

Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marées.

S.E. Ben Elghali, L. Drouen, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, J. A. Astolfi, F. Hauville

Abstract—Le potentiel mondial de génération d'énergie électrique par la récupération des courants de marée est très important. L'Europe occidentale et la France en particulier possèdent près de leurs côtes de nombreux sites exploitables. Ce type d'énergie renouvelable est donc amené à se développer fortement dans la prochaine décennie. Cette ressource est caractérisée par un fort potentiel énergétique lié à la forte densité de l'eau et à la vitesse des courants, par une grande prédictibilité liée à l'origine astronomique du phénomène de marée et par de faibles impacts environnementaux. Ceci rend cette énergie renouvelable particulièrement attractive dans le contexte actuel du développement de la production d'énergie électrique renouvelable. Ces dernières années un certain nombre de projets pour montrer la faisabilité de solutions technologiques pour exploiter cette ressource ont été mis en place. Cet article présente un état de l'art des concepts proposés par les principaux projets à travers le monde. La présentation s'intéresse en particulier aux technologies de capteurs et à leurs implications sur les systèmes de conversion électromécanique ainsi qu'aux technologies émergentes inspirées des développements récents dans le domaine de la propulsion navale.

I. INTRODUCTION

Les océans couvrent plus de 70% de la surface de la planète et mettent en jeu des énergies considérables qui constituent un important potentiel de production d'énergie. Il est par exemple possible de récupérer de l'énergie grâce aux différences de températures entre le fond de l'océan et la surface dans certaines zones tropicales ou grâce aux différences de salinité entre différentes masses d'eau. Il est également possible de récupérer une partie de l'énergie cinétique liée aux mouvements des masses océaniques à différentes échelles (courants marins et vagues). La biomasse océanique présente également un fort potentiel énergétique à exploiter. Un certain nombre de concepts pour exploiter ces différentes ressources ont été proposés au cours des dernières années et un certain nombre de démonstrateurs ont ainsi vu le jour.

Ainsi, il est possible d'extraire l'énergie thermique des océans dans les zones tropicales qui présentent d'importantes différences de température entre différents points de la masse d'eau. Les solutions technologiques proposées reposent sur l'utilisation de machines thermiques exploitant des cycles thermodynamiques. Les gradients de salinité peuvent, également être exploités par le biais de processus osmotiques. Cependant, les développements de l'exploitation de ces deux dernières ressources sont pour l'instant limités par des considérations de rentabilité économique liées à des limitations technologiques [1-3]. La culture de la biomasse marine peut quand à elle conduire à la production de carburants d'origine végétale susceptibles d'alimenter par

exemple des piles à combustible pour produire de l'énergie électrique.

Mettre au point un système efficace pour récupérer l'énergie des vagues est toujours à l'heure actuelle un défi technique et un certain nombre de concepts originaux ont été proposés pour exploiter cette ressource.

Les éoliennes offshore dont la technologie est actuellement mûre sont en cours de développement à grande échelle.

Il semble évident que seule une faible part du potentiel global des énergies renouvelables marines peut être exploité dans des conditions de rentabilité économique. Cette exploitation réaliste correspond, en fait, à un certain nombre de sites particuliers où il est possible d'extraire une quantité significative d'énergie et de l'acheminer vers un réseau de transport d'énergie en utilisant les technologies disponibles relativement bon marché. Malgré ces restrictions liées à des critères de rentabilité économique, la contribution potentielle des énergies renouvelables marines à la production d'énergie électrique pour certaines régions du monde reste tout de même considérable.

Parmi ces énergies marines, L'énergie cinétique présente dans les courants marins qu'ils soient liés au phénomène des marées ou aux grands mouvements de circulation océanique comme le *gulf-stream*, représente un potentiel important. Cette énergie peut être extraite en utilisant des turbines relativement « conventionnelles ». C'est la raison pour laquelle la recherche et le développement de concepts efficaces pour récupérer ces énergies représentent un enjeu majeur pour un grand nombre de chercheurs et d'industriel à travers le monde [4,5]. Les côtes de l'Europe occidentale présentent par exemple de nombreux sites où l'intensité des phénomènes liés aux courants marins ainsi que la proximité d'un réseau de transport d'énergie rendent possible une production rentable d'électricité. La ressource potentielle relative aux courants de marée est considérable. Elle est estimée à 24 TWh/an pour l'Europe occidentale dont 48 % en Grande Bretagne, 42 % en France et 8 % en Irlande [6].

Il y a deux possibilités pour exploiter les déplacements de masses d'eau créés par les marées. La première consiste à installer un barrage sur une baie ou un estuaire où le marnage est considérable (usine marémotrice). La seconde consiste à récupérer directement l'énergie cinétique des courants générés par le phénomène de marée (hydrolienne).

Le principe d'une usine marémotrice est très proche de celui d'une installation hydroélectrique classique. Les particularités les plus notables sont que le flux d'eau se produit au cours d'un cycle de marée consécutivement dans les deux directions et que les turbines et les générateurs

doivent donc être conçus pour pouvoir assurer un fonctionnement dans les deux sens. D'autres contraintes spécifiques sont liées à l'immersion de la turbine dans un milieu salin plus agressif que l'eau douce des cours d'eau. De manière simplifiée on installe un barrage à travers une baie ou un estuaire. Lors du flot la mer monte à un niveau supérieur à celui de l'eau située dans le bassin en amont du barrage. Il est alors possible de turbiner l'eau de mer en remplissant le bassin. Lors du jusant, la mer se retire et la surface de la mer descend alors en dessous du niveau de l'eau stockée dans le bassin ce qui rend possible de turbiner l'eau de mer lors de la vidange du bassin (Fig.1).

La plus importante installation marémotrice au monde est l'usine qui barre l'estuaire de la Rance en France (Fig. 2) avec une puissance installée de 240 MW . La partie close de l'estuaire a une surface de 22 km^2 . Le marnage sur ce site exceptionnel peut atteindre plus de 13 m lors des marées d'équinoxe. L'installation comprend 24 groupes turbines-générateurs de type bulbe de 10 MW chacun qui peuvent fonctionner selon les deux direction de flux [7,8]. L'usine installée sur la rivière Annapolis au Canada a quand à elle une puissance de 20 MW . Les turbines utilisées dans ce système présentent la particularité d'intégrer le générateur électrique à la circonférence des aubes (ou pales) de la turbine [6].

