

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

<p>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.</p> <p>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</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>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.</p> <p>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).</p>
--	--	--

© Dunod, 2016
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-074137-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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

Avant-propos

Transports, industrie, habitat, tertiaire : les « moteurs » de ces activités sont les énergies nécessaires pour se déplacer, produire, se chauffer ou s'éclairer, se distraire, par exemple. L'électricité qui n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur énergétique, y joue un rôle de plus en plus important.

Cette évolution est due aux normes de plus en plus strictes concernant les constructions (habitat, tertiaire), aboutissant à une diminution des besoins en chaleur, et au développement et à l'extension des technologies domestiques, informatiques, multimédia, bureautique... entraînant une augmentation du nombre d'équipements conduisant à une augmentation nécessaire de la production d'électricité.

Cette production d'électricité, qui a commencé au XIX^e siècle en utilisant l'hydraulique, le charbon et le gaz naturel, s'est ensuite enrichie au XX^e siècle d'autres technologies comme le nucléaire. Les conséquences en ont été une augmentation de la pollution atmosphérique (CO₂, particules...) et des risques associés au nucléaire (non seulement au niveau des centrales, mais aussi pour le stockage des déchets radioactifs).

La nécessité de réduire les émissions de CO₂ a poussé vers de nouvelles voies de production d'électricité « propre », comme le photovoltaïque ou l'éolien, l'hydraulique étant toujours utilisé. Si les installations ont explosé surtout grâce aux subventions, elles permettent aujourd'hui une production non négligeable d'électricité d'origine renouvelable pouvant atteindre en Espagne, en Allemagne ou au Danemark, selon les conditions météorologiques, plus de 50 % de la production totale d'électricité.

Cette production a malheureusement un inconvénient incontournable : la variabilité, justement fonction des conditions météorologiques (vents ou ensoleillement). Même si des prévisions peuvent être faites, les maxima de production ne coïncident pas toujours avec les pics de demande résultant en une production supérieure à cette demande, d'où la nécessité de pouvoir stocker cette électricité en excédent pour l'utiliser plus tard, quelle que soit la forme.

Parmi les nombreuses technologies disponibles et vu les volumes en surplus actuels ou prévus, parfois importants, celle qui va s'imposer doit permettre de stocker le maximum de cet excédent.

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement toutes les sociétés, agences de presse et organismes qui m'ont fourni visuels et documentations m'ayant permis d'illustrer cet ouvrage.

Introduction

Face aux défis environnementaux (pollution, diminution des réserves de combustibles fossiles, déchets nucléaires...) et à une demande croissante en énergies, une approche faisant appel à une solution soutenable est nécessaire. Les énergies renouvelables, comme l'éolien ou le solaire, sont malheureusement soumises aux conditions météorologiques et donc à une variabilité de la production. Il en résulte déjà aujourd'hui et encore plus dans le futur un décalage entre production maximale et besoins. Il s'avère donc nécessaire de stocker l'électricité produite et non utilisée afin de pouvoir soit la récupérer lors d'une forte demande, soit l'utiliser sous une autre forme.

Quelle technologie utiliser pour stocker cet excédent d'électricité ? La première solution qui vient à l'esprit est les batteries. Cependant, même si certaines disposent d'une capacité de stockage relativement importante, les coûts ainsi que les durées de vie malgré tout limitées ne permettent pas d'envisager leur utilisation sur une grande échelle. D'autres solutions existent, mais toutes sont limitées dans leurs capacités de stockage, comparées aux excédents prévus.

En dehors d'un stockage direct de l'électricité, l'autre approche est de la convertir en une autre forme pour pouvoir la stocker. C'est là qu'intervient l'**électrolyse** c'est-à-dire la conversion en hydrogène et oxygène, d'où la dénomination **Power-to-Gas**.

Cet hydrogène peut être stocké sous différentes formes, transformé en un autre gaz (méthane par exemple) ou, si nécessaire, être à nouveau converti en électricité dans une pile à combustible ou une centrale au gaz (ou une unité de cogénération). Quelle que soit l'utilisation envisagée, l'électricité en excès sera ainsi valorisée.

Si cette approche semble la plus élégante en termes énergétiques et technologiques, elle présente malgré tout actuellement des handicaps qui sont d'une part, le coût de ces installations et d'autre part, la faible capacité de conversion en hydrogène en 2015 comparée aux quantités actuelles d'électricité en excédent, mais surtout celles prévues pour les prochaines décennies.

Malgré tout la technologie Power-to-Gas associée à une approche décentralisée (utilisation locale de l'hydrogène ou du méthane) et à une gestion optimisée à tous les niveaux, que ce soit la production, la distribution ou l'utilisation (grâce aux Smart Meter, Mini-Grid, Smart Grid, Virtual Power Plant...) permettrait une meilleure couverture des besoins ainsi qu'une stabilisation facilitée des réseaux électriques.

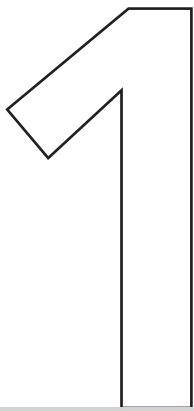
Les enjeux du Power-to-Gas ne peuvent s'appréhender que replacés dans le contexte global de la production et de la consommation d'énergies et de leurs problématiques.

Électrolyse, hydrogène, méthane, pile à combustible, Smart Meter, Smart Grid...

Ces technologies de conversion, de production ou de gestion d'électricité se sont actuellement soit déjà imposées, soit sont en évaluation, ne serait-ce que dans quelques secteurs bien définis. Elles seront détaillées et analysées dans cet ouvrage.



**CONSOMMATION
MONDIALE D'ÉNERGIE ET
ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE
RENOUVELABLE**



Consommation mondiale d'énergie

A

Consommation mondiale d'énergie et électricité d'origine renouvelable

Ces dernières décennies ont vu une augmentation importante de la consommation mondiale d'énergie dans pratiquement tous les secteurs, tirée entre autres par les pays dits émergents, comme la Chine ou l'Inde, par exemple.

Cette consommation et les problèmes associés (environnement, lignes de transport d'électricité...) sont un des facteurs à aborder avant de définir les potentialités de la technologie Power-to-Gas.

1.1 Une demande en énergies en forte croissance

L'augmentation globale de la prospérité entraîne une croissance des besoins en énergie, que ce soit pour les transports, l'industrie, le tertiaire ou le résidentiel. L'évolution du PNB a été et reste un indicateur pour l'évolution de la consommation énergétique, même s'il reste un facteur d'incertitude sur la relation entre ces deux paramètres, ce que les projections pour les prochaines décennies essaient de prévoir en étudiant plusieurs scénarios.

1.1.1 Évolution de la consommation globale d'énergie

Les données de ces dernières décennies montrent une augmentation constante de la consommation (figure 1.1), même si celle-ci est pondérée par les variations climatiques ou les crises économiques.

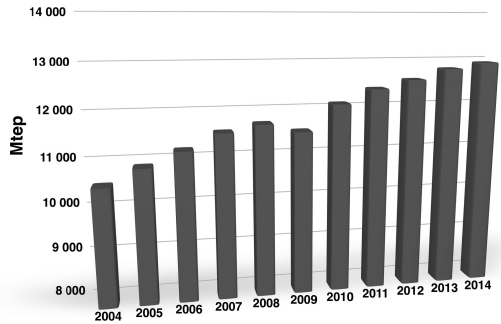


Figure 1.1 Consommation mondiale brute d'énergie en Mtep (Source : données BP Statistical Review of World Energy 2015)

Cette énergie provient de différentes sources : non-renouvelables comme le pétrole, le charbon, le gaz ou l'uranium ou renouvelables comme l'éolien, le solaire ou l'hydraulique. La contribution de chacune de ces sources évolue aussi avec les années (figure 1.2).

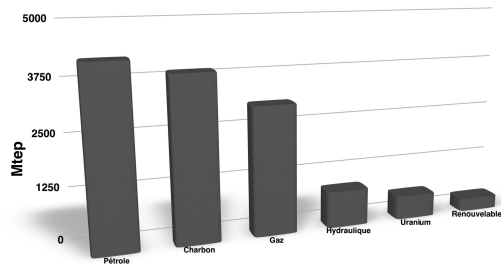


Figure 1.2 Consommation mondiale brute d'énergie par source en 2014 (Source : données BP Statistical Review of World Energy 2015)

Une comparaison entre les évolutions de consommation pour la France et l'Allemagne ces dernières décennies montre une baisse de la consommation d'énergie primaire (figure 1.3). Cela ne signifie cependant pas que la consommation par type d'énergie ou par secteur ait aussi baissé ou soit resté stable, comme le chapitre sur l'électricité le montrera.

