

Benoît Robyns, Arnaud Davigny  
Bruno François, Antoine Henneton,  
Jonathan Sprooten

# Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables

*2<sup>e</sup> édition*



**L**avoisier  
hermes

Benoît Robyns, Arnaud Davigny  
Bruno François, Antoine Henneton,  
Jonathan Sprooten

**Production d'énergie  
électriques à partir  
des sources renouvelables  
2<sup>e</sup> édition**

The logo for Lavoisier hermes features the word "Lavoisier" in a serif font with a horizontal line underneath it, and the word "hermes" in a lowercase, italicized serif font below that. A small square icon is positioned to the left of the text.  
editions.lavoisier.fr

© 2021, Lavoisier, Paris  
ISBN : 978-2-7462-4937-0

# Table des matières

<b>Préface</b> .....	1
Bernard MULTON	
<b>Introduction</b> .....	3
<b>Chapitre 1. La production d'électricité à partir d'énergie renouvelable</b> .....	7
Benoît ROBYNS	
1.1. Production décentralisée ou centralisée ? .....	7
1.1.1. Production décentralisée .....	7
1.1.2. Production centralisée .....	8
1.2. La problématique des énergies renouvelables .....	9
1.2.1. Constats .....	9
1.2.2. Le contexte du développement durable .....	13
1.2.3. Engagements et perspectives .....	13
1.3. Les sources d'énergie renouvelable .....	17
1.3.1. L'éolien .....	17
1.3.2. Le solaire .....	18
1.3.3. L'hydraulique .....	19
1.3.4. La géothermie .....	20
1.3.5. La biomasse .....	21
1.3.6. Contribution des différentes énergies renouvelables .....	22
1.4. La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables .....	23

---

## IV Énergie électrique à partir des sources renouvelables

1.4.1. Les chaînes de production de l'électricité.....	23
1.4.2. Facteur de rendement .....	25
1.5. L'autoproduction et l'autoconsommation d'énergie .....	27
1.6. Bibliographie.....	27

### **Chapitre 2. Le solaire photovoltaïque .....**

29

Arnaud DAVIGNY

2.1. Introduction.....	29
2.2. Caractéristiques de la ressource primaire .....	31
2.3. La conversion photovoltaïque .....	38
2.3.1. Introduction.....	38
2.3.2. L'effet photovoltaïque .....	38
2.3.3. La cellule photovoltaïque.....	41
2.3.4. Association de cellules.....	66
2.4. L'extraction du maximum de puissance électrique.....	72
2.5. Les convertisseurs d'énergie .....	76
2.5.1. Introduction.....	76
2.5.2. Structure des chaînes de conversion photovoltaïque.....	77
2.5.3. Le hacheur.....	80
2.5.4. L'onduleur.....	85
2.6. Le réglage de la puissance active et réactive .....	89
2.7. La centrale solaire.....	90
2.7.1. Introduction.....	90
2.7.2. La centrale autonome.....	91
2.7.3. La centrale raccordée au réseau.....	92
2.8. Exercices.....	95
2.8.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque.....	95
2.8.2. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome .....	97
2.9. Bibliographie.....	99

<b>Chapitre 3. L'éolien</b> .....	105
Bruno FRANÇOIS et Benoît ROBYNS	
3.1. Caractéristique de la ressource primaire .....	105
3.1.2. Distribution de Weibull.....	106
3.1.3. Effet du relief .....	109
3.1.4. Taux de charge .....	110
3.1.5. Rose des vents .....	111
3.2. Énergie cinétique du vent.....	112
3.3. Turbines éoliennes.....	114
3.3.1. Éoliennes à axe horizontal.....	114
3.3.2. Éoliennes à axe vertical.....	121
3.3.3. Comparaison des différents types de turbine.....	121
3.4. Limitation de puissance par variation du coefficient de puissance .....	121
3.4.1. Le système « pitch » ou à angle de calage variable .....	121
3.4.2. Le système « stall » ou à décrochage aérodynamique.....	121
3.5. Couplages mécaniques entre la turbine et la génératrice électrique.....	121
3.5.1. Lien entre vitesse mécanique, vitesse de synchronisme et fréquence du réseau électrique.....	121
3.5.2. Éoliennes à « attaque directe » (sans multiplicateur).....	121
3.5.3. Utilisation d'un multiplicateur de vitesse.....	121
3.6. Généralités sur l'induction et la conversion mécano électrique.....	121
3.7. Éolienne à « vitesse fixe » à base de machine asynchrone .....	121
3.7.1. Principe physique .....	121
3.7.2. Constitution de la machine asynchrone.....	121
3.7.3. Modélisation.....	121
3.7.4. Système de conversion.....	121
3.7.5. Caractéristiques de fonctionnement .....	121
3.8. Éolienne à vitesse variable .....	121
3.8.1. Intérêt.....	121
3.8.2. Classement des structures selon les technologies de machines.....	121

