

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

Origines et objet de l'Ingénierie Electrochimique.....	9
1- L'Ingénierie Electrochimique, domaine d'application des méthodes de l'Ingénierie des Procédés de Transformation de la Matière et de l'Energie (I.P.T.M.E.).....	9
2- Les concepts de la I.P.T.M.E. en Ingénierie Electrochimique.....	11
3- Organisation des connaissances de la I.P.T.M.E.....	14

CHAPITRE 1

Considérations générales.....	17
1.1. Ecoulement d'un liquide le long d'une surface plane.....	17
1.2. Ecoulement dans un canal de section rectangulaire.....	19
1.3. Autres types d'écoulements. Modes de convection.....	21
1.4. Flux de transport dans les milieux statiques.....	22
1.4.1. Flux de matière par diffusion moléculaire.....	23
1.4.2. Densité de flux de transport des trois grandeurs extensives en milieu tranquille.....	24
1.4.3. Loi de Newton. Viscosité.....	25
1.4.4. Densité de flux de transport des ions en solution diluée.....	26
1.4.5. Transport simultané des trois grandeurs extensives.....	28

CHAPITRE 2

Bilans macroscopiques et microscopiques sur des réacteurs électrochimiques.....	31
2.1. Bilans macroscopiques.....	31
2.1.1. Bilan macroscopique de matière.....	32
2.1.2. Bilan macroscopique d'énergie.....	33
2.1.3. Bilan macroscopique de quantité de mouvement.....	35
2.2. Bilans microscopiques ou différentiels.....	37
2.2.1. Bilan différentiel ou microscopique de conservation de la masse globale du fluide, ou équation de continuité du fluide.....	37
2.2.2. Bilan différentiel de matière (pour le constituant A).....	39
2.2.3. Bilan différentiel de quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes pour les fluides incompressibles).....	40
2.2.4. Utilité des bilans différentiels.....	41
2.3. Exemple d'application des bilans différentiels.....	43
2.4. Analyse dimensionnelle – Nombres adimensionnels.....	46
2.4.1. Principe de l'analyse dimensionnelle.....	46
2.4.2. Recherche des nombres adimensionnels par la méthode de Buckingham.....	48
2.4.3. Utilité des nombres adimensionnels.....	50

Annexe au Chapitre 2

1. Résumé sur les vecteurs.....	52
2. Bilans différentiels en coordonnées rectangulaires.....	53
3. Opérations qui utilisent l'opérateur Nabla.....	53

CHAPITRE 3

Transport de matière par diffusion-convection et lien

avec l'hydrodynamique.....	55
3.1. Rappels de cinétique électrochimique.....	55
3.1.1. Etapes limitatives possibles du processus.....	55
3.1.2. Réaction à l'électrode. Lien entre potentiel et densité de courant.....	56
3.1.3. Courant limite de diffusion.....	59
3.2. Coefficient de transport de matière vers (ou depuis) les électrodes.....	61
3.3. Nombres adimensionnels pour le transport de matière.....	63
3.4. Écoulements laminaires simples et permanents.....	65
3.5. Cas des milieux électrolytiques d'hydrodynamique complexe.....	69
Annexe au Chapitre 3 : Transport de matière au travers d'une	
couche limite laminaire. Solution approchée pour le cas des liquides.....	72

CHAPITRE 4

Méthode électrochimique pour la détermination des coefficients

de transport de matière – Applications.....	75
4.1. Rappel du principe du dosage polarographique.....	75
4.2. Détermination électrochimique de k_d par la méthode électrochimique.....	77
4.3. Application à l'échelle locale : microélectrodes.....	82
4.3.1. Les deux « familles » de microélectrodes.....	82
4.3.2. Cas particulier des électrodes « en paroi inerte ».....	84
4.4. Application des microélectrodes.....	88
Annexe au Chapitre 4 : Dosage ampérométrique des ions $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$.....	92

CHAPITRE 5

Réacteurs électrochimiques.....	95
5.1. Principaux types de réacteurs électrochimiques.....	95
5.2. Bilan de matière dans deux types de réacteurs idéaux.....	97
5.2.1. Réacteur continu parfaitement mélangé.....	97
5.2.2. Réacteur à écoulement piston.....	98
5.2.3. Comparaison de ces deux réacteurs idéaux.....	100
5.2.4. Cas d'une cascade de réacteurs parfaitement mélangés mis en série....	101
5.3. Effet du recyclage d'une partie du débit de sortie.....	102
5.4. Cas de réacteurs réels – Distribution des temps de séjour.....	104
5.4.1. Généralités.....	104
5.4.2. Notion de Distribution des Temps de Séjour ou D.T.S.....	106
5.4.2.1. Méthode expérimentale d'obtention de la D.T.S.....	107
5.4.2.2. Utilisation de la D.T.S.....	109
5.4.2.3. Méthode des deux points de mesure.....	111
5.5. Cas particuliers.....	112
5.5.1. Modèle des réacteurs parfaitement mélangés en série.....	112
5.5.2. Modèle du réacteur à écoulement piston avec dispersion axiale.....	113
5.6. Application du dernier modèle au dimensionnement de réacteurs.....	115
5.6.1. Utilité du modèle du réacteur à écoulement piston	
avec dispersion axiale.....	115
5.6.2. Exemple de déroulement des calculs.....	117

