



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8863>

#### **To cite this version :**

Sofiane DJEBARRI, Jean-Frederic CHARPENTIER, Franck SCUILLER, Mohamed BENBOUZID - Eléments comparatifs de plusieurs technologies de génératrices à aimants permanents a entrainement direct pour hydroliennes - In: Congrès SHF : «Energies Marines Renouvelables 2013», France, 2013 - Congrès SHF : «Energies Marines Renouvelables 2013» - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)



# ELEMENTS COMPARATIFS DE PLUSIEURS TECHNOLOGIES DE GENERATRICES A AIMANTS PERMANENTS A ENTRAINEMENT DIRECT POUR HYDROLIENNES

## *Comparison of several Direct-Drive PM Generators for Tidal Turbines*

Sofiane DJEBARRI<sup>1,2</sup>, Jean-Frédéric CHARPENTIER<sup>1</sup>

Franck SCULLER<sup>1</sup>, Mohamed BENBOUZID<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole Navale, EA 3634, IRENav - Brest, France - [sofiane.djebbari@ecole-navale.fr](mailto:sofiane.djebbari@ecole-navale.fr)

<sup>2</sup>Université de Brest, EA 4325 LBMS, - Rue de Kergoat, Brest, France - [Mohamed.Benbouzid@univbrest.fr](mailto:Mohamed.Benbouzid@univbrest.fr)

*Résumé : L'article présente la comparaison des dimensionnements de génératrices à entraînement direct pour des cahiers des charges d'hydroliennes. Deux types de structures magnétiques (à flux radial et à flux axial) sont étudiés. Nous considérons que ces deux structures peuvent être associées à une turbine à axe horizontal selon deux types de technologies d'intégration : POD et Rim-Driven. Dans un concept dit « Rim-Driven » la génératrice est disposée sur la périphérie des pales. Pour les technologies POD, la génératrice est logée dans une nacelle étanche placée au niveau de l'axe de l'hélice. Un point de dimensionnement nominal inspiré d'un projet d'hydrolienne préindustrielle est défini pour être utilisé, dans cette étude, pour le dimensionnement de ces génératrices. Les outils utilisés comprennent un modèle électromagnétique et un modèle thermique intégrés dans une procédure d'optimisation visant à minimiser le coût total des parties actives sous contraintes thermique et de rendement. Ces dimensionnements électromagnétiques des génératrices pour des configurations Rim-Driven et POD permettent de dégager des conclusions qualitatives sur le choix du type de génératrices et son mode d'accouplement avec l'hélice.*

*Mots-clefs : Hydrolienne, Rim-Driven, POD, Génératrices à aimants permanents*

*Abstract: The aim of the paper is to compare the design of direct-drive permanent-magnet (PM) generators associated with horizontal axis tidal turbines. The turbine/generator couplings are here examined. These turbine/generator couplings consist of a POD and Rim-driven assembly. In a Rim-Driven association the electrical generator active parts are inserted in a duct surrounding the blades. For POD generator insertion, the electrical machine is placed in a nacelle located on the turbine axis. To achieve the generators sizing, a design rated point related to an industrial MCT is defined. The used design models include an electromagnetic model which is linked to a thermal model in an optimization procedure that goals to minimize the active parts cost. Firstly, a simple side (PM) axial flux generator and a radial flux (PM) generator are designed for a rim-driven MCT specification. For these generators sizing, a comparison of the machines active parts and the machines geometrical dimensions are carried out. Secondly, radial flux (PM) generators are designed for Rim-Driven and POD coupling with the tidal turbine and a comparison is performed for this study case. Finally, the influence of the POD diameter on the generator electromagnetic design is studied. It shows that the active parts costs are minimized, when the generator diameter is around 1/3 of the turbine diameter for the considered specifications. These performed comparisons between the considered study cases aims to help designers in their technologies choices.*

*Key-words : Marine Current turbine, POD, Rim-Driven, PM Generators.*

## I INTRODUCTION

Les machines à aimants permanents à entraînement direct peuvent se révéler très intéressantes pour les applications sous marines et offshore où il est souvent très difficile d'effectuer des opérations de maintenance. Ainsi pour extraire l'énergie des courants de marées, utiliser des systèmes à entraînement direct où la génératrice est directement reliée à la turbine sans multiplicateur peut être une solution pertinente. Dans ce cas, la génératrice est entraînée à basse vitesse (typiquement en dessous de 50 tr/min pour des dispositifs de grande puissance). Ainsi, le rendement de la chaîne de conversion est amélioré et les besoins en maintenance sont minimisés [Semken, 2012]. Néanmoins, les génératrices fonctionnant à faible vitesse sont caractérisées par un très fort couple, ce qui amène à un volume élevé des parties actives (cuivre, aimant) de la génératrice.

