

Les réalisations d'Electricité de France concernant l'énergie éolienne

PAR

R. BonnefilleDirection des Etudes et Recherches
Electricité de France

AVANT-PROPOS.

1 - LE VENT ET L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.

- 1.1 - *Les mesures de l'énergie du vent.*
- 1.2 - *La formule de Betz.*

2 - LES RÉALISATIONS.

2.1 - *Les éoliennes d'Electricité de France.*

2.1.1 - L'aérogénérateur de 800 kW de Nogent-le-Roi.

2.1.1.1 - Les buts du programme d'essais.

2.1.1.2 - Historique succinct de l'aérogénérateur de 800 kW de Nogent-le-Roi.

2.1.1.3 - Conclusion sur la marche de l'aérogénérateur de 800 kW de Nogent-le-Roi.

2.1.1.4 - L'hélice rapide de Nogent-le-Roi.

2.1.1.5 - Programme d'action ébauché à la suite de l'expérience de Nogent-le-Roi.

2.1.2 - L'aérogénérateur de 132 kW de Saint-Rémy-des-Landes.

2.1.3 - L'aérogénérateur de 1 000 kW de Saint-Rémy-des-Landes.

2.1.4 - Les essais de Saint-Servan.

2.1.5 - Les éoliennes J.-B. Morel.

2.1.5.1 - L'hélice à pales tendues entre une jante circulaire et un moyeu allégé.

2.1.5.2 - L'éolienne à axe vertical.

2.2 - *Les autres grandes machines.*

2.2.1 - L'aérogénérateur Andraeu-Enfield (1950-1957).

2.2.2 - L'aérogénérateur des Orcades.

2.2.3 - Les éoliennes danoises.

2.2.4 - L'énergie éolienne en Allemagne.

2.3 - *Les petits aérogénérateurs.*

3 - CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES ET PERSPECTIVES D'AVENIR.

CONCLUSION.

BIBLIOGRAPHIE.

Avant-propos

Parler d'énergie éolienne en 1974, soulève immédiatement la passion des interlocuteurs; les « éoliens », les défenseurs de l'environnement, les nostalgiques des énergies propres... tous, sentent dans la crise de l'énergie de ce début 1974, l'occasion de remettre à la mode l'utilisation de l'énergie du vent.

Il faut bien avouer que l'énergie éolienne est une des plus anciennes puissances naturelles domestiquée sous forme mécanique, principalement pour la traction des navires et l'entraînement des meules des moulins et des pompes. Ces deux modes d'utilisation ont bien évolué. Les grands voiliers ont été remplacés par les navires à vapeur, puis à moteur à explosion et enfin nucléaires; en revanche, l'art de la voile s'affine de jour en jour. Les moulins à vent ont

disparu; cependant les pompes mues par les éoliennes continuent à tourner.

La crise de l'énergie, qui a suivi la Seconde Guerre mondiale, a vu se développer des tentatives de construction d'aérogénérateurs de grandes puissances pour la production de l'électricité. On ne peut pas dire que toutes ces tentatives aient échoué; mais elles ont toutes été arrêtées lorsque le prix des produits pétroliers est devenu relativement bas. Seules quelques petites machines, utilisées dans des lieux isolés où elles s'avéraient « économiquement » rentables, ont continué à se développer et se perfectionner et sont même en train de donner naissance à la nouvelle génération d'aérogénérateurs.

Notre propos est de faire le point sur les utilisations de l'énergie éolienne, sans insister outre mesure sur les réalisations à l'étranger qu'il faut cependant rappeler, mais en développant la contribution d'Electricité de France, notamment de 1947 à 1966.

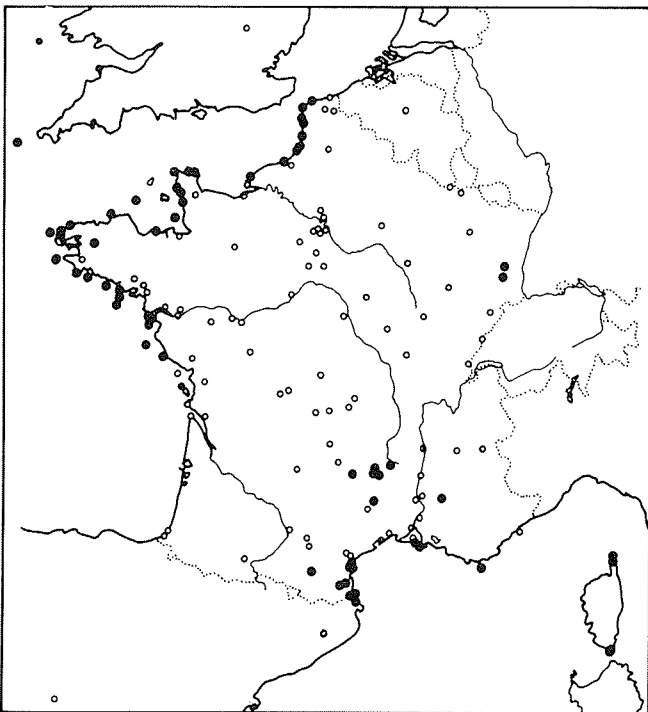
1 - Le vent et l'énergie éolienne

Quelques notions de base sur le vent sont nécessaires pour comprendre l'énergie éolienne. De gros efforts dans le but de connaître le vent, dans la tranche de 0 à 100 m au-dessus du sol, ont été faits au cours des deux décennies 1947-1966. En France, le mérite en revient principalement à Électricité de France, sous l'impulsion de son Directeur des Études et Recherches de l'époque, Pierre Ailleret [102, 105, 112, 115, 116, cf. bibliographie *in fine*].

1.1. - LES MESURES DE L'ÉNERGIE DU VENT.

Dès 1946, un anémomètre intégrateur est mis au point par la Compagnie des Compteurs à Montrouge; construits en grande série, 350 appareils sont installés en France et Outre-Mer; leurs résultats sont étudiés avec soin. L'appareil comptabilisait un paramètre proportionnel à l'énergie du vent susceptible d'être recueillie par une hélice éolienne; des considérations de mécanique des fluides basées sur des hypothèses très simplistes (voir ci-contre) montrent que le cube de la vitesse V du vent peut être ce paramètre universel.

Partant de ce principe, furent dressées les cartes d'énergie éolienne annuelle disponible exprimée en kWh/m² de surface balayée par l'aérogénérateur (fig. 1). Par exemple, sur les côtes NW de Bretagne on peut disposer, en certains rares endroits, de 5 000 kWh/m²; une hélice de 30 m de diamètre, brassant un cercle de 700 m², peut théoriquement recueillir 3,5 GWh par an! Pratiquement ce chiffre est à diviser par 2 à 3 pour mieux cerner l'ordre de grandeur de la vérité; on peut ainsi énoncer que mille éo-



1/ Répartition de l'énergie éolienne annuelle à 40 m au-dessus du sol

- Supérieure à 3000 kWh/m²
- Inférieure à 3000 kWh/m²

liennes de ce type, réparties sur ces côtes, fourniraient plus d'un TWh par an [104, 105, 111, 113].

A ce niveau de connaissance, l'extrapolation est dangereuse et risque de condamner prématurément l'énergie éolienne, car l'anémomètre « CdC-Ailleret », le « germe » de l'utilisation de l'énergie éolienne en France, ne peut à lui seul convaincre de la possibilité réelle de dominer cette énergie; il fallait au préalable tenter l'expérience. C'est elle que nous nous efforcerons de décrire impartialement, dix ans après son arrêt, avec comme objectif de préciser :

— côté positif, le rendement aérodynamique des machines, c'est-à-dire la part de l'énergie du vent théoriquement disponible qu'elles ont effectivement captée;

— côté négatif, les problèmes technologiques qu'ont soulevés les grands aérogénérateurs.

Néanmoins, l'anémomètre développé par Électricité de France et le Service Français des Phares et Balises a permis d'énoncer des résultats intéressants [112, 115, 116] :

— L'énergie éolienne est surtout localisée près des côtes de la zone tempérée; elle n'est pas corrélée à l'énergie hydraulique. Elle est plus forte en hiver qu'en été, un peu plus forte à faible hauteur au-dessus du sol, le jour que la nuit; elle est régulière à l'échelle de l'année (il n'y a pas d'année peu ou très venteuse) et même du trimestre; elle est régulière à l'échelle de l'heure, mais très irrégulière à l'échelle de la minute et de la demi-semaine. La conclusion est que la façade atlantique de l'Europe est bien pourvue en énergie éolienne moyenne annuelle, mais cette énergie est distribuée aléatoirement; toutefois il existe de bons modèles mathématiques de cette distribution [210].

— La distribution spatiale du vent est en outre très irrégulière; l'énergie éolienne disponible est très différente en des sites rapprochés. L'aérogénérateur est lui-même un assez grand perturbateur; son sillage très important (plusieurs kilomètres) est un facteur de relative dévalorisation des sites. En conclusion, le choix des sites éoliens est délicat, les pales des machines à hélices sont soumises à des efforts mécaniques très irréguliers.

Ces deux ensembles de résultats relatifs au vent mettent en relief les deux grands problèmes des aérogénérateurs : l'irrégularité de la fourniture de l'énergie et la tenue mécanique des aérogénérateurs. A l'heure actuelle ces problèmes sont résolus pour les petites machines (moins de 10 kW); la solution semble possible pour les puissances moyennes (100 kW); elle est seulement ébauchée pour les grandes puissances [114, 117, 205, 207].

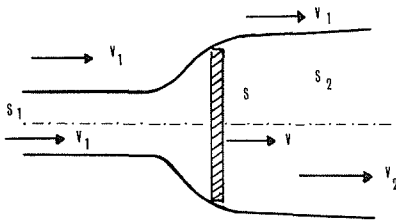
1.2 - LA FORMULE DE BETZ [100]

La proportionnalité, mentionnée ci-dessus, de l'énergie éolienne au cube de la vitesse du vent, constitue la formule de Betz, familière aux « éoliens ». Comme, par la suite, nous nous référerons uniquement au rendement des aérogénérateurs, rapport entre la puissance qu'ils engendrent et la puissance aérodynamique totale qu'ils pourraient tirer du vent, c'est-à-dire « la puissance au sens de Betz », il est nécessaire de préciser les hypothèses de cette formule.

L'aéromoteur est supposé placé dans un fluide illimité, animé à l'infini amont et aval d'un mouvement uniforme. Il ralentit une fraction faible du fluide, et ce déficit d'énergie cinétique est transformé en énergie mécanique. Comme le fluide qui a travaillé doit conserver assez de vitesse pour

s'éloigner de l'appareil, celui-ci n'utilisera jamais qu'une fraction limitée de l'énergie cinétique du fluide intéressé.

Schématisons l'aérogénérateur par le disque de surface S qu'il balaie, abordé normalement par le vent de vitesse V , c'est-à-dire par une masse d'air de révolution de sections S_1 et S_2 et vitesses moyennes V_1 et V_2 loin à l'amont et à l'aval du disque, et de masse volumique ρ .



La continuité et l'incompressibilité du fluide sont traduites par les relations :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2$$

Exprimons de deux manières la perte de puissance du fluide à la traversée du disque. D'une part la perte d'énergie cinétique est :

$$W_1 = \rho (S V / 2) (V_1^2 - V_2^2)$$

D'autre part la variation de quantité de mouvement à la traversée du disque exprime un effort du fluide sur celui-ci :

$$F = \rho S V (V_1 - V_2)$$

dont la puissance correspondante est :

$$W_2 = F V = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

L'égalité des deux puissances conduit à la relation simple :

$$V = (V_1 + V_2) / 2$$

Posons $V_2 = a V_1$; exprimons la puissance en fonction du paramètre a a priori inconnu, mais variant forcément entre 0 et 1 :

$$W = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 + a)(1 - a^2)$$

La fonction $W(a)$ passe par un maximum pour $a = \frac{1}{3}$:

$$W_{\max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho S V_1^3 \right)$$

C'est la formule de Betz, donnant l'énergie maximale disponible à travers la surface S dans le lit du vent de vitesse V_1 . Avec $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, bonne moyenne, elle devient :

$$W (\text{kW/m}^2) = 0,37 \left[\frac{V (\text{m/s})}{10} \right]^3$$

relation qui sert à évaluer l'énergie éolienne, théoriquement disponible, à partir de la mesure de la vitesse du vent en un point où celle-ci est significative du site.

2 - Les réalisations

Ce chapitre est une revue des installations ayant réellement fonctionné, présentée sous la forme d'une synthèse des renseignements existants dans la littérature sur ces réalisations. Le but est plus d'informer que d'interpréter.

Les renseignements essentiels sur quelques machines dont l'étude du fonctionnement peut suggérer des idées sur les possibilités de l'énergie éolienne sont rassemblés sur le tableau de la page suivante.

Dans ce tableau, figurent quelques indications sur la plus grande éolienne jamais réalisée : celle de Morgan-Smith-Putman (1 250 kW), installée aux U.S.A. en 1941, dont une pale cassa le 26 mars 1945; le projet fut ensuite abandonné par suite du coût élevé de l'opération (1,25 million de dollars). La machine avait cependant fonctionné 1 030 heures, d'octobre 1941 à mai 1945, et fourni 360 000 kWh; sa puissance avait atteint 1 500 kW par un vent de 30 m/s. De même, est citée une des plus anciennes machines, de puissance 100 kW construite en 1931 en Crimée, où elle fut expérimentée pendant deux ans. En U.R.S.S., des machines de 18 m-28 kW ont également fonctionné, en particulier en connection avec la Station de tracteurs et machines de Télécéf et la centrale de Mikolskoé [106, 201].