Ce type d'installation présente des désavantages majeurs. Tout d'abord seuls un très petit nombre de sites dans le monde possèdent des marnages suffisants pour être économiquement intéressants. D'autre part, l'installation de barrages de grande ampleur à travers des baies ou des estuaires a des conséquences significatives sur l'écosystème et génère des conflits d'usage avec les usagers de la mer. Pour ces raisons dans la dernière décennie les efforts des chercheurs et des ingénieurs se sont portés sur des systèmes permettant de prélever directement l'énergie cinétique des courants de marées. Ces systèmes basés sur des turbines en eau libre peuvent être implantés dans plus de sites. La ressource a donc un très fort potentiel énergétique [1], [9-15]. Ce type de système a de plus beaucoup moins d'impact sur l'écosystème et les autres usagers de la mer [5].

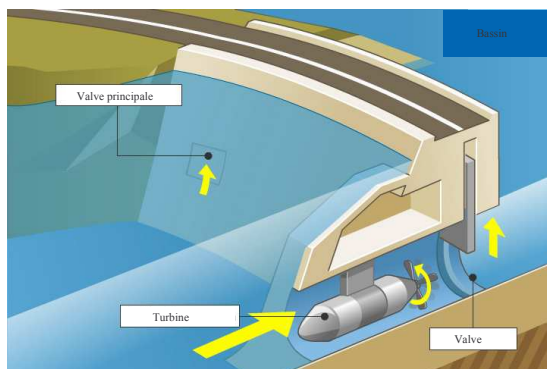


Fig. 1. Système marémoteur utilisant un groupe bulbe.



Fig. 2. Vue générale de l'usine marémotrice de la Rance [6].

Beaucoup de zones côtières dans le monde sont le siège de très forts courants de marées. La figure 3 montre 3 exemples de ce type de site en France. Le raz Blanchard en Normandie, le chenal du Fromveur ainsi que le raz de Sein à l'ouest de la Bretagne sont des sites où les courants peuvent atteindre plus de 8 nœuds et ont donc un très fort potentiel. Cet article a pour but de faire le point sur les concepts fondamentaux concernant l'extraction de cette énergie et d'établir un état de l'art des différentes technologies associées aux principaux projets à travers le monde. Nous analyserons également les caractéristiques des principaux systèmes de conversions électromécaniques pouvant être utilisés pour ce type d'application et nous discuterons des possibilités ouvertes par l'apparition de nouvelles technologies dérivées des systèmes éoliens ou des systèmes de propulsion navale.

II. GENERALITES ET CONTEXTE

Les espoirs que font naître les projets sur l'énergie renouvelable des courants de marées sont à la hauteur des avantages que l'on peut prêter à cette ressource : Le milieu contient en effet une forte densité d'énergie car l'eau est environ 800 fois plus dense que l'air, la nature du phénomène est astronomique et est donc prédictible et peu influencée par les phénomènes météorologiques. La vitesse du courant et donc l'énergie disponible sur un site peuvent être calculées heures par heures et minutes par minutes plusieurs années en avance. Les phénomènes tels que le vent ou la houle n'occasionnent que des fluctuations de second ordre si la hauteur d'eau sur l'hydrolienne est conséquente. Le courant de marée est donc globalement indépendant des phénomènes comme le vent, le brouillard ou les nuages dont dépendent les autres sources d'énergie renouvelables. Ce caractère prédictible représente un avantage décisif pour une intégration réussie dans un réseau de transport d'énergie [9].

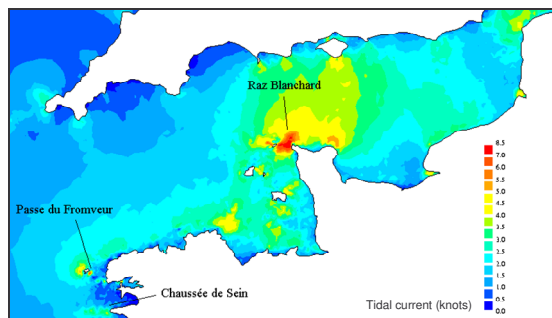


Fig. 3. Sites potentiels sur la cote occidentale française : le raz Blanchard, Le raz de Sein, et la passe du Fromveur.

A. Caractéristiques de la ressource énergétique

Les courants marins exploitables sont principalement créés par le phénomène des marées et à une moindre échelle par des phénomènes liés à des différences de densité ou de température au sein des masses d'eau. La marée provoque le mouvement de grande quantité d'eau vers le large (jusant) ou vers les cotes (flot) avec une périodicité principale d'une demi journée (cycle semi-diurne de 12 heures et 24 minutes) ou d'une journée (cycle diurne de 24 heures et 48 minutes) selon les sites. Dans la plupart des sites le phénomène est une combinaison de ces 2 cycles majeurs. L'amplitude des marées et des courants qu'elles génèrent dépendent de la position de la lune et du soleil par rapport à la terre. L'influence en terme de force d'attraction de la lune est d'environ 68 % contre 32 % pour le soleil. Dans les endroits où le cycle semi-diurne est prépondérant les maxima d'amplitudes de courants correspondent à la nouvelle et à la pleine lune (Lors de ces marées dites de « vives eaux », le soleil et la lune sont alors pratiquement alignés à la terre et conjuguent leurs effets). Les minima d'amplitudes se produisent lors du 1^{er} et du 3^{ème} quartier (marées dites de « mortes eaux » où les effets du soleil et de la lune se compensent partiellement). A des endroits où le cycle principal est un cycle diurne, l'amplitude des marées dépend de la déclinaison de la lune (hauteur de l'astre par rapport à l'équateur), les plus fortes marées correspondent alors à des grandes déclinaisons et les plus faibles à des déclinaisons nulles. Ces variations en termes d'amplitude correspondent à des périodicités de 2 semaines, un an, et à des périodes plus longues. Ces amplitudes sont entièrement prédictible plusieurs mois voire plusieurs années à l'avance [6], [16].

Les caractéristiques de la ressource sont généralement calculées à partir de bases de données océanographiques avec un maillage géographique de résolution donnée. Pour chacune des mailles d'espace, il est possible de disposer des principales données suivantes : vitesse en fonction de l'heure pour les marée de vives eaux, profondeur, houle centennale et moyenne, distance de la cote. Les 2 premières données permettent de reconstituer facilement la vitesse probable du courant en fonction de la date et de l'heure. Les autres données donnent des indications précieuses sur les contraintes liées à l'exploitation du site et sur les caractéristiques des perturbations possibles [12], [17-18]. Pour illustrer l'exploitation de ce type de données, l'évolution théorique de

la valeur des courants de marées dans le Raz de Sein pour l'année 2007 et pour mars 2007 est donnée à la figure 4.

