

Méziane Boudellal



COGÉNÉRATION ET MICRO-COGÉNÉRATION

Solutions pour améliorer l'efficacité énergétique

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © SenerTec

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, Paris, 2013
ISBN 978-2-10-059137-4

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.

Préface

Le changement climatique ainsi que la vulnérabilité énergétique sont devenus une réalité qui n'est quasiment plus contestée par personne. Enrayer ces phénomènes et éviter leurs conséquences dramatiques sont des défis cruciaux de notre siècle. Ils nécessitent une vision à long terme et les actions à entreprendre doivent s'inscrire dans des politiques ambitieuses.

Pour atteindre les objectifs énergétiques et climatiques établis pour 2020 – et très au-delà –, et sans négliger la sécurité d'approvisionnement, le marché énergétique doit se transformer, notamment – mais pas seulement – au niveau de la production d'électricité. Les éléments clés d'une telle mutation sont le renforcement des énergies renouvelables, la réduction drastique de la consommation grâce à plus d'efficacité, l'extension de la part de la cogénération et la substitution vers l'utilisation de combustibles moins émetteurs en CO₂, comme peut l'être – à court terme – le gaz. Mais à plus long terme ce sont les énergies renouvelables qui devront assurer une part très significative de la production d'électricité. Le potentiel existe, en France, en Europe et dans le monde.

La cogénération est un moyen prometteur pour atteindre les objectifs ambitieux de réduction d'émission de gaz à effet de serre. Par son rendement le plus élevé de toutes les technologies de production d'énergie, sa flexibilité au niveau des combustibles utilisables, la gamme de tailles qui va d'une maison individuelle au chauffage urbain, et sa production locale proche des consommateurs, elle est destinée à devenir un pilier central dans l'approvisionnement énergétique de cette première moitié de siècle.

Malgré un contexte plutôt favorable (par exemple la Directive Efficacité Énergétique – EED), la cogénération et notamment la micro-cogénération ne réussit pas encore – sauf exceptions – à conquérir une part significative du marché en Europe. Habitué à un paradigme plus centralisé, les états et les grandes compagnies énergétiques font de la résistance. Or, l'avenir est du côté d'un système énergétique plus décentralisé, basé sur la demande finale, où production et consommation s'interpénètrent. C'est là que le rôle des autorités locales est irremplaçable.

Ce livre montre bien que la technologie a fait les preuves de sa fiabilité et de la diversité de ses possibilités d'utilisation. Le nombre d'emplois créés par un approvisionnement

énergétique décentralisé (où la cogénération prendrait toute sa place) est largement supérieur à un système de type centralisé. Si nous prenions en compte l'intégralité des coûts de production, la cogénération et certaines technologies de micro-cogénération pourraient rivaliser avec les modes de production centralisés (charbon, nucléaire ou gaz). Des conditions à peine plus favorables, comme dans les pays fédéraux et scandinaves, et la situation serait très différente.

J'espère que ce livre vous encouragera à prendre des initiatives pour favoriser l'utilisation de la micro-cogénération. Allez chercher d'autres acteurs du marché, pratiquez le networking, faites du lobbying, « pensez *globally*, produisez *locally* » !

Peter SCHILKEN

Chef de projet à Energy Cities

*Energy Cities est l'association des autorités locales européennes
qui inventent leur futur énergétique*

Table des matières

Préface	III
Avant-propos	1
Introduction	3

A

Cogénération, micro-cogénération et efficacité énergétique

Chapitre 1 : Définitions	7
1.1 Qu'est-ce que la cogénération ?	7
1.2 Où utiliser la micro-cogénération ?	8
Chapitre 2 : Besoins énergétiques	12
2.1 Les énergies et leurs usages	12
2.2 Consommation brute – Europe et France	13
2.3 Consommation énergétique finale	15
2.4 Production et consommation d'électricité	17
Chapitre 3 : Pourquoi la cogénération ?	21
3.1 Avantages de la cogénération	21
3.2 Penser global	22
3.3 Agir local	30

