

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	1
Daniel HISSEL	
<b>Introduction</b> . . . . .	3
<b>Chapitre 1. La pile à combustible, la voie pour une révolution de l'hydrogène</b> . . . . .	9
1.1. Introduction. . . . .	9
1.2. L'énergie dans le monde . . . . .	10
1.2.1. Un modèle énergétique obsolète . . . . .	10
1.2.2. Les solutions pour décarbonner le bouquet énergétique . . . . .	11
1.2.2.1. L'énergie hydroélectrique. . . . .	12
1.2.2.2. L'énergie éolienne . . . . .	12
1.2.2.3. La biomasse . . . . .	12
1.2.2.4. L'énergie solaire . . . . .	13
1.2.2.5. La géothermie. . . . .	13
1.2.2.6. Les énergies marines. . . . .	13
1.3. Le vecteur hydrogène . . . . .	13
1.3.1. La production d'hydrogène . . . . .	14
1.3.1.1. À partir des énergies fossiles . . . . .	14
1.3.1.2. L'électrolyse de l'eau . . . . .	15
1.3.1.3. La production directe à partir de la biomasse . . . . .	15
1.3.1.4. Le stockage d'hydrogène . . . . .	15
1.4. La pile à combustible et ses applications . . . . .	19
1.4.1. Rapide historique . . . . .	20
1.4.2. La pile à combustible et son renouveau . . . . .	21
1.4.3. Les applications des piles à combustible . . . . .	22
1.4.3.1. Le transport . . . . .	23

1.4.3.2. Le stationnaire . . . . .	31
1.4.3.3. Autres applications. . . . .	35
1.5. Conclusion . . . . .	37
<b>Chapitre 2. De la PAC vers le système . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Introduction. . . . .	39
2.2. Les technologies piles à combustible pour les applications transports et stationnaires. . . . .	40
2.2.1. Présentation des différentes technologies . . . . .	40
2.2.2. Principe de fonctionnement . . . . .	42
2.2.2.1. Les PEMFC . . . . .	42
2.2.2.2. Les SOFC . . . . .	44
2.2.2.3. Les autres technologies . . . . .	45
2.2.3. Comparaison des technologies . . . . .	46
2.3. Approche système . . . . .	49
2.3.1. Les circuits auxiliaires . . . . .	50
2.3.1.1. Le circuit d'alimentation en carburant . . . . .	50
2.3.1.2. Le circuit d'alimentation en comburant. . . . .	50
2.3.1.3. Le circuit de gestion thermique . . . . .	50
2.3.1.4. Le circuit électrique . . . . .	51
2.3.1.5. Le système de contrôle/commande . . . . .	51
2.3.2. Architecture des systèmes . . . . .	52
2.3.2.1. PEMFC. . . . .	53
2.3.2.2. SOFC. . . . .	62
2.4. Limites des systèmes piles à combustible . . . . .	65
2.5. Conclusion . . . . .	67
<b>Chapitre 3. Hybridation des générateurs. . . . .</b>	<b>69</b>
3.1. Introduction. . . . .	69
3.2. Hybridation des sources d'énergie électrique . . . . .	70
3.2.1. L'hybridation pour les systèmes orientés transport . . . . .	70
3.2.2. La gestion d'énergie dans les systèmes hybridés . . . . .	73
3.2.2.1. Stratégies en ligne . . . . .	75
3.2.2.2. Exemple du véhicule ECCE . . . . .	78
3.3. Hybridation des générateurs piles à combustible. . . . .	79
3.3.1. Application de la transformée en ondelettes pour la gestion d'énergie . . . . .	80
3.3.1.1. Présentation de la transformée en ondelettes. . . . .	80
3.3.1.2. Application de la transformée en ondelettes pour la gestion d'énergie dans un véhicule hybride . . . . .	85
3.3.2. Application des modèles ARIMA pour la gestion d'énergie. . . . .	90

