

coordonnateur
Eugen Hnatiuc

Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants



35533

Editions
TEC
& **DOC**

ECL 92

35533
②

Chez le même éditeur

La radioactivité au service de l'industrie et de l'environnement
A. CARLOT, 2002.

Spectrométrie gamma appliquée aux échantillons de l'environnement
CETAMA, 2002.

Matériaux de référence pour l'environnement
P. QUEVAUVILLER, 2002.

Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants

Eugen Hnatiuc
Coordonnateur



35533

Editions

TEC

& DOC

11, rue Lavoisier
75008 Paris

LONDRES - PARIS - NEW YORK

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) 33

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) 45

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 des 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) 59

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
3. Types de mesures	63

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

■ Chapitre 5

Techniques de séparation ioniques et électriques (Valérie Desauziers et Jean-Michel Guillot) 67

1. Chromatographie ionique	68
1.1. Modes de séparation	69
1.1.1. Échange d'ions	70
1.1.2. Appariement d'ions	71
1.1.3. Choix du mode de séparation	72
1.2. Applications de la chromatographie ionique en environnement	73
2. Électrophorèse capillaire	75
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)	79
2.2.2. Électrophorèse capillaire micellaire	79
2.3. Avantages et limites de l'électrophorèse capillaire	79
2.3.1. Limites	80
2.3.2. Avantages	80
3. Electrochromatographie	81
3.1. Mode de séparation	81
3.2. Applications de l'électrochromatographie	82
3.3. Avantages de l'électrochromatographie	82
Conclusion	82
Références bibliographiques	82

■ Chapitre 6

Détections électroniques (Valérie Desauziers et Jean-Michel Guillot) 85

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. Sources et modes d'ionisation	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 (E. Hnatiuc).....	121
■ Chapitre 8	
Procédés électriques classiques (Jean-Louis Brisset, Maria Aurora Fernandez, Eugen Hnatiuc et Véronique 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.....	127
1.5.2. Osmose.....	127
2. Méthodes électriques ou électroassistées.....	128
2.1. Électrolyse et électrodépollution.....	129
2.1.1. Mise en œuvre générale des procédés électrolytiques.....	129
2.1.2. Technologies disponibles.....	131
2.1.3. Domaines d'applications.....	131
2.1.4. Séparateurs : électrolyses à membranes.....	133
2.1.5. Eau pure ; eau ultra-pure.....	133
2.2. Formation électrolytique de réactifs physiquement actifs.....	133
2.2.1. Électroflottation.....	134
2.2.2. Electrocoagulation ; électrofloculation.....	134
3. Techniques mixtes couplées aux techniques séparatives (électrotechniques ; électro-électrotechniques).....	137
3.1. Électrodialyse.....	140
3.2. Électro-électrodialyse.....	140
4. L'électroremédiation.....	140
4.1. Introduction.....	141
4.2. Bases physicochimiques du procédé.....	142
4.2.1. Phénomènes de transport de la matière.....	146
4.2.2. Réactions chimiques.....	148
4.2.3. Importance relative des phénomènes et modélisation.....	149
4.3. L'électroréhabilitation des sols.....	152
4.4. Études laboratoire 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 activées. Matière gazeuse activée.....	160
1.1. Origines et propriétés.....	160
1.1.1. Origines.....	161
1.1.2. Nature des entités gazeuses activées.....	162
1.1.3. Aspect énergétique.....	162
1.2. Principaux protagonistes.....	163
1.2.1. Dioxygène.....	163
1.2.2. Radical hydroperoxyde $^{\circ}\text{O}_2\text{H}$ et radical anion superoxyde $\text{O}_2^{\circ-}$	164
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 activées créées par radiolyse/photolyse.....	166
2.4. Principales manifestations de la réactivité.....	167