2.1 - LES ÉOLIENNES D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Électricité de France a expérimenté trois machines de grande puissance. Cette contribution est le fruit du travail de la Division Énergie du Vent, dirigée par M. A. Argand de 1948 à 1966, au sein de la Direction des Études et Recherches, en collaboration avec les constructeurs et les bureaux d'études français : le Bureau d'Études Scientifiques et Techniques (B.E.S.T.), Neyrpic et sa filiale SO.GRE.A.H., etc.

2.1.1 - L'aérogénérateur de 800 kW de Nogent-le-Roi

La machine (fig. 2 et 3) comportait une hélice tripale ⁽¹⁾ en tôles d'alliage léger, à calage fixe; les pales étaient encastées dans le moyeu.

Les pales étudiées en soufflerie (Eiffel, Chalais-Meudon, Saint-Cyr-l'École et Poitiers), et du point de vue résistance des matériaux à l'Établissement Aéronautique de Toulouse, répondaient aux spécifications suivantes :

- l'hélice peut fonctionner dans un vent de 25 m/s (90 km/h);
- l'hélice arrêtée peut supporter un vent de 250 km/h;
- l'hélice peut subir des rafales de 35 m/s (125 km/h) sans dégâts.

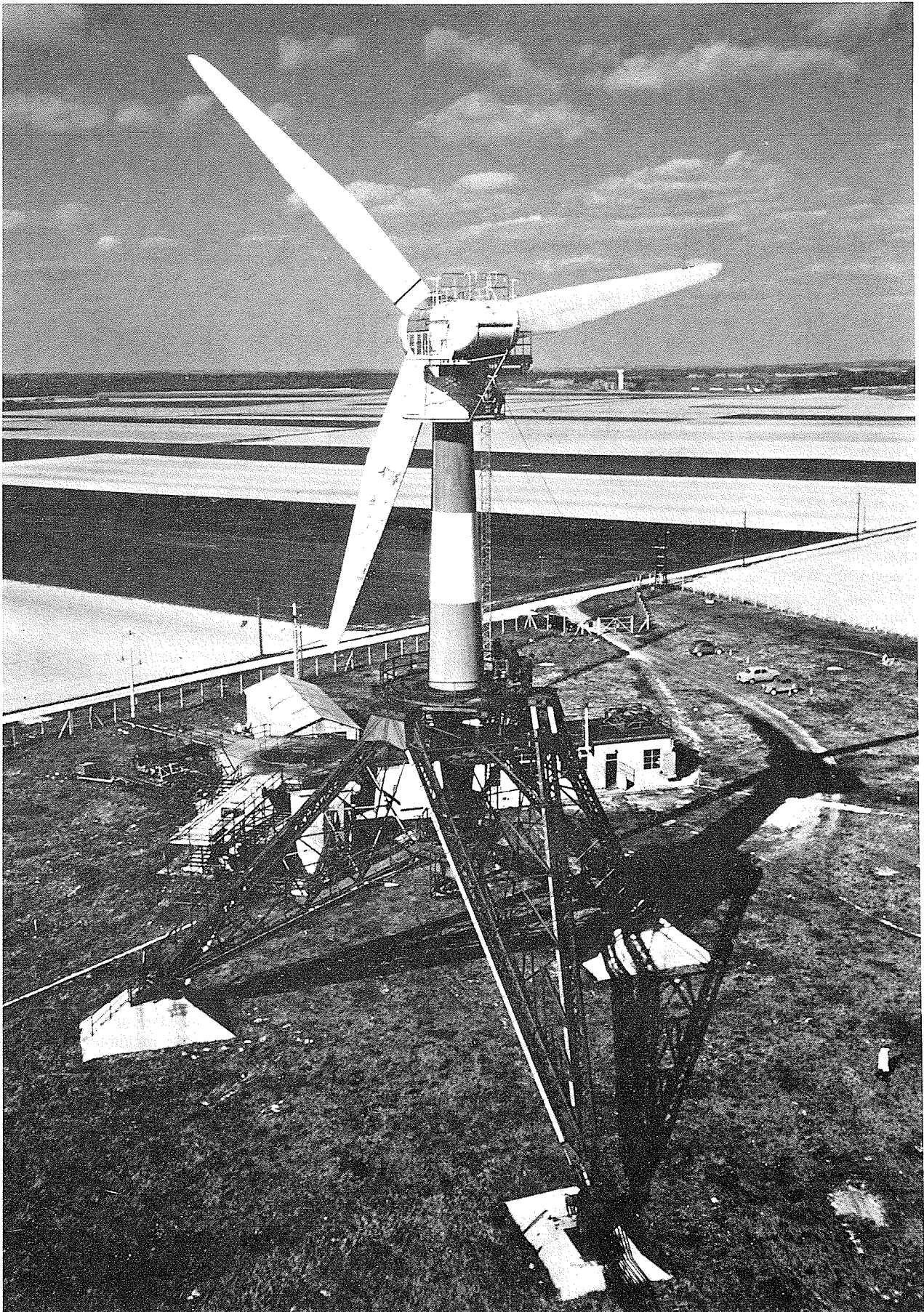
L'hélice tournait à vitesse constante, car la machine était couplée au réseau (50 Hz, 60 kV), par l'intermédiaire d'un alternateur synchrone (800 kW-3 000 V), d'un double étage de transformation (3/15/60 kV) et d'une ligne 15 kV de 12 km de long.

⁽¹⁾ C'est le nombre optimal, si l'on veut que l'hélice ne tourne pas trop lentement, tout en lui conservant un ellipsoïde d'inertie qui soit de révolution.

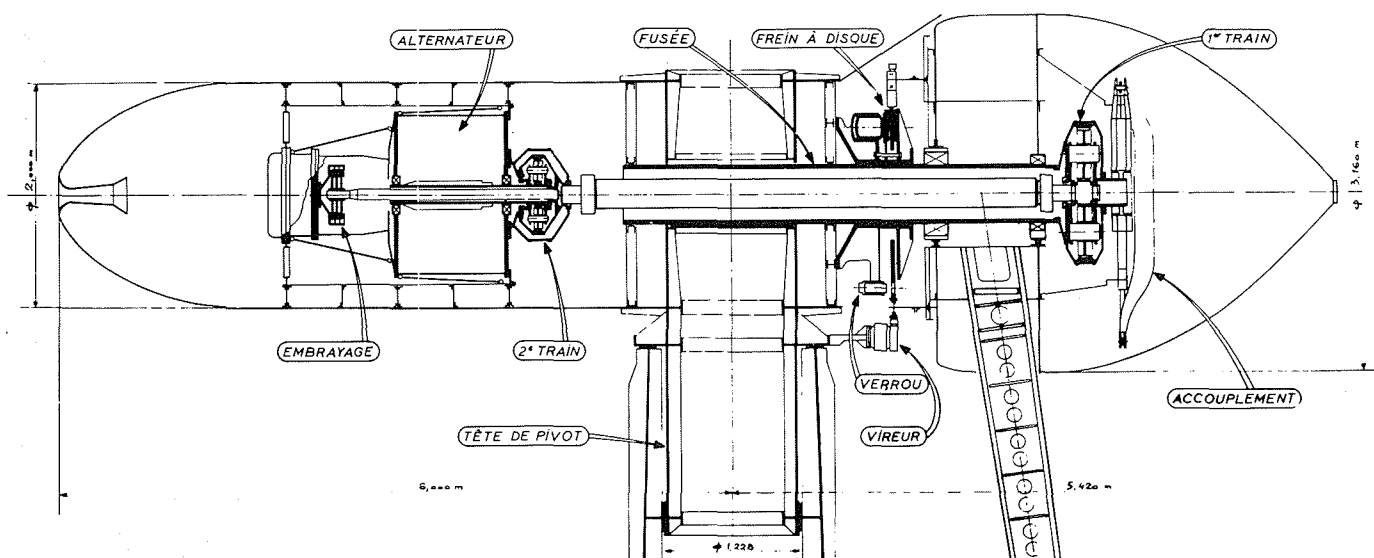
Caractéristiques de quelques éoliennes moyennes ou grandes ayant fonctionné

SITE	CONSTRUCTEUR (Maître-d'Œuvre)	DIAMÈTRE ET SENS DE MARCHÉ (*) (m)	PUISSANCE NOMINALE (kW)	VITESSE NOMINALE DU VENT (m/s)	TYPES DE PALES	EXEMPLE DE PRODUCTION
Algérie Grand-Vent	Andreau-Enfield (B.E.A. - E.G.A.)	24,4 AV	100	13	à calage variable et articulées	180 h
Allemagne Stötten	Studiengesellschaft Windkraft	34 AM	100	8		
Antilles La Barbade	Brace (Québec)	9,75 AM		10	à calage variable en plastique	irrigation de 4 ha
Danemark Bogo	Lykegaard Smith (S.E.A.S.)	13	45	5		
Vester-Egesborg ...	— —	8,2	13		à calage variable en plastique	25 MWh/an
Gedser	— —	24,4	200	6		
Grande-Bretagne Costa-Head	John Brown Co.	15,2 AV	100	15,6	en bois	avec groupe électrogène de 400 kW
(Orcaades)						
Crandfield	Dowsett Holdings	12	25	11	à calage variable	85 MWh/an
(Bedfordshire)	(U.K. Ministry)					
Ile de Man			100			
France St-Rémy-des-Landes (Manche)	Neyrpic (E.D.F.)	21,2 AV	132	12,5	plastique à calage variable	52 MWh/mois (déc. 1965)
— —	— —	35 AV	1 000	17		
Nogent-le-Roi	B.E.S.T.-ROMANI (E.D.F.)	30,2 AV	800	16,7	métallique à calage fixe	200 MWh/mois (nov. 1963)
(Eure-et-Loir)						
Sept-Iles	Aérowatt	9,2 AM	4,1	7	aluminium à calage variable tôles fixes	20 MWh/an (1973)
Le Bourget	C.E.M. (Darrius)	20 AV	12	6		
U.R.S.S. Balaklava	Tz A.G.I.	30 AM	100	10,5	métal léger	200 MWh/an (1933)
U.S.A. Granpa's Knob (Vermont)	Morgan-Smith Co. (Putman)	53 AV	1 250	7,5	acier inox	360 MWh

(*) AV signifie que l'hélice est à l'aval du moteur, AM qu'elle est placée en amont par rapport au vent.



2/ L'aérogénérateur « B.E.S.T.-ROMANI » de Nogent-le-Roi (Eure-et-Loir) - 30,2 m, 800 kW



3/ Coupe schématique de la nacelle de l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi

L'hélice et l'alternateur étaient reliés par l'intermédiaire de deux multiplicateurs à planétaires (fig. 3), de rapports 7,5 et 3 environ, et d'un accouplement permettant la seule transmission du couple et non de déformations que la construction du moyeu et des pales en mécano-soudure et chaudronnerie ne pouvait manquer d'engendrer.

Les autres caractéristiques intéressantes sont :

- diamètre de l'hélice 30,19 m;
- vitesse de rotation : hélice 47,3 tr/mn, alternateur 1 000 tr/mn;
- puissance nominale : 800 kW pour un vent de 16,7 m/s (60 km/h);
- hauteur de l'axe 32 m au-dessus du sol;
- masse totale (sauf infrastructure) : 160 tonnes.

L'intérêt de la station de Nogent-le-Roi est d'avoir été un véritable banc d'essai pendant cinq ans (1958-1963). Grâce aux nombreux rapports établis par le B.E.S.T. à la demande d'E.D.F., il est possible de donner beaucoup de détails sur le fonctionnement de cette machine. Deux hélices ont été successivement étudiées; la première hélice à vitesse lente, décrite ci-dessus, s'est très bien comportée; les seuls incidents rencontrés étaient d'origine mécanique, ne mettant pas en cause le principe d'utilisation de l'hélice. En revanche, une pale de la deuxième hélice à vitesse rapide s'est rompue.

2.1.1.1 - LES BUTS DU PROGRAMME D'ESSAIS [301]

Avant de décrire l'histoire de la machine, il est intéressant d'analyser les buts du programme d'essais de Nogent-le-Roi :

— *Mesurer les performances de l'appareil de façon à établir la base d'évaluation de la capacité de production d'énergie des machines futures; il s'agit de « dépasser » les résultats obtenus à petite échelle, à Saint-Cyr-l'École, sur une maquette à 40 m au-dessus du sol, par une réalisation en « vraie grandeur ».*

— *Analyser les pertes énergétiques : la conception des aérogénérateurs met en balance les réductions de prix dues aux imperfections, avec les pertes de rendement concomitantes; pour faire ce bilan, il faut connaître la répartition des pertes d'énergie.*

— *Déterminer le réglage d'excitation optimale : les expériences antérieures avaient montré la possibilité d'obtenir l'auto-régulation avec une excitation constante de la génératrice; mais cette méthode est-elle la meilleure ?*

— *Mettre au point les méthodes d'exploitation : par exemple les processus des manœuvres de couplage, découplage par vent faible, etc.*

— *Comparer les procédés de freinage : deux systèmes (mécanique et électrique) sont essayés simultanément (2).*

— *Simplifier les servitudes : l'appareil est muni du maximum d'équipement prévisible (par exemple orientation asservie et manuelle); mais cet équipement n'est-il pas surabondant, ou n'a-t-on pas omis un phénomène important ?*

— *Vérification des calculs de résistance des matériaux : il s'agit d'une technique nouvelle, où les normes sont à définir; il faut donc mesurer le maximum de contraintes.*

— *Étudier si le basculement général est vraiment nécessaire.*

(2) Si les pales d'une hélice éolienne sont à calage fixe, la régulation peut être automatiquement et gratuitement obtenue, ainsi que, dès 1927, l'a proposé Darrieus, du seul fait que la génératrice mécaniquement entraînée est accrochée de manière synchrone ou même seulement quasi-synchrone, sur un réseau important. En effet, le vent incident est la somme géométrique d'une composante relative, due à la rotation, et du vent naturel. Lorsque ce dernier force, à vitesse de rotation constante, le triangle des vitesses se déforme et une partie des pales se met en « perte de vitesse »; la puissance de l'hélice, après être passée par un maximum, décroît et ne recommence à croître, lentement, que pour des vitesses de vent très importantes. En contrepartie, l'hélice « emballe » dès que la génératrice est déconnectée du réseau.