CHAPITRE 6

Réacteurs à électrodes de grande surface spécifique.....	121
6.1. Introduction... Contenu protégé par copyright.....	121

6.1.1. Stimulation des études grâce à « l'électrode fluidisée ».....	121
6.1.2. Intérêt des Electrodes Poreuses Percolées (E .P.P.).....	123
6.2. Considérations générales.....	125
6.2.1. Configurations de référence.....	125
6.2.2. Objet du dimensionnement des E.P.P.....	126
6.2.3. Matériau d'électrode et surface spécifique.....	128
6.3. Bilan des charges électriques dans l'E.P.P.....	129
6.4. Cas de l'E.P.P. de type parallèle.....	133
6.4.1. Contrôle cinétique et approximation linéaire.....	133
6.4.1.1. Le problème qui se pose et sa solution.....	133
6.4.1.2. Quelques commentaires.....	136
6.4.2. Contrôle diffusionnel.....	138
6.5. Cas de l'E.P.P. de type croisé.....	139
6.5.1. Contrôle diffusionnel.....	139
6.5.2. Application au dimensionnement.....	142
6.5.3. Remarques sur le cas du contrôle cinétique.....	145
6.6. Conclusions.....	145
Annexe au Chapitre 6 : Procédé HULIN.....	146

CHAPITRE 7

Principaux matériaux proposés pour la construction des E.P.P.....	151
7.1. Introduction et historique.....	151
7.2. Cas des électrodes granulaires.....	152
7.2.1. Evolution dans le temps des E.P.P. granulaires.....	152
7.2.2. Cas particulier de l'électrode fluidisée.....	154
7.2.3. Autres électrodes granulaires.....	158
7.2.4. Conclusion sur les électrodes granulaires.....	159
7.3. Cas des électrodes de métal déployé.....	159
7.4. Cas des électrodes de mousse métallique.....	161
7.5. Considérations générales pour l'utilisateur.....	165
7.5.1. Utiliser le canal hydraulique pour y placer une E.P.P.....	165
7.5.2. Paramètres de dimensionnement.....	167
7.5.3. Liste résumée de quelques paramètres importants.....	168
7.6. Discussion relative à ces matériaux.....	169
7.7. Autres matériaux.....	172

CHAPITRE 8

Transport de matière dans les principales situations pratiques.....	175
8.1. Introduction.....	175
8.2. Electrodes planes parallèles.....	176
8.3. Electrodes cylindriques coaxiales.....	176
8.4. Promoteurs de turbulence électrochimiquement inactifs.....	176
8.5. Matériaux du type électrode-promoteur de turbulence.....	185
8.5.1. Electrodes simples.....	185
8.5.2. Electrodes poreuses.....	186
8.6. Electrode en contact avec un film ruisselant.....	187
8.7. Electrode soumise à l'impact de jets.....	189
8.8. Conclusions.....	192

CHAPITRE 9	
Eléments sur la distribution du potentiel et du courant.....	193
9.1. Introduction.....	193
9.2. Distribution primaire.....	195
9.3. Distribution secondaire.....	198
9.3.1. Définition.....	198
9.3.2. Le nombre de WAGNER.....	199
9.3.3. Conséquences.....	200
9.4. Distribution tertiaire.....	202

CHAPITRE 10

Du laboratoire au réacteur industriel.....	203
10.1. Etude à micro-échelle au laboratoire.....	203
10.2. Première étude d'Ingénierie Electrochimique.....	204
10.3 Etude d'un mini-pilote.....	206
10.4. Extrapolation – Etude d'un pilote industriel.....	207
10.5. Principe de l'optimisation économique.....	210
10.6. Conclusion.....	212

CHAPITRE 11

Quelques apports récents de l'Ingénierie Electrochimique.....	213
11.1. Pourquoi de nouveaux réacteurs électrochimiques ?.....	213
11.2. Considérations sur le choix des réacteurs.....	214
11.2.1. Facteurs à considérer au plan pratique.....	215
11.2.2. Quel type d'électrode doit-on considérer ?.....	215
11.3. Présentation succincte de quelques réacteurs originaux.....	217
11.4. Quelques domaines ayant servi au développement de l'Ingénierie Electrochimique.....	220
11.4.1. La récupération des métaux.....	220
11.4.2. Les électrosynthèses organiques.....	221
11.4.3. Le traitement électrolytique des eaux.....	222
11.5. Influence, sur quelques exemples, de l'apport de l'Ingénierie Electrochimique.....	223
11.5.1. Etude de l'irrigation des canaux dentaires sous l'effet d'une lime en vibration.....	224
11.5.2. Etude d'une cellule de laboratoire à auto-pompage.....	226
11.5.3. Etude des échanges entre un fritté et le liquide qui en remplit les pores.....	226
11.5.4. Exemple du réacteur à film ruisselant.....	228

CONCLUSION.....	229
-----------------	-----

EXEMPLES D'APPLICATION.....	231
-----------------------------	-----

NOMENCLATURE.....	267
-------------------	-----

GLOSSAIRE.....	273
----------------	-----

BIBLIOGRAPHIE.....	275
--------------------	-----

INDEX ALPHABETIQUE.....	283
-------------------------	-----