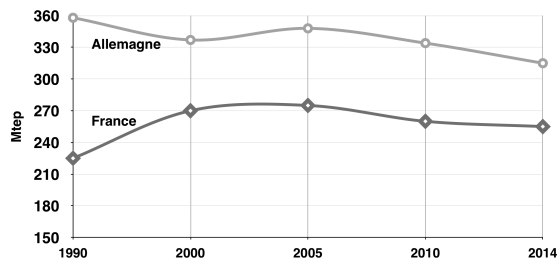


Figure 1.3 Variations comparées de la consommation d'énergie primaire

1.1.2 Stockage d'énergie

Alors que les combustibles solides ou liquides peuvent être stockés en quantités importantes, l'électricité ne peut l'être que pour de faibles quantités par rapport à la production et la consommation (tableau 1.1) pour des raisons techniques (très faible capacité des systèmes disponibles) et financières (coût élevé par kW pour certaines solutions comme les batteries).

Tableau 1.1 Capacités respectives de stockage pour la France

	Capacité de stockage maximale	Consommation annuelle Capacité (électricité)	Ratio
Gaz	12 milliards de m ³	40 milliards de m ³	1 : 3,3
Produits pétroliers	37 millions de tonnes	77 millions de tonnes	1 : 2,1
Électricité	~ 6 - 7 GW (STEP)	129 GW	

La capacité de stockage réel d'électricité de 7 MW (STEP) est sans commune mesure avec la capacité de production, comparée au gaz naturel ou aux produits pétroliers. On pourrait certes y inclure une partie de l'hydraulique (barrages avec retenue d'eau représentant environ 9 GW) comme électricité « latente », mais il ne s'agit pas vraiment de stockage.

Stocks de sécurité en pétrole, produits pétroliers ou gaz naturel

Chaque pays stocke du gaz et du pétrole brut ou des produits pétroliers pour faire face soit à une demande importante, soit à une pénurie ou une rupture d'approvisionnement. L'Union Européenne impose par exemple un stock minimum de 90 jours d'importations nettes. En 2014, la France disposait de 22,3 millions de tonnes de produits pétroliers pour une capacité totale de stockage d'environ 37 millions de tonnes.

Pour le gaz naturel, la France dispose de stocks (dans des cavernes) d'un volume utile total d'environ 12 milliards de m³ pour une consommation d'environ 40 milliards de m³ en 2014. L'Allemagne peut stocker jusqu'à 22 milliards de m³ pour une consommation de 71 milliards de m³ en 2014.

La gestion des pics de consommation (figure 1.4) est critique pour les fournisseurs d'électricité. Elle dépend principalement de la structure d'utilisation de cette électricité. En France, le chauffage électrique est encore répandu (35 % des logements en 2011 contre 6 % en Allemagne) et, lors de grands froids,

la demande devient très rapidement importante, surtout le soir, et il faut pouvoir y répondre sans délai.

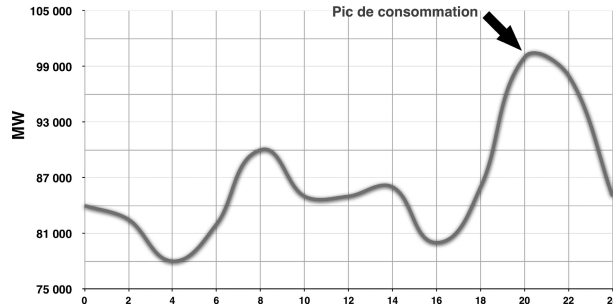


Figure 1.4 Exemple de pic de consommation

Les fournisseurs d'électricité approvisionnent en flux tendu, c'est-à-dire qu'ils doivent équilibrer en temps réel production et consommation.

1.1.3 Consommation par secteur de l'économie

Parmi les secteurs de l'économie (habitat, tertiaire, industrie, agriculture, transports), les variations au cours de ces dernières années ont connu des trajectoires différentes (tableau 1.2).

Tableau 1.2 Évolution de la consommation finale par secteur en France en Mtep – données SOeS

	1990	2002	2012	2014
Résidentiel et tertiaire	57,7	67,8	68,7	67,7
<i>Résidentiel seul</i>		46,1	46,4	45,8
<i>Tertiaire seul</i>		21,7	22,3	21,9
Transports	40,8	50,1	49,1	48,8
Industrie	38,2	36,8	29,9	28,8
Agriculture	4,0	4,5	4,5	4,7
TOTAL	140,7	159,2	152,1	150,0

Si l'industrie, par une amélioration continue des processus de production, a pu réduire notablement sa consommation, les transports, mais surtout le résidentiel et le tertiaire, ont vu une augmentation constante de leur consommation, seulement modulée par les variations climatiques (un hiver doux réduit la consommation en chauffage alors qu'un été chaud entraîne une augmentation de la consommation d'électricité due aux climatiseurs).