B

Unités de micro-cogénération – Critères de sélection et législation

Chapitre 4 : Types d'unités de cogénération	35
4.1 Considérations générales sur les équipements de micro-cogénération	35
4.2 Moteur à combustion interne	41
4.3 Moteur Stirling	73
4.4 Micro-turbine	99
4.5 Vapeur	104
4.6 Pile à combustible	110
4.7 Autres	139
4.8 Technologies pour demain	152
4.9 Comparaison des unités de micro-cogénération	156
Chapitre 5 : Combustibles	159
5.1 Gaz naturel	159
5.2 Biogaz	160
5.3 Fioul	161
5.4 Agroc carburants / Biocarburants	162
5.5 Bois	165
5.6 Hydrogène	168
5.7 Comparaison	168
Chapitre 6 : Critères de sélection d'une unité de cogénération	172
6.1 Introduction	172
6.2 Méthodologie	174
6.3 Modes opératoires	175
6.4 Besoins énergétiques et profil de consommation	179
6.5 Pilotage d'une unité de micro-cogénération	203

6.6 Optimisation : puissance nécessaire et durée de fonctionnement	206
6.7 Unités de petite puissance pour habitat individuel	212
6.8 Unités de micro-cogénération	216
6.9 Récapitulatif	222
Chapitre 7 : Coûts du système et amortissement	223
7.1 Coût global	223
7.2 Coût de l'énergie produite	225
7.3 Amortissement global	230
Chapitre 8 : Solutions globales – Systèmes hybrides	233
8.1 Définition	233
8.2 Systèmes hybrides avec brûleur ou chaudière	234
8.3 Systèmes hybrides avec énergies renouvelables	236
Chapitre 9 : Simulation d'une unité de micro-cogénération	240
9.1 Logiciel généraliste de simulation	240
9.2 Logiciels spécifiques à la micro-cogénération	240
Chapitre 10 : Législation	245
10.1 Critères pour l'unité de micro-cogénération	245
10.2 Approches au niveau utilisateur	245
10.3 La micro-cogénération au niveau législatif européen et français	246

C

Exemples, perspectives et aspects annexes

Chapitre 11 : Campagnes d'essais, évaluations et exemples d'unités de micro-cogénération en service	249
11.1 Campagnes d'essais	249
11.2 Campagnes d'essais dans le monde et en Europe	250

11.3 Campagnes d'essais en France	252
11.4 Évaluations par d'autres organismes	254
11.5 Exemples d'applications	256
Chapitre 12 : Perspectives – Le marché de la micro-cogénération	270
12.1 Le marché actuel	270
12.2 Potentiel futur et incertitudes	275
Chapitre 13 : Autres aspects liés à la cogénération	276
13.1 Mini-cogénération	276
13.2 Trigénération	281
13.3 Stockage de l'énergie	283
13.4 Gestion du réseau électrique – « <i>Smart Grid</i> »	287
13.5 Autonomie et temps de démarrage	290
13.6 Centrale virtuelle (<i>Virtual Power Plant</i> – VPP)	292
13.7 Électromobilité	297
13.8 Gestion et efficacité énergétique	300
Conclusion	301
 Annexes	
Unités	305
Sites Internet, salons et organismes	306
Lexique et abréviations	308
Bibliographie	309
Index	311

Avant-propos

Depuis la préhistoire jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'humanité s'est chauffée et éclairée individuellement.

La combinaison de la vapeur, de la dynamo et des lignes électriques a permis à partir des années 1880 une distribution, une régularité et une production d'électricité de plus en plus centralisée pour amortir, entre autres, les coûts d'installation de toute l'infrastructure.

Voilà pour l'électricité, qui est donc passée aux mains de grandes compagnies souvent nationales (avant d'éventuelles privatisations), alors que la chaleur est pratiquement restée une « production » individuelle (sauf quelques réseaux de chaleur).

La cogénération dans la vie quotidienne aujourd'hui ?

Comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, en hiver nous utilisons pratiquement tous les jours la cogénération : le moteur d'une voiture produit certes une énergie mécanique qui entraîne les roues assurant la propulsion (fonction principale), mais de plus ce moteur assure la production d'électricité par l'alternateur (fonction secondaire nécessaire) et de chaleur pour l'habitable, récupérée du circuit de refroidissement du moteur (fonction annexe).

À partir du même combustible et du même équipement, on produit chaleur et électricité : c'est la cogénération.

