

Sur la possibilité d'utiliser l'énergie des courants marins au moyen de machines analogues aux aérogénérateurs

G. REMENNIERAS

CHEF DU SERVICE
DES ETUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES
D'ELECTRICITE DE FRANCE

PAR

ET

P. SMAGGHE

INGENIEUR AU SERVICE
DES ETUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES
D'ELECTRICITE DE FRANCE

Comparaison des caractéristiques d'une même hélice réceptrice fonctionnant respectivement dans l'air et dans l'eau, d'après les principes de la similitude en mécanique des fluides.

Calcul des principales dimensions d'un générateur à courants marins « semblable » à des aérogénérateurs ayant fait l'objet d'études détaillées, d'essais sur modèles ou de réalisations (aérogénérateurs à multiplicateur à engrenages, aérogénérateurs à dépression Andraeu). Problèmes posés par la réalisation pratique d'un générateur électrique utilisant les courants marins.

Calcul de l'énergie annuelle disponible pour quelques sites pour lesquels on dispose de mesures suffisantes.

La vitesse maximum, en vive-eau moyenne, des courants marins liés au jeu des marées, est, en de nombreux points de nos côtes, comprise entre 1 et 2m/s; en des points singuliers, elle atteint des chiffres sensiblement plus élevés: 5 m/s dans le célèbre Raz Blanchart près du cap de la Hague.

Il est facile de montrer que, compte tenu du rapport existant entre les masses spécifiques de l'eau et de l'air (environ 800), l'énergie récupérable par m³ de surface balayée par le rotor d'un appareil analogue aux aérogénérateurs modernes est souvent supérieure, dans les courants marins, à celle disponible dans l'air, même dans des sites réputés très venteux. En outre, les courants marins présentent la régularité astronomique des marées, ce qui semble leur conférer, au point de vue qui nous préoccupe, un avantage sérieux sur le vent dont on sait le régime essentiellement aléatoire; de plus les spécialistes estiment que les vitesses maxima et la turbulence de ces courants, au-delà de la zone d'action des hautes (soit 10 à 20 m au-dessous de la surface), sont proportionnellement très inférieures à celles

des vents de tempête pour lesquels on doit calculer les aérogénérateurs.

L'objet de la présente note est d'examiner, à la lumière des résultats des nombreuses études effectuées ces temps derniers sur les aérogénérateurs, la possibilité d'adapter ces machines à l'utilisation des courants marins, et de calculer l'énergie annuelle qu'elles permettraient de produire en les supposant installées sur quelques sites français pour lesquels on dispose de bonnes mesures de vitesse de ces courants.

Bien entendu, ces appareils dont nous ne dissimulons pas la difficulté de mise en place et d'exploitation — malgré le développement probable des groupes hydroélectriques immergés — ne sauraient entrer en compétition avec les usines marémotrices. Nous avons simplement tenté de nous rendre compte si, dans certains cas favorables, ils avaient quelque chance de pouvoir jouer un rôle analogue à celui que l'on espère pouvoir confier aux générateurs éoliens; comme ces derniers, ils exigent peu de travaux de génie civil, leur construction en série est susceptible

d'abaisser leur prix de revient, et ils se prêtent à des installations de faible puissance pour

l'alimentation locale en énergie électrique, notamment en pays sous-développé.

I. — CARACTÉRISTIQUES D'UNE MÊME HÉLICE RÉCEPTRICE FONCTIONNANT SUCCESSIVEMENT DANS L'AIR ET DANS L'EAU

Considérons tout d'abord un aérogénérateur du type hélice (fig. 1), placé dans un vent uniforme de vitesse V (à l'infini); S étant, la surface du cercle balayé par l'hélice. ρ la masse spécifique de l'air, l'expression de la puissance W fournie par le rotor est de la forme

$$W = k \rho S V^3 \quad (1)$$

k est une constante ne dépendant que de l'appareil considéré.