*\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d'un soutien de la société ECA-EN*

Les projets pour l'exploitation de l'énergie des courants de marées voient l'émergence et l'étude de plusieurs solutions techniques [Block, 2012]. Ainsi, des turbines à axe horizontal [Drouen, 2010 ; OpenHydro, 2012 ; Gilson, 2011] inspirées de l'éolien, à axe vertical de type Darius ou à pales oscillantes inspirées de la biologie marine sont à l'étude [Ben Elghali, 2008]. À l'heure actuelle une grande partie de ces solutions techniques sont en phase de développement ou de tests, et la technologie de référence ne s'est pas encore clairement imposée. Le travail que nous présentons concerne la comparaison de plusieurs solutions techniques (topologies de la génératrice et le mode d'association avec la turbine) à entraînement direct pour une turbine à axe horizontal. Nous considérerons ainsi le cas d'une turbine « Rim-Driven » où la génératrice est insérée dans une tuyère à la périphérie des pales (voir Figure 1a et Figure 1b) et le cas d'une association de type « POD » où la génératrice est logée dans une nacelle reliée à l'arbre de la turbine (Figure 2b) [Atlantis, 2013], [Gilson, 2011]. Dans Certains cas la génératrice de type POD peut être évidée en son centre [Gilson, 2011]. Il est à noter que ces concepts technologiques sont développés pour les hydroliennes pré industrielles comme : OpenHydro (Figure 1b), AR-1000 d'Atlantis ressource corporation (figure 2b) et Alstom BELUGA 9 (Figure 2a) [OpenHydro, 2012 ; Gilson, 2011 ; Atlantis, 2013]. La différence majeure entre ces solutions, du point de vue dimensionnement de la génératrice, réside dans le fait que le rayon interne de la génératrice est imposé par la turbine pour le cas du Rim-Driven, alors que pour un POD, c'est le rayon externe qui est limitée par une valeur seuil afin de maintenir un bon compromis entre la performance hydrodynamique des pales et la performance électrique de la génératrice. En outre, nous considérons dans cette étude, la possibilité d'utiliser deux types de structures de machines à aimants permanents : une structure à flux axial et à flux radial. Ces structures sont dimensionnées pour un point de dimensionnement réaliste. Ce point correspond à un site dont les caractéristiques sont proches de sites choisis pour des projets industriels [Gilson, 2011]. L'objectif est, ici, de mener une comparaison et de dégager les principales tendances spécifiques par rapport à des choix technologiques.

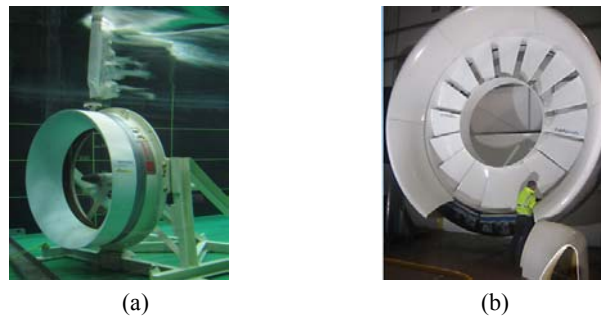


Figure 1 : Démonstrateur d'hydrolienne Rim-Driven IRENav [Drouen, 2010] (a), hydrolienne Rim-Driven OpenHydro (b) [OpenHydro, 2012],

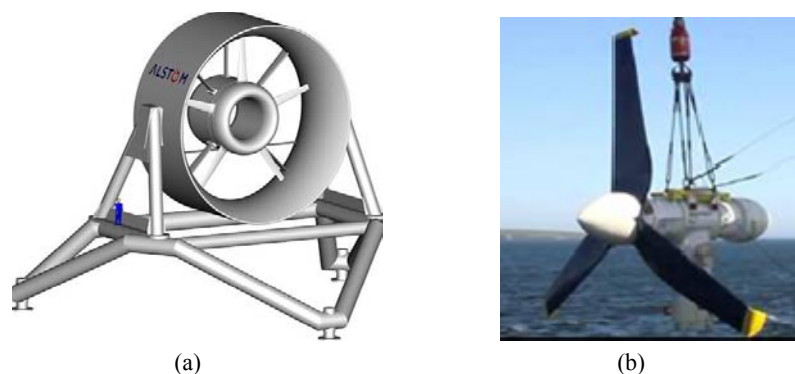


Figure 2 : Hydrolienne de type POD « BELUGA 9 » ALSTOM [Gilson, 2011] (a), hydrolienne POD « AR-1000 » d'Atlantis ressources corporation (b) [Atlantis, 2013].