VI	Énergie électrique à partir des sources renouvelables	
	3.8.3. Principe de dimensionnement des éléments .....	121
	3.8.4. Réglage des puissances actives et réactives.....	121
	3.8.5. Aérogénérateurs basés sur une machine asynchrone à double alimentation .....	121
	3.8.6. Aérogénérateurs basés sur une machine synchrone .....	121
3.9.	Éoliennes offshore .....	121
	3.9.1. Intérêts de l'éolien en mer .....	121
	3.9.2. Types d'éoliennes offshore .....	121
3.10.	Fermes d'éoliennes .....	121
	3.10.1. Architecture de fermes éoliennes.....	121
	3.10.2. Foisonnement .....	121
3.11.	Exercices .....	121
	3.11.1. Éolienne à vitesse fixe.....	121
	3.11.2. Caractérisation d'une turbine et estimation de la puissance générée..	121
	3.11.3. Éolienne de forte puissance à vitesse variable .....	121
3.12.	Bibliographie .....	121
<b>Chapitre 4.</b>	<b>L'hydroélectricité terrestre et marine</b> .....	<b>189</b>
	Benoît ROBYNS et Antoine HENNETON	
4.1.	L'hydraulique au fil de l'eau .....	189
	4.1.1. L'hydroélectricité .....	189
	4.1.2. Petite hydroélectricité .....	192
	4.1.3. Turbines hydrauliques.....	194
	4.1.4. Conversion électromécanique pour la petite hydroélectricité.....	202
	4.1.5. Exercice : petite centrale hydroélectrique au fil de l'eau .....	205
4.2.	L'énergie hydraulique de la mer.....	220
	4.2.1. Énergie des vagues .....	220
	4.2.2. Énergie des courants océaniques continus.....	225
	4.2.3. Énergie des marées .....	227
	4.2.4. Production houlomotrice, houlogénérateurs .....	233
	4.2.5. Production par les courants marins .....	256

4.2.6. Production marémotrice.....	270
4.2.7. Exercice : estimation de la production d'une usine marémotrice simple effet .....	284
4.3. Bibliographie.....	285
<b>Chapitre 5. La production d'origine thermique .....</b>	<b>291</b>
Jonathan SPROOTEN	
5.1. Introduction.....	291
5.2. La géothermie.....	291
5.2.1. Introduction.....	292
5.2.2. La ressource .....	292
5.2.3. Caractéristiques des fluides.....	293
5.2.4. Le principe des centrales géothermiques.....	295
5.2.5. La conversion thermodynamique.....	297
5.2.6. La turbine à vapeur .....	303
5.2.7. L'alternateur.....	305
5.3. La production solaire thermodynamique.....	311
5.3.1. Introduction.....	311
5.3.2. Principe de la concentration .....	312
5.3.3. Le captage cylindro-parabolique .....	316
5.3.4. La tour solaire.....	320
5.3.5. Le captage parabolique .....	320
5.3.6. Comparaison des productions solaires thermodynamiques .....	323
5.4. La cogénération par biomasse .....	323
5.4.1. Origine de la biomasse. Intérêt énergétique .....	324
5.4.2. Principe de la cogénération .....	324
5.5. Bibliographie.....	327



