eugen Hnatiuc



Procédés
électriques
de mesure
et de traitement
des polluants

Editions
TEC
& **DOC**

aire et
73376

savoie.fr

ole

ment

o.fr

Lyon
von,

lyon.fr

d'iasi

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

Le présent ouvrage est un délit

Table des matières

Préface	III
Remerciements	IV
Liste des auteurs	V
Avant-propos (Gérard Matricali)	XVII
Introduction	XIX

PARTIE 1

Énergie électrique et environnement

Chapitre 1	
Problèmes environnementaux (E. Hnatiuc, et J.-L. Fanlo)	3
1. L'homme et l'environnement	3
2. Évolution historique de la pollution	5
3. Sources de pollution. Classification des polluants	9
4. Dispersion et circulation des polluants	11
5. Accumulation des polluants dans la biomasse. Chaînes trophiques	15
6. Bilan des principaux problèmes	17
7. Aspects actuels de la pollution	18
7.1. Pollution acoustique	18
7.1.1. Sons et bruits	18
7.1.2. Mesures acoustiques	20
7.1.3. Évaluation des effets du bruit sur l'homme	22
7.1.4. Limitation de la pollution acoustique	24
7.2. Pollution par les odeurs	26
7.2.1. L'individu et les odeurs	27
7.2.2. Caractéristiques des odeurs	27
7.2.3. Nature et sources des nuisances olfactives	28
Références bibliographiques	31

Chapitre 2

Législation – Aspects normatifs et législatifs en matière de protection de l'environnement. Suivi de la pollution (E. Hnatiuc)

1. Législation – Aspects normatifs et législatifs en matière de protection de l'environnement.....	33
1.1. Évolution historique.....	33
1.2. Installations classées.....	34
1.3. Acteurs intervenant sur l'environnement.....	37
1.4. L'environnement sans frontières. Politique européenne de l'environnement.....	39
2. Suivi de la pollution.....	43
Références bibliographiques.....	44

Chapitre 3

Importance des techniques électriques en matière d'environnement (E. Hnatiuc)

1. Incidence des techniques électriques sur la protection de l'environnement.....	45
1.1. Procédés électriques pour le traitement de l'air.....	48
1.2. Procédés électriques pour le traitement des solutions aqueuses.....	49
1.3. Procédés électriques pour la dépollution des sols, des boues pâteuses et des déchets.....	50
1.4. Procédés électriques de mesure de polluants.....	51
2. Avantages des techniques électriques de mesure et de traitement des polluants.....	53
3. Conclusions sur l'importance des techniques électriques.....	54
Références bibliographiques.....	56

PARTIE 2

Méthodes de mesure et d'analyse des polluants

Chapitre 4

Importance des techniques électriques de mesure des polluants – Situation par rapport aux méthodes classiques (Valérie Desauziers et Jean-Michel Guillot)

1. Lieux de la mesure.....	60
2. Objectifs de la mesure.....	60
2.1. Application des normes ou proposition de méthodes de mesure en l'absence de normes.....	60
2.2. Préparation du suivi (monitoring).....	62
2.3. Obtention de signaux compatibles avec le pilotage d'une unité de traitement.....	63

Positionnement des méthodes classiques (physicochimiques : optiques, spectrométriques...) par rapport aux méthodes électriques.....	63
Mise en évidence des performances et des limites.....	64
Procédures d'étalonnage.....	65

Chapitre 5

Techniques de séparation ioniques et électriques (Valérie Desauziers et Jean-Michel Guillot)

1. Chromatographie ionique.....	68
1.1. Modes de séparation.....	69
1.1.1. Échange d'ions.....	70
1.1.2. Appariement d'ions.....	70
1.1.3. Choix du mode de séparation.....	71
1.2. Applications de la chromatographie ionique en environnement.....	72
2. Électrophorèse capillaire.....	73
2.1. Mécanisme de séparation.....	75
2.1.1. Mobilité électrophorétique.....	75
2.1.2. Flux électro-osmotique.....	75
2.2. Différents types d'électrophorèse capillaire et applications.....	77
2.2.1. Électrophorèse capillaire en « zone libre » (CZE).....	77
2.2.2. Électrophorèse capillaire micellaire.....	79
2.3. Avantages et limites de l'électrophorèse capillaire.....	79
2.3.1. Limites.....	79
2.3.2. Avantages.....	80
3. Electrochromatographie.....	80
3.1. Mode de séparation.....	81
3.2. Applications de l'électrochromatographie.....	81
3.3. Avantages de l'électrochromatographie.....	82
Conclusion.....	82
Références bibliographiques.....	82

Chapitre 6

Détections électroniques (Valérie Desauziers et Jean-Michel Guillot)