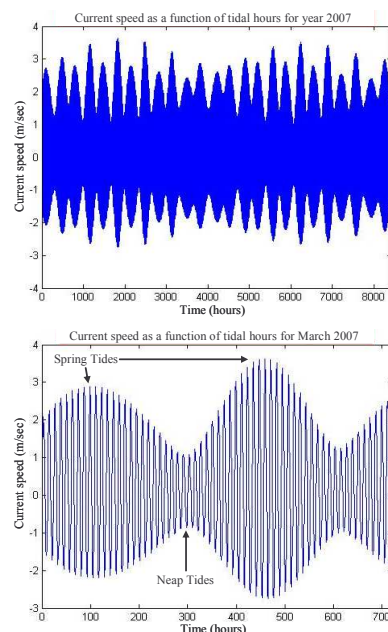


Fig. 4. Évolution théorique de la valeur des courants de marées dans le Raz de Sein (France) pour l'année 2007 et pour mars 2007.

B. Considérations sur l'extraction de l'énergie cinétique des courants

L'expression de la puissance théoriquement disponible sur une turbine marine est similaire à celle obtenue pour une éolienne et est donnée par l'équation suivante [6], [19-20].

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

où ρ est la densité du fluide, A est la section de la turbine et V la vitesse du fluide. Comme dans le cas de l'éolien, seule une fraction de cette puissance théorique disponible peut être réellement extraite par le système de conversion. De ce fait on introduit dans l'équation (1) un coefficient C_p (coefficient de puissance) inférieur à 1 qui représente le pourcentage de puissance pouvant être extrait par la turbine (ce coefficient de puissance prend en compte les limitations du capteur, les pertes dans la chaîne de conversion (transmission, générateur, électronique...)).

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \quad (2)$$

Pour les aérogénérateurs, les valeurs typiques de C_p sont de comprises entre 0,25 et 0,3 pour les points de fonctionnement nominaux. Pour les turbines marines il est possible d'espérer des C_p compris entre 0,35 et 0,5 [21].

Un élément important pour une comparaison entre l'éolien et les systèmes de récupération des courants marin est la taille des machines à utiliser. En effet, si l'on calcule, avec l'équation (2) la section, A , nécessaire pour récupérer une même puissance en utilisant des valeurs typiques de vitesse

de courants et en tenant compte de la densité de l'eau qui est environ 800 fois plus dense que l'air, il apparaît que les hydroliennes seront significativement plus compactes que des éoliennes de même puissance. Ce point est particulièrement important car il signifie pour des machines de grande puissance une diminution significative des coûts de fabrication et d'installation. La figure 5 illustre ce résultat par une comparaison de 2 turbines de 1 MW. Le diamètre de la turbine éolienne est alors d'environ 55 m contre environ 18 m pour la turbine marine.

De manière générale, les machines utilisées pour récupérer l'énergie des courants de marées seront d'une part beaucoup plus compactes que les aérogénérateurs et seront d'autre part capables de produire une puissance pouvant être prévue à l'avance et donc plus facilement exploitable au sein d'un réseau de transport d'énergie [20], [22].

III. TECHNOLOGIES ET CONCEPTS DE TURBINES

Récupérer l'énergie des courants marins suppose de convertir l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement pour la transformer en un mouvement mécanique susceptible, par exemple, d'entraîner un générateur électrique. Ceci explique que de nombreux concepts parmi ceux qui sont proposés à l'heure actuels sont très proches des technologies éoliennes qui correspondent au même type de conversion électromécanique. De manière générale la plupart des systèmes proposés correspondent à 3 types principaux [23]. Ces 3 grandes familles de systèmes sont décrites à la figure 6 :

- Les systèmes de turbines à rotor à axe horizontal comme ceux installés dans le chenal de Bristol entre le pays de Galles et l'Angleterre ou près d'Hammerfest en Norvège [24,25] Dans ces systèmes l'axe de la turbine est dans le sens du courant.
- Les systèmes de turbines à rotor à axe perpendiculaire au courant (technologies proches des turbines Darrieus) comme le dispositif qui a été implanté expérimentalement dans le détroit de Messine entre l'Italie et la Sicile [26].
- Des systèmes basées sur des profils oscillant (turbines à battement caudal) dans le sens du courant tels que ceux installés dans le nord de l'écosse [27].

Dans la suite de l'article nous nous attacherons à présenter une vue d'ensemble des projets majeurs utilisant un de ces 3 concepts fondamentaux



Fig. 5. Comparaison à puissance égale entre une éolienne et une hydrolienne[© MCT].

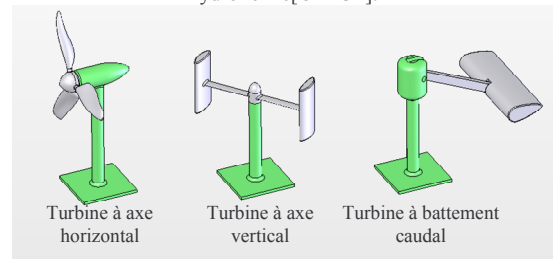


Fig. 6. Concepts fondamentaux de turbines hydroliennes.

A. Projets basés sur l'utilisation de turbines à axe horizontal

1) Le projet SEAFLOW/SEAGEN de la société Marine Current Turbine (MCT) au Royaume Uni [24].

La société « Marine Current Turbine » (MCT) a testé un prototype d'hydrolienne nommé « Seaflo » basé sur un système de turbine à axe horizontal dans le Nord du Devon à approximativement 1,1 km de la côte et 25 m de profondeur. Le diamètre de l'hélice dont la conception est assez proche d'une turbine éolienne classique est de 11 m. Un contrôle de pas est utilisé pour la régulation de puissance. Le générateur est constitué d'une machine asynchrone à cage associée à un convertisseur 4 quadrants à IGBT. La figure 7 présente des vues de cette turbine *Seaflo*. La puissance nominale développée par ce système est de 300 kW crête dans des conditions optimales de courant de marée. La turbine tourne alors à 15 tr/min. Cette installation expérimentale n'est pas connectée au réseau mais débite sur une charge résistive réglable. La machine est montée sur une pile plantée dans le sol marin dépassant de la surface de la mer. L'ensemble constitué de la génératrice et de la turbine peut ainsi s'élever le long de cette colonne jusqu'à la surface ce qui permet un accès par bateau facilité pour les opérations de maintenance. Accéder et opérer sur un système sous-marin dans des conditions de forts courants et souvent dans des conditions météorologiques défavorables est en effet très difficile voire impossible.