— *Expérimenter la liaison au sol par câbles souples*, tolérant à l'intérieur du pivot un lovage de plusieurs tours, de manière à éviter tout collecteur tournant.

— *Étudier le sillage* : de façon à estimer le minimum d'espacement entre les machines.

Ce programme a permis de définir les appareillages de mesure : wattmètres, anémomètres, jauges, etc., compte tenu des possibilités de l'époque; l'énumération de leurs caractéristiques est sans intérêt aujourd'hui.

2.1.1.2 - HISTORIQUE SUCCINCT DE L'AÉROGÉNÉRATEUR DE NOGENT-LE-ROI [302 à 309]

L'exposé historique des essais sur l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi est intéressant; il montre la succession des opérations à entreprendre dans un tel cas, fait la synthèse des accidents et du fonctionnement et précise les délais des diverses actions élémentaires.

DU 15 MARS AU 13 JUIN 1958 : *Essais préliminaires à vitesse du vent V inférieure à 12 m/s* : ces essais portent sur les points suivants :

— *La vérification de la validité des procédés de démarrage et de couplage et stabilité électrique à faible charge* : après réparation des malfaçons du démarreur, le couplage sur réseau est obtenu sans problème à partir du 2 avril pour l'appareil en position normale, et à partir du 10 avril pour l'appareil orienté à 90° dans le vent. Lorsque l'hélice est face au vent les opérations sont les suivantes :

- démarrage de l'alternateur en asynchrone, puis synchronisation,
- défreinage de l'hélice, puis embrayage lorsqu'elle atteint la vitesse de synchronisme, en s'emballant.

Lorsque l'hélice n'est pas dans le vent, ou si le vent est faible (opération non recommandée par vent fort) :

- démarrage en asynchrone en entraînant l'hélice et synchronisation,
- libération de l'orientation de l'engin.

La stabilité est parfaite dans la gamme de puissance 55 kW (vent nul) à 300 kW (vent de 12 m/s).

— *Le contrôle de l'équilibrage* : des essais en autorotation jusqu'à la vitesse de synchronisation sont entrepris.

— *L'étude du dispositif de freinage mécanique monodisque* : c'est la partie de la machine qui a paru d'abord la plus délicate; elle nécessitera de nombreuses retouches et mises au point, mais finalement fonctionnera parfaitement.

— *La vérification du dispositif de freinage électrique* : après réduction à moins de 0,4 s du temps de réponse du disjoncteur, le freinage électrique donne satisfaction; par vent inférieur à 10 m/s il réduit la vitesse à 1 tr/mn, vitesse permettant le verrouillage de l'hélice au vol. L'action combinée des deux freins, même par vent fort, arrête l'ensemble en moins de deux tours d'hélice.

— *Le contrôle de graissage*; les ennuis et les fuites sont nombreux.

— *Le contrôle de l'échauffement*; il n'apparaît pas de problème car l'efficacité des radiateurs croît avec la vitesse du vent.

— *Les études des vibrations* : les oscillations de la nacelle, enregistrées par trois accéléromètres sont trouvées insignifiantes, sauf celles dues au passage des pales derrière le pivot ($\pm 4'$), mais qui disparaissent par fort vent. La cinématographie à grande vitesse des pales prouve l'absence de vibration.

— *Le bruit* : le niveau du bruit est peu élevé, mais aucune mesure n'est effectuée; ce problème est peu considéré, n'apparaissant pas très important.

— *L'étude de l'orientation* : le couple de rappel est mesuré à l'aide d'un frein-dynamomètre, en fonction de l'angle de dérive; il est trouvé bien supérieur à celui prévu en soufflerie. Le mouvement de mise en rotation s'avère aperiodique; la machine, à partir d'un écart de 45°, s'oriente sans vibration ni oscillation en quelques secondes.

DU 19 JUIN 1958 À SEPTEMBRE 1958 : *Continuation de l'équipement.*

DE SEPTEMBRE 1958 AU 16 AVRIL 1959 : *Nouvelle série d'essais jusqu'à $V = 17$ m/s* comportant 122 couplages au réseau, 171 h de marche couplée. La puissance nominale de 800 kW est atteinte pour un vent de 16,7 m/s. Les points importants à signaler sont les suivants :

— *Hélice* : son fonctionnement est correct; la peinture extérieure est en mauvais état.

— *Freins* : sont donnés 200 coups de frein mécanique (moment retardateur 4.10^6 mN). Le frein électrique fonctionne correctement; par vent de 10 m/s il ramène la vitesse à 0,2 tr/mn.

— *Embrayage* : des mises au point sont nécessaires pour éviter le broutement et le patinage au-dessus de 700 kW.

— *Stabilité du couplage au réseau* : ce point est bien étudié; en particulier les oscillations du système, car l'alternateur est susceptible d'oscillation pendulaire non amortie (3 Hz), pouvant entraîner le décrochage⁽³⁾. En fait, le système alternateur + hélice oscille à 2 Hz environ en entraînant des perturbations d'amplitude maximale de l'ordre de 40 kW; mais il s'agit des oscillations dues au passage des pales derrière le pivot (2,35 Hz), phénomène inévitable, cependant admissible car ce n'est pas un pompage.

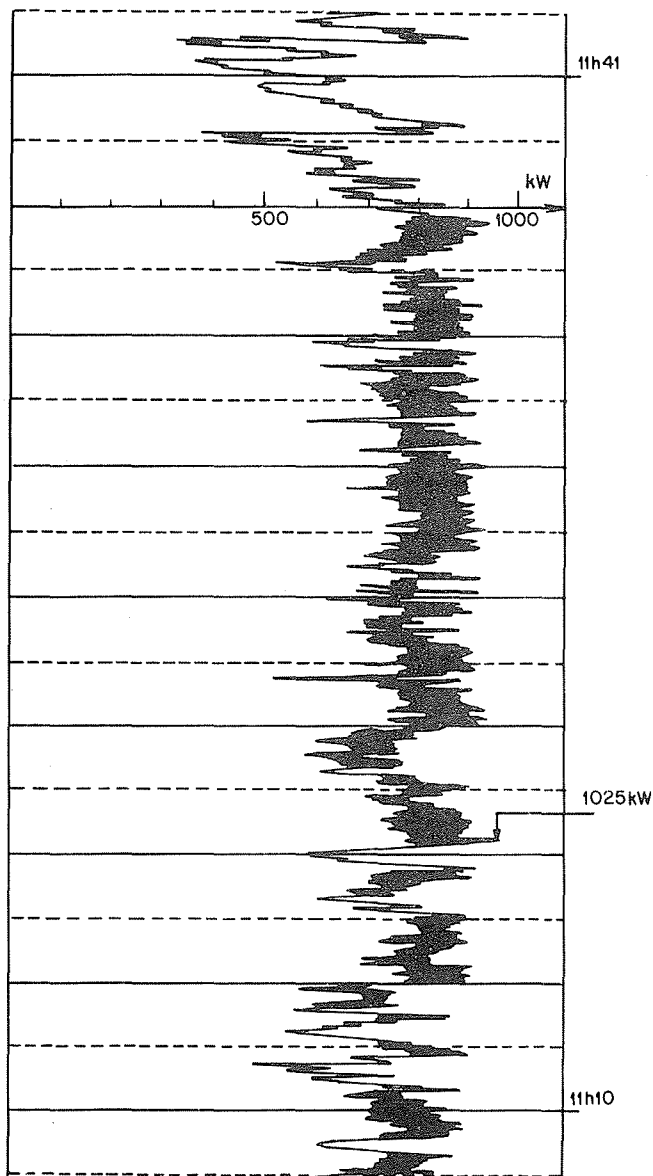
— *Orientation* : l'orientation spontanée fonctionne bien (2,8°/s jusqu'au vent de 17 m/s).

— *Échauffement* : le maximum est de 45° au deuxième train du multiplicateur.

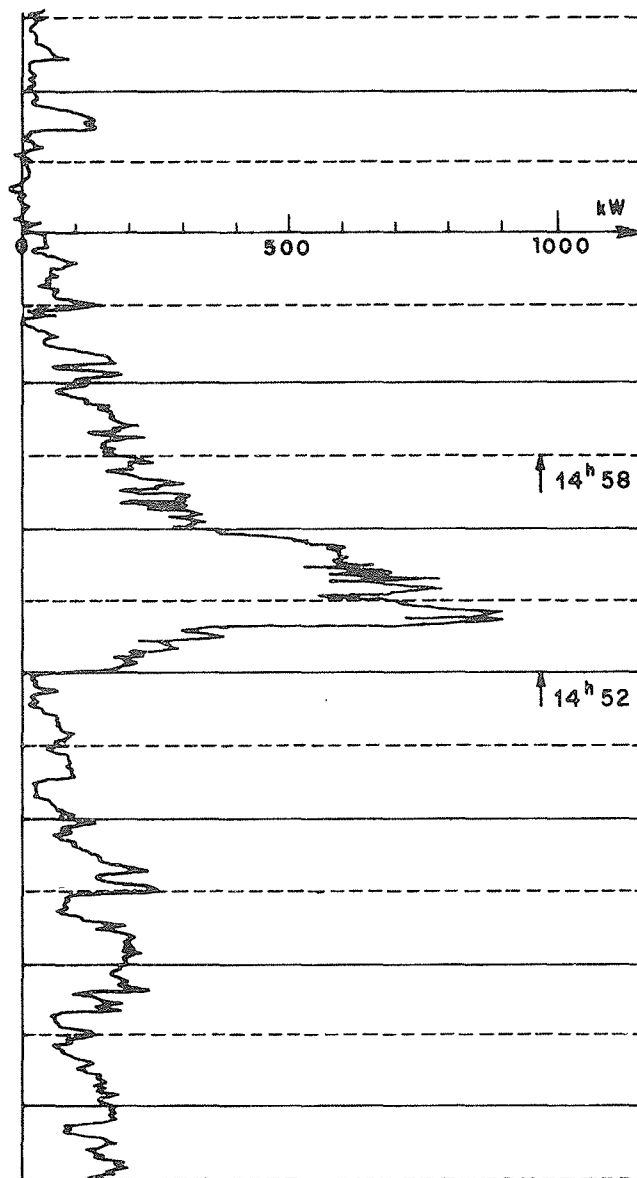
DU 17 AVRIL AU 15 MAI 1959 : *Achèvement de l'équipement (en particulier mise en place de l'orienteur).*

DU 16 MAI AU 4 OCTOBRE 1959 : *L'été 1959, marqué par une déficience du vent, est consacré à la mise au point du matériel de mesure « embarqué ».*

(³) L'extrême inconstance de la source d'énergie que constitue le vent oblige, pour éviter toute tendance aux oscillations, à prévoir sur l'alternateur entraîné, de puissants amortisseurs en cage d'écureuil. Il est en outre nécessaire que la liaison au réseau se fasse par une ligne électrique dont soient faibles à la fois la réactance, afin que le couple synchronisant soit suffisamment élevé, et la résistance ohmique, afin de ne pas développer d'amortissement négatif.



4/ La marche à puissance maximale à l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi, le 27 octobre 1959



5/ Comportement en puissance de l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi au cours d'une forte rafale de vent, le 30 août 1960

DU 5 OCTOBRE AU 18 NOVEMBRE 1959 : *Marche continue*

- avec des interruptions de courtes durées dues au :
- patinage de l'embrayage (18 octobre et 13 novembre);
 - désordres dans les circuits d'huile du freinage et de l'embrayage (21 et 27 octobre);
 - jeu dans la fixation de l'orienteur (4 novembre);
 - dégâts mécaniques sur l'arbre (18 novembre).

Pendant cette période, la machine a fonctionné 931 heures dont 195 consécutives; elle a été couplée 164 fois; la puissance maximale observée est 930 kW pour un vent de 20 m/s, avec pointe à 1 025 kW (fig. 4).

Les enseignements tirés de cette série d'essais sont les suivants :

— *hélice* : le fonctionnement est correct (jusqu'à $V = 24$ m/s).

— *Freins* : l'action du frein mécanique est différée de quelques secondes après celle du frein électrique, sauf par grand vent par mesure de sécurité.

— *Multiplicateurs* : Les ennuis de graissage conduisent à maintenir les niveaux constants dans chaque carter, éventuellement en utilisant la pompe à main.

— *Stabilité* : la machine conserve le régime permanent sans décrocher ni vibrer même au-dessus de 800 kW.

— *L'accident du 18 novembre 1959* : le roulement aval de l'alternateur étant détruit, il en a résulté des dommages sur l'arbre, le roulement amont et le ventilateur de l'alternateur.

teur. Les causes de l'accident n'ont pas été entièrement élucidées; il semble que les bains d'huile étaient de trop faible capacité ou que les roulements furent trop serrés au montage. La conclusion est que le graissage des machines à multiplicateurs est une source de difficultés.

DU 18 NOVEMBRE 1959 AU 13 AVRIL 1960 : *Remise en état.*

DU 13 AVRIL 1960 AU 12 AVRIL 1962 : Après remontage de l'alternateur, la machine fut recouplée au réseau le 13 avril 1960. De nombreux incidents sont ensuite survenus :

- fuites d'huile du premier multiplicateur;
- incidents sur le circuit hydraulique de freinage;
- incidents sur le freinage électrique;
- échauffement du deuxième multiplicateur, entraînant la mise hors service de certains roulements (16 septembre 1960);
- jeu dans l'accouplement (arrêt du 4 juillet au 6 septembre 1961);
- craquements aux pieds des pales dus à l'allongement des rivets de fixation des pales.

Néanmoins, la machine a atteint la puissance de 1 025 kW, moins 10 kW pour l'excitation de l'alternateur (fig. 4). Elle s'est bien comportée au cours des rafales; le 30 août 1960, la puissance est passée de 300 à 900 kW en quelques secondes (fig. 5). Les puissances moyennes soutenues sont les suivantes :

870 kW	pendant 1 heure;
825 kW	— 4 heures consécutives;
683 kW	— 12 heures consécutives.

La machine a bien supporté la tempête du 11 janvier 1962 au cours de laquelle le vent a soufflé à 30 m/s.

2.1.1.3 - CONCLUSION SUR LA MARCHÉ DE L'AÉROGÉNÉRATEUR DE 800 kW DE NOGENT-LE-ROI

Le tableau ci-dessous résume les performances de la machine.

Il faut ajouter :

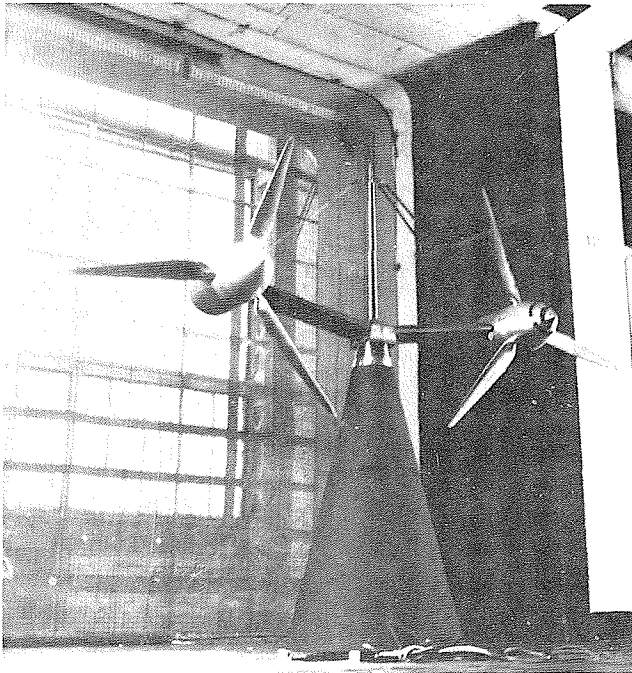
- le nombre de couplages sur le réseau : 372;
- la durée de la plus longue période de couplage sans arrêt : 637 h;
- le rendement maximal de l'hélice seule : 0,85, de l'aérogénérateur 0,70.

En résumé, il est permis de conclure que :

- la courbe de puissance dépasse la prévision;
- l'aérorégulation fonctionne correctement;
- l'auto-orientation marche à partir d'un vent de 3 m/s, si l'hélice tourne;
- le couplage au réseau est facile et stable;
- les vibrations des pales sont très faibles;
- il n'y a pas de signe de vétusté après 5 428 heures de fonctionnement et 38 000 heures d'exposition aux intempéries, mis à part la peinture extérieure des pales;
- il faut éviter l'admission d'air atmosphérique dans l'alternateur;
- il vaudrait mieux fournir le courant d'excitation au moyen d'un redresseur;
- les freinages mécaniques et électriques ont suffisamment donné satisfaction;
- certains problèmes de graissage restent à résoudre, si l'on pense que les machines devraient fonctionner sans surveillance.

La lecture de l'historique où les incidents, tous d'ordre mécanique, sont forcément mis en relief, ne doit pas minimiser le bon comportement éolien de l'aérogénérateur, c'est-à-dire, sa stabilité au couplage en orientation et son bon rendement aérodynamique.

PÉRIODE	TEMPS DE FONCTIONNEMENT (h)	PRODUCTION (kWh)	CONSOMMATION (kWh)	FAITS MARQUANTS
02-04-1958 08-04-1959	171	16 730	500	Vérifications, problèmes de freinage.
28-05-1959 18-11-1959	931	53 430	22 980	Problèmes d'embrayage et de graissage, Destruction du palier
13-04-1960 04-07-1961	3 980	62 970	121 260	Problèmes de graissage et de freinage, échauffement des roulements, jeu dans l'accouplement
06-09-1961 12-04-1962	346	87 410	2 540	Arrêt pour changement d'hélice
TOTAUX				
— kWh.....	—	220 540	146 780	
— heures.....	5 428	1 780	3 648	



6 / Maquette d'ensemble
de deux machines de 2 MW équipées d'hélices de 45 m
en cours d'essais en soufflerie
(Bréguet à Villacoublay)

2.1.1.4 - L'HÉLICE RAPIDE DE NOGENT-LE-ROI

Le 12 avril 1962, l'hélice est démontée pour être remplacée par une hélice plus rapide.

De façon à supprimer un des multiplicateurs, il fut décidé de construire une autre hélice. La nouvelle hélice montée à Nogent-le-Roi différait de la précédente par le fait qu'elle était en alliage léger plein (AG 4 forgé); elle tournait à 71 tr/mn au lieu de 47,3 tr/mn; chaque pale était emmanchée par un tourillon dans le moyeu. Le calage était réglable à l'arrêt.

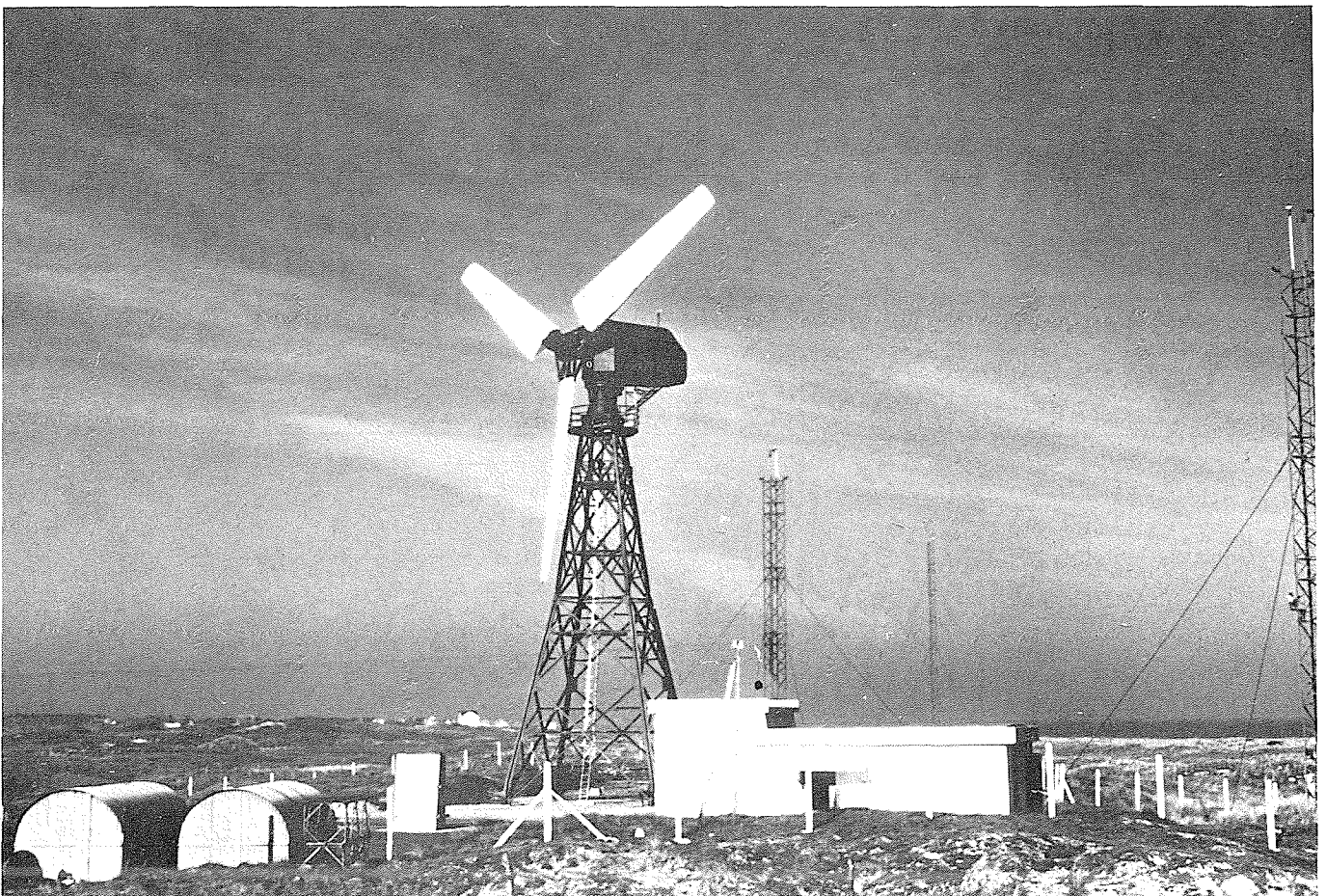
Cette hélice a fonctionné 307 heures jusqu'au 5 septembre 1963 où survint une rupture de pale. Cet incident a mis fin aux essais de Nogent-le-Roi.

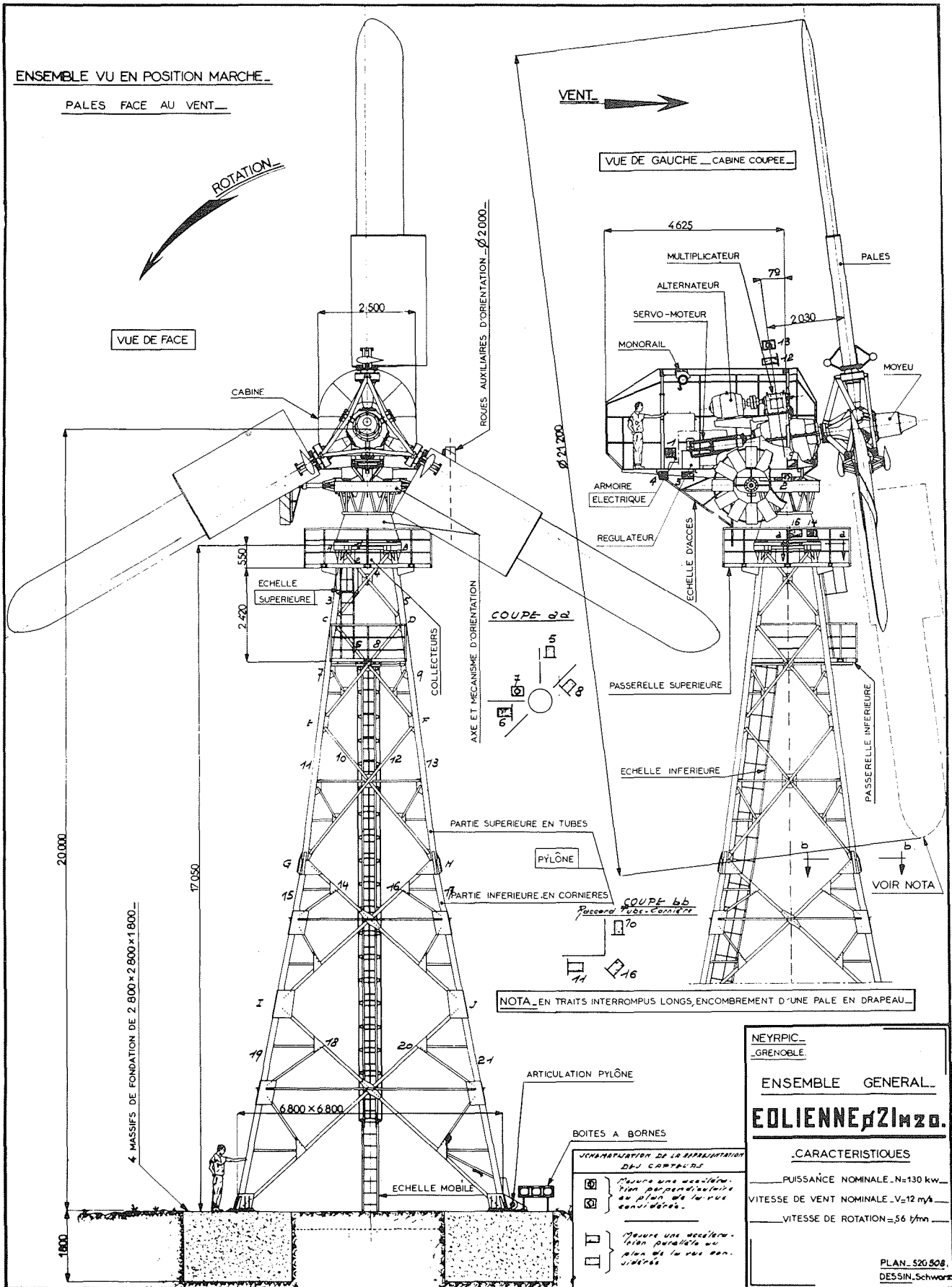
L'échec de cette hélice réside dans le fait que l'augmentation de 50 % de la vitesse de rotation a entraîné la vibration des pales en alliage léger obligatoirement souples.

En effet, des essais exécutés à la même époque à Chalais-Meudon, en soufflerie, de cette hélice rapide de diamètres successifs de 2,5 et 4,5 m, ont fait apparaître les mêmes vibrations destructives.

En 1965, on envisagea de remonter la première hélice, en transportant l'aérogénérateur dans un site plus venteux dans les Corbières.

7 / L'aérogénérateur « Neyrpic »
de Saint-Rémy-des-Landes (Manche)
21,2 m, 132 kW





8 / Schéma de la première version du pylône et des pales de l'aérogénérateur de 132 kW

2.1.1.5 - PROGRAMME D'ACTION ÉBAUCHÉ A LA SUITE DE L'EXPÉRIENCE DE NOGENT-LE-ROI

Après les essais de l'appareil expérimental, le programme d'action prévoyait la réalisation et l'essai d'un appareil prototype à Landunvez (près de Porspoder dans le Nord-Finistère), et ensuite la construction et l'implantation de séries de machines.

De ce fait, il fut envisagé dès 1959, de poursuivre les essais avec deux hélices de 45 m placées côte à côte au sommet d'un pylône creux en béton (analogue aux tours de réfrigération des centrales thermiques), entraînant deux alternateurs de 2 MW chacun (fig. 6), tournant en sens inverse (les essais en soufflerie ayant montré que l'énergie recueillie par une machine double est 2,2 fois celle d'une machine simple, les interactions hélice-pylône étant rendues favorables). On avait même envisagé à un moment, de construire un prototype à quatre hélices de 45 m, ou en variante de 50 m, afin d'atteindre les $4 \times 2,5 = 10$ MW unitaires (4).

Or, si les appareils prototypes et de série doivent avoir les mêmes hélices, il peut être intéressant de réaliser d'abord un appareil expérimental de diamètre plus faible. Le projet E.D.F.-B.E.S.T. ROMANI, finalement étudié dans le détail en 1963 [310], ne comportait donc que deux hélices de 32 m. Pour éviter les multiplicateurs, dont l'histoire avait révélé certains inconvénients, on aurait utilisé des alternateurs de 1 000 kW, tournant à 66,67 tr/mn, si les hélices avaient été bipales. Dans ce cas, la vitesse périphérique des pales eut atteint 112 m/s, soit le tiers de la vitesse du son. Cependant, on aurait plus probablement adopté des tripales, un peu moins rapides, en conservant un étage de multiplication de l'ordre de 8, ce qui aurait permis l'adjonction d'une roue libre à l'entrée de l'alternateur pour éviter, par vent faible, le fonctionnement en ventilateur.

Finalement, ces projets furent abandonnés, y compris l'idée de reprendre les essais de la machine de 800 kW, à cause de la baisse du prix du pétrole.

2.1.2 - L'aérogénérateur de 132 kW de Saint-Rémy-des-Landes [314, 315, 316, 317]

La machine (fig. 7 et 8), préalablement étudiée en soufflerie à Toulouse, puis installée à Saint-Rémy-des-Landes en 1958, avait les caractéristiques suivantes :

- diamètre des pales : 21,2 m;
- vitesse de rotation : 56 tr/mn;
- vitesse de la génératrice asynchrone : 1 530 tr/mn;
- puissance nominale : 132 kW pour un vent de 12,5 m/s (45 km/h);

(4) On peut se demander si l'emploi d'hélices d'un peu plus grand diamètre (56 m par exemple) pour la même puissance totale, ne réduirait pas l'inconstance du fonctionnement. Un autre aspect du problème du choix des dimensions des machines réside dans le fait que les tailles optimales des différents organes essentiels d'un aérogénérateur ne sont pas les mêmes. L'infrastructure, le support, l'appareillage électrique sont bon marché quand la puissance est aussi élevée que possible. En revanche, les grandes hélices coûtent très cher; d'une part parce que leur poids et leur prix croissent comme le cube de leur diamètre, alors que la puissance croît comme le carré; et, d'autre part, parce que la vitesse de rotation décroît proportionnellement au diamètre, de sorte que la transmission et la génératrice sont alors de plus en plus coûteuses.

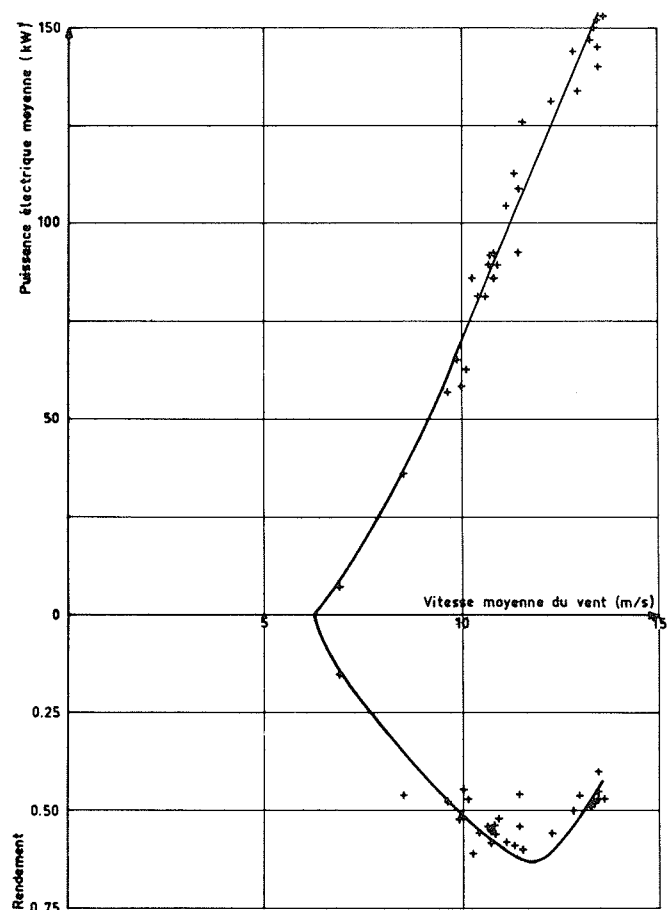
- hélice tripale à pas variable, constituée initialement d'aluminium soudé, puis d'une structure métallique avec revêtement en matière plastique;
- double train multiplicateur;
- montage au sol, puis basculement (supprimé par la suite).

Les essais de puissance ont conduit aux résultats suivants :

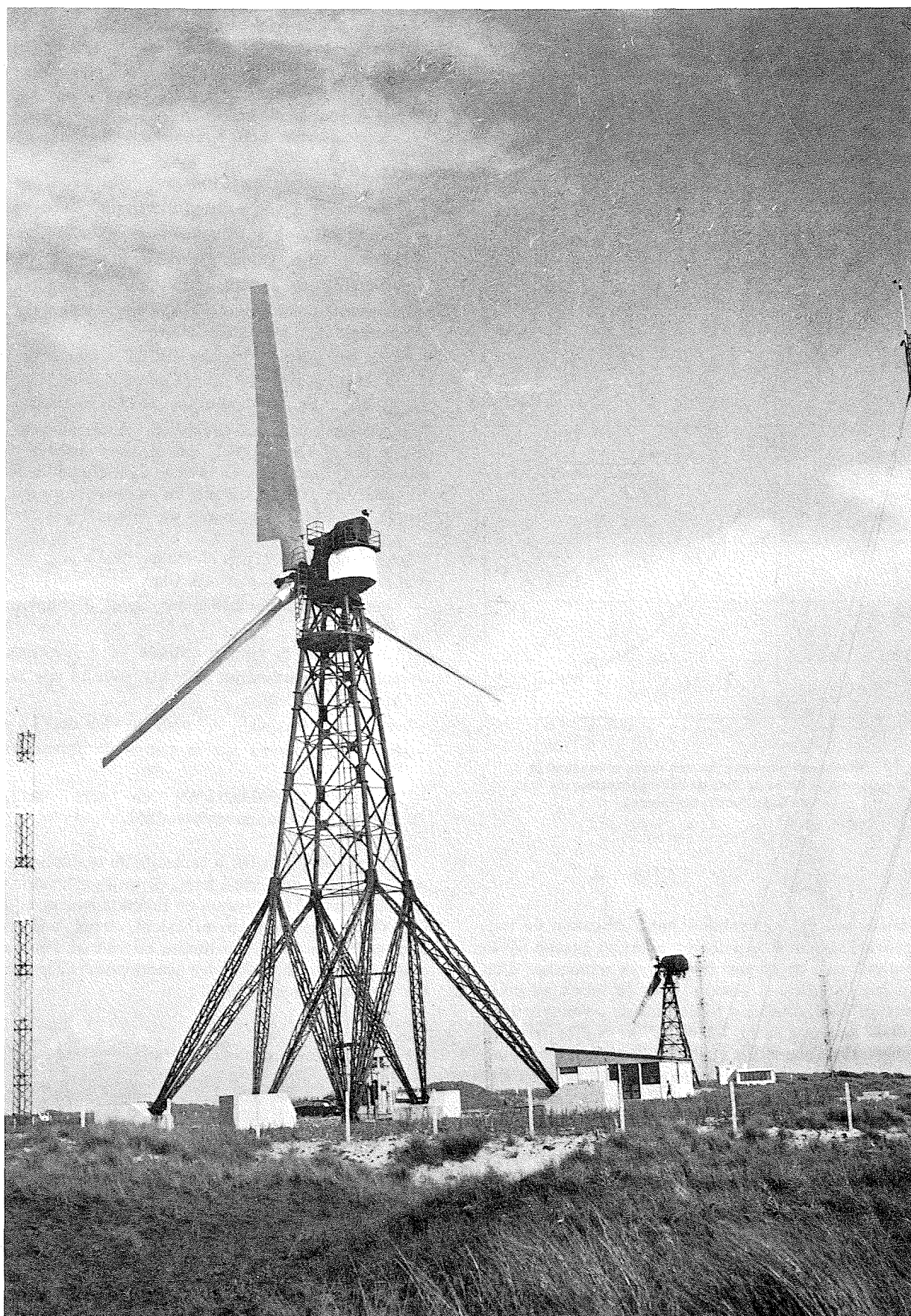
- puissance nominale : 132 kW pour un vent de 12,5 m/s;
- puissance maximale : 150 kW pour un vent de 13,5 m/s (fig. 9);
- rendement maximal : 0,5 à 0,6 pour un vent de 10 à 13,5 m/s.

Les essais commencés au début de 1959 concernaient :

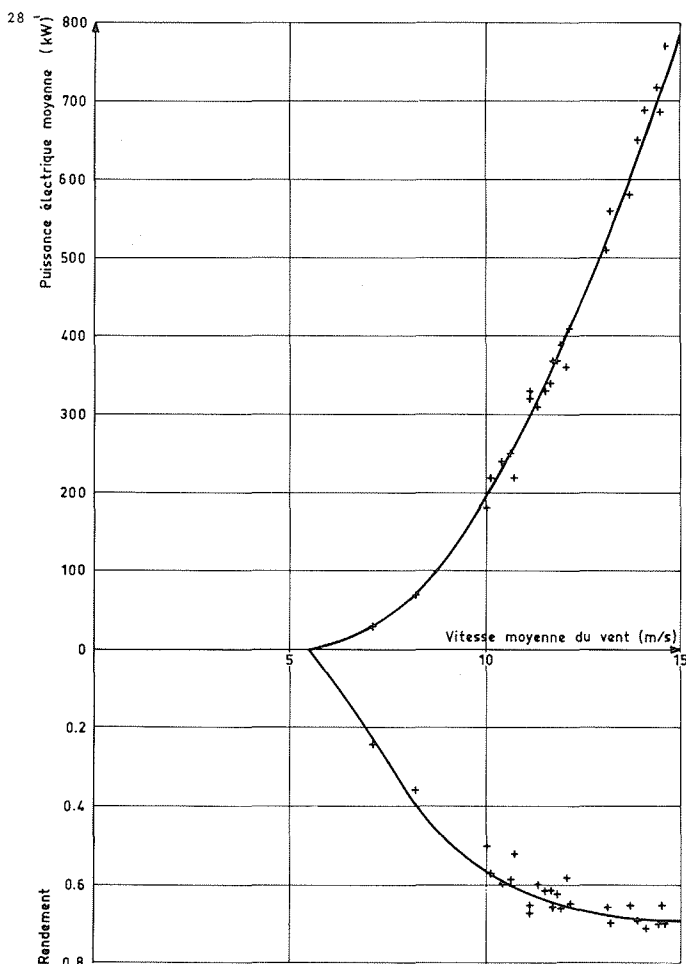
- la mise au point du servorégulateur (elle conduit en particulier à l'élimination de l'accumulateur tampon du circuit hydraulique du servomoteur);
- la recherche du calage optimal;
- les mesures d'efforts et vibrations du pylône (3,2 Hz) et des pales (3,5 Hz);
- les essais en orientation libre (bon fonctionnement en l'absence d'orienteur).



9/ Puissance moyenne sur une heure et rendement par rapport à la limite de Betz de l'aérogénérateur de 21,2 m de Saint-Rémy-des-Landes



10/ Les aérogénérateurs « Neyrpic » de Saint-Rémy-des-Landes (Manche)
Au premier plan, celui de 35 m, 1 000 kW



11/ Puissance moyenne sur une heure et rendement par rapport à la limite de Betz de l'aérogénérateur de 35 m de Saint-Rémy-des-Landes

Ces essais ont été interrompus par l'obligation de renforcer considérablement le pylône support, et ensuite par la rupture d'une pale le 28 juin 1959. Après remontage d'un nouveau jeu de pales et compte tenu de mises au point effectuées en 1964, l'hélice a fonctionné de novembre 1962 à mars 1966 en produisant 700 000 kWh, chiffre relativement faible du fait que le site était moins venté qu'on l'avait espéré. La production mensuelle maximale est 52 000 kWh. Pendant ces trois ans, les arrêts pour incidents ont totalisé 59 jours. En conclusion, la machine a bien fonctionné; son rendement moyen sur ces trois années est honorable : 0,34 par rapport à la limite de Betz bien entendu.

2.1.3 - L'aérogénérateur de 1 000 kW de Saint-Rémy-des-Landes [311, 312, 317, 318] (fig. 10).