## II METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT:

### II.1 Définition de la méthodologie de dimensionnement employée

La finalité de l'étude que nous présentons est de comparer et d'évaluer d'un point de vue du dimensionnement électromagnétique les performances de génératrices à aimants permanents à flux axial et à flux radial associées en Rim-Driven ou en POD avec une turbine d'hydrolienne.

*\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d'un soutien de la société ECA-EN*

La méthodologie de dimensionnement implique principalement un modèle électromagnétique et un modèle thermique qui sont couplés. Ces deux modèles principaux sont associés dans une boucle d'optimisation. Le problème d'optimisation vise à minimiser le coût des parties actives sous contraintes thermiques et de rendement. Des contraintes sur la géométrie de la génératrice sont également prises en compte lors du processus d'optimisation. Le modèle électromagnétique permet le calcul direct des dimensions géométriques et des performances de la génératrice à partir des spécifications électromagnétiques et du cahier des charges. Le modèle thermique permet de vérifier que la température de la machine n'excède pas une valeur maximale tolérable (contrainte thermique). Notons que les modèles et la méthodologie utilisés dans cette étude sont présentés et décrits en détails dans [Djebbari, 2013]. Les valeurs caractéristiques liées à la proportion de remplissage des encoches, aux types de bobinage, aux matériaux et aux conditions thermiques ambiantes sont prises identiques pour les différentes génératrices étudiées afin de mener une comparaison réaliste.

Le cahier des charges utilisé consiste à définir la vitesse de rotation nominale et la puissance nominale ( $P_n$ ,  $\Omega_n$ ) de la génératrice. Ces deux valeurs sont déterminées à partir des éléments suivants : une vitesse de courant caractéristique (liée au site), un coefficient de puissance optimal associé à un TSR optimal (caractéristique de la performance hydrodynamique de la turbine) et le diamètre de turbine. Au final, un point de dimensionnement nominal de la génératrice est défini. Ce point de dimensionnement est alors utilisé pour effectuer les dimensionnements de génératrices. Une comparaison des coûts et des masses des matériaux des parties actives est alors effectuée, ceci en fonction des différents choix technologiques que nous proposons d'étudier dans cet article. Le tableau 1 donne les prix sur le marché des matériaux actifs utilisés. Les autres spécifications utilisées pour le dimensionnement sont données dans [Djebbari, 2013b].

Tableau 1 : Prix des matériaux actifs [Asianmetal, 2013 ; Mineralprices, 2013].

Aimants (Nd-Fe-B)	115	\$/kg
Cuivre	7,8	\$/kg
Tôles à GNO standard	1	\$/kg

## II.2 Structures magnétiques étudiées

La machine à flux axial étudiée est pourvue d'un disque fixe supportant des bobinages et d'un disque mobile supportant des aimants permanents. Le flux provenant des aimants est axial, tandis que les conducteurs actifs sont orientés dans la direction radiale [Djebbari, 2011]. La deuxième structure magnétique étudiée est une machine à aimant permanents à flux radial. Cette machine est pourvue d'un stator cylindrique portant des encoches qui logent des conducteurs placés dans la direction axiale. Le rotor est constitué d'une culasse ferromagnétique sur laquelle sont collés des aimants permanents dont l'aimantation est selon la direction radiale. Ce rotor peut aussi être creux en son milieu pour les machines de grand diamètre [Gilson, 2011]. Dans notre étude, ces deux structures de machines seront associées à la turbine selon des technologies POD et Rim-Driven ce qui permet de comparer le dimensionnement électromagnétique de ces génératrices pour ces possibilités d'association.