La poussée axiale P , parallèle à l'axe de rotation a pour expression :

$$P = k' \rho S V^2 \quad (k' = \text{constante}) \quad (2)$$

Le rapport des masses spécifiques de l'eau et de l'air étant pris égal à 800, et le nombre de Reynolds d'un écoulement d'eau étant, à vitesse égale, 13 fois supérieur à celui d'un écoulement d'air, des conditions élémentaires de similitude montrent qu'à puissance égale, une même hélice réceptrice conduira dans l'eau à :

- Une vitesse V du fluide moteur : racine cubique 800 soit 9,3 fois plus petite environ dans l'eau que dans l'air. A cette vitesse son rendement sera identique, ou légèrement supérieur, à celui obtenu dans l'air en raison de la quasi identité des

nombre de Reynolds;

- Une vitesse de rotation de l'hélice 9,3 fois plus faible (afin de conserver le même rapport caractéristique de fonctionnement $\omega R/V$ de la vitesse en bout de pale ωR à la vitesse V);
- Une poussée axiale et à un couple moteur : 9,3 fois supérieurs.

Ainsi une roue éolienne placée dans des courants marins compris entre 1 et 2 m/s donnera la même puissance que si elle se trouvait dans des vents de 9,3 à 18,6 m/s que l'on ne rencontre que durant une faible partie de l'année dans les sites les plus venteux. Les forts courants du Raz Blanchart correspondent à des vents de 45 m/s, alors que les aérogénérateurs sont calculés pour donner leur puissance maximum pour des vents ne dépassant pas 12 à 16 m/s; on doit cependant établir leur structure pour des vents de 60 à 70 m/s, alors que les appareils marins pourraient être prévus pour des vitesses de « tempête » proportionnellement beaucoup plus réduites.

Par contre la plus faible vitesse de rotation et les valeurs plus fortes du couple et de la poussée axiale défavorisent, à puissance égale, l'hélice tournant dans l'eau.

II. DIMENSIONNEMENT D'UN GROUPE « GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE ACTIONNÉ PAR LES COURANTS MARINS

Les simples considérations de similitude exposées ci-dessus permettent, en s'appuyant sur des études poussées déjà effectuées sur les aérogénérateurs et sur les groupes turbines alternateurs immergés, de déterminer avec une bonne approximation les dimensions principales d'un groupe générateur actionné par les courants marins.

Pour fixer les idées nous donnons ci-après les caractéristiques principales d'un tel générateur calculé pour fournir une puissance électrique nette de 500 kW pour une vitesse V de 3 m/s soit un peu moins de 6 nœuds); nous envisagerons successivement deux modes de transmission entre la roue et la génératrice électrique:

1. Transmission par engrenages;
2. Transmission hydrodynamique (analogue à celle utilisée sur les éoliennes à dépression).
 - a) Générateur à transmission par engrenages.

La disposition générale de l'appareil est schématisée par la figure 1. L'hélice motrice à 3 pales non orientables présente un diamètre de 10,50 m, et tourne à 27,5 tr/mn; elle entraîne par un harnais d'engrenages une génératrice asynchrone ou un alternateur immergé dans l'huile (type Castet ou Rance), de 500 kW à 500 tr/mn.

Le tableau I ci-après compare les caractéristiques de cet appareil avec celui d'un aérogénérateur « semblable » de 500 kW.

TABLEAU I. — Comparaison d'un générateur marin et d'un générateur éolien de 500 kW.

	Générateur éolien	Générateur marin
Puissance nominale de la génératrice électrique	500 kW	500 kW
Vitesse du fluide moteur correspondante	15 m/s	3 m/s
Diamètre de l'hélice	26,50 m	10,50 m
Vitesse de l'hélice	55 tr/mn	27,5 tr/mn
Poussée sur l'hélice	P	5 P

Malgré la poussée 5 fois plus forte sur l'hélice marine, le poids de celle-ci sera plus faible que celle de l'hélice éolienne d'abord en raison de son diamètre 2,5 fois plus petit, et surtout parce que c'est la poussée par vent de tempête et non pour le vent correspondant à la puissance nominale qui dimensionne, dans une large mesure, non seulement la pale mais aussi le pylône d'un aérogénérateur; or nous avons souligné plus haut le gros avantage qui en résulte pour le générateur marin. Le poids apparent de certaines pièces

immergées peut d'ailleurs être allégé par une construction creuse ou en matériaux convenables (béton précontraint, matières plastiques).

b) Générateur à transmission hydrodynamique.