1. Ionisation de flamme et dérivés.....	86
1.1. Détecteur à ionisation de flamme.....	86
1.1.1. Principe de fonctionnement.....	86
1.1.2. Caractéristiques.....	86
1.2. Détecteur thermoionique.....	86
2. Capture d'électrons et dérivés.....	87
2.1. Détecteur à capture d'électrons.....	87
2.1.1. Principe de fonctionnement.....	87
2.1.2. Caractéristiques.....	87
2.2. Détecteur à ionisation par gaz rares.....	87
3. Spectrométrie de masse.....	88
3.1. Principe de fonctionnement.....	88

3.2.1. Ionisation par impact électronique (IE)	88
3.2.2. Ionisation chimique (IC)	89
3.2.3. Autres ionisations	89
4. Autres méthodes	89
Références bibliographiques	89

Chapitre 7
Capteurs (Liviu Breniuc) 91

Introduction	91
1. Capteurs chimiques pour le contrôle et la description de l'environnement	94
2. Capteurs chimiques qui utilisent la mesure d'une grandeur électrique	95
2.1. Capteurs chimiques basés sur le principe de la mesure de la résistance/conductance (Chemrésistances)	96
2.2. Capteurs chimiques basés sur le principe de la mesure de la capacité (Chemcapacitances)	97
2.3. Capteurs chimiques de type diode semi-conductrice (Chemdiodes)	98
2.4. Capteurs chimiques de type Mosfet (ChemFet)	98
3. Capteurs chimiques basés sur le principe de la mesure d'une grandeur thermique	103
3.1. Thermistances	104
3.2. Pellistors	105
3.3. Thermocouples	106
4. Capteurs chimiques basés sur le principe de la mesure de la masse (capteurs chimiques gravimétriques)	107
4.1. Capteurs chimiques de type microbalance à quartz (QCM)	107
4.2. Capteurs chimiques à ondes acoustiques de surface (SAW)	108
5. Capteurs chimiques à fibre optique	111
6. Systèmes pour la surveillance continue des paramètres de l'environnement	114
Références bibliographiques	117

PARTIE 3
Traitement de la pollution

Introduction 121
(E. Hnatuc)

Chapitre 8 Procédés électriques classiques (Jean-Louis Brisset, Maria Aurora Fernandez, Eugen Hnatuc et Veronique Pomes) 123	
1. Techniques séparatives élémentaires	123
1.1. Précipitation	123
1.2. Séparation des phases solides : filtration	124
1.3. Distillation	125

1.4. Extraction	125
1.5. Autres techniques : dialyse et osmose	126
1.5.1. Dialyse	126
1.5.2. Osmose	127
Méthodes électriques ou électroassistées	127
2.1. Electrolyse et électrodépollution	128
2.1.1. Mise en œuvre générale des procédés électrolytiques	129
2.1.2. Technologies disponibles	129
2.1.3. Domaines d'applications	131
2.1.4. Séparateurs : électrolyses à membranes	131
2.1.5. Eau pure ; eau ultra-pure	133
2.2. Formation électrolytique de réactifs physiquement actifs	133
2.2.1. Electroflottation	133
2.2.2. Electrocoagulation ; électroflocculation	134
Techniques mixtes couplées aux techniques séparatives (électrotechniques ; électro-électrotechniques)	137
3.1. Electrolyse	137
3.2. Electro-électrodialyse	140
3.3. Electroremédiation	140
4.1. Introduction	140
4.2. Bases physicochimiques du procédé	141
4.2.1. Phénomènes de transport de la matière	142
4.2.2. Réactions chimiques	146
4.2.3. Importance relative des phénomènes et modélisation	148
4.3. L'électroréhabilitation des sols	149
4.4. Études laboratoires et pilote en électroremédiation	152
Références bibliographiques	155

Chapitre 9
Procédés d'oxydation avancée et procédés émergents pour la dépollution (Jean-Louis Brisset, Jean Roussy, Christian Pétrier, Nicolas Gondrexon, Alexis Evstratov) 159

1. Espèces actives. Matière gazeuse activée	160
1.1. Origines et propriétés	160
1.1.1. Origines	160
1.1.2. Nature des entités gazeuses activées	161
1.1.3. Aspect énergétique	162
1.2. Principaux antagonistes	162
1.2.1. Dioxygène	163
1.2.2. Radical hydroperoxyde $^{\circ}\text{O}_2\text{H}$ et radical anion superoxyde $\text{O}_2^{\circ-}$	163
1.2.3. Peroxyde d'hydrogène H_2O_2 et l'ion hydroperoxyde HO_2°	164
1.2.4. Radical hydroxyle $^{\circ}\text{OH}$ et l'ion conjugué $\text{O}^{\circ-}$	164
1.2.5. Oxydes d'azote	164
2. Réactivité de la matière excitée et des espèces actives	165
2.1. Acidité	165
2.2. Oxydoréduction	165
2.3. Réactions induites par les espèces actives créées par radiolyse/photolyse	166
2.4. Principales manifestations de la réactivité	167

