

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
<b>Chapitre 1. Introduction à la filière technologique de l'hydrogène</b> . . . . .	13
1.1. L'hydrogène comme vecteur énergétique . . . . .	13
1.1.1. Les méthodes de production. . . . .	18
1.1.2. Les technologies de stockage . . . . .	20
1.1.2.1. Stockage sous forme liquide . . . . .	20
1.1.2.2. Stockage gazeux sous haute pression . . . . .	20
1.1.2.3. Stockage sous basse pression. . . . .	21
1.1.3. Les réseaux de distribution et risques associés. . . . .	21
1.1.3.1. Risque de fuite . . . . .	22
1.1.3.2. Risque d'inflammabilité. . . . .	22
1.1.3.3. Risque de formation d'une nappe explosive . . . . .	22
1.1.4. Les avantages et les défis à soulever. . . . .	22
1.1.4.1. Les avantages . . . . .	23
1.1.4.2. Les inconvénients . . . . .	23
1.2. Les types des piles à combustible. . . . .	23
1.2.1. Les différentes technologies des piles à combustible . . . . .	24
1.2.1.1. Principe de fonctionnement des piles à combustible . . . . .	25
1.2.1.2. Pile à combustible à membrane polymère (PEMFC) . . . . .	25
1.2.1.3. Pile à combustible alcaline (AFC) . . . . .	27
1.2.1.4. Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC) . . . . .	30
1.2.1.5. Pile à combustible à carbonates fondus (MCFC) . . . . .	32
1.2.1.6. Pile à combustible à oxyde solide (SOFC) . . . . .	35

1.2.1.7. Pile à combustible à méthanol direct (DMFC) . . . . .	37
1.2.1.8. Pile à combustible réversible (RFC). . . . .	40
1.2.1.9. Pile à combustible métal-air . . . . .	40
1.2.1.10. Pile à combustible céramique protonique (PCFC). . . . .	41
1.2.1.11. Biopile ou pile à combustible microbienne (BFC) . . . . .	41
1.2.2. Le couple piles/applications . . . . .	42
1.2.2.1. Secteur du stationnaire. . . . .	43
1.2.2.2. Marché des transports . . . . .	43
1.2.2.3. Secteur portable. . . . .	43
1.2.3. Les avantages et les problèmes à optimiser. . . . .	44
1.3. La pile à membrane échangeuse de proton . . . . .	45
1.3.1. La structure élémentaire de la pile PEMFC. . . . .	47
1.3.1.1. La couche d'électrolyte . . . . .	48
1.3.1.2. La couche catalytique . . . . .	52
1.3.1.3. Les couches de diffusion des gaz . . . . .	53
1.3.1.4. Les plaques bipolaires . . . . .	53
1.3.2. Conception et configuration des PEMFC . . . . .	54
1.3.3. Fonctionnement et problème de vieillissement. . . . .	56
1.3.4. La pile et son entourage technique . . . . .	57
1.3.4.1. Le système d'approvisionnement . . . . .	58
1.3.4.2. Le système de contrôle . . . . .	58
1.3.4.3. Le convertisseur statique . . . . .	58
1.3.4.4. Le circuit de refroidissement . . . . .	59
1.3.4.5. Le circuit d'humidification . . . . .	59
1.4. Conclusion . . . . .	59
1.5. Quiz . . . . .	60

## **Chapitre 2. Les phénomènes de transfert de charges . . . . . 61**

2.1. Introduction. . . . .	61
2.2. Thermodynamique et chimie de la pile PEM . . . . .	62
2.2.1. La réaction de base . . . . .	62
2.2.2. La chaleur de réaction . . . . .	62
2.2.3. Le travail électrique. . . . .	63
2.2.4. La tension à vide . . . . .	64
2.2.5. Effet de la pression . . . . .	65
2.2.6. Effet de la température. . . . .	67
2.2.7. Efficacité théorique. . . . .	70

2.3. Les débits des réactifs et des produits . . . . .	72
2.3.1. Débit d'oxygène . . . . .	72
2.3.2. Débit d'hydrogène . . . . .	73
2.3.3. La quantité d'eau produite . . . . .	74
2.4. Électrochimie de la pile . . . . .	74
2.4.1. La cinétique des électrodes . . . . .	74
2.4.2. Énergie d'activation . . . . .	75
2.4.3. Vitesse de réaction . . . . .	76
2.4.4. Courant d'échange . . . . .	76
2.4.5. Densité de courant . . . . .	77
2.5. Phénomènes de polarisation . . . . .	78
2.5.1. Polarisation d'activation . . . . .	79
2.5.2. Polarisation ohmique . . . . .	80
2.5.3. Polarisation de concentration . . . . .	82
2.5.4. Tension réelle . . . . .	84
2.5.5. Courbe de polarisation . . . . .	84
2.5.6. Plage optimale de fonctionnement . . . . .	85
2.6. Modélisation du transfert de charge . . . . .	85
2.7. Aperçu sur les modèles analytiques . . . . .	86
2.7.1. Les modèles analytiques simples . . . . .	86
2.7.2. Les modèles analytiques complexes . . . . .	87
2.8. Les modèles empiriques . . . . .	87
2.9. Transport de courant et conservation de charge . . . . .	87
2.10. Conclusion . . . . .	89