La seconde phase du projet est d'étendre ce concept à un ensemble de turbines/générateurs jumeaux fonctionnant en contre rotation d'environ 500 kW sur la même pile chacune ce qui amènerait la puissance totale du système autour d'1 MW (Fig. 8a).

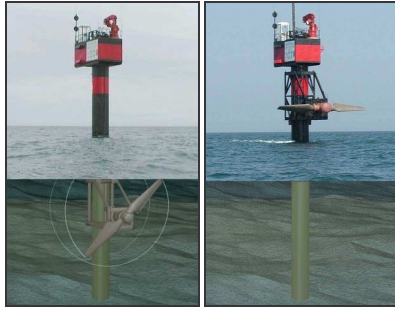
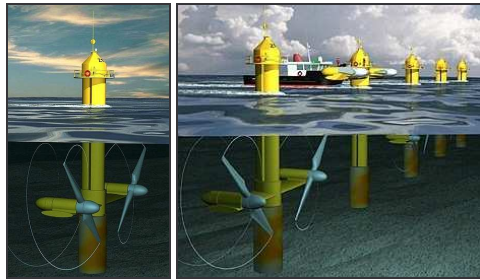


Fig. 7. Turbine seaflow en position immergée et émergée [© MCT].



(a) turbine Seagen. (b) ferme de turbines Seagen.

Fig. 8. Vue d'artiste de turbines Seagen [© MCT].

Un système Seagen pourrait ainsi produire environ 3 fois plus que le prototype Seaflow. Ces systèmes pourraient avoir un diamètre d'environ 15 m et être associés en une ferme de plusieurs machines pour atteindre des puissances de production de l'ordre de 5 MW (Fig. 8b).

2) Le projet E-Tide (Norvège) [25].

La société Hammerfest Strøm a développé un projet appelé *Blue ou E-Tide Concept* à Kvalsund au nord de la norvège en 2003. Le système, constitué d'une turbine contra rotative est fixée au sol. Cette turbine peut opérer dans les 2 sens de rotations par inversion du pas de l'hélice (Fig. 9). Un système de 300 kW a été testé, et comme pour le projet « Seagen », un système de l'ordre du MW a été dimensionné pour ce même site d'essai. La turbine a un diamètre d'environ 15 m .

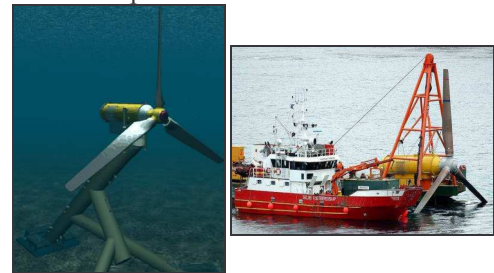
3) Le projet Tidal Stream Energy (Royaume Uni) [28].

La figure 10 est une illustration du projet anglais « tidal stream ». Le projet a été étudié pour être implanté sur le site de pentland firth situé entre le nord de l'écosse et les îles Orkney [18]. Ce site étant de « faible » profondeur et avec un grand marnage, la première option choisie (Fig. 10a) serait d'équiper le système de 2 turbines de 20 m de diamètre développant une puissance nominale entre 1 et 2 MW . Le système fonctionne entre 30 et 50 m de profondeur et flotte entre deux eaux grâce à un bras articulé fixé au sol par une rotule à un corps mort. Le bras est associé à une base flottante à son extrémité haute. Ce système permet le déplacement des turbines dans les 3 directions. On peut également noter que ce bras articulé permet de remonter le système pour les opérations de maintenance et d'installation. Une évolution actuelle de ce projet consiste à fonctionner avec 4 turbines au lieu de deux pour diminuer les charges hydrodynamiques sur les pales. Ceci conduit à un ensemble pouvant développer une puissance totale proche de 4

MW . Le système a été testé en rivière à échelle réduite (rotor de $1,5\text{ m}$ de diamètre) avec succès

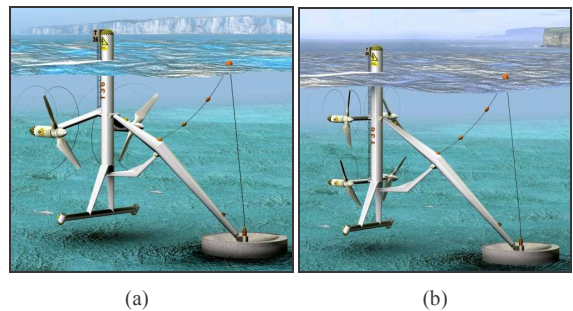
4) Le projet "Tidel" de la société SMD Hydrovision(GB) [29].

Le concept à la base du projet Tidel propose d'associer 2 turbines de 500 kW montées sur une poutre horizontale (Fig. 11). Le système flotte entre 2 eaux et est amarré au sol par des chaînes qui permettent un alignement de la turbine dans la direction du courant sans aucune intervention. Le système semble facile à implanter dans un grand nombre de sites côtiers car il ne nécessite pas de mettre en place de structures importantes. Chacune des turbines composée d'une hélice à pas fixe de 15 m de diamètre est associée à un multiplicateur et un générateur disposé dans une nacelle.



(a) turbine E-tide. (b) Installation.

Fig. 9. Le système Blue ou E-Tide [© Strøm AS].



(a) (b)

Fig. 10. Le projet Tidal Stream [© Tidal Stream].

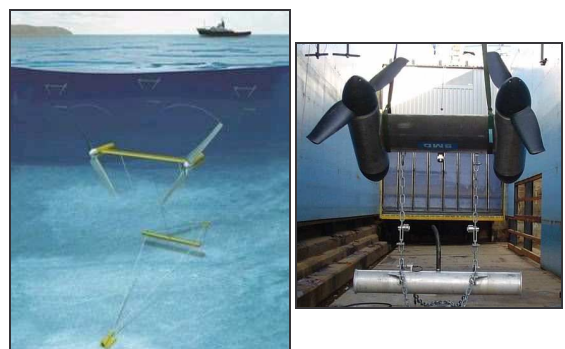


Fig. 11. Illustration et vue du prototype du projet de turbine TidEL [© SMD Hydrovision].