2.5. Examen particulier de certains systèmes redox d'intérêt.....	169
3. Procédés d'oxydation avancée.....	171
3.1. Ozonation.....	171
3.1.1. Propriétés physiques.....	172
3.1.2. Propriétés chimiques.....	172
3.1.3. Détermination analytique.....	173
3.1.4. Préparation.....	173
3.1.5. Réacteurs.....	174
3.1.6. Effet bactéricide.....	176
3.1.7. Mécanismes de réactions.....	176
3.2. Emploi du peroxyde d'hydrogène.....	179
3.2.1. Propriétés physiques.....	180
3.2.2. Propriétés chimiques.....	180
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.....	181
3.4. Procédés d'oxydation avancée (POA).....	185
3.4.1. Couplage O_3/OH	186
3.4.2. Couplage H_2O_2 /catalyseurs métalliques.....	186
3.4.3. UV/Dioxyde de titane.....	187
3.4.4. Couplage O_3/H_2O_2	187
3.4.5. Couplage O_3/UV	188
3.4.6. Couplage $O_3/H_2O_2/UV$	188
3.4.7. Couplage UV/H_2O_2	189
4. Ultrasons appliqués au traitement de l'eau.....	191
4.1. Introduction, historique.....	191
4.2. Cavitation ultrasonore.....	191
4.3. Élimination sonochimique de contaminants organiques de l'eau.....	193
4.4. Les configurations de réacteurs à ultrasons.....	194
4.5. Combinaisons de procédés.....	197
4.5.1. Ultrasons-Catalyseur métallique. Ultrasons-Photochimie.....	197
4.5.2. Ultrasons-Ozonation.....	198
4.6. Ultrasons, procédés de séparation.....	199
4.7. Perspectives.....	200
5. Photocatalyse.....	200
5.1. Principes généraux.....	200
5.2. Mise en œuvre des procédés photocatalytiques.....	204
5.2.1. Choix de matériel.....	204
5.2.2. Paramètres opératoires et performances.....	206
5.2.3. Avantages et limites d'application.....	207
5.3. Exemples d'applications industrielles.....	209
5.4. Principaux fournisseurs de l'équipement.....	211
Références bibliographiques.....	212
■ Chapitre 10	
Procédés basés sur les décharges électriques (E. Hnatiuc)	219
1. Évolution historique des décharges.....	219
2. Types de décharges électriques.....	222

2.1. Influence du circuit électrique extérieur sur les décharges électriques.....	231
2.2. Équilibre thermodynamique local.....	232
2.3. Principales familles de réactions élémentaires en phase plasma.....	235
3.1. Effets acidifiants.....	238
3.2. Effets oxydants.....	239
3.3. Effets complexants.....	240
3.4. Effets radicalaires.....	240
4. Réacteurs électrochimiques à « plasma froid ».....	241
4.1. Sources d'alimentation pour les réacteurs électrochimiques à plasma froid.....	242
4.2. Construction des réacteurs à plasma froid.....	250
4.2.1. Construction des réacteurs type « GlidArc ».....	250
4.2.2. Construction des réacteurs à plasma froid faible puissance.....	259
4.3. Applications des réacteurs électrochimiques à plasma froid.....	263
4.3.1. Décharge couronne.....	272
4.3.2. Arc rampant (ou arc glissant « GlidArc »).....	273
4.3.3. Mécanisme d'interaction.....	274
4.3.4. Désinfection biologique.....	276
4.4. Domaines d'applications potentiels.....	276
4.4.1. Procédés des décharges électriques pour le traitement des odeurs.....	277
4.4.2. Électroporation.....	281
5. Réacteurs électrochimiques à décharges type plasma thermique.....	282
5.1. Construction des générateurs à plasmas thermiques.....	283
5.2. Applications des plasmas thermiques pour l'environnement.....	286
6. Revue des principales utilisations de décharges électriques en dépollution.....	289
6.1. Composés gazeux ou volatils.....	290
6.2. Composés peu volatils. Liquides : solvants et solutés.....	290
6.3. Incinération.....	291
Références bibliographiques.....	291