### **Chapitre 3. Les phénomènes de transfert de masse . . . . . 91**

3.1. Introduction . . . . .	91
3.2. Les flux de matière . . . . .	91
3.3. Le transfert de masse par convection . . . . .	95
3.4. Le transfert de masse dans les diffuseurs poreux . . . . .	98
3.4.1. La conservation de la masse . . . . .	98
3.4.2. La conservation des espèces . . . . .	98
3.4.3. Quelques lois paramétriques . . . . .	103
3.4.3.1. Pression de saturation . . . . .	103
3.4.3.2. Coefficient de diffusion binaire du mélange gazeux . . . . .	104
3.4.3.3. Isotherme de sorption . . . . .	105
3.5. Transfert de masse dans les couches de réaction (électrodes) . . . . .	106
3.5.1. Modèle à faible courant (Butler-Volmer) . . . . .	106
3.5.2. Modèle d'agglomérat à fort courant . . . . .	108

3.6. Transfert de masse dans la membrane . . . . .	110
3.6.1. Paradoxe de Schröder . . . . .	110
3.6.2. Échelle microscopique . . . . .	112
3.6.2.1. Mécanique statistique . . . . .	112
3.6.2.2. Dynamique moléculaire . . . . .	112
3.6.3. Échelle mésoscopique . . . . .	114
3.6.4. Échelle macroscopique . . . . .	116
3.6.4.1. Modèle de transport de type milieu poreux . . . . .	116
3.6.4.2. Modèle phénoménologique . . . . .	121
3.6.5. Les lois paramétriques . . . . .	124
3.6.5.1. La teneur en eau . . . . .	124
3.6.5.2. La conductivité ionique de la membrane . . . . .	125
3.6.5.3. Le coefficient de diffusion d'eau dans la membrane . . . . .	125
3.6.5.4. Le coefficient électro-osmotique . . . . .	126
3.7. Conclusion . . . . .	126

## **Chapitre 4. Les phénomènes de transfert de chaleur . . . . . 129**

4.1. Introduction . . . . .	129
4.2. Les bilans énergétiques pour une pile à combustible PEMFC . . . . .	131
4.2.1. Bilan d'énergie pour un <i>stack</i> . . . . .	131
4.2.2. Bilan d'énergie pour les composants et pour les gaz . . . . .	133
4.2.3. Bilan d'énergie pour la phase gazeuse . . . . .	134
4.2.4. Bilan d'énergie pour la structure solide . . . . .	134
4.3. Le flux de chaleur dans les différentes couches de la pile PEMFC . . . . .	135
4.3.1. Transfert de chaleur par conduction . . . . .	135
4.3.2. Dissipation de chaleur par convection naturelle et par rayonnement . . . . .	136
4.4. La gestion thermique dans une pile PEM . . . . .	137
4.4.1. Les systèmes de refroidissement . . . . .	137
4.4.2. Refroidissement par convection du flux d'air à la cathode . . . . .	137
4.4.2.1. Refroidissement avec des canaux d'air séparés . . . . .	138
4.4.2.2. Refroidissement par un liquide . . . . .	139
4.4.2.3. Refroidissement par évaporation . . . . .	139
4.4.2.4. Refroidissement par dissipateur thermique intégré . . . . .	140
4.4.2.5. Refroidissement par des plaques . . . . .	140
4.4.3. L'effet de la température sur la performance de la pile PEM . . . . .	141
4.5. Les sources de chaleur dans la pile PEM . . . . .	141
4.5.1. Dans la membrane polymère . . . . .	144

---

4.5.2. Dans les électrodes . . . . .	144
4.5.2.1. Flux de chaleur de la réaction . . . . .	145
4.5.2.2. Flux de chaleur d'activation électrochimique des réactions. . . . .	145
4.5.3. Dans les GDL . . . . .	146
4.5.4. Le phénomène d'évaporation et de condensation de l'eau . . . . .	147
4.6. Distribution de la température entre deux cathodes : étude de cas. . . . .	150
4.7. Conclusion . . . . .	155
<b>Liste des symboles . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>159</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>175</b>