Ces systèmes de 1 MW ont été conçus pour être disposés dans des sites offshore d'une profondeur supérieure à 30 m où la vitesse du courant atteint 5 noeuds (environ $2,5\text{ m/s}$)

5) Le projet Lunar Energy (GB) [30].

Ce projet utilise une turbine carénée sous tuyère fixée au sol par un socle pesant. La tuyère permet de récupérer de

l'énergie sur une plus grande surface que celle de la turbine et d'accélérer le courant. Ceci permet d'utiliser une turbine plus compacte pour une même puissance extraite. Le principe du système proposé par Lunar Energy est d'utiliser une turbine à pales symétrique qui entraîne un générateur situé au dessus de la carène par une transmission hydraulique. L'ensemble turbine/transmission/générateur est amovible et peut être extrait par un jeu de câble situé sur la tuyère pour des opérations de maintenance. Le système de turbine et de tuyère « lunar energy » doit permettre d'extraire de l'énergie dans les 2 directions de courants même si le courant n'est pas orientée dans l'axe exact de la turbine (il est possible d'extraire de l'énergie dans un secteur angulaire de $\pm 40^\circ$ autour de l'axe) sans nécessiter un complexe et coûteux contrôle d'orientation de la turbine. Un modèle au 1/20^{ème} a été testé en 2004 et l'installation d'un système de 1 MW est attendue dans les prochain mois.

6) Le projet Hydrohelix (France)[31]

Le but de ce projet est de développer des turbines à pales symétrique à pas fixe de 200 kW sous tuyère (Fig. 13a) et de les associer pour former des unités de production de 1 MW (Fig. 13b). Un prototype de 10 kW nommé "Sabella" doit être installé aux environs de Benodet en avril 2008. Comme dans le cas précédent, l'utilisation d'une turbine carénée permet l'augmentation des performances hydrodynamiques et la protection des pales par une couronne extérieure.

Tous ces projets ont en commun un certain nombre de caractéristique. La turbine tourne à des vitesses très faible (10 à 20 tr/min) ce qui impose des couples très élevés pour une puissance donnée.

B. Turbines à axe perpendiculaire au courant

La plupart des turbines à axe perpendiculaire au courant sont des turbines à axe vertical très proches dans leur principe de la turbine de type Darrieus utilisée en éolien avec une base au sol. Ce type de turbine est un système où le fluide traverse la section de la turbine perpendiculairement à son axe de rotation. Ces systèmes permettent d'extraire l'énergie venant de toutes les directions de flux possibles sans aucune reconfiguration de la turbine. Il est ainsi possible d'exploiter l'ensemble de l' "ellipse de courant" d'un site [32]. Pour des applications marines il est possible d'utiliser ce type de systèmes pour transmettre le mouvement de rotation de la turbine directement à une plate-forme flottante à la surface sans lui associer de complexes transmission mécaniques ou des nacelles sous marines. Cependant, la proximité de la turbine de la surface entraîne une plus grande variabilité de la ressource dus au vent et à la houle et les mouvements de plate-forme liés à ces phénomènes perturbent le fonctionnement de la turbine. Comme les turbines à axe horizontal les vitesses de rotations de ce type de turbines sont très faibles (autour de 15 tr/min).

1) Le projet Enemarr (Italy) [26].

Ce projet repose sur l'utilisation de la turbine Kobold (Fig. 14a). Cette turbine possède un couple de démarrage très important qui lui permet de démarrer sans assistance particulière. Une installation pilote a été testée dans le détroit

de Messine près de la cote Sicilienne dans un courant nominal de 2 m/s (Fig. 14b). Le système testé peut produire 20 kW pour une vitesse de courant de 1,8 m/s

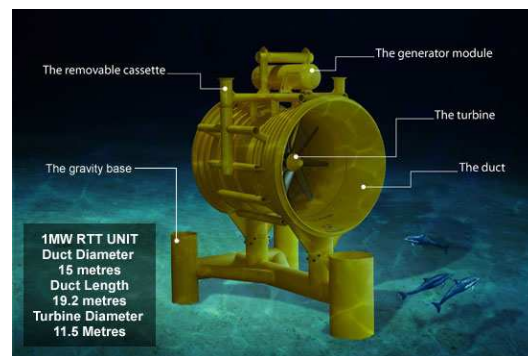


Fig. 12. Le système Lunar Energy [© Lunar Energy].

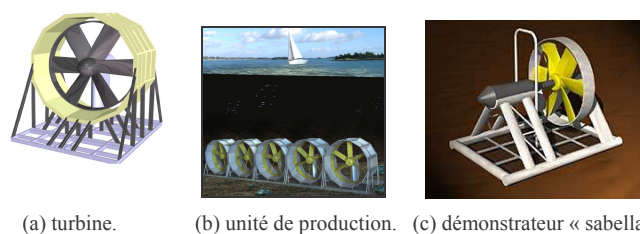


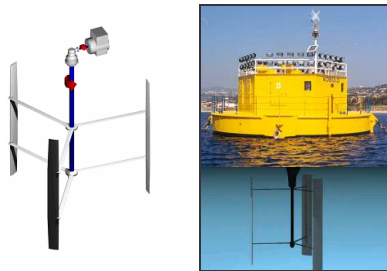
Fig. 13. Le projet Hydrohelix [© HydroHelix Energies].

2) Le projet Blue Energy (Canada) [33].

Le système est constitué de rotors à 4 pales fixes qui entraînent un multiplicateur associé à une génératrice. L'ensemble est monté dans un robuste caisson flottant caréné de manière à accélérer le flux de courant. Le système est amarré au fond de l'océan. Le générateur et le multiplicateur se situent au dessus du caisson et donc au dessus de la surface ce qui permet une maintenance aisée. Les pales présentent un profil spécifique qui permet, d'une part, à la turbine d'avoir une vitesse périphérique plus importante que la vitesse du fluide, et d'autre part, que le sens rotation de la turbine soit identique pour toutes les directions de courant. Chaque unité est prévue pour une puissance nominale de 200 kW. Plusieurs de ces Unités peuvent être mises à couple afin de créer un barrage flottant perpendiculaire au courant avec une grande capacité de production. Un prototype a été testé dans les installations de l'université de Colombie britannique.

