

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



La bibliographie complète de l'ouvrage est accessible sous forme de ressource numérique, à télécharger gratuitement sur le site dunod.com.

© Dunod, Paris, 2010, 2014, 2019

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079209-2

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

A

Évolution et panorama actuel

L'objectif de cette partie n'est pas de retracer de façon exhaustive l'avènement des éoliennes actuelles, ce qui a déjà été traité dans d'autres ouvrages, comme l'incontournable *Wind Energy, comes of age* de Paul Gipe. Le but est de replacer certains développements dans leur contexte pour comprendre l'évolution des concepts qui a abouti aux machines actuelles et d'y inscrire les réalisations françaises, parfois citées mais souvent oubliées quoique d'importance.

1 • L'AVÈNEMENT DE L'ÉOLIEN MODERNE

Les origines de l'éolien moderne se situent à la fin du XIX^e siècle avec l'implantation massive partout dans le monde de petites machines de pompage. Pourquoi choisir de les situer à cette époque ?

Simplement parce qu'après le siècle des Lumières, l'utilisation du vent perdit progressivement de son aura face aux formidables développements industriels de l'époque. Il restait pourtant encore en activité des milliers de moulins traditionnels dans toutes les campagnes... Fin XIX^e, de nouvelles petites machines sont apparues pour répondre à un besoin essentiel : la maîtrise de l'utilisation de l'eau. La présence de l'ensemble de ces moulins a sans nul doute marqué de façon importante et durablement l'inconscient collectif en nous familiarisant avec l'idée même de cette forme d'exploitation du vent. La marche vers l'éolien moderne pouvait commencer.

1.1 Les moulins « américains »

Les moulins utilisés pour exploiter l'eau sont tous similaires dans leur principe : être robuste et pouvoir fonctionner – et donc s'orienter – de façon autonome. Le rotor est multipale pour obtenir un couple de démarrage élevé avec de faibles vitesses de vent. Un système d'effacement du rotor ou des pales ou de parties constituant des pales garantit la survie de la machine en cas de vents violents.

La première évocation connue de ce principe se trouve dans l'ouvrage de Belidor, « architecture hydraulique » de 1737 (voir figure A1.1), possédant une girouette et ce qui correspond maintenant à une hélice moderne avec 4 pales entoilées et vrillées de formes elliptiques. Il faudra cependant attendre encore un siècle avant de trouver dès 1828 la description d'une des premières réalisations connues (classée sous la terminologie « préolienne » par E. Rogier), attribuée au français Amédée Durand (figure 1.1). Sa conception est différente puisque le rotor était placé en aval du mât et constitué de 6 pales en bois et toiles (à l'image des voiles de moulin). L'intérêt majeur de cette configuration, appelée « sous le vent » (*downwind*), est que le rotor joue lui-même le rôle de la girouette et s'oriente de lui-même face au vent. Pour les grands vents, un système original chaîne et contrepoids assurait un mouvement automatique des pales autour de leur axe (le calage), la masse du contrepoids étant définie pour résister jusqu'à une certaine valeur des efforts du vent sur ces pales. Plusieurs autres concepts similaires ou évolutions ont suivi comme les machines Mahoudeau ou Dellon (voir figure 1.2, voir aussi en annexe).

