

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES TRANSFERTS COUPLES

**DANS UNE PILE A COMBUSTIBLE
A BASE TEMPERATURE**

Bilal ABDEREZZAK



EDITIONS
ITINERAIRES
SCIENTIFIQUES

Tables des matières

	<i>Page</i>
Introduction générale	<u>01</u>
Chapitre I – L'hydrogène et les piles à combustibles	<u>04</u>
Introduction	05
1. L'hydrogène	05
1.1. L'hydrogène comme vecteur énergétique	05
1.2. La filière technologique de l'hydrogène	06
1.3. Les technologies de stockage de l'hydrogène	07
1.3.1. <i>Stockage sous forme liquide</i>	07
1.3.2. <i>Stockage gazeux sous haute pression</i>	07
1.3.3. <i>Stockage sous basse pression</i>	08
1.4. Les réseaux de distribution	08
1.5. Les aspects de sécurité de l'hydrogène en tant que combustible	08
1.5.1. <i>Risque de fuite</i>	08
1.5.2. <i>Risque d'inflammabilité</i>	08
1.5.3. <i>Risque de formation d'une nappe explosive</i>	09
1.6. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'hydrogène	09
2. Les piles à combustible	09
2.1. Types des piles à combustible	10
2.2. Applications des piles à combustible	11
2.2.1. <i>Secteur du stationnaire</i>	11
2.2.2. <i>Marché des transports</i>	12
2.2.3. <i>Secteur portable</i>	12
2.3. Les avantages et les problèmes à résoudre	12
3. Technologie de la Pile PEM	13
3.1. Principe d'une pile PEM	14
3.2. Caractéristiques de fonctionnement	15
3.3. Avantages et inconvénients	15
3.4. Vieillesse	16
3.5. La PEMFC comme dispositif électrochimique	16
3.6. Structure élémentaire de la Pile	17
3.6.1. <i>La couche d'électrolyte</i>	17
3.6.1.1. <i>Les types des membranes</i>	17
3.6.1.2. <i>La notion du poids équivalent</i>	18
3.6.1.3. <i>La teneur en eau de la membrane</i>	18
3.6.1.4. <i>Le modèle structurel du NafionTM</i>	19
3.6.2. <i>La couche catalytique</i>	20
3.6.3. <i>Les couches de diffusion des gaz</i>	20
3.6.4. <i>Les plaques bipolaires</i>	21
3.7. Conception et configuration des PEMFC	21
3.8. Les systèmes auxiliaires dans le fonctionnement de la pile PEMFC	23
3.8.1. <i>Le système d'approvisionnement</i>	23
3.8.2. <i>Le système de contrôle</i>	24

3.8.3.	<i>Le convertisseur statique</i>	24
3.8.4.	<i>Le circuit de refroidissement</i>	24
3.8.5.	<i>Le circuit d'humidification</i>	24
3.9.	Avantages et inconvénients de la PEMFC	24
	Conclusion	25
	<i>Chapitre II – Les phénomènes de transfert de charges</i>	<u>26</u>
	Introduction	27
1.	Fondements Théoriques sur la Pile PEM	27
1.1.	Thermodynamiques et chimie de la pile	27
1.1.1.	<i>La réaction de base</i>	27
1.1.2.	<i>La chaleur de réaction</i>	28
1.1.3.	<i>Le travail électrique</i>	28
1.1.4.	<i>La tension à vide</i>	29
1.1.5.	<i>Effet de la Pression</i>	30
1.1.6.	<i>Effet de la température</i>	31
1.1.7.	<i>Efficacité théorique</i>	33
1.2.	Les débits des réactifs et des produits	35
1.2.1.	<i>Débit d'oxygène</i>	35
1.2.2.	<i>Débit d'hydrogène</i>	36
1.2.3.	<i>La quantité d'eau produite</i>	36
1.3.	Electrochimie de la pile	36
1.3.1.	<i>La cinétique des électrodes</i>	37
1.3.2.	<i>Energie d'activation</i>	37
1.3.3.	<i>Vitesse de réaction</i>	37
1.3.4.	<i>Courant d'échange</i>	38
1.3.5.	<i>Densité de courant</i>	39
1.4.	Phénomènes de polarisation	40
1.4.1.	<i>Polarisation d'activation</i>	40
1.4.2.	<i>Polarisation ohmique</i>	41
1.4.3.	<i>Polarisation de concentration</i>	42
1.4.4.	<i>Tension réelle</i>	44
1.4.5.	<i>Courbe de polarisation</i>	44
1.4.6.	<i>Plage optimale de fonctionnement</i>	46
2.	Modélisation du transfert de charge	46
2.1.	Aperçu sur les modèles analytiques	46
2.1.1.	<i>Les modèles analytiques simples</i>	46
2.1.2.	<i>Les modèles analytiques complexes</i>	47
2.2.	Les modèles empiriques	47
2.3.	Transport de courant et conservation de charge	47
	Conclusion	48
	<i>Chapitre III – Les phénomènes de transfert de masse</i>	<u>49</u>
	Introduction	50
1.	Détermination des flux de matière	50
2.	Le transport de masse par convection	53
3.	Le transport de masse dans les diffuseurs poreux	55
3.1.	La conservation de la masse	55
3.2.	La conservation des espèces	56