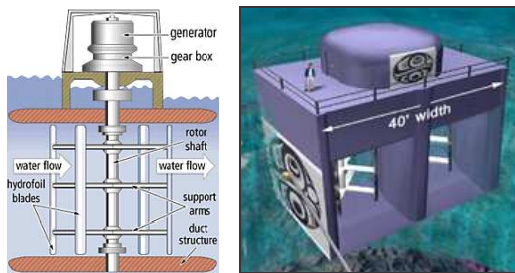
2) La Turbine de type Gorlov(USA) [34,35] et Achard[36].

La turbine hélicoïdale Gorlov (GHT) est formée de plusieurs pales hélicoïdales assemblées dans une cage d'écureuil. Comme dans le projet précédent les pales dont les profils sont inspirés de profils d'ailes ont une vitesse périphérique plus importante que la vitesse du courant et tournent dans la même direction quelque soit l'orientation du courant



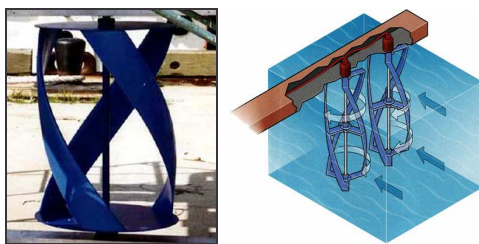
(a) Turbine Kobold. (b) Base flottante.

Fig. 14. Le projet Enermar [© Ponte di Archimede].



(a) Blue Energy turbine. (b) Turbine platform.

Fig. 15. Le projet Blue Energy [© Blue Energy].



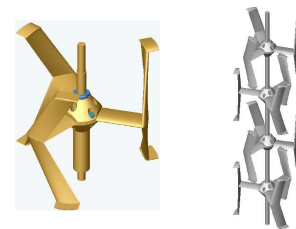
(a) turbine Gorlov. (b) Vue d'artiste d'une installation.

Fig. 16. La turbine Gorlov [© GCK Technology].

La GHT démarre sans assistance et peut produire une puissance significative à partir de $1,5 \text{ m/s}$ de vitesse de courant. Les dimensions de la turbine standard sont de 1 m de diamètre et de $2,5 \text{ m}$ de longueur. Cette turbine peut alors produire de $1,5 \text{ kW}$ pour un courant de $1,5 \text{ m/s}$ à 180 kW pour un courant de $7,7 \text{ m/s}$. Ce type de turbine peut être installée horizontalement ou verticalement [35]. Une vue d'artiste d'un projet d'usine comprenant 2 de ces turbines installées horizontalement est présentée à la figure 16b.

Un concept très proche de la GHT est la turbine Achard développée dans le cadre du projet Harvest (France) [36]. Cette turbine comprend des pales à profil d'ailes fixes par rapport à l'axe qui ne sont pas contrairement à la GHT assemblées en une cage d'écureuil mais sont reliées à l'axe par leur centre. (Fig. 17a). Un aileron d'extrémité est disposé sur chaque pale afin de minimiser les tourbillons en bout d'aile et la traînée induite par ces phénomènes turbulents. Les bras de liaisons entre les pales et l'axe ont eux aussi des profils d'ailes et peuvent avoir un pas différent de 0 ce qui permet de pousser vers le haut ou vers le bas la turbine selon la valeur de ce pas. Le concept permet d'associer plusieurs turbines pour former un chapelet sur le même axe et ainsi augmenter la puissance produite par unité (Fig. 17b). Un ensemble de ces chapelets

peut alors être attachés à une barge flottante à une extrémité et ancré au fond par l'autre extrémité pour donner une ferme hydrolienne complète.



(a) Turbine Achard. (b) Chapelet de turbines.

Fig. 17. Le projet Harvest [36].

4) Turbines à base de roues à aubes (Hydrogen Fr [37], Univ. Southampton, GB [38]).

Certains projets proposent des concepts de turbines basées sur l'utilisation de roues à aubes en surface. C'est le cas du projet Français, Hydrogen, et d'un projet a priori très similaire de l'université de Southampton qui proposent tous les deux un concept utilisant une roue à aubes maintenue en surface par des flotteurs. Des essais de ces systèmes entraînés en remorque d'un navire ont été réalisés avec des démonstrateurs de faible puissance (de l'ordre de quelques kW avec des vitesses d'avance de 2 à 4 nœuds). Les figures 18a et b présentent une vue des systèmes expérimentaux de ces 2 projets. Les systèmes sont conçus pour être positionnés dans des zones proches des côtes et relativement protégées.



(a) Université de Southampton. [37] (b) Hydrogen [38].

Fig. 18. Turbines à base de roues à aubes

C. Systèmes à base de profils hydrodynamiques oscillant [27,39,40,41]

Le concept de générateur oscillant est illustré par le système Stingray développé par la société Engineering Business (GB) et est présenté à la figure 19a. Il est composé d'une pale qui oscille horizontalement perpendiculairement au courant dans un mouvement qui se rapproche de celui de la queue d'un cétacé. L'angle d'attaque de la pale varie grâce à un simple mécanisme. Le bras supportant le plan va alors osciller et entraîner, via un système hydraulique à huile pressurisée, un générateur électrique. Un démonstrateur (Fig. 19b) a été dimensionné pour une puissance de 150 kW . Il a été testé dans un courant nominal de $1,5 \text{ m/s}$ et a produit une puissance moyenne de 90 kW pour une puissance crête de 250 kW lors de ces premiers cycles de fonctionnement. Le projet a été mis en suspens en 2005. Il est à noter que ce système est assez proche, dans son principe, d'autres projets dans le monde

comme le projet anglais « seasnail » de l'université Robert Gordon (Fig. 20) [39] qui consiste en une série de profils associés mécaniquement ou le projet « pulsegeneration » qui associe 2 profils associés sur un bras oscillant autour de son centre (Fig. 21) [40]. Le projet australien « biostream » de la société Biopower, lui aussi basé sur ce type de concept, est basé sur le bio mimétisme d'une queue de poisson (Fig. 22) [41].

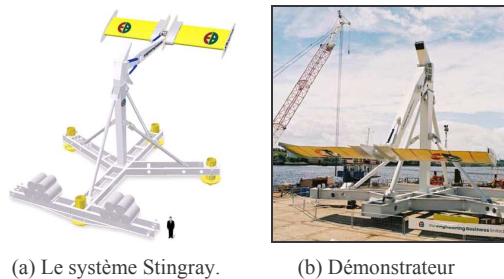


Fig. 19. Le Système stingray [© EB].