Les bons résultats d'exploitation, obtenus par la machine de 21 m, ont incité le constructeur Neyrpic à proposer une nouvelle machine basée sur le même principe de fonctionnement, essayée au préalable également en soufflerie à Toulouse; elle avait les caractéristiques suivantes :

- hélice à trois pales en matière plastique, orientable, placée en aval du pylône;
- réglage par variation du calage des pales à partir de la régulation de puissance, c'est-à-dire calage fixe jusqu'à 650 kW, calage variable ensuite, démarrage asservi à la vitesse du vent (pour 8 m/s) et couplage automatique sur le réseau;
- auto-orientation en girouette;
- génératrice asynchrone, 1 015 tr/mn, 3 000 V;
- pylône en treillis métallique de 30 m de haut;
- montage au sol et basculement de la machine montée (5);
- multiplicateur à deux étages;
- puissance nominale : 1 000 kW pour un vent de 17 m/s à hauteur de l'hélice (61 km/h);
- arrêt par mise en drapeau des pales lorsque le vent est inférieur à 6 m/s;
- masse totale (sauf infrastructure) : 96 tonnes.

L'aérogénérateur fut couplé sur le réseau pour la première fois le 13 juin 1963, quatre mois après le début du montage. Il fonctionna en marche industrielle du 30 juin au 18 juillet 1963, date à laquelle un incident électrique survint sur le système de couplage du réseau.

Les essais furent repris d'octobre 1963 à juin 1964; ils ont donné les résultats suivants (fig. 11) :

- bonne tenue à l'emballement, après découplage du réseau;
- vibrations à la vitesse critique de 1 300 tr/mn;
- puissance satisfaisante : 800 kW pour 15 m/s, maximum atteint 1 085 kW;
- rendement maximal : 0,7 pour un vent de 13 à 15 m/s;
- rendement moyen sur le temps de fonctionnement : 0,47;
- production : 500 000 kWh en sept mois, dont 222 000 kWh en novembre 1963.

En juin 1964, le palier à rouleaux du multiplicateur, supportant l'hélice en porte à faux, cassa; l'explication de cette rupture, après 2 000 heures de fonctionnement au lieu des 200 000 heures prévues au calcul, serait une mauvaise conception du palier. La remise en état de l'ensemble fut d'abord envisagée, puis l'idée abandonnée; l'aérogénérateur fut démonté en juin 1966.

2.1.4 - Les essais de Saint-Servan

A partir de 1959, des essais furent exécutés, à but commun par B.E.S.T.-ROMANI et Neyrpic-SO.GRE.A.H. sous la direction d'E.D.F., sur un élément de longeron de 4 m de longueur, en matière plastique armé, soumis en plein air à d'importants efforts et déformations alternés. Ils permirent de contrôler la très faible et très lente évolution dans le temps des qualités de ce matériau pour la fabrication des hélices éoliennes (plus de 100 millions d'alternances furent imposées).

(5) Seul le pylône fut monté au sol puis basculé; mais la machine dut être mise en place avec une grue.

2.1.5 - Les éoliennes J. B. Morel [313] (fig. 12)

Électricité de France s'est aussi intéressée aux roues aéromotrices à axe horizontal et aux éoliennes à axe vertical, en particulier à celles brevetées par J.-B. Morel. Préalablement, cet inventeur avait essayé, sans résultat bien intéressant, un « barrage moteur » éolien à axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent.

2.1.5.1 - L'HÉLICE A PALES TENDUES ENTRE UNE JANTE CIRCULAIRE ET UN MOYEU ALLÉGÉ.

Un prototype de 3 m de diamètre, d'une roue à jante munie de pales, a été étudié en soufflerie à Domène (Isère),

puis sur le plateau de Saint-Nizier, à 1 100 m d'altitude, en 1951. Les avantages de l'appareil sont :

- la suppression de l'axe moteur, l'énergie étant transmise par la jante;
- la suppression des multiplicateurs, l'énergie mécanique étant disponible à grande vitesse;
- la possibilité d'utiliser des pales à profil mince, de haut rendement aérodynamique, leur rigidité étant assurée par leur état de tension entre la jante et le moyeu de la roue;
- l'effet stabilisateur de la jante;

D'après les essais, le rendement de la machine a atteint 0,45 et la puissance 4,8 kW pour un vent de 15 m/s. L'affaire n'a pas eu de suite.

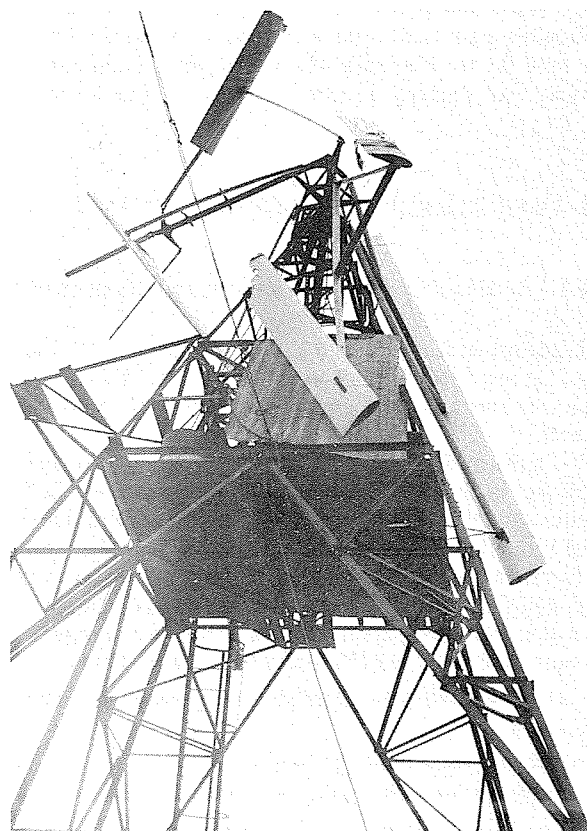
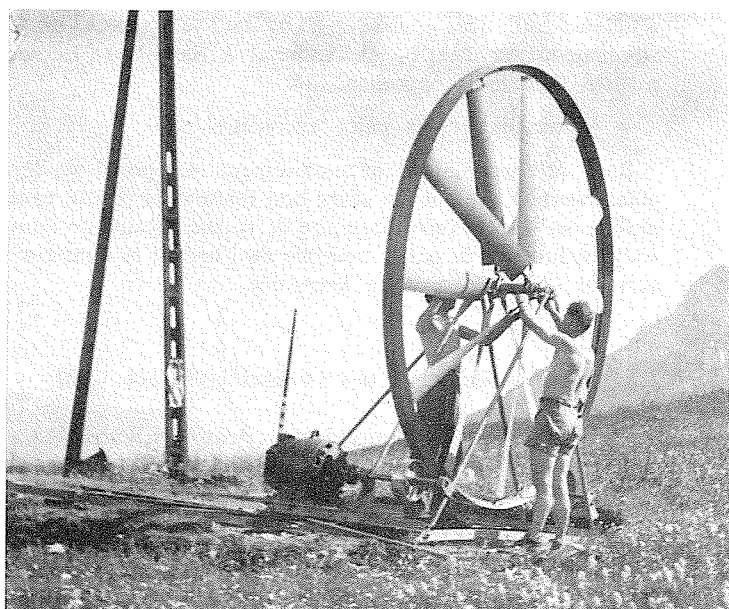
Caractéristiques des éoliennes à axe vertical J.-B. Morel

PUISSANCE NOMINALE (kW)	7 5		90	500	1200
	(réalisées)		(projet)	(projet)	(projet)
Diamètre de la roue (m) :					
haut	4,2	2,0	3,9	12	18
bas	8,5	8,5	20	40	60
Hauteur de la roue(m)	5,7	5,7	14	36	54
Vitesse de rotation nominale(tr/mn)		50	50	14,3	14,3
Vitesse du vent(m/s)	10	10	15	15	15
Prix sans alternateur(MF)				50 (1953)	110 (1955)

12 /

L'éolienne de Mondragon
après l'accident

La roue J.-B. Morel sur le plateau de Saint-Nizier



Un autre inventeur, M. Doffin, a étudié une maquette d'hélice du même genre dans une des souffleries de Poitiers en 1966, mais sans aide financière d'E.D.F.

2.1.5.2 - L'ÉOLIENNE A AXE VERTICAL

L'appareil avait pour but d'allier les qualités de simplicité de l'ancienne panémone, aux rendements élevés des hélices modernes à pales profilées. Ce type d'éolienne a l'avantage de n'avoir pas besoin d'être orienté; mais il faut la lancer; ce n'est d'ailleurs pas un inconvénient grave pour un appareil couplé au réseau.

Des essais en soufflerie à Saint-Cyr, avec une machine tripale d'envergure 1,75 m de long, ont conduit à un rendement de 0,23 (puissance 300 W, pour un vent de 10 m/s).

A l'issue de ces essais, une machine expérimentale de 7 kW (voir tableau de la page précédente) fut construite et expérimentée aux Fressinades à Mondragon, en bordure du canal Donzère-Mondragon. Elle a tourné du 9 août au 8 octobre 1954, date à laquelle elle fut détruite par une bourrasque de mistral, par suite d'une défaillance du système de freinage. Les essais ont conduit aussi à un rendement de l'ordre de 0,23 en moyenne.

Les essais devaient reprendre à Mondragon avec une machine de 5 kW, plus petite, formant un cône d'angle au sommet plus important, de façon à obtenir une courbe de rendement moins « pointue », c'est-à-dire une plage de rendement maximal valable pour une gamme étendue de vitesses du vent. Les essais commencèrent, mais la Société J.-B. Morel les interrompit en 1955 pour cause de difficultés financières.

Néanmoins, des avant-projets d'éolienne de 90, 500 et 1 200 kW ont été ébauchés avec l'aide de l'E.D.F., en admettant un rendement moyen de l'ordre de 0,25. Les quelques essais ont surtout montré qu'il y avait beaucoup de difficultés à surmonter dans ce type de machine. De ce fait, les prix de revient déjà très importants, condamnent ces projets par rapport à ceux à hélice à axe horizontal.

2.2 - LES AUTRES GRANDES MACHINES

2.2.1 - L'aérogénérateur Andreau-Enfield (1950-1957) [202]

L'aérogénérateur de 100 kW expérimenté à Grand-Vent (fig. 13) par Électricité et Gaz d'Algérie (E.G.A.), est d'un type très particulier; de ce fait, son historique n'est pas sans intérêt.

Il s'agissait de la machine Andreau-Enfield, construite en 1950 par la Société Enfield-Cables Limited pour la British Electricity Authority. Les pales, dessinées par De Havilland Propellers Limited, sont creuses; lorsqu'elles tournent, la force centrifuge expulse l'air à l'extrémité; il en résulte une aspiration au centre. Cette dépression est utilisée pour entraîner une turbine située dans le fût de l'aérogénérateur (brevet Andreau n° 617331 du 8 octobre 1951).

Les caractéristiques détaillées de l'ensemble étaient les suivantes :

- diamètre de l'hélice : 24,4 m;
- rotation à 100 tr/mn pour un vent de 13,5 m/s (48 km/h);
- débit d'aspiration : 1 655 m³/mn;

- inclinaison des pales réglée automatiquement pour les vents de plus de 48 km/h, de façon à maintenir constant le débit d'air de la turbine;
- puissance nominale : 100 kW pour une plage de vent de 13,5 à 29 m/s (48 à 105 km/h);
- pales mises en drapeau pour un vent de plus de 105 km/h;
- moteur synchrone : 100 kW, 415 V;
- hauteur de la tour : 30 m au-dessus du sol.

Initialement, la machine devait être installée au sommet de la colline de Mynydd Anelog, Alerdaron (Caernarvonshire, Pays de Galles), mais l'engin fut au préalable installé en 1953 à fin d'expérimentation à Prae-Wood, St-Albans (Hertfordshire). Malheureusement, il s'agissait d'un site boisé, donc d'une zone où la distribution verticale des vents était très perturbée; il en résulta l'apparition de vibrations de l'hélice et le projet fut abandonné par les chercheurs anglais.

En 1957, E.G.A. récupéra la machine, pour la remonter à Grand-Vent (fig. 14), dans un site meilleur que celui de St-Albans. L'aérogénérateur y fonctionna 180 h, fournissant une puissance oscillant de 80 à 130 kW.

Les essais d'E.G.A., sous la conduite de M. Delafond, ont mis en relief les points faibles du système, en particulier des défauts de conception du mécanisme d'orientation des pales, des butées, des fuites aux joints rotatifs de la colonne de dépression. Ces différents problèmes de détail ont été résolus; l'installation fut cependant abandonnée pour des raisons d'insécurité.

Les conclusions de l'opération sont les suivantes :

- Le choix du site est fondamental; il faut rechercher les zones où le vent est le plus régulier possible dans l'espace;
- Le rendement du système Andreau est très faible (20 %) par suite des pertes d'énergie cinétique de l'air expulsé en bout de pale (absence d'une volute permettant une récupération), des entrées d'air aux joints, des pertes de charge importantes du circuit à dépression et surtout parce que les rendements de chacune des quatre machines en série (éolienne, soufflante centrifuge, turbine en dépression et alternateur) doivent être multipliés l'un par l'autre; c'est d'ailleurs ce que les essais sur grand modèle, exécutés antérieurement par E.D.F. et Andreau à Saint-Cyr-l'École, avaient déjà fait apparaître.
- Il faut éviter les pales articulées.

Bien qu'elles fussent nécessairement mal profilées, les pales (seules) avaient un assez bon rendement (0,73); ceci montre qu'il n'est pas nécessaire de soigner beaucoup l'aérodynamisme de la partie centrale de l'hélice; la construction de l'hélice peut être simplifiée.