La faible vitesse de rotation de l'hélice marine constitue un handicap que l'on peut tenter de lever en utilisant l'artifice employé sur les éoliennes dites à *dépression*.

Une éolienne à dépression se compose d'une hélice à 2 ou 3 pales tournant folle sur un axe. Les pales sont creuses. de sorte que, pendant la rotation de l'hélice, l'air est aspiré par le moyeu et rejeté vers l'extrémité de celle-ci comme dans un ventilateur centrifuge; un tuyau « porte-vent » relie, par l'intermédiaire d'un joint tournant à labyrinthe, le moyeu de l'hélice à une turbine à air rapide accouplée à la génératrice électrique; l'inconvénient de ce système qui permet la suppression du multiplicateur réside dans le mauvais rendement de l'ensemble soufflante-turbine à air. Les pales sont en général à pas variable, ce qui améliore le rendement et surtout permet la « mise en drapeau » de l'hélice en cas de tempête.

Ici encore les résultats de quelques essais sur modèles d'éoliennes à dépression permettent de dimensionner approximativement notre groupe marin de 500 kW pour $V = 3$ m/s; il se peut toutefois que les rendements déduits d'essais sur modèles de petites dimensions soient trop pessimistes.

Sa disposition générale est schématisée par la figure 2. L'hélice creuse à 3 pales a 17 m de diamètre et tourne à 24 tr/mn, elle constitue une pompe centrifuge fruste donnant une dépression à l'ouïe de 1.5 m d'eau. Cette dépression est utilisée pour actionner une turbine hélice ou Kaplan (*) qui absorberait $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ à la vitesse de 600 tr/m; cette machine de type classique aurait à pleine charge un rendement de l'ordre de 0,85 et

entraînerait un alternateur ou un générateur asynchrone immergé dans l'huile.

c) Mise en place des générateurs à courants marins.

La mise en place des générateurs à courants marins constitue évidemment la difficulté principale pour leur utilisation et implique des travaux de génie maritime qui sortent de notre compétence.

On peut envisager suivant le schéma de la figure 1, que l'ensemble entièrement monté du générateur et de son système d'orientation sera fixé par des scaphandriers (autonomes ou non) sur la plateforme supérieure d'un pylône en béton armé constituant un caisson construit à terre et mis en place sur l'emplacement choisi par échouage. De tels travaux ne pourront être exécutés qu'en morteau et au moment de lit renverse des courants marins; les difficultés qu'ils présentent conduiront à abandonner, en première étape, les sites à forts courants — tels que le Raz Blanchart - pour s'attaquer à des endroits énergétiquement moins avantageux, mais plus abrités, tels que certains estuaires dans lesquels les grandes houles ne pénètrent guère; ainsi la profondeur d'implantation de ces engins pourra être réduite jusqu'au point où le diamètre du cercle balayé par l'hélice devient tangent au niveau des plus basses mers.

De ce point de vue l'implantation de ce type de générateur sur les rapides de fleuves profonds tels que le Congo présente, semble-t-il, beaucoup moins de difficultés.

(*) Pour certaines caractéristiques de l'hélice motrice, on serait conduit à utiliser des turbines Francis installées en "chambre ouverte".

III. — CALCUL DE L'ÉNERGIE ANNUELLE PRODUITE PAR UN GROUPE, GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE UTILISANT LES COURANTS MARINS

a. Quelques définitions et formules essentielles.

La théorie « globale » établie par BETZ montre que la puissance mécanique recueillie sur l'arbre d'une hélice réceptrice idéale ne peut dépasser les $16/27 = 0,593$ de l'énergie de la veine fluide qui traverse le cercle balayé par l'hélice.

On en déduit facilement que la puissance théorique W maximum susceptible d'être recueillie sur l'arbre d'une hélice idéale par m^2 de surface balayée perpendiculaire à la vitesse V à l'infini du fluide a pour expression :

$$W = 0,37 \left(\frac{V}{10}\right)^3 \text{ dans l'air (3)}$$

$$W = 300 \left(\frac{V}{10}\right)^3 \text{ dans l'eau (4)}$$

Dans ces formules W est exprimé en kilowatts et V en m/s.