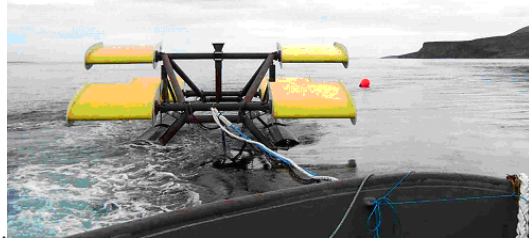


figure 20 : le prototype Seasnail[© RGU]

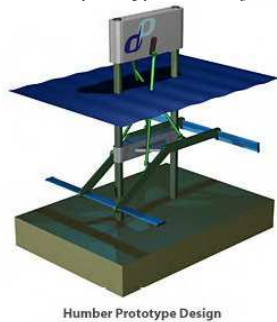


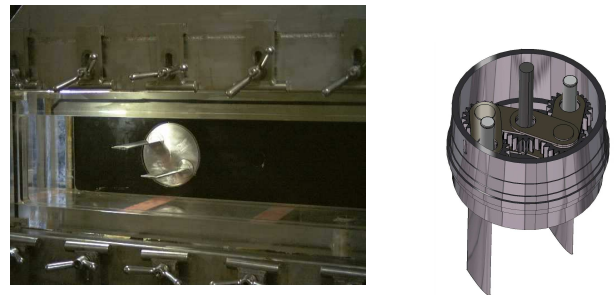
figure 21 : Prototype Humber [© pulsedgeneration]



Fig. 22 : Le système "Biostream"[© BIOPOWER]

Il est à noter que d'autres systèmes à bases de mouvements de profils à cinématique particulière sont actuellement à l'étude. Certaines technologies sont directement dérivées de systèmes de propulsion navale non conventionnels. Par exemple, un

prototype de système cycloïdal à axe vertical, le rotor Lipp [42], dont la trajectoire trochoïdale des pales obtenue par un ensemble d'engrenage, est actuellement testé (Fig. 23) en générateur à l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale en France [43].



(a) Rotor Lipp en tunnel hydrodynamique (b) CAO du Lipp.

Fig. 23. Le prototype Lipp [49].

D. Considérations sur le développement futur des technologies de récupération des courants marins.

Les technologies qui permettent de récupérer l'énergie des courants marins sont encore en cours de développement. Une technologie de référence ne s'est pas encore imposée. Pour l'instant seules les technologies basées sur des turbines à axe horizontal dérivées des technologies classiques d'éoliennes ont été testées à une échelle de production industrielle sur des durées représentatives avec les prototypes des projets Seagen, et E-tide [24,25]. La vitesse du fluide est plus prévisible dans le cas d'une hydrolienne que dans le cas d'une éolienne. Cependant, de très forts états de mer dus à des conditions météorologiques extrêmes, peuvent entraîner des surcharges mécaniques dynamiques sur ces structures et causer des dommages. Ceci implique un effort particulier lors du choix des sites qui conduit souvent au choix de sites proches des côtes car plus protégés qu'en haute mer. Ces raisons font qu'il est nécessaire de développer des recherches qui permettent de modéliser et prévoir les performances des systèmes de récupération dans des conditions de fonctionnement réel. L'objectif est d'être capable de déterminer les solutions technologiques les plus adaptées à chaque site [44]. Il est pour l'instant impossible de prévoir quelle est la solution qui va s'imposer pour les systèmes de récupération de l'énergie cinétique des courants. Ce que l'on peut dire à l'heure actuelle c'est que les systèmes devront être particulièrement robustes pour minimiser les opérations de maintenance et que les procédures de mise hors service des systèmes lors des phases de dépassement des valeurs nominales de vitesse de fluides ne pourront dans le cadre hydrolien n'être qu'exceptionnelles contrairement à l'éolien (Elles correspondront à des conditions extrêmes seulement rencontrées lors de très fortes tempêtes) [20], [44].

IV. STRUCTURES ET TOPOLOGIES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

La plupart des systèmes qui ont été proposés pour l'extraction de l'énergie des courants marins sont dérivés de l'éolien. Il semble donc relativement logique que certaines topologies d'association convertisseur/machine qui ont été choisies dans le cas éolien puissent être utilisées avec succès dans le contexte hydrolien [45]. Cependant, il existe des différences notables de contraintes entre les deux domaines. La première est que dans le domaine hydrolien il semble nécessaire de diminuer ou d'éliminer toute opération de maintenance car les sites à haut potentiel sont particulièrement difficiles d'accès et que la maintenance nécessite des opérations complexes liées au fait que les machines sont immergées [20]. Un deuxième point significatif est lié à la différence de densité du fluide. Dans le cas éolien les tailles des nacelles contenant les systèmes de génération électrique sont en général négligeables devant la taille des capteurs mécaniques (hélices ou turbines) ce qui n'est pas forcément le cas en hydrolien où les hélices sont beaucoup plus petites pour une même puissance. La traînée due à l'écoulement d'eau sur les structures d'une hydrolienne impose des contraintes mécaniques beaucoup plus grandes que la traînée due à l'écoulement d'air sur les structures d'une éolienne. On voit donc que la compacité des systèmes de conversion électromécanique est un point particulièrement important. On peut ainsi examiner les avantages et inconvénients des solutions électromécaniques classiques résumées dans la Table 1 à la lumière de ces considérations. Si les solutions ne nécessitant ni système bague-balais, ni multiplicateur comme ceux à bases de génératrices synchrones lentes à entraînement direct semblent séduisantes pour la minimisation des contraintes liées à la maintenance [46], elles semblent beaucoup moins pertinentes en termes de compacité et de prix. Les solutions utilisant des multiplicateurs permettent grâce à l'utilisation de machines électriques plus rapides d'augmenter la compacité et d'utiliser des solutions sur étagère en termes de structures électromécaniques. Cependant les contraintes de maintenance liées à l'utilisation de multiplicateurs (lubrification régulière) semblent difficilement compatibles avec le contexte hydrolien. Des expérimentations permettant des comparaisons de solutions in situ peuvent permettre de mieux identifier quelle solution sera la plus adaptée à chacune des technologies et des sites. Ainsi le projet coréen Uldolmok (Fig. 24) consiste à implanter dans une même usine, située au sud ouest de la Corée, deux turbines Gorlov de 500 kW chacune, associées l'une à une génératrice asynchrone à double alimentation et l'autre à une génératrice synchrone [47]. Il est également nécessaire d'envisager des configurations turbines/machines spécifiques qui permettent de répondre au mieux au cahier des charges hydrolien. Ainsi associer un générateur synchrone à aimant permanent à attaque directe avec une turbine à axe vertical semble particulièrement intéressant. L'avantage de cette association est que le générateur étant situé au dessus ou en dessous de la

turbine, la taille du générateur n'a pas de conséquences sur les performances hydrodynamiques du système (Fig. 25).