3.3. Lois paramétriques	59
3.3.1. <i>Pression de saturation</i>	59
3.3.2. <i>Coefficient de diffusion binaire du mélange gazeux</i>	60
3.3.3. <i>Isotherme de sorption</i>	60
4. Transport de masse dans les couches de réaction (électrodes)	62
4.1. Modèle à faible courant (Butler – Volmer)	62
4.2. Modèle d'agglomérat à fort courant	63
5. Transport de masse dans la membrane	64
5.1. Paradoxe de Schröder	65
5.2. Modèles de transport de masse dans la membrane	66
5.2.1. <i>Echelle microscopique</i>	66
5.2.1.1. <i>Mécanique statistique</i>	66
5.2.1.2. <i>Dynamique moléculaire</i>	66
5.2.2. <i>Echelle mésoscopique</i>	67
5.2.3. <i>Echelle Macroscopique</i>	69
5.2.3.1. <i>Modèle de transport de type milieu poreux</i>	69
5.2.3.2. <i>Modèle phénoménologique</i>	73
5.2.4. <i>Les lois paramétriques</i>	75
5.2.4.1. <i>La teneur en eau</i>	75
5.2.4.2. <i>La conductivité ionique de la membrane</i>	76
5.2.4.3. <i>Le coefficient de diffusion d'eau dans la membrane</i>	76
5.2.4.4. <i>Le coefficient électro – osmotique</i>	77
Conclusion	78
<i>Chapitre IV – Les phénomènes de transfert de chaleur</i>	<u>79</u>
Introduction	80
1. Les modèles thermiques existants	80
2. Bilan d'énergie pour une Pile à combustible PEMFC	81
2.1. Bilan d'énergie pour un stack	81
2.2. Bilan d'énergie pour les composants et pour les gaz	83
2.3. Bilan d'énergie pour la phase gazeuse	83
2.4. Bilan d'énergie pour la structure solide	84
3. Le flux de chaleur dans les différentes couches de la pile PEMFC	84
3.1. Transfert de chaleur par conduction	84
3.2. Dissipation de chaleur par convection naturel et par rayonnement	85
4. La gestion thermique d'une Pile PEMFC	86
4.1. Les systèmes de refroidissement	86
4.2. Refroidissement par convection du flux d'air à la cathode	86
4.3. Refroidissement avec des canaux d'air séparés	87
4.4. Refroidissement par un liquide	87
4.5. Refroidissement par évaporation	87
4.6. Le refroidissement par dissipateur thermique intégré	88
4.7. Le refroidissement par des plaques	88
5. L'effet de la température sur la performance de la pile PEM	89
6. Les sources de chaleur dans une pile à combustible PEM	89
6.1. Les canaux de refroidissement	90
6.2. Localisation et quantification des sources de chaleur	91
6.2.1. <i>Dans la membrane polymère</i>	91
6.2.2. <i>Dans les électrodes</i>	91

6.2.3.	<i>Flux de chaleur de la réaction</i>	92
6.2.4.	<i>Flux de chaleur d'activation électrochimique des réactions</i>	92
6.2.5.	<i>Dans les GDL</i>	93
6.2.6.	<i>Evaporation et condensation de l'eau</i>	94
7.	Distribution de la température entre deux cathodes : Etude de cas	96
	Conclusion	100
	<i>Chapitre V – Le couplage des phénomènes de transfert</i>	<u>101</u>
	Introduction	102
1.	Influence des conditions opératoires	102
1.1.	Mise en œuvre du modèle mathématique	102
1.2.	Conditions mises en jeu	104
1.3.	Effet du changement de la Température de la pile	104
1.4.	Effet du changement de pression	108
1.5.	Effet du changement de l'humidité relative de l'air	110
2.	Visualisation numérique des transferts couplés	114
2.1.	Visualisation du transfert de masse dans les GDE	114
2.2.	La mise en œuvre du modèle choisi	114
2.3.	Maillage et conditions aux limites	117
2.4.	Résultats obtenus	120
3.	Influence de la vitesse d'écoulement d'air : Etude d'optimisation	122
3.1.	Résultats et discussions	122
3.2.	Validation des résultats	126
	Conclusion	126
	<i>Conclusion générale</i>	<u>127</u>
	<i>Références bibliographiques</i>	<u>129</u>