Nous désignerons dorénavant par « *puissance brute* », la puissance théorique selon BETZ, ainsi calculée.

L'énergie brute E pour une période de temps T aura évidemment pour expression :

$$E = \int_0^T W dt$$

En explicitant cette formule pour une hélice actionnée par l'eau, on trouve

$$E = 0,3 \int_0^T V^3 dt \quad (5)$$

L'expression $\frac{1}{T} \int_0^T V^3 dt$ n'est autre que l'ordonnée moyenne de la courbe $V^3 = f(t)$; nous la désignerons par *vitesse cubique moyenne* V_{3M} .

Nous appellerons énergie annuelle brute la valeur de E calculée à partir de la vitesse cubique moyenne relative à une période d'un an.

On passe des puissances et énergies brutes sur l'arbre de l'hélice aux puissances et énergies disponibles W' et E' aux bornes de la génératrice électrique en multipliant les premières par un coefficient η de rendement *global* qui tient compte des rendements propres de l'hélice, de la transmission et de la génératrice électrique *aux régimes considérés*.

(*) Il résulte de ces formules que la puissance brute par mètre carré de surface balayée, et pour une vitesse - de 1 m/s (soit 2 nœuds environ) est :

0,37 watts dans l'air,
et 300 watts dans l'eau.

b. Calcul de l'énergie annuelle brute par m^2 de balayée pour quelques sites caractéristiques.

La publication n° 427 A (« Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique ») établie par le Service hydrographique de la Marine sous la direction de M. LACOMBE fournit pour de nombreux points des côtes de France, la vitesse et la direction des courants à chaque heure « ronde » au cours des marées de vive-eau moyenne^(**) (coefficient 95) et de morte-eau moyenne (coefficient 45); la figure 4 donne les courbes obtenues à partir de ce document pour la station : « Le Lieu » sur la côte du Morbihan.

En toute rigueur, le calcul de la vitesse cubique moyenne annuelle impliquerait le planimétrage de la courbe afférente à chaque marée. Heureusement, nous avons pu vérifier — comme pour le calcul de l'énergie fournie par une usine marémotrice — qu'on obtient une très bonne approximation de l'énergie brute annuelle d'un site à courants marins à partir de celles correspondant à trois marées types de coefficients respectifs 95, 70 et 45 en appliquant la formule suivante :

$$E = 0,3 E_{95} + 0,4 E_{70} + 0,3 E_{45} \quad (6)$$

E étant l'énergie brute annuelle cherchée; E_{95} , E_{70} , E_{45} , les énergies brutes annuelles calculées en supposant toutes les marées de l'année respectivement aux coefficients 95, 70 et 45.

Quelques résultats

Le tableau II ci-après donne en kWh par m^2 l'énergie annuelle brute, calculée comme il est dit à l'alinéa précédent, afférente à quelques sites marins caractéristiques. Pour comparaison, nous y avons fait figurer les chiffres correspondants à quelques sites éoliens sur la base des relevés effectués au moyen des compteurs préconisés par M. AILLERET^(*).

On voit que l'énergie brute sur un site marin est toujours plusieurs fois supérieure à celle correspondant aux sites éoliens homologues; cela suffira-t-il à compenser les difficultés supplémentaires évidentes de leur aménagement et de leur exploitation?

(**) Pour une marée quelconque, on procède par extrapolation à partir des deux marées susvisées en admettant que la vitesse des courants varie linéairement avec le coefficient de marée (voir fig. 3).

(*) P. AILLERET. — L'énergie éolienne, sa valeur et la prospection des sites. Rev. Gén. de l'Élértr.. mars 1946.

TABLEAU II. — *Energie annuelle brute de quelques sites marins et éoliens.*

SITE MARIN			SITE EOLIEN			OBSERVATIONS
N°	Situation	Energie brute annuelle (kWh / m ²)	Nom	Altitude du sol (m)	Energie brute annuelle (kWh / m ²)	
288	500 m à l'ouest de la Foraine (Raz Blanchart)	58.800	Pic de Lagrange (P. O.)	237	6.200	Site exceptionnel.
506	Le Lieu (Morbihan)	10.900	Cap de La Hague (Manche)	4	3.500	Bon site.
296	Ouest du banc de la Schôle (entre Aurigny et Guernesey)	3.700	Colline Beaumont (P. d. C)	30	1.800	Site médiocre.
	Site marin ou fluvial à courant constant de 2 m / s	21.000				Courants en certains points des Dardanelles et de Gibraltar.
	3 m / s	71.000				Rapides de grands fleuves profonds tels que le Congo.

c. Calcul de l'énergie annuelle disponible par m² de surface balayée par l'hélice.

Le calcul de l'énergie annuelle disponible aux bornes de la génératrice électrique pour un site déterminé exige l'étude des rendements de l'hélice, de la transmission et de la machine électrique aux *régimes très variables* qu'imposent les fluctuations de courant marin. Ces rendements sont relativement bien connus à la suite des études et essais effectués sur les générateurs éoliens et peuvent être appliqués sans grands risques au cas des appareils marins homologues.

Nous avons étudié avec quelque détail l'utilisation des courants du site de « qualité moyenne » du « Lieu » à l'entrée du Morbihan, au moyen d'un générateur à transmission mécanique du type esquissé au paragraphe II-a. A cet effet, nous avons tout d'abord établi la: courbe moyenne annuelle des vitesses et des puissances brutes classées (fig. 5), en utilisant pour le calcul des fréquences des divers coefficients de marée, la méthode donnée par M. GOUGENHEIM dans le *Bulletin d'information du C.O.E.C.* de mars 1953. Cette méthode conduit à attribuer au « Lieu », une énergie annuelle brute E de 11.100 kWh/m² au lieu de 10.900, chiffre fourni par la méthode approchée exposée à l'alinéa b ci-dessus.

La figure 5 donne les courbes des puissances disponibles classées par m² de surface balayée déduites de celle des puissances brutes en multipliant celle-ci par le produit des rendements respectifs

de l'hélice et de la génératrice électrique au *régime considéré*.

Pour une même vitesse du courant marin, le régime de la machine dépend de la « vitesse de tracé .» ou si l'on veut de la vitesse nominale V_n pour laquelle elle a été établie afin de « s'adapter » aussi efficacement et économiquement que possible aux fluctuations des courants marins.

Le tableau III donne les caractéristiques essentielles de trois générateurs supposés installés au « Lieu » et ayant respectivement des vitesses de tracé de 5, 4,6 et 3,5 nœuds; on a admis que la puissance maximum était atteinte pour cette vitesse qui correspond donc à la « puissance installée ».

Une vitesse de tracé de 5 nœuds conduit à une énergie annuelle disponible de 5.900 kWh/ m² contre 4.200 pour V_n = 3,5 nœuds, mais son utilisation annuelle (2.200 h) est assez faible; une vitesse de tracé de 4,6 nœuds semble constituer un compromis raisonnable.

Nous avons fait figurer dans le tableau III le *rendement énergétique global annuel moyen*, égal au rapport de l'énergie disponible aux bornes de la machine électrique à l'énergie brute correspondante; il varie de 0,53 pour V_n = 5 nœuds à 0,38 pour V_n = 3,5 nœuds. Il est de l'ordre de ceux calculés pour divers sites éoliens pour lesquels il s'échelonne entre 0,4 et 0,5. Pour des sites marins ou fluviaux à courants de vitesse constante, il atteindrait 0,65.