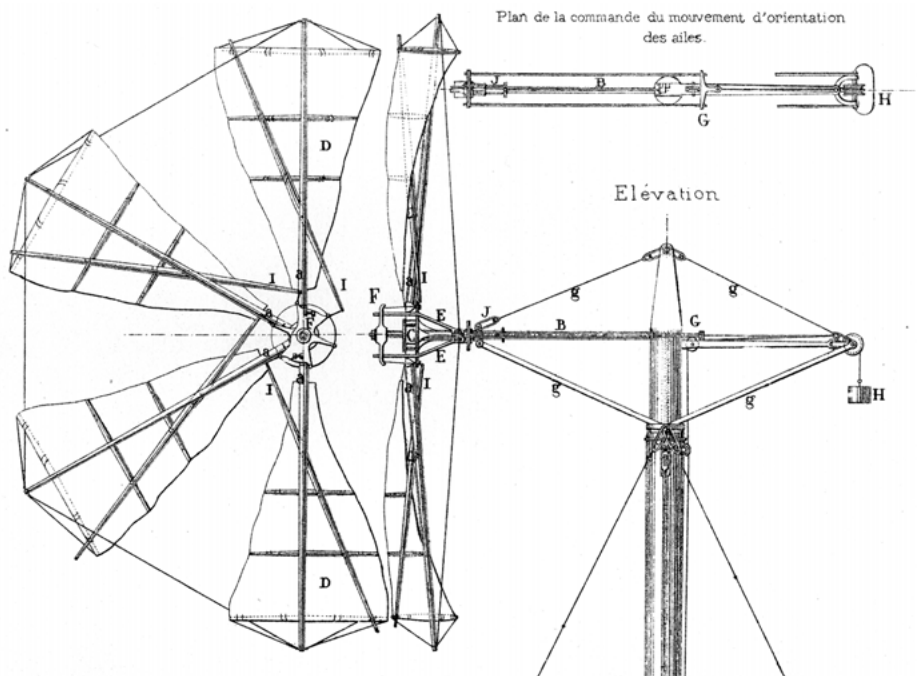


Figure 1.1 – Schéma de principe du moulin décrit par A. Durand en 1836
(collection M. Rapin)



Figure 1.2 – Prééolienne Dellon-Formis à l'exposition universelle de Paris de 1867
(photographie Pierre Petit, collection M. Rapin)

Mais c'est bien aux États-Unis que furent mises au point et produites à une échelle industrielle les petites éoliennes de pompage, d'où leur surnom de moulins « américains ». Elles sont ainsi très étroitement associées à la représentation du « *homesteader* » de l'ouest américain qui s'en servait pour alimenter son ranch. Leur histoire est magnifiquement et richement décrite dans l'ouvrage de T. Lindsay Baker : *A field guide to american windmills*. En 1854, Daniel Halladay fut le premier à proposer une machine avec gouvernail à quatre pales en bois mobiles. Parmi les autres développements de cette époque, on peut citer celle du révérend Wheeler en 1866 avec un premier modèle à 4 pales utilisant un gouvernail et une palette additionnelle : le concept Eclipse. Suivirent en 1878 deux autres modèles très répandus : l'Eureka de Smith et Woodard et la Star de Walling.

En France, comme l'a retracé Étienne Rogier, elles ont été importées et/ou fabriquées sous licences à partir des années 1880 par exemple pour les Eureka Solid Wheel par les sociétés Araou de Narbonne ou Bonnet de Toulouse (figure 1.3), Schabaver de Castres pour les Halladay (figure A1.3), par S. Plissonnier de Lyon ou L. Beaume de Boulogne pour les Eclipse (figure 1.4). Leur application principale était le pompage de l'eau, que ce soit pour l'irrigation ou l'approvisionnement en eau des communes, des fermes, des sites isolés, des particuliers, etc. Ces éoliennes sont donc à proximité, voire directement au-dessus d'un réservoir ou d'un château d'eau. Leur diamètre pouvait atteindre les 15 mètres pour certains modèles. Au XIX^e siècle, rotors et gouvernails étaient généralement réalisés en bois. C'est pour cette raison qu'il reste peu de traces des centaines de machines installées.

A

ÉVOLUTION ET PANORAMA ACTUEL

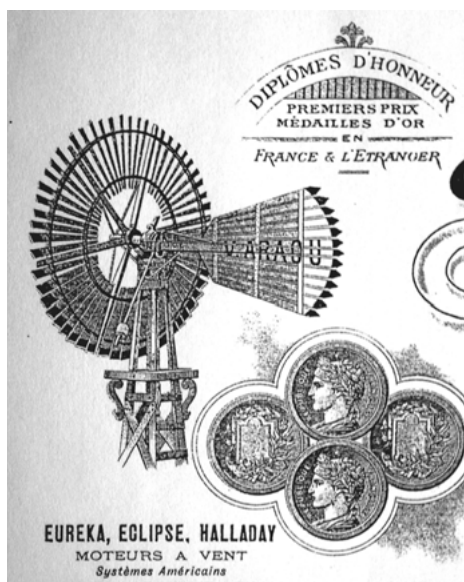


Figure 1.3 – Extrait d'une publicité Araou et photo de la restauration par la CC Vallée de l'Hérault de l'éolienne Bonnet Eureka de Belarga (collection et photo E. Rogier)

Les réalisations métalliques ne sont arrivées que dans un deuxième temps pour améliorer la tenue de l'ensemble. Le passage à la roue métallique avec pales concaves, plus efficace que les lames de bois jusqu'alors employées, est venu d'un ingénieur, Thomas Perry, travaillant initialement pour l'entreprise de fabrication des Halladay Standard. Il créa sa société en 1888 avec LaVerne Noyes pour produire l'un des modèles les plus populaires de tous les temps : l'Aermotor. Produites à seulement 45 unités la première année, ce sont plus de 2 200 machines qui sont vendues en 1889 puis 20 000 en 1891 ! Plus de 800 000 machines basées sur ce concept ont été installées de par le monde (figure 1.5) !

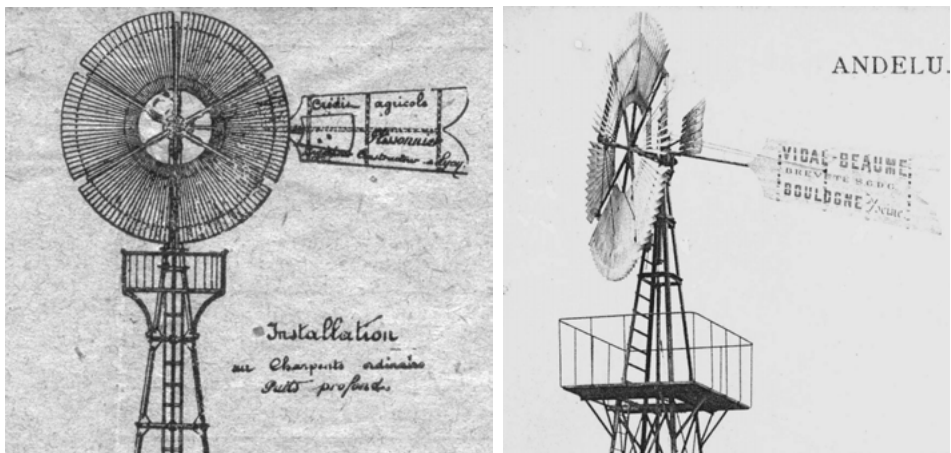


Figure 1.4 – Éoliennes Eclipse des Maisons S. Plissonnier de Lyon et Vidal-Beaume de Boulogne à Andelu (L'H. Paris, collection M. Rapin)

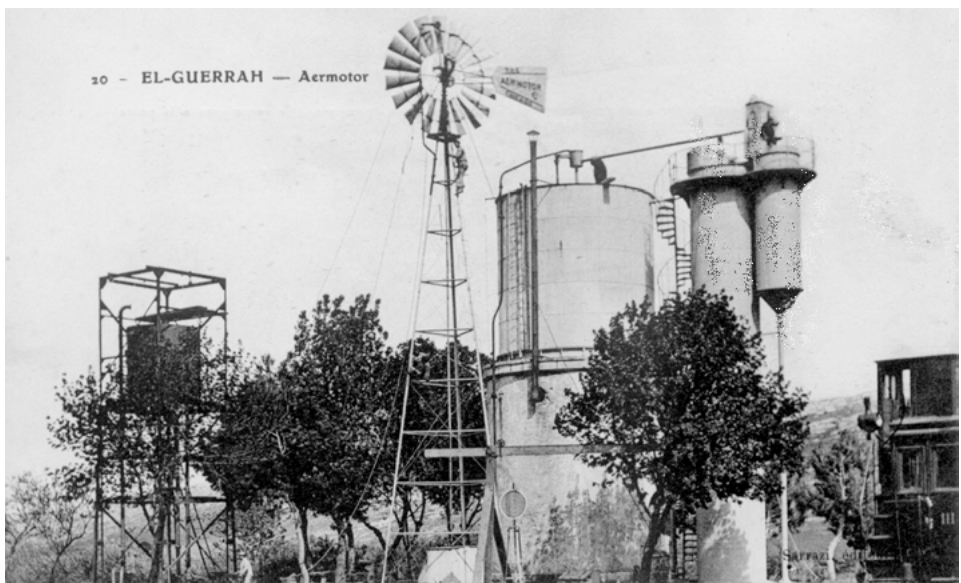


Figure 1.5 – Éolienne Aermotor en Algérie, début xx^e siècle

En 1892, la société Flint & Walling proposa pour sa part la Steel Star, distribuée en France par les compagnies R. Wallut de Paris et L. Bompard de Nîmes (figure 1.6) ; la société Stover Manufacturing Company l'Idéal Steel, puis la Samson en 1898, machines distribuées par la Maison Th. Pilter de Paris (figures 1.6 et A1.4). Certains fabricants français ont ensuite proposé leurs propres machines, souvent largement inspirées dès le départ par des modèles américains, et présentant de simples évolutions ou de réels perfectionnements tels que Schabaver (Halladay), Bompard (modèles séries CA et A) ou Araou (figure A1.6).

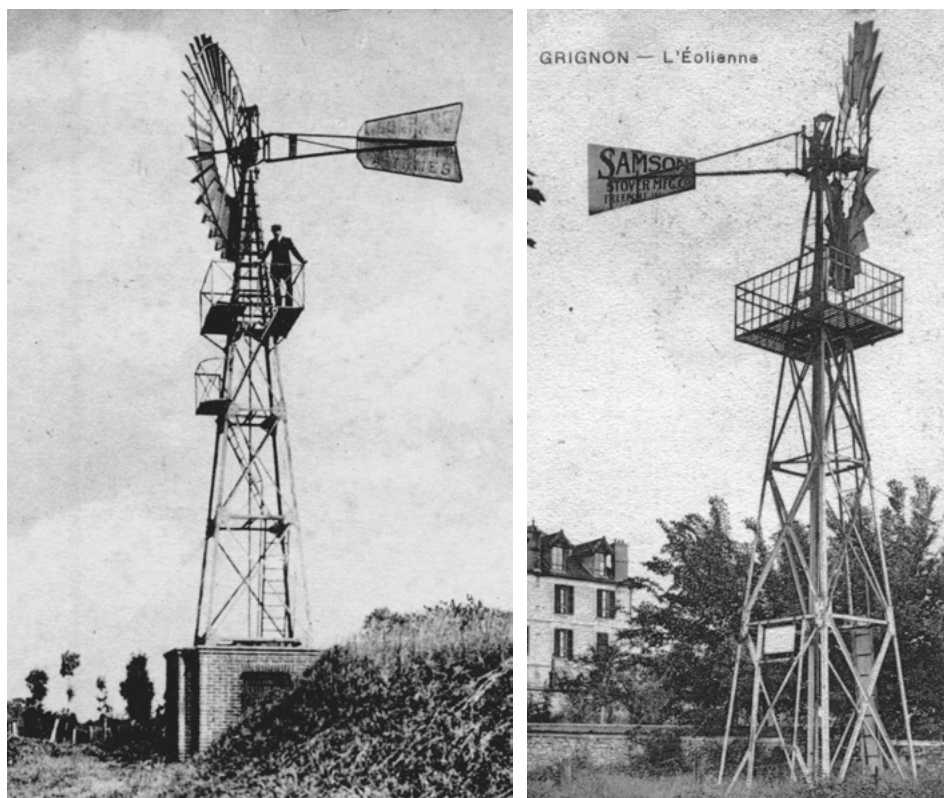


Figure 1.6 – Éoliennes Bompard Steel Star à Caumont-L'Éventé et Pilter Samson à Grignon (collection M. Rapin)

Pour l'ensemble de ces moulins « américains », le rotor est cette fois placé en amont du pylône, dans la configuration appelée « au vent » (*upwind*) : l'orientation automatique nécessite donc un système dédié. Celle-ci est la plupart du temps assurée par l'action d'un gouvernail (encore appelé safran), constitué par une surface verticale déportée à l'aval du pylône. Il existait cependant quelques machines disposant de moulinets auxiliaires (encore appelés papillons, roses des vents), qui, en rotation, sont équivalents à des surfaces latérales. Ce principe n'était pas nouveau puisque inventé par Edmund Lee en 1745 et déjà appliqué sur certains moulins à vent traditionnels (figure 1.7) pour remplacer la longue guivre (queue extérieure

A

ÉVOLUTION ET PANORAMA ACTUEL

descendant jusqu'au sol), prise dans la charpente du chapeau, utilisée par les meuniers pour orienter les ailes et la toiture.



Figure 1.7 – Exemple de moulin à orientation par moulinet, tiré de la revue *Science et Avenir*, n° 30, août 1949 (collection M. Rapin)

La nécessité de protéger la machine, en cas de vent important, a donné lieu à divers mécanismes. Là encore, certains constructeurs utilisaient un système d'effacement des pales directement inspiré des techniques développées pour les moulins traditionnels par Andrew Meikle en 1772 puis William Cubbit en 1807 : l'ensemble (ou une partie pour les éoliennes Halladay) des sections est mobile perpendiculairement à leur axe, comme pour les machines Lykkegaard (figure 1.12) ou le moulin de la figure 1.7. Dans le cas des préoliennes Durand ou des machines Lebert, c'est l'ensemble de la pale qui pivote autour de son axe pour se mettre en drapeau. Dans un souci de simplification des mécanismes et de fiabilité, ces systèmes d'orientation des pales étaient le plus souvent remplacés par un système d'effacement de l'ensemble du rotor. Celui-ci est obtenu par l'adjonction d'un système de rappel, constitué d'un contrepoids (Eclipse) ou d'un ressort (Mistral figure 1.8) lié au gouvernail d'orientation, et par l'utilisation d'une palette disposée perpendiculairement. Dans d'autres cas, le même résultat est obtenu sans palette mais en décentrant l'axe de rotation de l'axe vertical du pylône (Eureka).



Figure 1.8 – Exemple d'effacement sur une petite éolienne Mistral en réduisant l'angle entre le gouvernail/ressort et la palette (crédit photo : M. Rapin)



Figure 1.9 – St Martin d'Ocre : Bollée modèle n° 2 de 1893 (diamètre 3,5 m) avec le réservoir d'eau à proximité (crédit photo : M. Rapin)

D'autres ont su proposer des concepts originaux tels que la famille Bollée du Mans dès 1868. Le mât était constitué dans un premier temps d'une colonne en fonte, tendue par des câbles, autour de laquelle s'enroulait un élégant escalier (figure 1.9). Le rotor était en fait double : le 1^{er} étage était fixe et servait de redresseur pour le 2^e étage mobile. L'orientation était assurée par un moulinet qui avait la particularité de pouvoir tourner, en cas de grand vent, autour de son axe vertical pour mettre l'éolienne en position de sûreté, perpendiculairement au vent. Bien que de conception plus complexe et de prix supérieur, le design de ces éoliennes leur a permis de connaître un relatif succès (avec plus de 200 machines installées entre 1872 et fin 1893) et le sérieux de leur réalisation de fonctionner parfois assez longtemps (à l'image de l'éolienne Bollée d'Epuisay jusqu'en 1965, voir figure 1.10). Il en existe encore une cinquantaine sur presque 400 produites !



Figure 1.10 – Epuisay : Bollée modèle n° 3 de 1911 (diamètre 5 m) fabriquée par Lebert avec une tour de conception classique (crédit photo : M. Rapin)

Certaines d'entre elles ont été fabriquées jusque dans les années 50 (Araou, figure A1.6). Il n'est donc pas rare d'apercevoir encore de ces « anciennes » machines ou de plus récentes, basées sur les mêmes principes et proposées à la vente pour le pompage de l'eau, à l'image des Mistral ou des Oasis. Loin de choquer, elles font toutes partie intégrante de nos paysages ruraux ou communaux, à l'image des moulins à vent d'autrefois.

1.2 L'évolution électrique : Poul La Cour, Louis Constantin et autres pionniers

Dès la fin du XIX^e siècle, l'idée de tirer partie du vent pour produire de l'électricité est évoquée. En effet, la plupart des régions, surtout rurales, sont peu électrifiées, d'où l'intérêt d'une source d'alimentation « locale ». Cette application du moulin à vent fut très tôt évoquée dans quelques conférences ou revues scientifiques, comme par exemple Edouard Hospitalier en 1880 (*La Nature*) ou Lord Kelvin en 1881.

Des premiers essais ont été tentés par le belge Nolllet dès 1841. Mais le premier à avoir réellement utilisé l'électricité pour une installation individuelle – l'éclairage de sa maison à Marykirk, Kincardineshire – fut le britannique James Blyth, ingénieur en électricité et professeur à Glasgow. En juillet 1887, il installa une éolienne à axe verticale équipée de pales entoilées qui chargeait une batterie d'accumulateurs au plomb, construite par le français Camille Alphonse Faure. Sa proposition, quelques années plus tard, d'éclairer la rue principale de Marykirk avec un système éolien, fut rejetée par les habitants car jugée comme « démoniaque » !

Il fut suivi de peu, pendant l'hiver 1887-88, par l'américain Charles Brush, grand industriel en électricité, avec un moulin en bois pour alimenter sa résidence de Cleveland dans l'Ohio (figure 1.11). Le rotor faisait 17 m de diamètre et était composé de 144 lames en cèdre, le gouvernail servant à l'orientation faisait quant à lui 18 m de long. Du fait de la présence d'une palette additionnelle, qui assurait la régulation comme pour le système Eclipse, ce fut le premier système automatique au monde. Une dynamo Brush de 12 kW servait à charger 12 batteries de 34 accumulateurs pour alimenter quotidiennement 100 lampes à incandescence, 2 à arc et 3 moteurs électriques. Cette installation fonctionna pendant 20 ans...

En France, l'approche du Duc de Feltre était différente puisqu'il choisit d'utiliser d'emblée en 1887 pour charger des accumulateurs un produit « moderne », c'est-à-dire une grande éolienne américaine de type Halladay Standard (pylône de 18 m avec rotor multipale de 12 m de diamètre). L'ensemble fut finalement implanté en 1893 près du Havre pour alimenter électriquement l'un des phares de la Hève. Même si cette première expérience ne semble pas avoir été couronnée de succès, le principe proposé par le Duc de Feltre, baptisé « système de la Hève », fut repris et amélioré pour être ensuite utilisé les années qui suivirent.

Avec la combinaison du principe éolien et de la production d'électricité, on entre dans l'ère des aéromoteurs ou aérogénérateurs (appelés *windchargers* aux États-Unis). Mais les machines proposées pour produire de l'électricité sont les mêmes que celles utilisées pour le pompage, c'est-à-dire multipales lentes.

C'est du Danemark que soufflera le vent du changement. Poul La Cour est d'abord électricien, connu pour ses travaux sur le télégraphe, mais aussi météorologue et physicien. En 1878, il devint enseignant-chercheur à l'Askov High School. Dès 1891, il réalisa la construction d'une première éolienne à 4 ailes asymétriques de type flamande (voiles ajustables) avec orientation par deux moulins (figure 1.12). Les ailes évoluèrent rapidement la même année (figure 1.14) vers une configuration symétrique mais avec un assemblage de planches mobiles