## VIII Énergie électrique à partir des sources renouvelables

<b>Chapitre 6. Problématique de l'intégration de la production décentralisée dans le réseau électrique</b> .....	329
Benôit ROBYNS et Jonathan SPROOTEN	
6.1. D'un réseau centralisé vers un réseau décentralisé .....	329
6.1.1. Le réseau de transport .....	329
6.1.2. Le réseau de distribution .....	331
6.1.3. Les services pour le système électrique .....	333
6.1.4. Acteurs d'un système libéralisé .....	338
6.1.5. Rôles des productions décentralisées dans la gestion du réseau .....	339
6.2. Contraintes de raccordement et vérifications d'usage.....	340
6.2.1. Gestion de la tension.....	340
6.2.2. Gestion de la fréquence.....	343
6.2.3. Qualité de l'onde électrique .....	347
6.2.4. Protection et tenue en court-circuit du système électrique .....	349
6.2.5. Protection de découplage .....	349
6.2.6. Autres contraintes .....	350
6.3. Les défis de l'intégration de la production décentralisée .....	350
6.3.1 Plan de défense et de reconstruction du système électrique .....	351
6.3.2 Prévision de la production en cas de situation météorologique extrême .....	351
6.3.3. Capacité d'accueil et protection du réseau .....	353
6.4. Perspectives pour une meilleure intégration dans les réseaux .....	354
6.4.1. Actions au niveau des sources .....	355
6.4.2. Actions au niveau des réseaux.....	357
6.4.3. Actions au niveau des consommateurs.....	363
6.5. Bibliographie.....	366

# Préface

La première édition de l'ouvrage « Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables » a rencontré un beau succès. Elle a sans doute rencontré un public qui recherchait des connaissances synthétiques concernant les moyens de production d'électricité à partir des ressources renouvelables. Cette réussite est le résultat de la collaboration de cinq enseignants-chercheurs dont l'expérience et la pratique sont internationalement reconnues, Benoît Robyns, Arnaud Davigny, Bruno François, Antoine Henneton et Jonathan Sprooten. Au sein de cette équipe, Benoît Robyns a joué un rôle majeur d'auteur, mais également de chef d'orchestre exigeant, contribuant au succès de l'ouvrage.

La gestation de la première édition, parue en 2012 fut longue (plus de 3 ans) et a bien révélé la difficulté et l'étendue d'un tel travail. Mais, près de 10 ans plus tard, le secteur extrêmement dynamique de la production d'électricité renouvelable, a conduit à la nécessité d'une mise à jour. Dans ce contexte, les secteurs les plus porteurs de la transition énergétique mondiale sont le photovoltaïque et l'éolien dont la croissance reste particulièrement soutenue grâce au premier potentiel technique exploitable, capable de satisfaire, à moyen terme, la majeure partie des besoins énergétiques de l'humanité. Cette dynamique s'accompagne ainsi de progrès suffisamment significatifs pour qu'une mise à jour ait été nécessaire et qu'elle ait conduit à la parution de cette nouvelle édition, avec la même équipe d'auteurs.

Dans ce livre, une introduction contextuelle présente l'immense potentiel des ressources renouvelables, ressources qui sont sans aucun doute les seules à offrir à toute l'humanité un avenir réellement soutenable, notamment en intensifiant l'électrification de nombreux secteurs. Ensuite, les auteurs traitent le sujet, de la façon la plus concise possible afin de permettre l'accessibilité de cet ouvrage à des personnes dont le niveau de formation scientifique est post-baccalauréat. Ils décrivent, de façon très pédagogique, les différents principes de conversion et les technologies associées dans quatre chapitres : photovoltaïque, éolien, terrestre et offshore, hydraulique (solutions terrestres et marines, incluant houlogénérateurs et hydroliennes) et thermique (à partir de biomasse, géothermie, rayonnement solaire), incluant la cogénération électricité et chaleur. En guise de conclusion, le dernier

## 2 Énergie électrique à partir des sources renouvelables

chapitre traite de l'intégration dans les réseaux d'une production très décentralisée. À la fin des chapitres 2 à 4, sont proposés des exercices corrigés, permettant de s'autoévaluer.

