

Méziane Boudellal

LE POWER-TO-GAS

Stockage de l'électricité
d'origine renouvelable

DUNOD

Illustrations de couverture :
© Enertrag Aktiengesellschaft
© by-studio – Fotolia.com
© Punto Studio Foto – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--	--

© Dunod, 2016
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-075016-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À ma mère

Table des matières

Avant-propos	XI
Introduction	1

A

Consommation mondiale d'énergie et électricité d'origine renouvelable

Chapitre 1 : Consommation mondiale d'énergie	5
1.1 Une demande en énergies en forte croissance	5
1.1.1 Évolution de la consommation globale d'énergie	5
1.1.2 Stockage d'énergie	7
1.1.3 Consommation par secteur de l'économie	8
1.1.4 Évolution de la consommation mondiale d'énergie	9
1.1.5 Potentiel des sources d'énergies renouvelables	10
1.2 Électricité	11
1.2.1 Production d'électricité	11
1.2.2 Une consommation d'électricité en forte augmentation	13
1.2.3 Une croissance importante de la production d'électricité d'origine renouvelable	15
1.3 Marché de l'électricité	16
1.3.1 Structure européenne	16
1.3.2 Structure des prix de l'électricité	16
1.3.3 Des prix élevés pour les consommateurs	18

Chapitre 2 : Électricité d'origine renouvelable	21
2.1 Technologies	21
2.1.1 Éolien	23
2.1.2 Solaire photovoltaïque	26
2.1.3 Maritime	29
2.1.4 Biomasse, géothermie	32
2.1.5 Contribution de l'électricité d'origine renouvelable	32
2.1.6 Comparaison des coûts de l'électricité selon l'origine	32
2.1.7 Évolution de la production d'énergies d'origine renouvelable	33
2.2 Variation de la production et de la consommation d'électricité	35
2.2.1 Prévisions de production et de consommation	36
2.2.2 Gestion des flux	36
2.2.3 Nécessité d'un stockage	37
2.2.4 Estimation de l'électricité en excédent	38
2.2.5 Qualité du réseau électrique	40
2.2.6 Réseaux européens	42
2.3 Stockage de l'électricité	43
2.3.1 Caractéristiques d'un système de stockage	44
2.3.2 Technologies	44
2.3.3 Solutions de stockage disponibles	49

B

Power-to-Gas

Chapitre 3 : Principe du Power-to-Gas	53
3.1 Schéma général	55
3.2 L'hydrogène	56
3.2.1 Propriétés	56
3.2.2 Sécurité	58
3.2.3 Production industrielle	59

Chapitre 4 : Électrolyse	61
4.1 Principe de base	61
4.1.1 Réactions chimiques	61
4.1.2 Calcul à partir des données thermodynamiques	63
4.1.3 Tension réelle de fonctionnement – Densité de courant	66
4.1.4 Paramètres de fonctionnement	67
4.1.5 Rendement des cellules	68
4.1.6 Énergie de dissociation de l'eau	69
4.1.7 Consommation d'eau	69
4.2 Électrolyseur alcalin	70
4.2.1 Historique et développement industriel	71
4.2.2 Équipements auxiliaires	77
4.2.3 Équipements industriels	78
4.3 Électrolyseur PEM	81
4.3.1 Principe	81
4.3.2 Structure d'un électrolyseur PEM	82
4.3.3 Influence du catalyseur	86
4.3.4 Paramètres de fonctionnement	87
4.3.5 Équipements industriels	88
4.3.6 Traitement et consommation d'eau	91
4.3.7 Comparaison électrolyse alcaline – PEM	91
4.3.8 Électrolyse à haute température	92
4.4 Compression de l'hydrogène	94
4.4.1 Compresseur à piston	95
4.4.2 Compresseur à membrane	96
4.4.3 Compresseur ionique	97
Chapitre 5 : Différentes approches du Power-to-Gas	101
5.1 Options d'utilisation de l'hydrogène	101
5.1.1 Injection directe d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel	101
5.1.2 Transport d'hydrogène	104
5.1.3 Stockage d'hydrogène	105

5.1.4 Méthanation	110
5.1.5 Méthanation biologique	112
5.2 Utilisation de l'hydrogène ou du méthane produit	114
5.2.1 Mobilité	114
5.2.2 Industrie	116
5.2.3 Énergie – Conversion en électricité	117
5.2.4 Utilisation domestique	121

C

Expérimentations actuelles et perspectives

Chapitre 6 : Installations et expérimentations	125
6.1 Approches possibles	125
6.1.1 Production d'hydrogène	126
6.1.2 Injection d'hydrogène dans le réseau	126
6.1.3 Production de méthane	126
6.1.4 Injection de méthane dans le réseau de gaz naturel	126
6.1.5 Production d'électricité	126
6.2 Expérimentations	127
6.2.1 Programme HySolar	127
6.2.2 Projets au niveau d'un bâtiment	129
6.2.3 Projets exploratoires	130
6.2.4 Premières expérimentations sur le terrain	130
6.3 Projets de recherche	132
6.3.1 Institut ZSW à Stuttgart	132
6.3.2 Programmes européens	134
6.4 Projets pilotes	135
6.4.1 Allemagne	136
6.4.2 France	150
6.4.3 Autres pays	155

Chapitre 7 : Quel avenir pour cette technologie ?	159
7.1 Capacité de conversion en hydrogène	159
7.1.1 Capacité des électrolyseurs	159
7.1.2 Puissance des piles à combustible	160
7.2 Coûts de la filière	161
7.2.1 Coût des principaux équipements spécifiques	162
7.2.2 Coût d'une installation	162
7.3 Business Model pour le Power-to-Gas	163
7.3.1 Préliminaires technico-économiques au Power-to-Gas	164
7.3.2 Leçons des expérimentations	165
7.3.3 Améliorations technologiques et rentabilité	166
Chapitre 8 : Conclusion et perspectives	169
8.1 Une évolution nécessaire de la structure énergétique mondiale	169
8.2 La technologie Power-to-Gas : une contribution à la protection de l'environnement	170
8.3 Civilisation hydrogène ou civilisation électron ?	171
 Annexes	
A. Power-to-Heat	175
B. Power-to-Liquid (P2L)	179
C. Une approche délocalisée	183
Une hiérarchisation de la gestion production/consommation	183
Une convergence des réseaux électriques et gaziers	185
Virtual Power Plant – VPP (Centrale électrique virtuelle)	186
Ressources complémentaires	189
Bibliographie	189
Sites Internet, salons et organismes	190
Index	191

