

L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | ENVIRONNEMENT ET SÉCURITÉ

Méziane Boudellal

LA PILE À COMBUSTIBLE

Structure • Fonctionnement
Applications



DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos XV

Introduction 1

A

La pile à combustible

1 • Qu'est-ce qu'une pile à combustible ? 5

1.1 Pourquoi pile ? 5

1.2 Pourquoi à combustible ? 6

1.3 À quoi ressemble une pile à combustible ? 6

2 • Le renouveau de la pile à combustible 9

2.1 Premier renouveau 9

2.2 Renouveau actuel 10

3 • Historique de la pile à combustible 13

3.1 Les débuts de l'électricité 13

3.2 La découverte de l'électrolyse 14

3.3 La découverte de la pile à combustible 14

3.4 Les développements de la pile à combustible 16

3.5 Premières applications 17

B

Principe

4 • Structure d'une pile à combustible	21
5 • Thermodynamique appliquée aux systèmes électrochimiques	25
5.1 Notion d'équilibre et réversibilité	25
5.2 Systèmes électrochimiques – Surtension	25
5.3 Oxydo-réduction	26
5.4 Vitesse de réaction – Catalyse	27
5.5 Énergie libre de Gibbs	29
5.6 Cinétique des réactions électrochimiques : zone de triple contact	30
5.7 Résumé	40
6 • Caractéristiques d'une pile à combustible	41
6.1 Tension réelle	41
6.2 Point optimal de fonctionnement	49
6.3 Rendement d'une pile à combustible	50
6.4 Puissance fournie par une pile à combustible	52
6.5 Gestion de l'eau produite	52
6.6 Gestion thermique	53
6.7 Caractérisation d'une pile à combustible	53
6.8 Résumé	54

C

Types de piles à combustible

7 • Classification générale	57
8 • PEMFC – Pile à combustible à membrane polymère ou à membrane échangeuse de protons	59
8.1 Historique	59
8.2 Réactions chimiques	59
8.3 Structure d'une cellule élémentaire	59

	8.4	Fonctionnement	65
	8.5	Caractéristiques et performances	69
	8.6	Avantages	70
	8.7	Inconvénients	70
	8.8	Applications	70
21	9	DMFC – Pile à combustible au méthanol (direct)	71
25	9.1	Historique	71
25	9.2	Réactions	71
25	9.3	Structure d'une cellule élémentaire	72
26	9.4	Fonctionnement	73
27	9.5	Caractéristiques et performances	75
29	9.6	Avantages	75
30	9.7	Inconvénients	76
40	9.8	Applications	76
41	10	DEFC – Pile à combustible à l'éthanol (direct)	77
41	10.1	Réactions théoriques	77
49	10.2	Tension	78
50	10.3	Développements	78
52	11	PAFC – Pile à combustible à acide phosphorique	79
52	11.1	Historique	79
53	11.2	Réactions	79
53	11.3	Structure d'une cellule élémentaire	79
54	11.4	Fonctionnement	81
	11.5	Caractéristiques et performances	82
	11.6	Avantages	82
	11.7	Inconvénients	82
	11.8	Applications	82
	12	AFC – Pile à combustible alcaline	83
	12.1	Historique	83
57	12.2	Réactions	83
	12.3	Structure d'une cellule élémentaire	84
	12.4	Fonctionnement	85
59	12.5	Caractéristiques et performances	86
59	12.6	Avantages	86
59	12.7	Inconvénients	86
59	12.8	Applications	86

13 • MCFC – Pile à combustible à carbonate fondu	87
13.1 Historique	87
13.2 Réactions	87
13.3 Structure d'une cellule élémentaire	88
13.4 Fonctionnement	88
13.5 Caractéristiques et performances	89
13.6 Avantages	90
13.7 Inconvénients	90
13.8 Applications	90
14 • SOFC – Pile à combustible à oxyde solide	91
14.1 Historique	91
14.2 Réactions	91
14.3 Structure d'une cellule élémentaire	92
14.4 Fonctionnement	97
14.5 Caractéristiques et performances	97
14.6 Avantages	98
14.7 Inconvénients	98
14.8 Applications	98
15 • Comparaisons des différents types de piles à combustible	99
15.1 Critères de comparaison	99
15.2 Résumé	100

D

Modules

16 • Structure d'un module (stack)	105
17 • Plaques bipolaires	107
17.1 Caractéristiques	108
17.2 Matériaux	108
17.3 Fonction hydraulique	110
17.4 Fonction électrique	113
17.5 Fonction mécanique	114
17.6 Fonction thermique	114

E

Combustibles

18 • Qualité du combustible	119
19 • Hydrogène	121
19.1 Propriétés	121
19.2 Production	121
19.3 Purification de l'hydrogène	131
19.4 Alimentation des piles à combustible en hydrogène	142
19.5 Infrastructure de transport, stockage et distribution	143
19.6 Sécurité	160
20 • Méthanol	161
20.1 Propriétés	161
20.2 Production	161
20.3 Qualité du méthanol	163
20.4 Transport	163
20.5 Distribution	163
20.6 Utilisation	163
20.7 Sécurité	164
21 • Autres combustibles	165
21.1 Éthanol	165
21.2 Ammoniac	167
21.3 Hydrazine	169
22 • Comparaison des combustibles	171
22.1 Résumé des étapes de production	171
22.2 Quel combustible pour quelle pile ?	172
22.3 Contenu énergétique	172
22.4 Volumes de stockage nécessaires	174
22.5 Bilan énergétique de la production de combustible	175
23 • Conclusion : quel combustible ?	179
23.1 Les défis	179
23.2 Quel combustible pourra s'imposer ?	179

F

----- Système

24 • Balance of plant (BoP)	183
24.1 Configuration du <i>stack</i>	183
24.2 Gestion du combustible	184
24.3 Gestion de l'oxygène (ou de l'air)	186
24.4 Gestion de l'électrolyte	187
24.5 Gestion des sous-produits	187
24.6 Gestion thermique	188
24.7 Gestion électrique	190
24.8 Gestion centrale	190
24.9 Concevoir un système simple	191
24.10 Exemple de système complet : auxiliaire de puissance (APU, <i>auxiliary power unit</i>)	193
24.11 Conclusion	194

G

----- Modélisation, simulation et test

25 • Approche de la modélisation	197
26 • Définition d'un modèle	199
27 • Exemples	201
27.1 Modèle unidimensionnel	201
27.2 Modèle bidimensionnel	202
27.3 Modèle tridimensionnel	203
27.4 Exemples de modélisation	204
27.5 Modélisation et simulation de systèmes complexes	205
27.6 Tests et résultats expérimentaux	206
27.7 Conclusion	207

H

Législation et sécurité

28 • Législation	211
28.1 Organismes élaborant les normes	211
28.2 Normes applicables aux piles à combustible	212
28.3 Organismes certificateurs de systèmes utilisant une pile à combustible	213
29 • Sécurité	215
29.1 Méthodologie	215
29.2 Sécurité d'un système utilisant une pile à combustible	216
29.3 Conclusion	220

I

Applications

30 • Transports	223
30.1 Transports terrestres (propulsion)	223
30.2 Transports maritimes (propulsion)	242
30.3 Transports aériens (propulsion)	245
30.4 Alimentation auxiliaire (APU, <i>auxiliary power unit</i>)	246
30.5 Conclusion	247
31 • Applications stationnaires ou transportables	249
31.1 Habitat individuel	249
31.2 Systèmes transportables de moyenne puissance	253
31.3 Habitat collectif/tertiaire ou systèmes transportables de forte puissance	254
31.4 Centrales électriques (et thermiques)	256
31.5 Conclusion	256
32 • Applications portables ou ultraportables	259
32.1 Applications portables	259
32.2 Applications ultraportables	261
32.3 Micropiles à combustible	262
32.4 Conclusion	262
Perspectives	265

Annexes

1 • Unités	269
2 • Programmes et acteurs	271
3 • Sites et salons	275
Lexique et abréviations	277
Bibliographie	281
Index	285

Méziane Boudellal

LA PILE À COMBUSTIBLE

Structure • Fonctionnement • Applications

Cet ouvrage présente les différents types de piles à combustible, leur développement, leur fonctionnement et leurs applications, existantes ou potentielles. Il aborde successivement :

- les phénomènes physico-chimiques mis en jeu ;
- les caractéristiques spécifiques de chaque type de pile (PEMFC, DMFC, DEFC, PAFC, AFC, MCFC, SOFC) ;
- les combustibles utilisables (hydrogène, méthanol), leurs contraintes et leurs limitations ;
- la sécurité et les aspects normatifs actuels ;
- les applications mettant en jeu la pile à combustible.

Concret et pratique, ce support de travail et de réflexion est indispensable aux ingénieurs et aux étudiants qui souhaitent mieux appréhender les mécanismes et les enjeux de la pile à combustible. Il s'adresse également à toute personne curieuse de découvrir cette nouvelle source d'énergie.



MÉZIANE BOUDELLAL

est docteur en chimie physique. Il a été chercheur en Allemagne dans le secteur de la chimie et de l'électronique (R&D et applications), puis en France dans la catalyse automobile. Il est actuellement ingénieur dans le domaine des nouvelles technologies pour capteurs chez Siemens VDO Automotive.



Code ADEME : 6191



6636989
ISBN 978-2-10-051392-5

L'USINENOUVELLE

www.dunod.com
www.ademe.fr