## II.3 Site utilisé pour l'étude

Le cahier des charges que nous prenons en considération est relatif à une machine de forte puissance implantée dans un site de fort courant. Cette machine est calculée pour une vitesse nominale de courant de marée de 3,5m/s et est destinée à être associée à une turbine possédant un coefficient de puissance de 0,41 obtenu pour un TSR (Tip Speed Ratio) de 6. Ceci correspond à une vitesse de rotation de la turbine d'environ 34 tr/min et puissance de 1MW pour une turbine de 12m de diamètre. Le tableau 2 résume les principales spécifications pour ce cahier des charges :

Tableau 2 : Point de dimensionnement correspondant.

Vitesse des courants	$V_n$	3,5	m/s
Puissance nominale de la turbine	$P_n$	1000	kW
Vitesse de rotation de la turbine	$\Omega_n$	34	tr/min
Couple nominal	$C_n$	280860	Nm
Diamètre de la turbine	$D_0$	12	m

\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d'un soutien de la société ECA-EN

### III COMPARAISON DES GENERATRICES A FLUX AXIAL ET A FLUX RADIAL

Dans cette partie, nous dimensionnons une machine à aimants à flux axial à simple stator et simple rotor et une machine à aimants à flux radial pour une intégration de la génératrice en Rim-Driven.

Le tableau 3 illustre les résultats obtenus pour le dimensionnement de génératrices à flux axial et à flux radial. Ces génératrices sont dimensionnées pour le cahier des charges défini, ainsi qu'un mode d'intégration de la génératrice en Rim-Driven.

Tableau 3 : éléments comparatifs des génératrices à flux axial et à flux radial.

	Machine à flux axial	Machine à flux radial	Unité
Rayon externe de la génératrice (rayon magnétique)	6,0739	6,094	m
Rayon moyen	6,0369	-	m
Rayon d'alésage	-	6,0412	m
Rayon interne	6	6	m
Longueur active	7,39	7,75	cm
Nombre de paires de pôles	232	238	-
Rendement électrique ( $\eta_{elec}$ )	0,96	0,96	-
Proportion des pertes fer ( $P_{fe}$ )	22,17	22,87	%
Proportion des pertes Joule ( $P_j$ )	77,82	77,12	%
Température dans l'encoche	50	53,7	°C
Proportion massique des têtes de bobines par rapport à la masse totale du cuivre	63,45	61,88	%

Les figures 3a et 3b montrent une représentation à l'échelle des deux génératrices. Ceci permet de visualiser les dimensions géométriques des deux génératrices respectives. La figure 3c donne une représentation d'une section de la génératrice à flux radial dimensionnée pour un Rim-Driven.

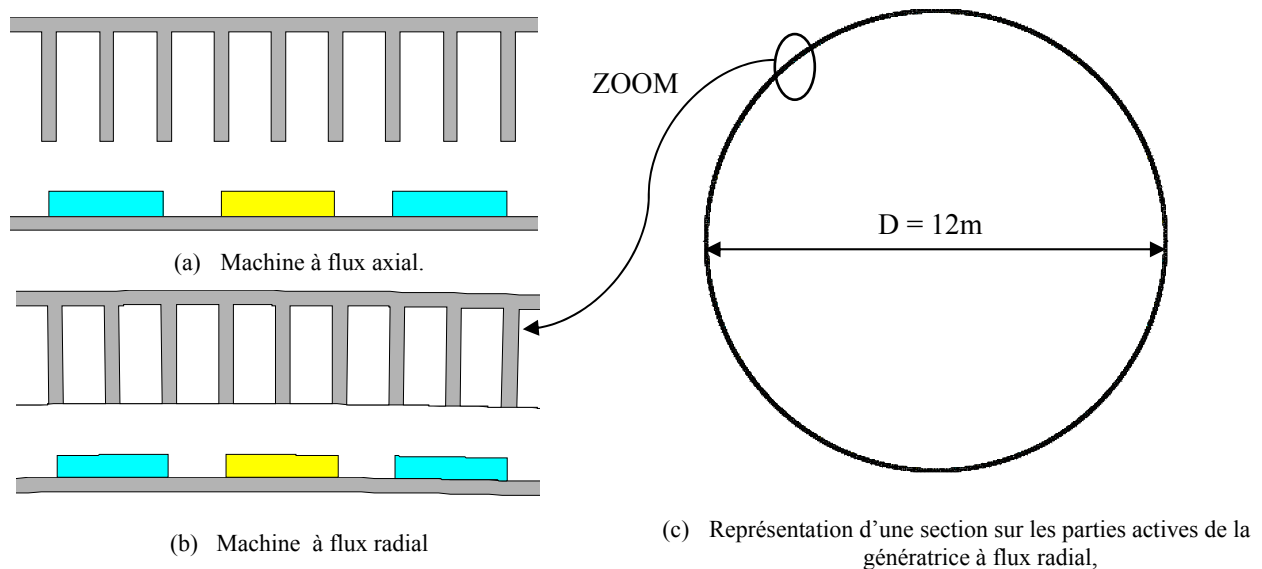


Figure 3: visualisation à l'échelle des dimensions des génératrices calculées.

Les figures 4a et 4b donnent une comparaison des coûts et des masses des parties actives des deux génératrices à flux axial et à flux radial dimensionnées pour un Rim-Driven.

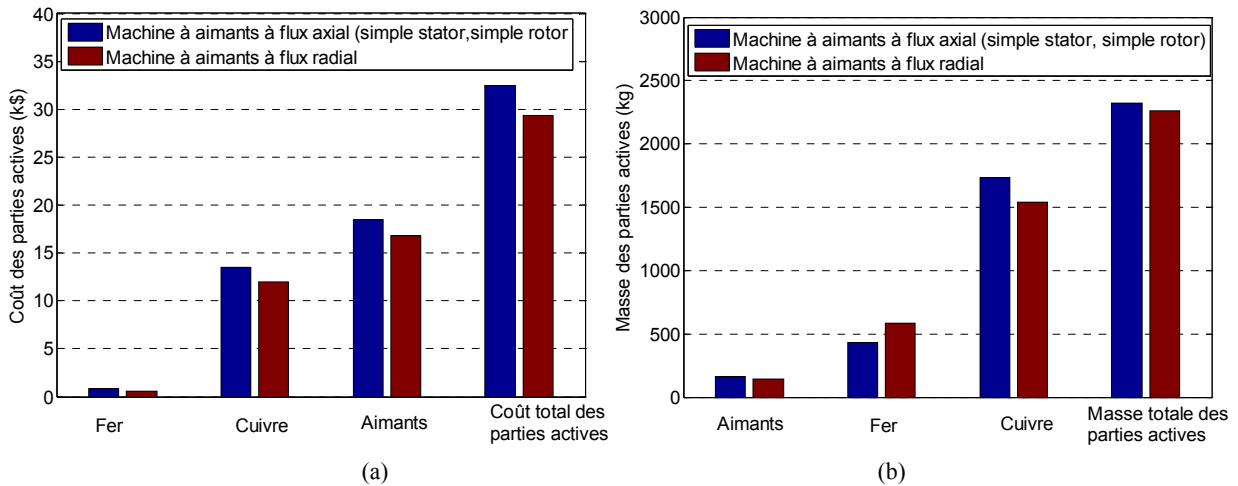


Figure 4: Comparaison des parties actives, (a) coûts des parties actives, (b) masses des parties actives.

Les deux génératrices Rim-Driven présentent des masses et des coûts des parties actives comparables et leurs dimensions géométriques restent proches (tableau 3). Dans les deux cas nous constatons les tendances suivantes : la faible longueur active conduit à une mauvaise utilisation du cuivre qui se traduit par une proportion de cuivre très importante dans les têtes de bobines (supérieure à 60% de la masse totale du cuivre de la génératrice). Les deux génératrices sont thermiquement peu contraintes (des températures d’encoches inférieures à 60°C alors que la contrainte sur la température maximale tolérable dans l’encoche a été fixée à 100°C). Ceci trouve son explication à l’immersion de la génératrice, ce qui permet un très bon refroidissement. Les deux types de génératrices étant caractérisés par des dimensions comparables, nous ne considérerons, dans la suite de cette étude, que des structures à flux radial.

#### IV COMPARAISON D’UNE GENERATRICE RIM-DRIVEN AVEC UNE GENERATRICE POD

Dans cette partie, nous allons comparer deux génératrices associées en Rim-Driven et en POD. Dans le cas d’un Rim-Driven, la génératrice est dimensionnée avec une contrainte sur son diamètre interne égale au diamètre de la turbine ( $D_i=12m$ ). Dans le cas d’une intégration de la génératrice en Rim-Driven, nous fixons une contrainte sur le diamètre externe de la génératrice égale à 1/3 du diamètre de la turbine ( $D_e=4m$ ). Les figures 5a et 5b illustrent les résultats obtenus en termes de coûts et masses des matériaux actifs pour les configurations étudiées.

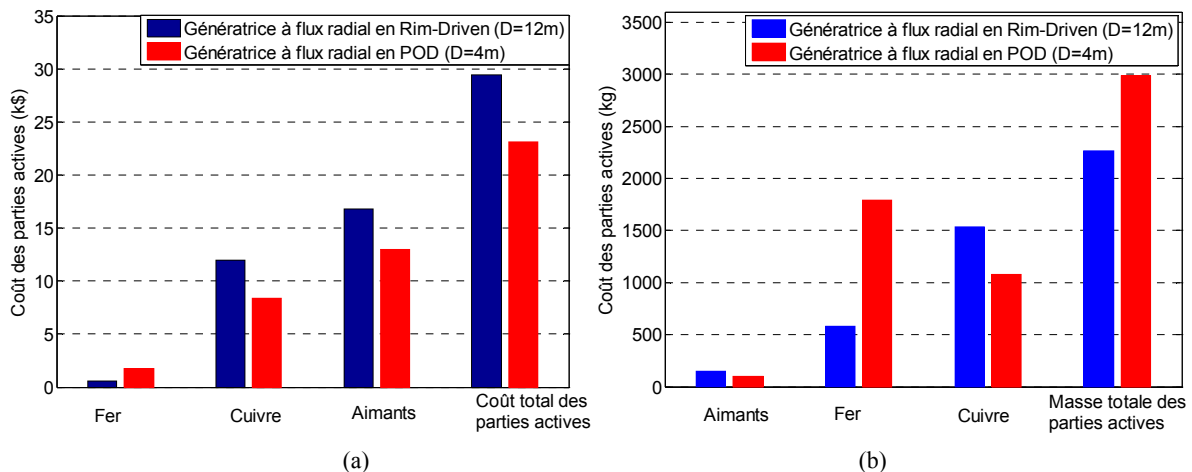


Figure 5: Comparaison des parties actives, (a) coûts des parties actives, (b) masses des parties actives pour les génératrices à flux radial dimensionnées en Rim-Driven et en POD.

Les résultats montrent que les parties actives de la génératrice POD sont moins coûteuses d’environ 20% par rapport à une génératrice Rim-Driven. Ceci s’explique par une meilleure répartition des matériaux actifs notamment le cuivre et les aimants. Cependant, la masse de la génératrice POD est supérieure d’environ 20% à celle de la génératrice Rim-Driven. Elle est due à une masse de fer de la génératrice beaucoup plus

\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d’un soutien de la société ECA-EN

importante dans le cas de la génératrice dimensionnée pour un POD. Afin de cerner l'influence de la contrainte sur le diamètre de la génératrice, nous avons effectué des dimensionnements de génératrices à flux radial, en faisant varier le diamètre extérieur de la machine entre 2m et 12m. Il est à noter qu'une valeur du diamètre de 12m correspond approximativement à une turbine « Rim-Driven » tandis que les valeurs 8 et 10m apparaissent peu réalistes d'un point de vue hydrodynamique. Les figures ci-dessous illustrent alors l'influence de cette contrainte.

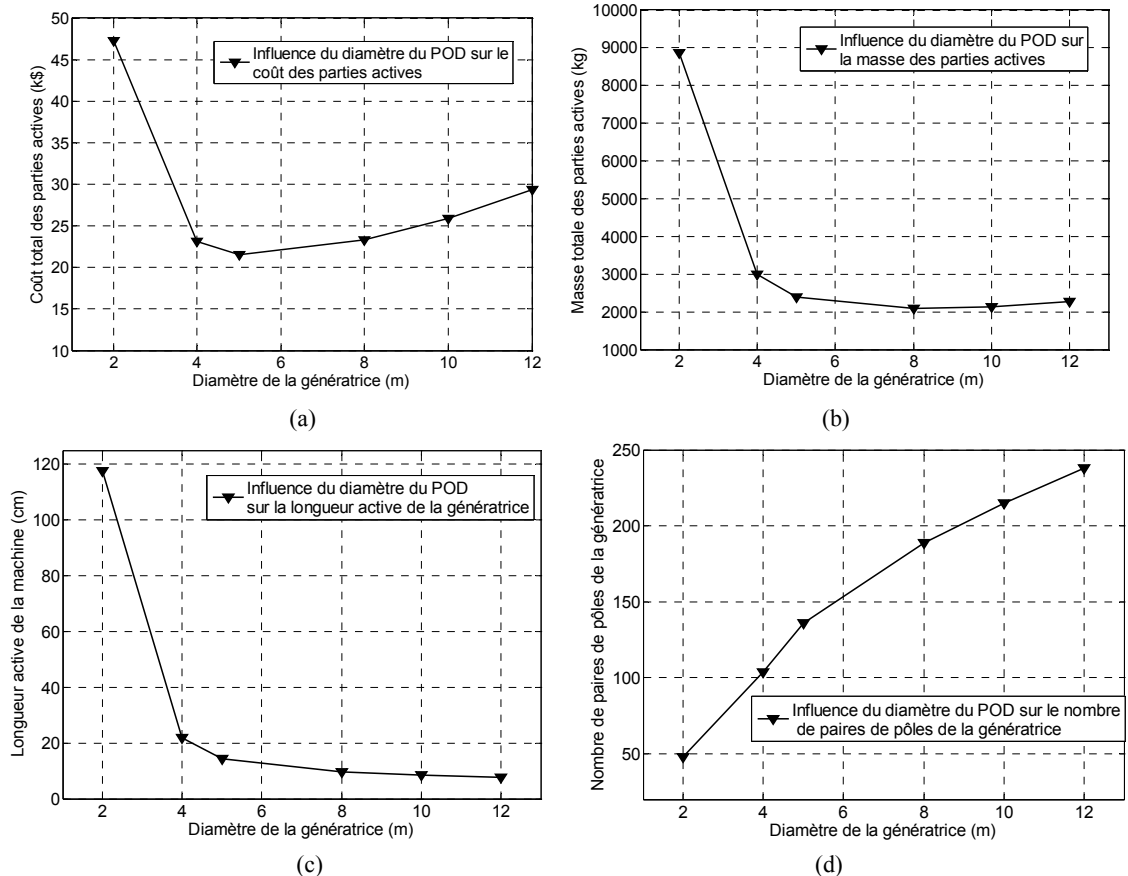


Figure 6: Influence du diamètre du POD, (a) influence sur le coût total des matériaux actifs, (b) influence sur la masse totale des matériaux actifs, (c) influence sur la longueur active de la génératrice, (d) influence sur le nombre de pôles de la génératrice.

La figure 6a donne l'évolution du coût des parties actives en fonction de la contrainte sur le diamètre extérieur de la génératrice (le diamètre extérieur de la génératrice peut se confondre avec le diamètre du POD). Elle montre clairement l'existence d'un optimum qui correspond à une minimisation du coût des parties actives. Cet optimum de la fonction coût des parties actives se situe typiquement à 1/3 du diamètre de la turbine pour les puissances et les vitesses mises en jeu.

La figure 6b met en évidence un optimum en termes de masse situé à environ 2/3 du diamètre de la turbine. De plus on constate qu'une forte contrainte sur le diamètre ( $D < 3m$ ) se traduit par une forte augmentation de la masse et du coût des parties actives.

Sur la figure 6c on constate une forte réduction de la longueur active de la génératrice lorsque le diamètre est inférieur à 1/3 du diamètre de la turbine. A partir de cette valeur la diminution de la longueur active en fonction du diamètre devient plus atténuée. Sur la figure 6d, on relève que le nombre de pôles augmente avec le diamètre. Ce phénomène est lié au respect de contraintes géométriques (facteur de forme) sur la faisabilité des encoches. Ceci explique la réduction importante de la masse des génératrices (et en particulier des culasses ferromagnétiques) lorsque le diamètre est élevé.

## V CONCLUSION

L'étude présentée concerne le dimensionnement de génératrices à aimants permanents à entraînement direct pour des cahiers des charges d'hydroliennes. Le but de cette étude est d'effectuer des comparaisons technologiques en lien avec la topologie de la génératrice et son mode d'accouplement avec la turbine. On va ainsi étudier la possibilité d'utiliser des génératrices à flux axial à simple stator et à simple rotor et des

*\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d'un soutien de la société ECA-EN*

machines à flux radial pour ces deux cahiers des charges. Deux possibilités d'intégration de la génératrice à la turbine sont également considérées : Une association de type Rim-Driven et une association de type POD. Des dimensionnements sont alors effectués pour un cahier des charges correspondant à un site de forts courants et à une turbine à axe horizontal de 12m de diamètre. Ces dimensionnements sont effectués pour optimiser le coût des parties actives sous contrainte de température et de rendement. L'étude montre tout d'abord que la machine à flux axial simple stator et simple rotor est comparable en termes de masse et coûts avec son homologue à flux radial dans le cas du Rim-Driven. L'étude se consacre ensuite à la comparaison de structures à flux radial de type POD et Rim-Driven. Si une génératrice à flux radial de type Rim-Driven apparaît comme sensiblement moins lourde, elle apparaît comme plus coûteuse en termes de matériaux actifs qu'une machine de type POD. L'étude montre également qu'il existe des valeurs du diamètre extérieur imposé à la machine qui permettent de minimiser la masse ou les coûts des parties actives de la génératrice pour ce cahier des charges.

Dans de futurs travaux, ce travail pourrait être complété par l'étude, pour ce cahier des charges, de génératrices à flux axial poly-entrefer, qui pourraient présenter des compromis différents en termes de masses et de coûts des parties actives. Le travail pourrait également tenir compte d'un cycle complet de fonctionnement de l'hydrolienne et d'une stratégie de limitation de puissance. Cela permettra sans doute de définir un dimensionnement minimisant le coût de l'énergie produite.

## VI REFERENCES

Asianmetal (2013), site internet - [www.asianmetal.com](http://www.asianmetal.com) (consulté en Mars).

Atlantis resource corporation, site web - <http://www.atlantisresourcescorporation.com>, consulté en Janvier, 2013.

Ben Elghali S.E, Drouen L, Benbouzid M.E.H, Charpentier J.F, Astolfi J.A, F. Hauville (2008) - *Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marées*, revue 3EI, n° 52, pp, 73-85.

Block E (2012),-Tidal power: an update, Renewable Energy Focus, Volume: 13, Issue 5, Pages 20-22.

Djebbari S., Charpentier J.F., Scuiller F., Benbouzid M.E.H (2013) - *Génératrice à aimants permanents à flux axial à grand diamètre avec entrefer immergé -Eléments de conception et analyse des performances pour un cahier des charges d'hydrolienne*, European Journal of Electrical Engineering, Volume 16-N°2/2013.

Djebbari S (2013b), *Comparaison des Masses et des Coûts des Parties Actives de Génératrices à Aimants Permanents pour des Cahier des Charges d'Hydroliennes POD et Rim-Driven*, in Proceedings of the JCGE 2013, Saint-Nazaire, 5 et 6 Juin 2013, 9p.

Djebbari S, Charpentier J. F, Scuiller F, Benbouzid M.E.H, Guemard S (2012) - *Rough Design of a Double-Stator Axial Flux Permanent Magnet Generator for a Rim-Driven Marine Current Turbine*, in Proceedings of the ISIE'2012, Hangzhou (China).

Djebbari S (2013), Charpentier J.F, Benbouzid M.E.H, Guemard S. (2011) - *Pré Dimensionnement d'une Machine à flux Axial à Double Stator pour un Cahier des Charges d'une Hydrolienne à Entraînement Circonférentiel*, Electrotechnique du Futur, EF2011, Belfort, 13 et 14 décembre 2011, 9p.

Drouen L (2010),-*Machines électriques intégrées à des hélices marines, contribution à une modélisation et conception multi-physique*, Thèse de Doctorat ARTS ET METIERS ParisTech.

Gilson P (2011) - *Alstom's Tidal in Stream Energy Converter Demonstration Project*, WREC 2011, Bali.

Mineralprices (2013), site internet - [www.mineralprices.com](http://www.mineralprices.com), (consulté en Mars).

OpenHydro (2013), site web, "<http://www.openhydro.com>", consulté en Janvier.

Rapport Dossier de Presse EDF (2009) - *Projet EDF Hydroliennes: site de Paimpol-Bréhat, point d'avancement du projet*.

Semken R.S, Polikarpova M, Roytta P, Alexandrova J, Pyrhonen J, Nerg J, Mikkola A, J. Backman (2012),- *Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: Benefits and limiting factors*, IET Renewable Power Generation, volume: 6, n°1, pp. 1-8.

\*Ces travaux sont financés par la Marine Nationale et bénéficient d'un soutien de la société ECA-EN