Si l'on considère maintenant les applications où la cogénération de faible puissance, dite micro-cogénération, pourrait être envisagée, les secteurs potentiels sont multiples : habitat individuel ou collectif, bureaux, écoles, piscines...

Que peut apporter la cogénération ? Selon l'optique dans laquelle on l'utilise, elle peut assurer une certaine autonomie, réduire les dépenses énergétiques et la pollution ou améliorer globalement l'utilisation des énergies primaires.

Introduction

Crise de l'énergie ?

Malgré toutes les mesures d'économie d'énergie prises au niveau européen ou français, la demande est en augmentation croissante. Elle est estimée en moyenne à 1,5-2,0 % par an au niveau européen.

Actuellement elle est assurée principalement par des énergies primaires non renouvelables dont les réserves diminuent ou dont le coût d'extraction, donc le cours, sera croissant et qui, de plus, émettent des gaz à effet de serre et/ou d'autres polluants.

L'Europe et la France sont très dépendantes des importations d'énergies primaires (pétrole, gaz naturel...), qui représentent plus de 55 % (pour l'Europe) et 90 % (pour la France) des besoins en 2010.

Face à ces contraintes, comment réduire la dépendance et les nuisances ? Certaines énergies primaires peuvent être utilisées directement (gaz naturel, charbon). Pour d'autres (solaire, éolien, nucléaire...), il faut passer par un intermédiaire appelé vecteur d'énergie : l'électricité. Celle-ci est principalement produite dans des centrales de forte puissance, puis distribuée par un réseau. Il s'en suit des pertes le long de cette chaîne, donc une utilisation non optimale de l'énergie primaire ; de plus, elle ne peut pas être stockée. Qu'en serait-il si cette électricité était produite sur le lieu d'utilisation ?

Pourquoi produire aussi son électricité ?

Sur le plan global, les solutions potentielles de réduction de la facture énergétique ne sont pas satisfaisantes (faible rendement des centrales électriques, intermittence du solaire ou de l'éolien, pertes pendant le transport...) ou éventuellement coûteuses (centrales au gaz ou au charbon à rendement élevé).

Produire son électricité et son eau chaude ?

Au niveau individuel et local, les énergies renouvelables accessibles (solaire, éolien) sont intermittentes et trop variables pour assurer un approvisionnement électrique et thermique continu, fiable et suffisant (ou du moins fournir un appoint significatif) pour alimenter une résidence ou un immeuble.

Une approche plus pratique envisageable est de produire son électricité en même temps que la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire et ceci en fonction

de ses besoins : c'est la COGÉNÉRATION dont il existe des unités qui le permettent aussi à petite échelle (MICRO-COGÉNÉRATION). La production locale de chaleur et d'électricité dans une unité intégrée permet une efficacité énergétique maximale par réduction des pertes associées à une production centralisée.

Une étape critique dans le choix d'une unité de micro-cogénération est la détermination de sa puissance en fonction des besoins et des choix du mode ou des modes de fonctionnement. Cette décision est facilitée par une approche méthodologique appuyée, si nécessaire, par des logiciels spécifiques ou adaptés.

Ces unités utilisent certes principalement des combustibles non renouvelables (gaz naturel, fioul...), mais elles permettent un rendement global très élevé dû à l'utilisation plus efficace de ces combustibles. D'autre part, elles préparent aussi la voie à l'utilisation de combustibles issus d'origine renouvelable (granulés, biogaz ou huiles végétales par exemple), lorsqu'ils seront plus répandus. L'utilisation du bois sous forme de granulés par exemple est aussi envisageable.

Les technologies disponibles sont très variées, allant du moteur classique à la pile à combustible. Les critères de choix d'un équipement devront s'appuyer aussi bien sur la disponibilité que sur les capacités de l'unité de micro-cogénération.

À ce jour, les coûts de ces unités (à quelques exceptions près) sont plus élevés que ceux d'une chaudière classique. Cela est principalement dû aux petites séries de production suite à la faible demande globale. Cependant les coûts d'exploitation peuvent se révéler intéressants dans la mesure où l'unité de micro-cogénération peut fonctionner pendant de longues périodes et ainsi non seulement fournir l'électricité nécessaire, mais aussi permettre la vente du surplus.