PARTIE 4

Pollution industrielle - Problèmes actuels

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

■ Chapitre 11	
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.	
Concentration du rayonnement solaire	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

5. Énergie marémotrice	337
5.1. Énergie houlomotrice	337
6. Géothermie haute température	339
6.1. Généralités sur la géothermie	340
6.2. Gisements	340
6.3. Recherche des gisements	341
6.4. Fonctionnement d'une centrale géothermique	342
6.5. Construction d'une centrale géothermique	343
6.6. Perspectives de développement à moyen terme	343
7. Piles à combustible	343
7.1. Définition	344
7.2. Description et principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire	345
7.3. Caractéristiques d'une cellule élémentaire	345
7.4. Système PAC	346
7.5. Intérêts des piles à combustible	347
7.6. Types de piles à combustible	348
7.6.1. PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC)	348
7.6.2. PAC à acide phosphorique (PAFC)	349
7.6.3. PAC à carbonates fondus (MCFC)	349
7.6.4. PAC à oxyde solide (SOFC)	350
7.7. Conclusions sur les piles à combustible	350
8. Cogénération	350
8.1. Définition	351
8.2. Utilisations de la cogénération	351
8.3. Caractéristiques énergétiques	
8.3.1. Combustion externe : turbines à vapeur à contre-pression (ensemble chaudière, turbine à vapeur, alternateur)	351
8.3.2. Combustion interne : moteurs alternatifs et turbines à gaz	352
8.4. Schémas d'utilisation	352
8.4.1. Moteurs alternatifs	352
8.4.2. Turbines à gaz	352
8.5. Bilans énergétiques et économiques	352
8.6. Implantation de la cogénération en Europe	353
8.7. Trigénération	353
9. Biomasse et déchets	354
9.1. Méthanisation de la biomasse	355
9.2. Combustion de la biomasse	356
9.3. Gazéification de la biomasse	356
9.4. Barrières et perspectives de la production d'électricité par la biomasse	357
Références bibliographiques	358
Conclusions	361
Index	365

La protection de notre environnement implique une maîtrise de la réduction des polluants générés par l'activité anthropique et notamment industrielle. Aujourd'hui, face à une sensibilisation mondiale, et plus particulièrement dans le cadre de la politique communautaire, les rejets sont étroitement contrôlés, contingentés et soumis à des réglementations de plus en plus sévères. Les décideurs industriels sont ainsi amenés à sélectionner des techniques d'analyse et de dépollution adéquates. Les procédés électriques, par leur caractère non polluant, constituent une solution performante et propre s'inscrivant dans les objectifs du développement durable.

L'approche proposée dans *Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants* est structurée et met en relief les principales voies électriques d'abattement de la pollution à l'aide de techniques rapides, souples, maîtrisables et autonomes, compatibles avec un traitement en temps réel. Ces procédés sont adaptables à la plupart des activités

industrielles qui doivent faire face à des rejets gazeux, liquides ou solides, pour des secteurs aussi variés que :

- la pharmacie, la parapharmacie, la cosmétique ;
- les industries agroalimentaires ;
- le pétrole ;
- les polymères et les peintures ;
- le textile (colorants) ;
- la papeterie, l'imprimerie, la sérigraphie ;
- la mécanique, les traitements de surface ;
- et même le nucléaire.

Rédigé par une équipe d'auteurs, tous spécialistes dans leurs domaines, ce livre constitue un guide susceptible de fournir des pistes pour aider les industriels dans leur choix d'une technique émergente qui s'intègre aisément dans une chaîne de traitement et renforce l'efficacité des procédés classiques. Ainsi, il s'adresse en particulier au monde industriel, par le biais des responsables de l'environnement, du secteur public ou privé, mais aussi aux enseignants, universitaires et ingénieurs en environnement.

2-7430-0578-5



9782743005788