3.3.2.1. Construction du modèle ARIMA . . . . .	91
3.3.2.2. Algorithme de gestion en ligne basé sur les modèles ARIMA. . . . .	92
3.3.3. Applications des réseaux de neurones pour la gestion d'énergie .	96
3.3.3.1. Paramétrage du NARNN . . . . .	97
3.3.4. Comparaison des modèles adaptatifs NARNN et ARIMA. . . . .	98
3.3.4.1. NARNN adaptatif . . . . .	98
3.3.4.2. ARIMA adaptatif . . . . .	99
3.4. Hybridation d'autres générateurs . . . . .	101
3.4.1. Topologie du système étudié et sa modélisation . . . . .	102
3.4.2. La stratégie de gestion d'énergie . . . . .	104
3.4.3. La logique floue de type 2 et l'optimisation du contrôleur flou . .	109
3.4.3.1. Logique floue de type 2 . . . . .	109
3.4.3.2. Algorithme génétique . . . . .	111
3.4.4. Résultats de simulation. . . . .	113
3.4.4.1. Algorithme génétique . . . . .	113
3.4.4.2. Résultats de la stratégie de gestion d'énergie . . . . .	115
3.5. Conclusion . . . . .	119

## Chapitre 4. Diagnostic et pronostic des générateurs

<b> piles à combustible . . . . .</b>	<b>121</b>
4.1. Introduction. . . . .	121
4.2. Les phénomènes de dégradation mis en jeu dans une pile à combustible et son système . . . . .	122
4.2.1. Dégradations réversibles ou irréversibles ? . . . . .	123
4.2.2. Dégradations des composants de la PAC . . . . .	123
4.2.3. Dégradations en fonction de l'origine . . . . .	125
4.2.3.1. Origine mécanique . . . . .	125
4.2.3.2. Origine chimique . . . . .	125
4.2.3.3. Origine thermique . . . . .	125
4.2.4. Les défaillances du système PAC . . . . .	126
4.2.4.1. Circuits anodique et cathodique . . . . .	126
4.2.4.2. Circuit de refroidissement. . . . .	127
4.2.4.3. Circuit électrique . . . . .	128
4.2.4.4. Circuit de commande . . . . .	129
4.3. Diagnostic. . . . .	130
4.3.1. Méthodes de diagnostic applicables aux piles à combustible . . .	131
4.3.1.1. Approches à base de modèles . . . . .	132
4.3.1.2. Approches basées données . . . . .	133
4.3.2. Méthodes de diagnostic développées . . . . .	135
4.3.2.1. Diagnostic basé sur la reconnaissance de formes couplée au k-NN . . . . .	135
4.3.2.2. Diagnostic basé sur la transformée en ondelettes . . . . .	137

---

4.3.3. Résultats obtenus avec les k-NN . . . . .	140
4.3.3.1. Établissement de la base de données . . . . .	140
4.3.3.2. Choix des descripteurs et établissement de la base d'apprentissage . . . . .	143
4.3.3.3. Apprentissage de l'algorithme et méthode de validation croisée pour le test. . . . .	145
4.3.3.4. Résultats de classification. . . . .	146
4.3.3.5. Transposition de la méthode pour le vieillissement. . . . .	150
4.3.4. Résultats obtenus avec la transformée en ondelettes . . . . .	152
4.3.4.1. Choix des données expérimentales . . . . .	152
4.3.4.2. Résultats des RWE. . . . .	153
4.3.5. Résultats obtenus à l'aide d'autres méthodes de diagnostic . . . . .	156
4.3.5.1. Méthode basée sur l'analyse des singularités contenues dans le signal de tension. . . . .	156
4.3.5.2. Méthode statistique . . . . .	156
4.4. Pronostic de piles à combustible . . . . .	157
4.4.1. Du pronostic à la discipline du PHM . . . . .	158
4.4.1.1. Les différentes approches du pronostic . . . . .	160
4.4.1.2. Le PHM . . . . .	161
4.4.2. Les méthodes de pronostic développées. . . . .	163
4.4.2.1. Méthode basée sur une approche ANFIS. . . . .	163
4.4.2.2. Méthode basée sur les ESN. . . . .	165
4.4.3. Les résultats obtenus avec ANFIS . . . . .	167
4.4.3.1. Acquisition et prétraitement des données. . . . .	167
4.4.3.2. Définition du modèle . . . . .	169
4.4.3.3. Résultats de simulation . . . . .	171
4.4.4. Les résultats obtenus avec les ESN . . . . .	174
4.4.4.1. Choix des bases de données . . . . .	174
4.4.4.2. Construction et paramétrage du modèle . . . . .	180
4.4.4.3. Résultats de simulation . . . . .	183
4.4.4.4. Autres résultats . . . . .	187
4.5. Conclusion . . . . .	189
<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>191</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>197</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>219</b>