

coordonnateur
Eugen Hnatiuc

Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants

Editions
TEC
& **DOC**

2-628-192-1



2-628-192-1

Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants

Eugen Hnatiuc
Coordonnateur



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	62
3. Types de mesures	62

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.....	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)	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 thermoïonique	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

X	Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants	
	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	126
1.5.2. Osmose	127
2. Méthodes électriques ou électroassistées.....	127
2.1. Électrolyse 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. Électroflottation	133
2.2.2. Électrocoagulation ; électrofloculation.....	134
3. Techniques mixtes couplées aux techniques séparatives (électrotechniques ; électro-électrotechniques)	137
3.1. Électrodialyse	137
3.2. Électro-électrodialyse	140
4. L'électroremédiation	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 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	160
1.1.2. Nature des entités gazeuses activées	161
1.1.3. Aspect énergétique	162
1.2. Principaux protagonistes.....	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 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. Prospectives.....	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
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	277
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	333
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.....	339
6.2. Gisements.....	340
6.3. Recherche des gisements.....	340
6.4. Fonctionnement d'une centrale géothermique.....	341
6.5. Construction d'une centrale géothermique.....	342
6.6. Perspectives de développement à moyen terme.....	343
7. Piles à combustible.....	343
7.1. Définition.....	343
7.2. Description et principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire.....	344
7.3. Caractéristiques d'une cellule élémentaire.....	345
7.4. Système PAC.....	345
7.5. Intérêts des piles à combustible.....	346
7.6. Types de piles à combustible.....	347
7.6.1. PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	348
7.6.2. PAC à acide phosphorique (PAFC).....	348
7.6.3. PAC à carbonates fondus (MCFC).....	349
7.6.4. PAC à oxyde solide (SOFC).....	349
7.7. Conclusions sur les piles à combustible.....	350
8. Cogénération.....	350
8.1. Définition.....	350
8.2. Utilisations de la cogénération.....	351
8.3. Caractéristiques énergétiques.....	351
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 ..	351
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.....	352
8.7. Trigénération.....	353
9. Biomasse et déchets.....	353
9.1. Méthanisation de la biomasse.....	354
9.2. Combustion de la biomasse.....	355
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