TABLEAU III. — *Caractéristiques principales de quelques générateurs électriques (*)
à courants marins supposés installés sur le site du « Lieu » (Morbihan)
(Energie annuelle brute : 11.100 kWh/m²)*

	Vitesse de tracé Vn de l'hélice					
	5 nœuds sans régulation		4,6 nœuds sans régulation		3,5 nœuds avec régulation	
<i>I. - Caractéristiques générales</i>						
1. Rapport ω R/V pour la "vitesse de tracé"	4,9		4,6		7,0	
2. Puissance max. (ou installée) aux bornes de la génératrice (kW/m ²)	2,70		1,76		1,16	
3. Energie annuelle disponible (kW/m ²)	5.900		5.200		4.200	
4. Rendement global annuel moyen	0,53		0,47		0,38	
5. Utilisation annuelle de la puissance installée (heures)	2.200		2.950		3.600	
6. Vitesse de démarrage à vide : Vd (heures)	1,8		1,6		1,8	
7. Durée totale de fonctionnement par an (heures)	6,430		6,730		6,430	
<i>II. - Puissances installées W' et d'énergies annuelles disponibles E' en fonction du diamètre de l'hélice.</i>						
Diamètres de l'hélice	W' (kW)	E' (10 ³ kWh)	W' (kW)	E' (10 ³ kWh)	W' (kW)	E' (10 ³ kWh)
2 m	8,5	18,6	5,5	16,4	3,7	13,2
5 m	53	115	35	103	23	82
10 m	210	460	140	410	90	330
15 m	480	1.040	310	920	205	740
20 m	850	1.860	550	1.640	370	1.320
30 m	1.910	4.180	1.250	3.680	820	2.970
* A transmission par engrenages.						

On notera que pour Vn = 5 nœuds et 4,6 nœuds, la machine est dite « sans régulation », c'est-à-dire qu'elle tourne à une vitesse constante liée à la vitesse de synchronisme du générateur électrique; on obtiendrait un meilleur rendement de l'hélice en faisant varier sa vitesse de rotation suivant la vitesse du courant marin — tout en maintenant constante celle de la machine électrique -- par des artifices dont la description sortirait du cadre de

cette note; c'est en admettant l'emploi d'un tel dispositif qu'ont été calculées les caractéristiques de l'appareil ayant une vitesse de tracé Vn = 3,5 nœuds.

La deuxième partie du tableau III donne les puissances maxima et les énergies annuelles disponibles - dans les 3 cas « d'adaptation » visés plus haut - pour six hélices de diamètres échelonnés entre 2 et 30 m.

CONCLUSION

En de nombreux points du globe, l'énergie des courants marins susceptible d'être captée par des générateurs analogues aux aérogénérateurs est - à égalité de surface balayée - plusieurs fois supérieure à celle correspondant à des sites éoliens voisins. Le dimensionnement des générateurs actionnés par ces courants et le calcul de leur productibilité énergétique peuvent être effectués avec une bonne sécurité par référence aux résultats obtenus pour des aérogénérateurs. Seule la mise en place de ces engins pose des

problèmes inédits et difficiles que l'on pourrait aborder en débutant par quelques installations-pilotes implantées dans des estuaires ou sur les rapides de grands fleuves profonds.

Sous cette importante réserve, nous pensons que ce triode de captation de l'énergie des courants marins pourrait se comparer favorablement au point de vue rentabilité, à l'exploitation d'autres énergies naturelles « très diluées » et intermittentes telles que celles du vent, de la houle et du rayonnement solaire.