Je remercie vivement les cinq auteurs de cet ouvrage pour leur contribution à une diffusion de connaissances indispensables à la transition énergétique qui peine, particulièrement en France, à prendre son envol. Cet ouvrage pourra ainsi accompagner tant les enseignants désireux de moderniser leurs enseignements que leurs étudiants post-bac.

Bernard MULTON

# Introduction

Les enjeux énergétiques et environnementaux sont à l'origine d'une forte croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Le concept de développement durable et le souci des générations futures nous interpellent au quotidien permettant l'émergence de nouvelles technologies de production d'énergie, et de nouveaux comportements d'utilisation de ces énergies. La part des énergies renouvelable dans le mix de production d'électricité mondial dépasse désormais les 25 % [RAB 20]. L'émergence rapide de nouvelles technologies peut rendre la compréhension et donc la perception de celle-ci difficile. Ce livre a pour but de contribuer à une meilleure connaissance de ces nouvelles technologies de production d'électricité en s'adressant à un public varié. En effet, il présente les enjeux, les sources et leurs moyens de conversion en électricité suivant une approche générale et développe les notions scientifiques de base permettant d'en appréhender les principales caractéristiques techniques avec une vision d'ensemble.

Les objectifs de cet ouvrage sont :

- de présenter les systèmes de production d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables des petites aux moyennes puissances (jusque 100 à 200 MW) ;
- d'introduire les notions électrotechniques de base nécessaire à la compréhension des caractéristiques de fonctionnement de ces convertisseurs ;
- d'évoquer les contraintes et problèmes d'intégration dans les réseaux électriques de ces moyens de production ;
- de proposer quelques exercices pour s'autoévaluer.

Le premier chapitre introduit la production décentralisée d'électricité à partir des ressources énergétiques renouvelables. Il présente les enjeux qui ont induit le développement de la production d'électricité non plus essentiellement suivant l'approche centralisée développée au XX<sup>e</sup> siècle, mais dispersée sur l'ensemble des territoires comme le sont les ressources disponibles et gérées par de multiples acteurs en situation de concurrence. Ce chapitre présente également les enjeux à

#### 4 Énergie électrique à partir des sources renouvelables

l'origine du développement de la production d'électricité à partir de ressources renouvelables. Il introduit les différentes énergies exploitables et décrit les principes de base de leur conversion en énergie électrique. L'autoproduction et l'autoconsommation d'énergie, bien adaptées aux énergies renouvelables, sont également introduits.

Le deuxième chapitre présente la production directe (photovoltaïque) d'électricité à partir de l'énergie solaire. Il décrit les caractéristiques des cellules et des panneaux photovoltaïques. Cette filière connaît un taux de croissance annuel de plus de 50 % en moyenne depuis 10 ans [RAB 20]. Il explique les principes de fonctionnement des convertisseurs électroniques de puissance permettant de contrôler l'énergie extraite du rayonnement solaire, et de lui donner une forme correspondant aux besoins du consommateur. Ce chapitre se termine par quelques exercices.

Le troisième chapitre développe les principes de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il décrit les principales technologies d'éoliennes. Le taux de croissance annuel de l'éolien terrestre est de plus de 20 % en moyenne depuis 10 ans [RAB 20]. La conversion électromécanique à partir de générateurs de type synchrone et asynchrone, à vitesse fixe ou variable, y est expliquée. Des exemples de caractéristiques d'éoliennes réelles de grande et de petite puissance sont présentés. L'éolien en mer ou offshore qui offre de belles perspectives de développement est introduit. Des exercices concernant différents types d'éoliennes, à vitesse fixe et variable, la caractérisation d'une turbine et l'estimation de la puissance générée sont proposés.

Le quatrième chapitre présente la production d'énergie électrique à partir de l'énergie potentielle ou cinétique de l'eau, qu'il s'agisse des milieux terrestres ou marins. Dans un premier temps, les principes de l'hydroélectricité, première source renouvelable mise en œuvre pour produire de l'électricité depuis plus d'un siècle, sont développés en se focalisant plus particulièrement sur l'hydraulique au fil de l'eau. Dans un deuxième temps, les énergies hydrauliques d'origines marines sont présentées : énergie des vagues, des courants et des marées. L'exploitation de ces énergies est encore peu développée et la plupart des technologies associées sont en émergence, à l'exception de la production marémotrice mature mais toujours marginale. Des exemples de ces technologies sont décrits dans ce chapitre. Des exercices relatifs à de petites centrales hydroélectriques au fil de l'eau et à une usine marémotrice sont proposés.

Le cinquième chapitre introduit la production d'électricité d'origine thermique dans laquelle la chaleur est produite à partir de ressources renouvelables. C'est le cas de la géothermie, du solaire thermodynamique à concentration et de la cogénération

dont les principes sont décrits. Les principes de fonctionnement et caractéristiques de l'alternateur synchrone directement couplé au réseau électrique y sont présentés.

Le sixième chapitre pose la problématique de l'intégration des sources d'origine renouvelable, et plus généralement de la production décentralisée dans les réseaux électriques. Ces derniers sont en effet confrontés à un nouveau paradigme du fait du caractère aléatoire et difficilement prévisible de certaines de ces sources, de leur dispersion sur le territoire, auquel s'ajoutent les règles d'un marché libéralisé de l'électricité. Les principales contraintes de raccordement de ces sources sont succinctement décrites. Des perspectives pour une meilleure intégration dans les réseaux de ces sources sont identifiées en considérant des actions au niveau des sources, des réseaux et des consommateurs. Les développements et incitations qui rendront les futurs réseaux électriques plus intelligents sont en marche.

[RAB 20] A.Rabain, B.Multon, M.Paillard, « Mais pourquoi diable chercher à convertir des énergies renouvelables en mer ? », [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org), avril 2020.



Les enjeux énergétiques et environnementaux sont à l'origine d'une forte croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle. Le concept de développement durable et le souci des générations futures nous interpellent au quotidien permettant l'émergence de nouvelles technologies de production d'énergie, et de nouveaux comportements d'utilisation de ces énergies. L'émergence rapide de nouvelles technologies peut rendre la compréhension et donc la perception de celle-ci difficile. Ce livre a pour but de contribuer à une meilleure connaissance de ces nouvelles technologies de production d'électricité en s'adressant à un public varié. Il présente les enjeux, les sources et leurs moyens de conversion en électricité suivant une approche générale et développe les notions scientifiques de base permettant d'en appréhender les principales caractéristiques techniques avec une vision d'ensemble.

Des systèmes de production d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables de petites et moyennes puissances sont présentés. La deuxième édition de cet ouvrage, revue et augmentée, met à jour les nombreuses données caractérisant le développement de ces énergies renouvelables, aborde les nouvelles technologies émergentes photovoltaïques et marémotrices exploitant les courants marins, le développement de l'éolien offshore, et les développements récents concernant l'intégration de ces sources dans le réseau électrique, ainsi que le développement de l'autoproduction et de l'autoconsommation. Plusieurs exercices sont proposés au lecteur à des fins d'évaluation.

**Benoît Robyns** est Directeur adjoint de la Recherche à Junia, et Vice-Président Transition Énergétique et Sociétale de l'Université Catholique de Lille. Il est le Responsable de l'équipe RESEAUX du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP).

**Arnaud Davigny** est docteur et enseignant-chercheur à Junia, et chercheur au L2EP.

**Bruno François** est Professeur à Centrale Lille Institut, et chercheur au L2EP.

**Antoine Henneton** est docteur et Responsable du Pôle Projets & Valorisation à Junia.

**Jonathan Sprooten** est docteur et responsable de l'équipe Power System Planning au sein du département Grid Development d'Elia, gestionnaire du réseau électrique de transport belge.

Crédit photo : alexsl (iStock)



978-2-7462-4937-0