

Jean-Paul Hulot, Jacques Percebois

Préface de Yves Bréchet

Le système électrique en France

**Fondamentaux techniques
et enjeux économiques**

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel
Graphisme de couverture : Elizabeth Riba

© Dunod, 2026
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-089723-0

● Table des matières

Préface	1
Introduction	5
Partie 1	
Fondamentaux techniques	9
1 L'énergie	11
1. L'humanité et l'énergie	11
2. La définition de l'énergie	13
3. L'énergie et la puissance	14
4. Les formes d'énergie	16
5. Les caractéristiques des sources d'énergie primaire	17
6. L'origine des sources d'énergie	18
7. La densité d'énergie	21
8. L'électricité	22
2 Les moyens de production de l'électricité	25
1. Le cycle à vapeur	27
2. L'énergie mécanique directe	32
3. La production photovoltaïque	37
4. L'énergie chimique	38
5. La comparaison des moyens de production de l'électricité	39
6. Les rejets de GES des moyens de production	40
3 Les réseaux électriques	44
1. Les réseaux publics	44
2. Le réseau européen	47
3. L'équilibre du réseau électrique	49
4. Les événements perturbateurs du réseau	54
5. Conclusion sur les réseaux	58

4	Le stockage de l'électricité.....	60
1.	Généralités	60
2.	Le stockage direct de l'électricité.....	62
3.	Le stockage de l'électricité sous forme d'énergie chimique	63
4.	Le stockage de l'électricité sous la forme d'énergie mécanique	70
5.	Les services rendus par le stockage de l'électricité.....	73
6.	Conclusion sur le stockage de l'électricité	76
5	Les moyens de production et leurs utilisations.....	78
1.	Le parc de production électrique français.....	78
2.	La production d'électricité	86
3.	Les échanges transfrontaliers.....	104
4.	La régionalisation	105
5.	L'utilisation de la production.....	106
6.	Le bilan 2009-2024 : l'évolution du parc, du mix et des limites d'intégration des productions intermittentes.....	107

Partie 2

Enjeux économiques

111

6	Le coût de l'électricité.....	113
1.	Les divers concepts de coût	113
2.	Le coût moyen actualisé (LCOE).....	115
3.	La sensibilité du LCOE à divers paramètres	121
4.	La sensibilité du coût au mode de financement.....	125
5.	La compétitivité des diverses filières électriques.....	129
6.	Les substitutions entre centrales en fonction des coûts relatifs de production	133

7	Le marché de gros de l'électricité	139
1.	Le fonctionnement du marché : un prix calé sur le coût marginal	140
2.	Les mécanismes de soutien aux énergies renouvelables	148
3.	La crise de 2022 et l'envolée des prix de gros	149
4.	Les enchères aux frontières	154
5.	Les projets de réforme du marché de gros européen	159
6.	Conclusion	167
8	Le marché de détail	169
1.	Les prix payés par le consommateur final : TRV ou OM	169
2.	La fixation du TRV par la CRE	173
3.	La fixation du tarif d'utilisation des réseaux de transport et de distribution d'électricité (TURPE)	178
4.	Quelle solution post-ARENH ?	183
5.	Quelle stratégie pour les fournisseurs alternatifs ?	188
6.	Comment les énergies renouvelables influencent-elles le prix de l'électricité ?	188
7.	Conclusion : hausses de prix, compétitivité et enjeux internationaux	192
	Conclusion	195
	Glossaire	196
	Index	199

Préface

L'énergie est le sang de nos économies industrielles comme la matière en est la chair. La décarbonation de nos économies est un impératif qui résulte des évolutions climatiques, et la stratégie la plus efficace pour y parvenir est une alliance entre la sobriété et l'électrification. L'électricité se trouve donc au cœur des stratégies de nos sociétés industrielles pour peu qu'on puisse à la fois la produire de façon décarbonée, et qu'il soit possible d'électrifier massivement les usages (dans le transport, dans le logement et dans l'industrie).

Il est facile de se convaincre de l'importance de l'électricité, mais il est autrement délicat d'en saisir toute la complexité technique, économique, politique et géopolitique. On a peine à croire, à regarder rétrospectivement les discours qui ont été tenus, les décisions qui ont été prises, les réglementations qui ont été émises, qu'un sujet d'une telle importance pour nos sociétés, dont l'impact sur nos industries est à ce point essentiel, dont l'incidence sur la vie de nos concitoyens est à ce point critique, ait été traité avec une telle légèreté, et qu'il ait été à ce point pollué par des idéologies aussi délétères qu'elles sont peu étayées par les faits. L'aveuglement a été largement partagé par la plupart des partis politiques, par les administrations en charge, au niveau national comme au niveau européen.

On a peine à croire qu'il ait fallu attendre l'émergence de crises politiques et géopolitiques majeures et qu'il faille aujourd'hui faire face aux impasses technologiques fondamentales signalées de longue date en termes de stabilité des réseaux et de capacités de stockage d'un produit difficile à stocker, l'électricité. La rationalité a fort à faire pour s'imposer dans des domaines où la croyance et la cupidité règnent en maîtres, et force est de constater que le secteur de l'électricité a cumulé les inconséquences idéologiques avec l'appât du gain sans effort que génère la prolifération sans discernement des aides publiques. Il a manqué à ceux qui décidaient à la fois la vision de l'intérêt public, la compréhension des échelles de temps, et la compréhension de la nature systémique de la question. À supposer que le sens du bien commun leur reste, il leur a manqué ce livre pour être capables de prendre les décisions qui s'imposaient au lieu de sacrifier à la mode et aux croyances.

Ce livre est constitué de deux parties qui constituent les deux composantes essentielles d'une politique rationnelle de l'électricité.

La première partie donne les grandes lignes de ce que nous apprend l'ingénieur : en quoi l'énergie diffère de la puissance, pourquoi les énergies de flux sont distinctes des énergies de stock, quelles sont les caractéristiques du vecteur électrique, quels sont les différents modes de production et quelles sont les caractéristiques des différents modes

de production d'électricité en ce qui concerne leur caractère renouvelable, pilotable ou intermittent, ainsi que leur signature du point de vue du climat et de l'environnement. Il rassemble également les informations trop souvent négligées, sur les capacités de stockage, sur les réseaux de transport et de distribution, sur la stabilité des réseaux, les phénomènes qui la menacent et les réserves de puissance permettant de la garantir. Cette partie fait la distinction entre la puissance installée et la puissance délivrée, et rappelle ce qui n'aurait jamais dû être passé sous silence : la réflexion sur un mix électrique ne saurait s'exonérer d'une réflexion parallèle sur les besoins de consommation, sur les capacités de stockage, sur la robustesse des réseaux. Supputer des consommations pharaoniques pour justifier des investissements en moyens de production que les réseaux ne peuvent accommoder sans danger pour leur stabilité, et prétendre appeler cela une « politique énergétique » relève simplement ou de l'incompétence, ou de la tromperie.

La seconde partie consacrée à l'économie de l'électricité. Là aussi, les dernières décennies ont apporté leur lot d'idéologies et de mensonges. La notion même de coût y apparaît dans toute sa complexité. Entre le coût moyen actualisé, le coût marginal, le coût complet, l'importance du taux d'utilisation des différents modes de production qui lui-même dépend de l'ordre d'appel, le caractère essentiel des coûts d'externalité (de stockage, de réseau) qu'il est si facile de cacher avec la poussière sous le tapis. Cette partie clarifie une question complexe qu'il est essentiel de comprendre au risque de se voir imposer des éléments de décisions simplement erronés, quand ils ne sont pas volontairement biaisés. Mais le coût n'est pas tout, le marché est une composante essentielle de la question. Les subtilités des marchés de gros et des marchés de détail, les différentes options de financement des investissements, la zoologie des aides diverses obligations d'achat et compléments de rémunération, et leur justification, l'idéologie sous-jacente aux traités européens visant à converger vers un marché de gros homogène, et dont on doit bien constater qu'il ne survit qu'à force de rustines accumulées, tout cela transparaît clairement dans l'analyse de la crise de 2022 conjuguant la guerre en Ukraine et l'indisponibilité du parc. La nécessité d'une réforme en profondeur pour sortir de l'impasse actuelle, et les différentes options actuellement sur la table sont clairement expliquées, et ces explications permettent au lecteur, par-delà les anathèmes et les oukases dont se repaissent ceux-là mêmes qui ont pris ou assumés les décisions, de mieux comprendre les choix qui se présentent.

À l'ingénieur qui s'intéresse à l'énergie, ce livre apportera une connaissance mieux assurée des aspects économiques, et à l'économiste de l'énergie, il dévoilera les difficultés techniques du système électrique. Au politique responsable, il donnera cette double vision qui n'aurait jamais dû le quitter, et au citoyen conscient des difficultés où des décennies d'inconséquences nous ont menés, il expliquera les racines du problème et l'incontournable réalité des faits. À tous ceux-là, je recommande vivement la lecture de cet ouvrage.

Je ne peux que reprendre la dernière phrase du livre : « La frontière entre ce qui relève des règles du marché et ce qui incombe à l'intervention de l'État est fluctuante

et l'on prend conscience que les choix de long terme ne sauraient être laissés au seul marché. C'est au politique de prendre les responsabilités de définir les contours de ce que sera demain le bilan énergétique, électrique en particulier, du pays. » Mais j'ajouterais que ces responsabilités ne sauraient s'exonérer de prendre en compte, sans tricherie, les exigences non négociables de la science et de la technique.

*Yves Bréchet,
Membre de l'Académie des sciences,
ancien haut-commissaire à l'énergie atomique*