2.5. Examen particulier de certains systèmes locaux et industriels.....	171
3. Procédés d'oxydation avancée.....	171
3.1. Ozonation.....	172
3.1.1. Propriétés physiques.....	172
3.1.2. Propriétés chimiques.....	173
3.1.3. Détermination analytique.....	173
3.1.4. Préparation.....	174
3.1.5. Réacteurs.....	176
3.1.6. Effet bactéricide.....	176
3.1.7. Mécanismes de réactions.....	179
3.2. Emploi du peroxyde d'hydrogène.....	180
3.2.1. Propriétés physiques.....	180
3.2.2. Propriétés chimiques.....	181
3.2.3. Détermination analytique.....	181
3.2.4. Production du peroxyde d'hydrogène.....	181
3.2.5. Effet bactéricide.....	181
3.3. Actions des UV.....	185
3.4. Procédés d'oxydation avancée (POA).....	186
3.4.1. Couplage O ₂ /OH.....	186
3.4.2. Couplage H ₂ O ₂ /catalyseurs métalliques.....	187
3.4.3. UV/Dioxyde de titane.....	187
3.4.4. Couplage O ₂ /H ₂ O ₂	188
3.4.5. Couplage O ₂ /UV.....	188
3.4.6. Couplage O ₂ /H ₂ O ₂ /UV.....	189
3.4.7. Couplage UV/H ₂ O ₂	191
4. Ultrasons appliqués au traitement de l'eau.....	191
4.1. Introduction, historique.....	191
4.2. Cavitation ultrasonore.....	193
4.3. Élimination sonochimique de contaminants organiques de l'eau.....	194
4.4. Les configurations de réacteurs à ultrasons.....	197
4.5. Combinaisons de procédés.....	197
4.5.1. Ultrasons-Catalyseur métallique. Ultrasons-Photochimie.....	198
4.5.2. Ultrasons-Ozonation.....	199
4.6. Ultrasons, procédés de séparation.....	200
4.7. Perspectives.....	200
5. Photocatalyse.....	200
5.1. Principes généraux.....	204
5.2. Mise en œuvre des procédés photocatalytiques.....	204
5.2.1. Choix de matériel.....	206
5.2.2. Paramètres opératoires et performances.....	207
5.2.3. Avantages et limites d'application.....	209
5.3. Exemples d'applications industrielles.....	211
5.4. Principaux fournisseurs de l'équipement.....	211
Références bibliographiques.....	212

Chapitre 10

Procédés basés sur les décharges électriques (E. Hnatuc)

1. Évolution historique des décharges.....	219
2. Types de décharges électriques.....	222

sur les décharges électriques.....	232
Équilibre thermodynamique local.....	235
Principales familles de réactions élémentaires en phase plasma.....	238
Effets acidifiants.....	239
Effets oxydants.....	240
Effets complexants.....	240
Effets radicalaires.....	241
Réacteurs électrochimiques à « plasma froid ».....	242
1. Sources d'alimentation pour les réacteurs électrochimiques à plasma froid.....	250
2. Construction des réacteurs à plasma froid.....	250
3. Construction des réacteurs type « GildArc ».....	259
4.2.2. Construction des réacteurs à plasma froid faible puissance.....	263
2. Applications des réacteurs électrochimiques à plasma froid.....	272
4.3.1. Décharge couronne.....	273
4.3.2. Arc rampant (ou arc glissant « GildArc »).....	274
4.3.3. Mécanisme d'interaction.....	276
4.3.4. Désinfection biologique.....	277
3. Domaines d'applications potentiels.....	277
4.4.1. Procédés des décharges électriques pour le traitement des odeurs.....	281
4.4.2. Électroporation.....	282
4. Réacteurs électrochimiques à décharges type plasma thermique.....	283
5.1. Construction des générateurs à plasmas thermiques.....	286
5.2. Applications des plasmas thermiques pour l'environnement.....	289
5.3. Revue des principales utilisations de décharges électriques en dépollution.....	290
6.1. Composés gazeux ou volatils.....	290
6.2. Composés peu volatils. Liquides : solvants et solutés.....	291
6.3. Incinération.....	291
Références bibliographiques.....	291

PARTIE 4

Pollution industrielle – Problèmes actuels

Introduction.....	299
Technologies propres et développement durable (Eugen Hnatuc).....	304
Références bibliographiques.....	304

Pollution Industrielle – Centrales thermoélectriques et thermiques
(Eugeniu Olimpiu Voinea)

305

1. Généralités..... 305
2. Émissions polluantes des centrales thermoélectriques et thermiques..... 306
 - 2.1. Émissions gazeuses..... 306
 - 2.2. Émissions solides..... 309
 - 2.3. Émissions liquides..... 310
- 2.4. Autres catégories de pollutions déterminées par les centrales thermoélectriques..... 310
3. Modalités pour réduire le niveau d'émissions polluantes..... 311

Références bibliographiques..... 313

Chapitre 12

Énergies renouvelables ou alternatives
(Jean Carré et Valérie Sartre-Duyme)

315

1. Énergie hydraulique..... 316
 - 1.1. Différents types d'aménagements hydrauliques..... 316
 - 1.1.1. Petites centrales hydroélectriques..... 317
 - 1.1.2. Éléments d'une petite centrale..... 318
2. Énergie éolienne..... 321
 - 2.1. Panorama mondial..... 321
 - 2.2. Gisement éolien..... 322
 - 2.3. Conversion de l'énergie éolienne..... 323
 - 2.4. État de l'art des technologies éoliennes..... 323
 - 2.4.1. Principaux composants d'un aérogénérateur..... 324
 - 2.4.2. Régulation de la vitesse de l'éolienne..... 325
 - 2.4.3. Conversion de l'énergie mécanique..... 325
- 2.5. Potentiel et barrières de l'énergie éolienne..... 326
3. Énergie photovoltaïque..... 327
 - 3.1. Panorama mondial..... 327
 - 3.2. Gisement solaire..... 328
 - 3.3. Cellule photovoltaïque..... 328
 - 3.4. Types de cellules photovoltaïques..... 330
 - 3.4.1. Cellule en silicium monocristallin..... 331
 - 3.4.2. Cellule en silicium polycristallin..... 331
 - 3.4.3. Cellule en silicium amorphe..... 331
 - 3.4.4. Cellule en silicium microcristallin..... 331
 - 3.5. Installations photovoltaïques..... 332
 - 3.6. Principales applications..... 332
 - 3.7. Perspectives et barrières de l'énergie photovoltaïque..... 332
4. Énergie solaire thermodynamique..... 333
 - 4.1. Centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques..... 334
 - 4.2. Centrales solaires à collecteurs paraboliques..... 335
 - 4.3. Centrales solaires à tour..... 336
 - 4.4. Perspectives et barrières de l'énergie solaire thermodynamique..... 336

337

1. Énergie marémotrice..... 339
 - 1.1. Énergie houlomotrice..... 339
 - 1.2. Géothermie haute température..... 339
- 1.1. Généralités sur la géothermie..... 340
 - 1.2. Gisements..... 340
 - 1.3. Recherche des gisements..... 340
 - 1.4. Fonctionnement d'une centrale géothermique..... 341
 - 1.5. Construction d'une centrale géothermique..... 342
 - 1.6. Perspectives de développement à moyen terme..... 343
- 1.6. Perspectives de développement à moyen terme..... 343
- Piles à combustible..... 343
 - 1.7.1. Définition..... 343
 - 1.7.2. Description et principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire..... 344
 - 1.7.3. Caractéristiques d'une cellule élémentaire..... 345
 - 1.7.4. Système PAC..... 345
 - 1.7.5. Intérêts des piles à combustible..... 346
 - 1.7.6. Types de piles à combustible..... 347
 - 1.7.6.1. PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC)..... 348
 - 1.7.6.2. PAC à acide phosphorique (PAFC)..... 348
 - 1.7.6.3. PAC à carbonates fondus (MFC)..... 349
 - 1.7.6.4. PAC à oxyde solide (SOFC)..... 349
- 1.7.7. Conclusions sur les piles à combustible..... 350
- 1.8. Cogénération..... 350
 - 1.8.1. Définition..... 350
 - 1.8.2. Utilisations de la cogénération..... 351
 - 1.8.3. Caractéristiques énergétiques..... 351
 - 1.8.3.1. Combustion externe : turbines à vapeur à contre-pression (ensemble chaudière, turbine à vapeur, alternateur)..... 351
 - 1.8.3.2. Combustion interne : moteurs alternatifs et turbines à gaz..... 351
 - 1.8.4. Schémas d'utilisation..... 352
 - 1.8.4.1. Moteurs alternatifs..... 352
 - 1.8.4.2. Turbines à gaz..... 352
- 1.8.5. Bilans énergétiques et économiques..... 352
- 1.8.6. Implantation de la cogénération en Europe..... 352
- 1.8.7. Trigénération..... 353
- 1.9. Biomasse et déchets..... 353
 - 1.9.1. Méthanisation de la biomasse..... 354
 - 1.9.2. Combustion de la biomasse..... 355
 - 1.9.3. Gazéification de la biomasse..... 356
 - 1.9.4. Barrières et perspectives de la production d'électricité par la biomasse..... 357

Références bibliographiques..... 358

Conclusions..... 361

Index..... 365