Fig.1- Générateur marin de 500 kW à transmission mécanique

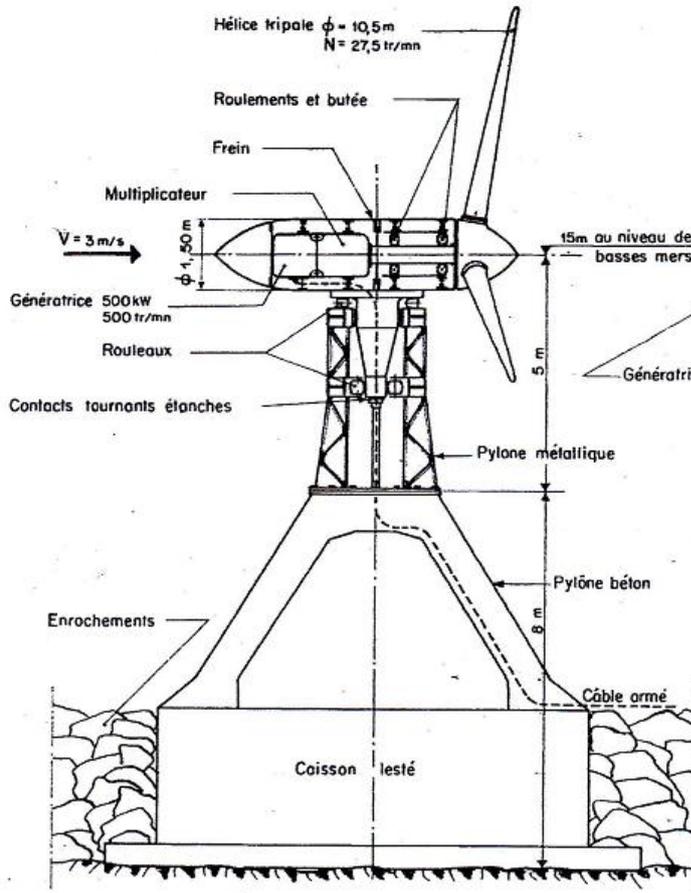


Fig. 2 - Générateur marin de 500 kW à transmission hydrodynamique

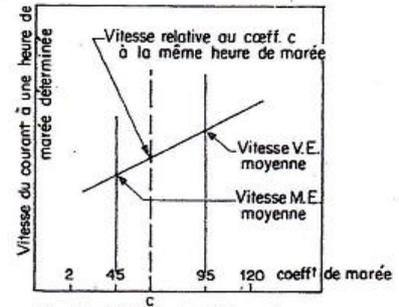
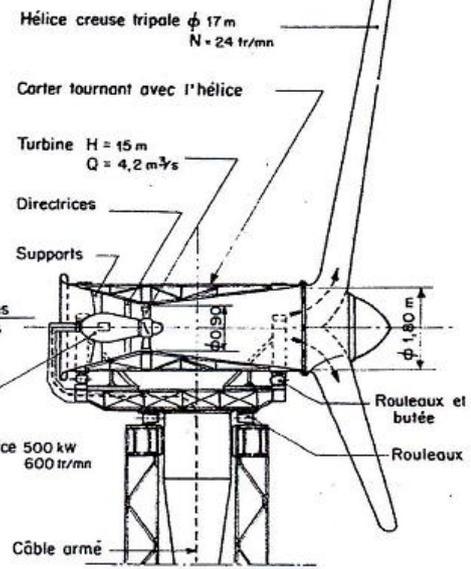


Fig. 3- Calcul de V à partir de V₉₅ et V₄₅

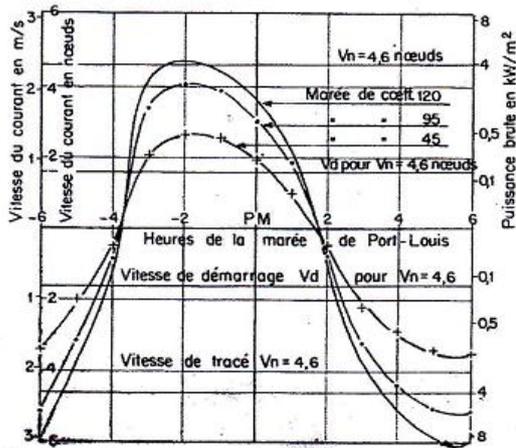


Fig. 4 - Courants de marés au "lieu"

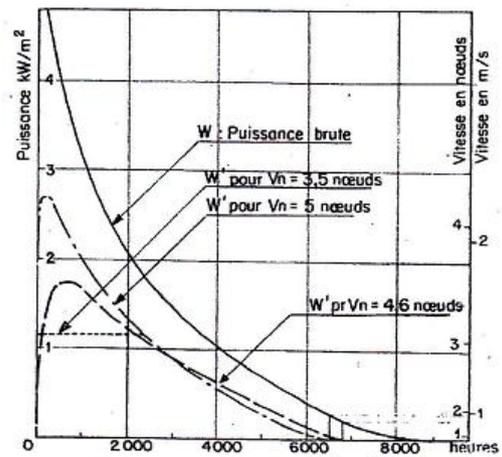


Fig. 5 - Puissances classées au "lieu"