Les turbines dites à entraînement circonférentiel semblent une piste également très prometteuse. Dans cette configuration la turbine est complètement intégrée avec la machine électrique. L'hélice de la turbine supporte alors une jante, sur laquelle sont collés des aimants permanents. L'ensemble constitue alors le rotor d'une génératrice synchrone. Le stator est alors situé dans un carénage autour de l'hélice (Fig. 26). [48,49, 50]. Ce type de solution a été également étudié pour la propulsion des navires [51].

Ce type de solution semble particulièrement intéressant en terme de maintenance car il n'y a pas de système de transmission mécanique complexe. La localisation de la machine dans la carène autour de l'hélice permet l'amélioration des performances hydrodynamiques de l'ensemble. Ce concept a été adopté par la société OpenHydro (Irlande) [49] (Fig. 27). Il est possible selon les cas d'envisager d'utiliser d'autres topologies de systèmes comme par exemple les machines à flux axial ou à flux transverse mais cela augmente la complexité du système [52].

Table 1. Solutions électromécaniques [38].

Type	avantages	inconvénients
Génératrice asynchrone à cage + convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gamme de vitesse importante ✓ pas de système balais bagues ✓ contrôle de la puissance active et réactive ✓ Technologie éprouvée 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Convertisseur de puissance nominale ✗ présence d'un multiplicateur
Génératrice synchrone bobinée + convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gamme de vitesse importante ✓ entraînement direct possible ✓ contrôle de la puissance active et réactive 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Convertisseur d'excitation de puissance réduite ✗ Convertisseur d'induit de puissance nominale ✗ Présence d'un système balais bagues (sauf pour un système à diodes tournantes)
Génératrice synchrone à aimant + Convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gamme de vitesse importante ✓ entraînement direct possible ✓ contrôle de la puissance active et réactive ✓ pas de système balais bagues ✓ excitation « autonome » 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Convertisseur de puissance nominale ✗ Poids, tailles, prix importants ✗ Le flux d'excitation ne peut être coupé en cas défaut.
Machine asynchrone à double alimentation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Convertisseur de puissance réduite. ✓ contrôle de la puissance active et réactive 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Présence d'un système balais bagues ✗ présence d'un multiplicateur ✗ Gamme de vitesse limitée à un intervalle de 30% autour de la vitesse de synchronisme

Machine asynchrone avec connexion directe au réseau	<ul style="list-style-type: none"> ✓ pas de système balais bagues ✓ Technologie éprouvée et peu coûteuse ✓ Pas de convertisseur 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Vitesse quasi fixée (proche du synchronisme) ✗ pas de contrôle de la puissance réactive ✗ présence d'un multiplicateur
---	--	--

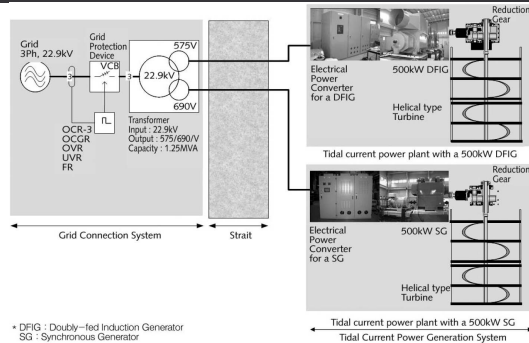


Fig. 24. L'installation pilote Uldolmok (1 MW) [40].

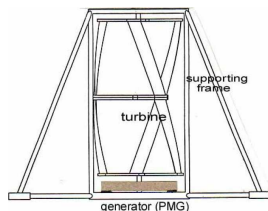


Fig. 25. Turbine Gorlov associée à un générateur synchrone à entraînement direct.

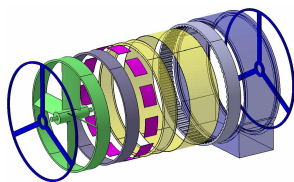


Fig. 26. Concept de turbine à entraînement circonférentiel.



Fig. 27. La Turbine à entraînement circonférentiel "Open Centre" [© OpenHydro].

V. CONCLUSION

Cet article se veut un état de l'art des systèmes de récupération de l'énergie des courants marins. Cette énergie renouvelable représente un potentiel très important en Europe de l'Ouest et en France en particulier. A travers une description des diverses solutions possibles que ce soit pour les turbines ou pour l'architecture de conversion électromécanique il apparaît clairement qu'aucune solution technologique de référence ne s'est pour l'instant imposée.

Un effort particulier de recherche et développement doit donc être mené dans les prochaines années afin de faire émerger les solutions technologiques qui permettront d'exploiter de manière optimale cette ressource énergétique.

REFERENCES

- [1] A.T. Jones et al., "Recent progress in offshore renewable energy technology development," in *Proceedings of IEEE PESGM'05*, vol. 2, pp. 2017-2022, San Francisco (USA), June 2005.
- [2] R. Ramakumar et al., "Economic aspects of advanced energy technologies," *Proc. IEEE*, vol. 3, n°8, pp. 318-332, March 1993.
- [3] G.T. Heydt, "An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology," *Proc. IEEE*, vol. 3, n°8, pp. 409-418, March 1993.
- [4] C.M. Johnstone et al., "EC FPVI co-ordinated action on ocean energy: A European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 191-196, 2006.
- [5] L.B. Bernshtein, "Tidal power development – A realistic, justifiable and topical problem of today," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 10, n°3, pp. 591-599, September 1995.
- [6] T.J. Hammons, "Tidal power," *Proc. IEEE*, vol. 3, n°8, pp. 419-433, March 1993.
- [7] S. Seth et al., "Tidal energy in electric power systems," in *Proceedings of IEEE PESGM'05*, vol. 2, pp. 630-635, San Francisco (USA), June 2005.
- [8] J.P. