

Marc Rapin
Jean-Marc Noël

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Du petit éolien à l'éolien offshore

3^e édition

DUNOD

Photo de couverture : PARETO – istockphoto.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, Paris, 2010, 2014, 2019

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078286-4

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.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	VIII
Nomenclature	IX

A

Évolution et panorama actuel

1 • L'avènement de l'éolien moderne	3
1.1 Les moulins « américains »	3
1.2 L'évolution électrique : Poul La Cour, Louis Constantin et autres pionniers	11
1.3 Les premières réalisations	16
2 • Le faux départ de l'après-guerre	25
2.1 L'expérience française	25
2.2 Les développements danois et allemand	39
3 • Le tournant du 1^{er} choc pétrolier	43
3.1 L'échec des grands prototypes <i>downwind</i>	43
3.2 Les petites machines <i>upwind</i> d'Europe du Nord	46
3.3 L'invasion du marché californien	48
3.4 Et en France... ?	50
4 • L'actuel et l'avenir : MW et offshore	69
4.1 Les développements des différentes machines	69
4.2 L'évolution du monde éolien	81
4.3 Les développements vers l'offshore	101
4.4 En conclusion	127

B

Les différents sous-systèmes de l'éolienne

5 • Le potentiel de conversion	131
5.1 La limite de Betz	131
5.2 Caractérisations des éoliennes	134
6 • La pale : l'organe premier de la conversion d'énergie	137
6.1 Structure et dynamique de pale	137
6.2 Aérodynamique de la pale	159
6.3 Aéroélasticité de la pale	166
7 • Le rotor	171
7.1 Fonctionnement du rotor	172
7.2 Comportement dynamique	181
7.3 Conception du rotor	201
8 • Les équipements de la génération électrique	207
8.1 Étapes du développement	208
8.2 Équipements individuels	210
8.3 Équipements couplés aux réseaux	214
8.4 Les solutions alternatives : entraînement direct et alternateurs à aimants permanents	231
8.5 Le couplage au réseau	243
9 • Approche système	247
9.1 Conception du système éolien	247
9.2 L'approche multi-domaines	251

C

Montage de projet pour un parc éolien

10 • Aspects techniques et économiques	257
10.1 La connaissance du vent	257
10.2 Le gisement éolien	269
10.3 Coûts et prix du kWh	277
10.4 Parc offshore	288
10.5 Retombées économiques	291

11 • Aspects environnementaux, contraintes et servitudes	297
11.1 Les outils de planification	300
11.2 L'impact visuel	305
11.3 Le bruit	306
11.4 L'interférence électromagnétique	309
11.5 La faune et la flore	311
12 • Aspects administratifs	315
12.1 L'étude d'impact	316
12.2 La demande de raccordement	316
12.3 L'enquête publique	317
12.4 Le permis de construire	317
12.5 Classement ICPE	319
12.6 La simplification des procédures	319
12.7 Offshore et CNDP	320
13 • Exemples de réalisations	323
13.1 Parc de Goulien (Bretagne)	323
13.2 Parc éolien de Bouin (Vendée)	324
13.3 Parc éolien de Summerview (Alberta, Canada)	325
13.4 Parc éolien offshore de Saint-Nazaire (Pays-de-Loire)	326

Annexe : chronologie des réalisations éoliennes françaises

A.1 • Les éoliennes lentes multipales	331
A.2 • Les 1^{res} éoliennes rapides	336
A.3 • Les développements de l'après-guerre	341
A.4 • Après le 1^{er} choc pétrolier	352
A.5 • L'ère moderne	361
Bibliographie	369
Index	371

REMERCIEMENTS

Je dédie cet ouvrage à la mémoire de mon grand-oncle, Maurice Marquet, et de mon père, François Rapin, qui m'ont transmis leur passion pour l'aéronautique et son histoire, à ma famille pour sa patience, les nombreuses pauses photos d'éoliennes, etc.

Je tiens à remercier Jacques Drivière du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ENSAM Paris pour avoir accompagné mes premiers pas dans l'éolien, Fawaz Massouh et Ivan Dobrev pour les coopérations et échanges actuels et tous mes interlocuteurs éoliens et étudiants, inlassablement motivés pour le développement des énergies renouvelables.

Je tiens plus particulièrement à remercier mes anciens collègues de l'ONERA qui ont participé à l'aventure de l'éolien en France et sans qui la matière de cet ouvrage n'aurait pas existé : Edmond Szechenyi qui m'a permis d'entrer à l'Office, Philippe Leconte, Didier Petot, Bernard Paluch, Claude Notin, Nicolas Tourjansky et Hervé Vuillemin.

Marc Rapin

NOMENCLATURE

C	N.m	Couple
C_p		Coefficient de puissance
C_z		Coefficient de portance d'un profil
C_x		Coefficient de traînée d'un profil
f	Hz	Fréquence
F	N	Force dans le plan rotor
H_0	m	Hauteur de la nacelle
I_b	kg.m ²	Moment d'inertie massique de la pale
I_t	kg.m ²	Moment d'inertie en torsion
K_β	N.m	Raideur de l'articulation de battement
K_δ	N.m	Raideur de l'articulation de traînée
K_θ	N.m	Raideur de l'articulation de torsion
M	N.m	Moment d'une force
q	rad.s ⁻¹	Vitesse angulaire de rotation autour de l'axe de lacet de l'éolienne
r	m	Position en envergure (rayon) d'une section élémentaire de pale
R	m	Rayon total d'une pale (du centre du rotor à l'extrémité de la pale)
S	m ²	Surface normale à la direction du vent
T	N	Traction
V_0	m.s ⁻¹	Vitesse moyenne axiale du vent en amont de l'éolienne et à la hauteur H_0
V_r	m.s ⁻¹	Vitesse relative du flux local
α	°	Angle d'incidence
β	°	Angle de battement
δ	°	Angle de traînée
φ	°	Angle de calage
ε_β		Excentricité de l'articulation de battement (ramenée au rayon R de la pale)
ε_δ		Excentricité de l'articulation de traînée (ramenée au rayon R de la pale)
λ		Vitesse spécifique = $\Omega R / V_0$
ρ	kg.m ⁻³	Masse volumique de l'air
θ	°	Angle de torsion
ψ	°	Azimut de la pale
ω	rad.s ⁻¹	Pulsation de la fréquence f ($\omega = 2\pi f$)
Ω	rad.s ⁻¹	Vitesse angulaire de rotation de la pale
\varnothing	m	Diamètre du rotor