2.2.2 - L'aérogénérateur des Orcades [107, 111, 203]

La North Scotland Hydroelectric Board (N.S.H.E.B.) a demandé, en 1950, à la Société John-Brown, de construire un aérogénérateur expérimental de 100 kW, pour l'installer sur la colline du Cap Costa au nord de l'île principale des Orcades. L'engin a fonctionné très peu de temps en 1955, couplé sur le réseau en parallèle avec des groupes électrogènes diesel. Le constructeur espérait en tirer des rensei-

gnements qu'il comptait utiliser pour mettre au point une machine de 250 kW, de diamètre 23,8 m; mais il ne semble pas que ce projet ait abouti.

Les caractéristiques détaillées de l'ensemble installé aux Orcades, étaient les suivantes :

— puissance nominale : 100 kW pour un vent de 15,5 m/s (56,3 km/h);

— ralentissement pour un vent de plus de 26,5 m/s (95 km/h);

— hauteur du pylône : 24 m au-dessus du sol.

Mais le trop grand nombre d'articulations et de mouvements d'orientation possibles des pales fut néfaste à la machine.

2.2.3 - Les éoliennes danoises [108, 204]

Le Danemark s'est intéressé depuis longtemps à l'énergie éolienne; en effet, le réseau danois n'étant jadis pas interconnecté, de nombreuses villes possédaient leur éolienne. En 1939, la Société Lykkegaard fabriquait des éoliennes de 18 m de diamètre fonctionnant pour les vents de 4 à 11 m/s et produisant 50 MWh/an (prix 1 100 couronnes). En 1941, 64 machines produisaient 1,8 GWh/an; de 1940 à 1947, 18 GWh furent obtenus à partir de l'énergie éolienne. Une machine Lykkegaard, achetée par E.D.F., a fonctionné quelques mois en 1948 à Clamart; elle a montré qu'elle était de conception un peu démodée.

Après la guerre, les études des éoliennes sont reprises en soufflerie, suivies d'essais sur une machine de 85 kW coûtant 612 couronnes par kW. Trois autres aérogénérateurs furent construits en 1942, de puissance comprise entre 30 et 75 kW; ils coûtèrent environ 900 couronnes par kW.

Ensuite, la Sydolstjallands Elektricitets Aktieselskab (S.E.A.S. ou l'Electricité du Sud-Est de la Zélande) expérimentait, avec succès, les aérogénérateurs de 13 kW à Vester-Egesborg (1949) et de 45 kW à l'île de Bogo (1952). En 1954, sous l'impulsion de J. Juul, elle décidait de construire une machine de 200 kW à Gedser, inaugurée en 1957 et mise en service en 1959. Des difficultés de fonctionnement apparurent ensuite : vibrations et pompes d'origine aérodynamique dues aux interférences entre les sillages des pales.

Il semble que, sous la triple conjonction de la disparition de J. Juul (1965), des incidents mécaniques et de l'abaissement du prix du pétrole, l'énergie éolienne fut abandonnée dans ce pays où elle avait joué un grand rôle.

2.2.4 - L'énergie éolienne en Allemagne [119, 209]

En 1949, l'Energieversorgung Schwalen A.G. a créé à Stuttgart la Studiengesellschaft Windkraft en vue de réaliser une installation éolienne expérimentale.

La machine de 100 kW érigée à Stotten près de Geisslingen tournait à 34 tr/mn, fournissait au réseau jusqu'à 90 kW entre 1959 et 1961. Cependant, malgré les relatifs bons résultats de cette machine et les possibilités techniques de réaliser des unités de 100 kW, dès 1966, l'Allemagne considérait que le système n'était pas économique, même en cas de fabrication en grand nombre, du fait des grandes dimensions des machines, des problèmes de stockage et de la courte durée d'existence des unités.

2.3 - LES PETITS AÉROGÉNÉRATEURS [200, 210, 211]

Si les grands aérogénérateurs ont en général conduit à des déboires, en revanche les machines à faible puissance ont plus souvent donné satisfaction. Ce sont des éoliennes de moins de 10 kW, utilisées pour le pompage, pour la fourniture en énergie électrique d'un lieu isolé (phare, île, camps d'explorateurs, etc.), en connection avec une batterie d'accumulateurs ou un groupe électrogène.

En France, après l'arrêt des études d'E.D.F., la Société B.E.S.T.-ROMANI qui avait construit l'éolienne de Nogent-le-Roi, disparut en 1966. La Société Aérowatt, qui la remplaça, prit un brevet, développé par M. Seger, concernant la régulation de la vitesse de rotation par divers moyens dont le décrochage aérodynamique. Il s'agit de situer la plage de fonctionnement de la machine dans la partie descendante de la courbe caractéristique puissance-vitesse du vent; de ce fait, le couple moteur diminue en cas de fort vent. Les hélices, plus simples, ne sont pas vrillées; elles sont adaptées pour fonctionner pour les vents de faible vitesse (5 à 7 m/s) et démarrent à 3 m/s.

Depuis 1970, Aérowatt a construit environ 200 machines de puissance allant de 24 W à 4 kW; en particulier, le Service des Phares et Balises les utilise pour l'alimentation de certains phares avec sécurité (fig. 15) [211]. Le prix de revient des installations avec le système de batteries d'accumulateurs au plomb est, en 1974, de l'ordre de 10 000 F/kW pour des puissances inférieures à la dizaine de kW.

Ces machines, conçues pour produire de l'énergie par vent faible, n'utilisent qu'une partie de l'énergie éolienne disponible, car leur puissance est limitée à celle correspondant à des vents de vitesse modérée. De ce fait, leur production annuelle est bien inférieure, par mètre carré de surface balayée par l'hélice, à celle donnée par la figure 1.

3 - Considérations économiques et perspectives d'avenir

Les publications sur les éoliennes sont souvent émaillées de considérations économiques dont *les bases de calcul sont pour la plupart malheureusement incontrôlables*. Nous ne citerons donc que celles qui paraissent les plus sérieuses. Tous les prix sont donnés en francs courants de l'année et en francs constants début 1974 [206].

La Société Dowsett Holdings Limited, London, proposait en 1957 les installations ci-dessous autour de sa machine de 25 kW.

Australie :

Machine débitant sur le réseau; 43 500 kWh par an;
Prix : 6 000 £ (1954), soit 180 000 F (1974).

Indes :

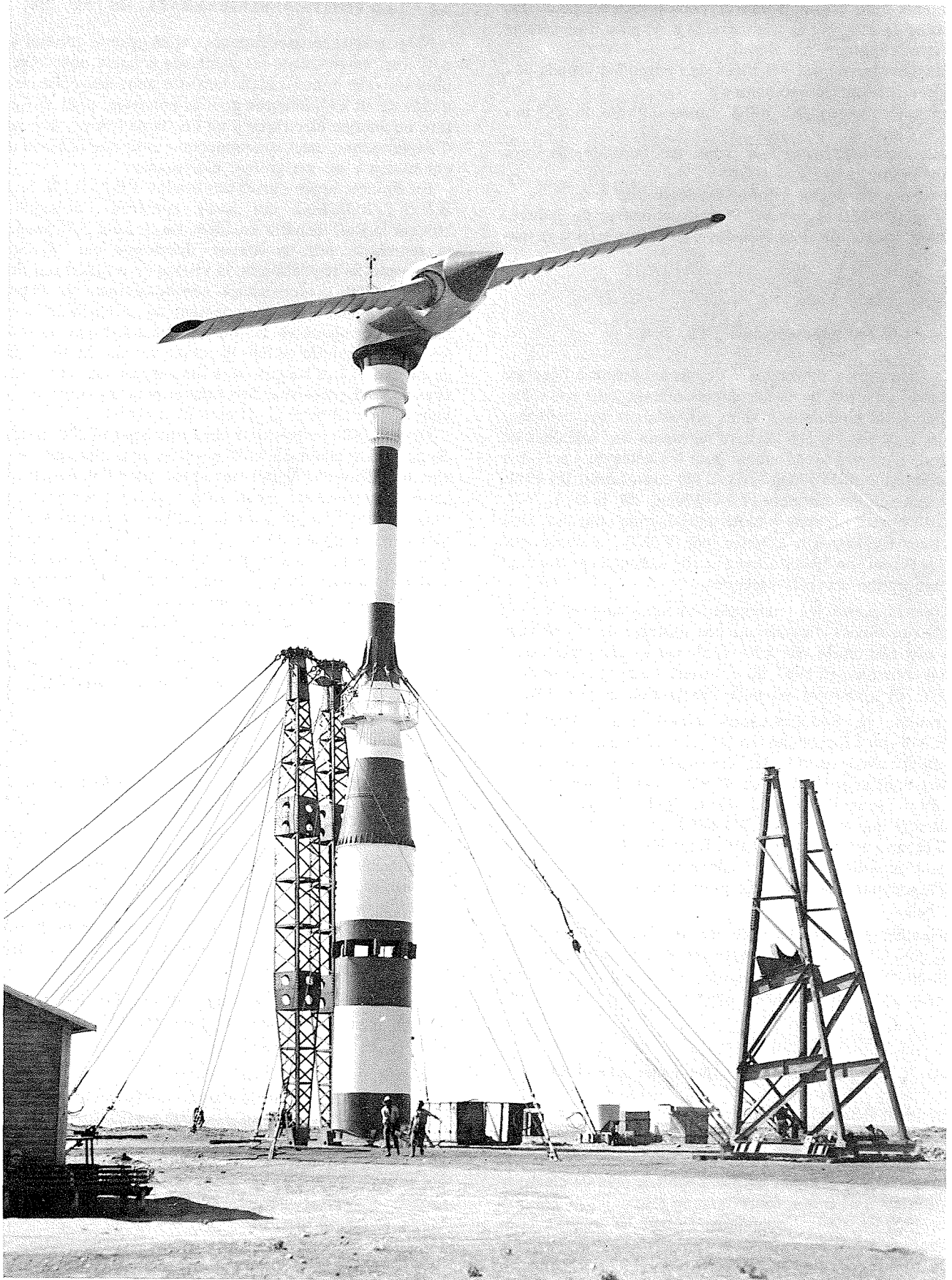
Pompage (10 kW); 300 000 m³/an;
Prix : 7 000 £ (1954), soit 210 000 F (1974).

Sainte-Hélène :

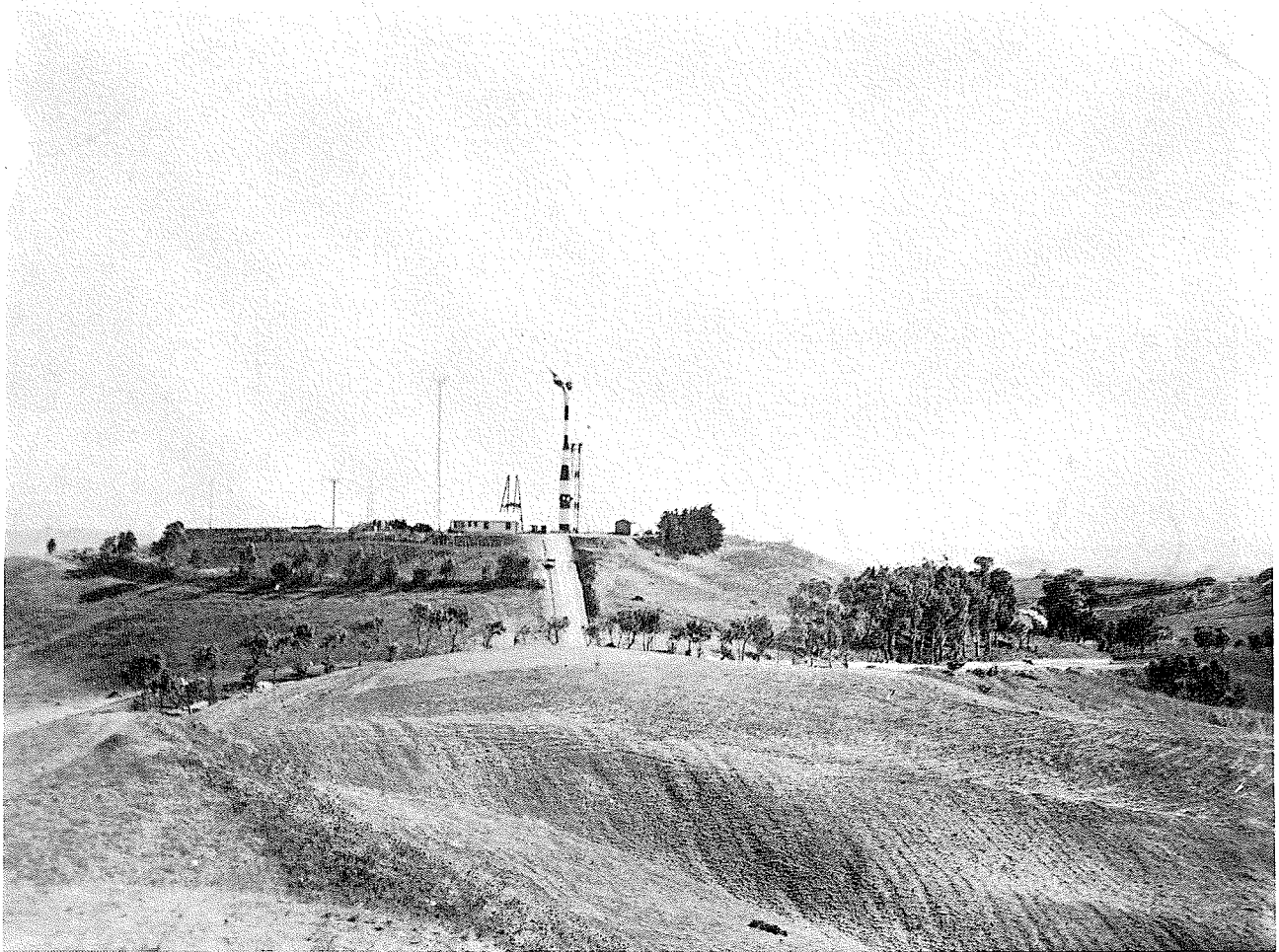
Stockage par batteries (225 Ah); 85 000 kWh/an;
Prix : 9 000 £ (1954), soit 270 000 F (1974).

Sainte-Hélène :

Complément par diesel-électrique (7 kW); 85 000 kWh/an;
Prix : 7 000 £ (1954), soit 210 000 F (1974).



13/ L'éolienne « Andreau-Enfield » de Grand-Vent (Algérie)
24,4 m, 100 kW



14/ Vue générale du site de Grand-Vent en Algérie



La colline Costa Hill
dans les Orcades.
Site retenu pour
installer l'aérogénérateur
de 100 kW
(un des endroits
le plus venteux
du monde)



15/ Le phare de Faraman (Bouches-du-Rhône) alimenté par un aérogénérateur « Aérowatt » de 1 100 W

Des études économiques assez poussées ont été réalisées en Grande-Bretagne au début des années 50, en particulier par E.W. Golding. Elles conduisent aux valeurs suivantes :

Machines de 1 à 4 kW :

200 £ (1955), soit 6 000 F (1974) par kW;

Machines de 10 à 100 kW :

150 £ (1955), soit 4 500 F (1974) par kW.

Ces prix sont à rapprocher de ceux des aérogénérateurs français et danois ayant réellement existé ou en projet :

Saint-Rémy-des-Landes :

130 kW - 24 000 000 AF (1955) ou 4 500 F/kW (1974)

1 000 kW - 2 400 000 F (1961) ou 4 300 F/kW (1974)

Nogent-le-Roi :

800 kW - 170 000 000 AF (1954) ou 5 200 F/kW (1974)

E.D.F. (projet B.E.S.T.-ROMANI) :

2 000 kW - 3 300 000 F (1963) ou 2 700 F/kW (1974) ⁽⁶⁾

Danemark :

75 kW - 9 000 000 AF (1948) ou 3 800 F/kW (1974)

200 kW - 20 000 000 AF (1954) ou 2 500 F/kW (1974)

En résumé, la dépense d'investissement pour les machines expérimentales serait, en 1974, de l'ordre de 3 000 à 4 500 F/kW. La proportion dans laquelle ces chiffres pourront être réduits dans le cas de réalisations industrielles de série reste à établir.

Où en sont les perspectives à l'étranger? Le rapport de G. Massart [122] répond en ce qui concerne les U.S.A.; l'Université du Montana étudie un nouveau type d'éolienne; l'Université d'Oklahoma est orientée vers les grands systèmes et les installations *offshore*. Le Lewis Research Center porte ses efforts sur les éoliennes de 100 kW. Les contrats correspondants dépassent le million de dollars pour 1973 et 1974. La firme Ocean Energy à Blairsville (Pennsylvanie) essaie de développer un petit aérogénérateur rustique de 5 à 8 kW avec hélice en « Tergal » pour le chauffage domestique en hiver.

Citons enfin les développements possibles de batteries d'aérogénérateurs sur des structures flottantes alignées en mer, produisant de l'hydrogène, stocké dans des réservoirs sous-marins et brûlé dans des centrales thermiques à terre [123]. W. Heronemus, après avoir examiné la machine de grande taille, semble accorder la préférence aux ensembles de puissance de l'ordre de 1 à 6 MW composés d'aérogénérateurs standardisés (10 m - 20 kW - 11 m/s).

Conclusion

Les premiers efforts d'Électricité de France en matière de développement de l'énergie éolienne, ont porté sur l'exploration du territoire français par la mesure de l'énergie éolienne théoriquement disponible (fig. 1).

Le second effort a conduit à expérimenter deux classes d'aérogénérateurs :

— Une machine de puissance moyenne 132 kW (fig. 7) qui a donné pleine satisfaction;

— Deux machines de grandes puissances. La première (800 kW, fig. 2) a posé, puis permis de résoudre de nom-

breux petits problèmes technologiques; néanmoins elle a montré qu'il n'était pas impossible de faire fonctionner sans difficulté des machines de diamètres de l'ordre de 40 à 60 m. La deuxième (1 000 kW, fig. 10) a confirmé pendant le court laps de temps où elle a fonctionné, les possibilités énergétiques de ces machines; en effet, la machine de 800 kW était installée dans un site peu venteux mais près de Paris; elle a plus joué le rôle de prototype technologique que la machine de 1 000 kW implantée près du littoral de la Manche.

Les enseignements des expériences d'Électricité de France et de celles de l'étranger peuvent se résumer comme suit :

— Les petites machines (1 à 10 kW), techniquement au point, sont intéressantes localement quand il n'existe pas de réseau électrique interconnecté. Il n'est pas douteux qu'il y a un marché de ces éoliennes, malgré leur prix unitaire élevé, dans les pays non industrialisés en bordure de mer ou en zone tempérée, ou pour des utilisateurs très particuliers comme les phares isolés en mer, le pompage de l'eau pour usage agricole, mise en réserve d'eau chaude, etc.

— Actuellement, le développement des machines moyennes, de puissance de l'ordre de quelques dizaines à la centaine de kW, est envisageable pour alimenter certaines communautés isolées (îles, exploitations forestières, etc.) en complément avec les autres formes d'énergie.

Bibliographie

SUR LE VENT ET L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN GÉNÉRAL

- [100] BETZ (A.). — Die Windmühlen im Lichte neuerer Forschung. *Die Naturwissenschaften*, vol. XV, n° 46, nov. 18, 1927, pp. 905-914.
- [101] THOMAS (P. H.). — « Electric power from the wind ». *Federal Power Commission*, Washington, mars 1945.
- [102] AILLERET (P.). — L'énergie éolienne: sa valeur et la prospection des sites. *Revue Générale de l'Électricité*, tome LV, n° 3, mars 1946, pp. 103-108.
- [103] JUUL (J.). — Utilisation de la force du vent pour la production rationnelle d'électricité. *Elektroteknikeren*, vol. 43, n° 2, 1947, p. 137 (Traduction DER, n° 70).
- [104] LANOY (H.). — « Les aéromoteurs modernes ». *Girardot*, Paris, 1947.
- [105] AILLERET (P.). — La recherche des sites qui pourraient convenir à une utilisation de l'énergie du vent. *La Météorologie*, avril-juin 1948, pp. 145-152.
- [106] PUTNAM (P. C.). — « Power from the wind ». *V. Nostrand C°*, New York, 1948.
- [108] JUUL (J.). — Undersøgelse af Muligheder for Windkraftens udnyttelse (Investigation sur les possibilités d'utilisation de l'énergie éolienne). *Elektroteknikeren*, vol. 45, n° 20, octobre 1949, p. 607 (Traduction DER, n° 85).
- [109] VEZZANI (R.). — Un impianto aeroelettrico pilota di media potenza con accumulo idrico di pompaggio. *L'Elettrotecnica*, vol. 37, n° 9, 1950, pp. 398-419.
- [110] GOLDING (E. W.). — Electricity from the wind. *Discovery*, mars 1950, pp. 97-99.
- [111] GOLDING (E. W.). — Harnessing the wind. *Discovery*, décembre 1953, pp. 373-377.
- [112] SERRA (L.). — Le vent en France et ses possibilités d'utilisation. *La Météorologie*, octobre-décembre 1953, pp. 273-292.

⁽⁶⁾ Y compris l'infrastructure.

- [112] SERRA (L.). — Le vent en France et ses possibilités d'utilisation. *La Météorologie*, octobre-décembre 1953, pp. 273-292.
- [113] GOLDING (E. W.). — Electrical energy from the wind. *Proceeding of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 102, Part A, n° 6, décembre 1955, pp. 677-695.
- [114] GOLDING (E. W.). — « The generation of electricity by wind-power ». *E.F.N. Spon*, London, 1955.
- [115] AILLERET (P.). — Les perspectives d'utilisation pratique des sources nouvelles d'énergie. *Revue Française de l'Energie*, n° 85, année 1957, pp. 292-310.
- [116] ARGAND (A.). — Mesure des paramètres caractéristiques de l'énergie éolienne en vue du choix des sites favorables à l'installation d'aéromoteur. *Conférence des Nations-Unies sur les sources nouvelles d'énergie*, 1961.
- [117] CAMBILLARGIU (E.). — L'utilisation de l'énergie du vent en Uruguay et en Argentine. *Proceedings of the International Seminar on Solar and Aeolian Energy*, Sounion, Grèce, 1961. *Plenum Press*, New York.
- [118] ARGAND (A.). — L'énergie éolienne. *Progrès-Sciences-Techniques*, 30, rue Bergère, 75009 Paris, 1963.
- [119] CLAUSNIGER (R.). — Die Bedeutung der Windkraft für die deutsche Energiewirtschaft. *Elektrizitätswirtschaft*, tome 64, 1955, n° 7, pp. 180-183.
- [120] ANONYME. — Mesure de l'énergie éolienne. Notice 4404, *Compagnie des Compteurs*, 92120 Montrouge, 1956.
- [121] SALOMON (I.). — Compteur anémométrique fournissant la moyenne cubique de la vitesse du vent. *Revue Générale de l'Electricité*, tome 76, n° 3, mars 1967, pp. 370-374.
- [122] MASSART (G.). — Compte rendu de mission aux Etats-Unis. *CNEXO*, Rapport COB/TDI-74 221, 28 février 1974.
- [123] HERONEMUS (W. E.). — Power from the offshore winds. 8th Annual Conference and Exposition, *Marine Technology Society*, septembre 1972, Washington, pp. 435-466.

SUR LES INSTALLATIONS ET LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

- [200] LACROIX (G.). — Les éoliennes électriques Darrieus. *La Nature*, décembre 1929, pp. 547-554.
- [201] SEKTAROF (U. R.). — L'utilisation de l'énergie des vents pour l'électrification. *Elektritchestvo*, mars 1953, pp. 11-16 (Traduction *DER* n° 1965).
- [202] ANONYME. — La production éolienne d'électricité. Installation prototype de 100 kW. *Engineering*, 25 mars 1955, pp. 471-474 (Traduction *DER* n° 1965).
- [203] ANONYME. — Wind-driven generator on Costa-Head, operational experience at very exposed site. *Engineering*, 8 juillet 1955, pp. 55-57 (Traduction *DER* n° 203).
- [204] GOLDING (E. W.). — Wind power in Denmark. *Electrical Times*, 16 janvier 1958, pp. 83-86.
- [205] VADOT (L.). — Etude synoptique des différents types d'éoliennes. *La Houille Blanche*, mars-avril 1957, n° 2, pp. 189-203.
- [206] ANONYME. — Economic possibilities of wind power. *News sources of energy and economic development*, United Nations, New York, 1957.

- [207] VADOT (L.). — La production d'énergie électrique par éoliennes. *La Houille Blanche*, octobre 1958, n° 5, pp. 503-525 et janvier-février 1959, n° 1, pp. 3-14.
- [208] CHILCOTT (R. E.). — L'utilisation de l'éolienne rapide Brace comme source d'énergie motrice. *L'Ingénieur*, août 1970, n° 257, pp. 7-12.
- [209] ANONYME. — Betriebserfahrungen mit einer Windkraftanlage von 100 kW (Expérience d'exploitation avec un équipement éolien de 100 kW. *Brennstoff-Wärme-Kraft*, 1964, 16, n° 7, pp. 333-340 (Traduction *DER* n° 1261).
- [210] HEMAR (D.) et PRUNERIAS (J.). — Contribution à la définition d'une station d'aérogénérateur. *Cahier Océanographique*, novembre-décembre 1970, pp. 305-326.
- [211] RIBES (J.-P.). — Hélice au pays des Merveilles. *Le Sauvage*, n° 11, mars 1974, pp. 47-50.

DOCUMENTS E.D.F. NON PUBLIÉS

Rapports du Bureau d'Etudes Scientifiques et Techniques (B.E.S.T.) (15^e campagne d'essais à Nogent-le-Roi) :

- [301] Rapport préliminaire : (non daté).
- [302] 1^{er} rapport (13 août 1958).
- [303] 2^e rapport (non daté).
- [304] 3^e rapport (9 juin 1959).
- [305] 4^e rapport (15 mars 1960).
- [306] 5^e rapport (21 mars 1960).
- [307] 6^e rapport (18 février 1961).
- [308] 7^e rapport (14 août 1962).
- [309] 8^e rapport (5 mars 1963).
- [310] Optimum des aérogénérateurs à deux hélices (23 juillet 1959).

Rapports SO.GRE.A.H. :

- [311] Eolienne 35 mètres. Etude générale. R 7972 (1960).
- [312] Eolienne 35 mètres. Etude mécanique des principaux ensembles. Etude de prix de revient. R 7973 (1963).

Rapports de la Division Energie du Vent de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

- [313] Les turbines éoliennes à axe vertical et la solution J.-B. Morel. E.D.F.-S.E.R.H. (juillet 1955).
- [314] Aérogénérateurs Neyrpic de 21,2 m de diamètre. Essais, 2^e campagne (septembre 1969).
- [315] Aérogénérateurs Neyrpic de 21,2 m de diamètre. Essais de réception provisoire du jeu de pales n° 2 (juillet 1960).
- [316] Note sur le fonctionnement durant l'année 1961 de l'aérogénérateur Neyrpic de 21,2 m de diamètre (février 1962).
- [317] Note sur les performances des aérogénérateurs Neyrpic de diamètre 35 m et 21,2 m (octobre 1963).
- [318] Essais complémentaires de puissance (mai 1964).