Cet ouvrage s'adresse ainsi à toute personne, entreprise ou organisme intéressés par une réponse à un niveau individuel ou local aux problèmes énergétiques tels qu'utilisateurs potentiels, architectes, promoteurs, concepteurs ou tous ceux désirant simplement mieux connaître cette approche.

Il ne couvre pas que les unités de micro-cogénération, mais aussi les aspects annexes qui y sont liés (mesures de consommations thermiques et électriques, systèmes hybrides...).

**COGÉNÉRATION,
MICRO-COGÉNÉRATION
ET EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE**

1

Définitions

La cogénération est, de façon générale, la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir de la même source d'énergie primaire (combustible d'origine renouvelable ou non) à partir d'un seul équipement. Il est à noter que la raison d'être de la cogénération est avant tout la production d'électricité, la chaleur n'étant qu'un « sous-produit ». L'échelle de puissance va de l'unité de micro-cogénération de quelques centaines de watts à la centrale électrique avec réseau de chaleur de plusieurs centaines de mégawatts.

1.1 Qu'est-ce que la cogénération ?

Définition classique : c'est la production d'électricité, la chaleur étant aussi récupérée, à partir d'une seule source d'énergie primaire et en utilisant le même équipement (figure 1.1).

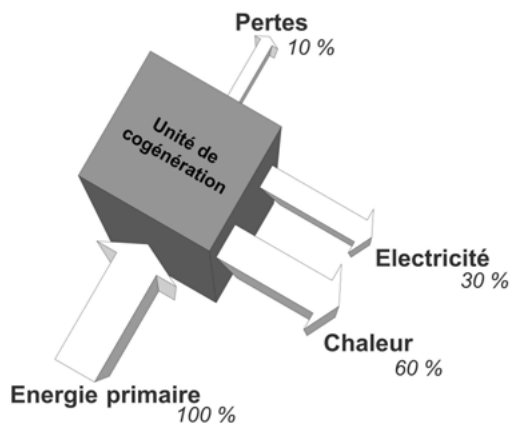


Figure 1.1 Principe de la cogénération
(les valeurs ne sont données qu'à titre indicatif).

Mais de nouvelles technologies bouleversent cette définition. Dans la pile à combustible par exemple, c'est l'hydrogène (donc un vecteur d'énergie) qui est le combustible.

On pourrait rajouter dans une approche décentralisée : production et utilisation locales.

Échelle de puissance pour cogénération

La cogénération de petite puissance (**micro-cogénération** ou μ -cogénération) couvre en général les besoins depuis une maison individuelle jusqu'à ceux d'un groupe de maisons ou d'un petit immeuble, bureau, hôtel, magasin, PME, clinique, piscine, école.

Selon la définition européenne (directive 2004/8/CE du Parlement européen), la micro-cogénération couvre une puissance allant jusqu'à 50 kW_{él.}.

Dans cet ouvrage, nous séparerons la micro-cogénération domestique (généralement moins de 1 kW_{él.}) de la micro-cogénération collective ou tertiaire (moins de 20 kW_{él.}). En fin d'ouvrage, quelques exemples d'unités de puissance supérieure à 20 kW_{él.} seront montrés.

1.2 Où utiliser la micro-cogénération ?

Imaginer une mini centrale électrique chez soi ou pour un magasin, hôtel, bureau ou PME ? Cela peut sembler paradoxal ; cependant cela est non seulement envisageable, mais aussi faisable, car de tels équipements sont commercialisés aujourd'hui.

Comment peut se présenter une unité de micro-cogénération intégrée à une habitation ? La figure 1.2 montre une unité alimentée au gaz naturel et fournissant électricité, eau chaude pour le chauffage et eau chaude sanitaire.

Deux exemples d'unités de micro-cogénération sont présentés figure 1.3. Celle de gauche est à accrocher et celle de droite, plus puissante, peut, par exemple, trouver place dans une cave ou un local technique.

La micro-cogénération peut aussi s'envisager pour des applications « mixtes » combinant divers types d'habitations et/ou d'activités. La figure 1.4 montre un exemple d'habitations individuelles ou collectives.

Une autre option est d'avoir la ou les unité(s) de micro-cogénération centralisées localement (figure 1.5).

Cette diversification permet de mieux optimiser la production d'énergie par rapport aux besoins en utilisant plusieurs unités de micro-cogénération, si nécessaire.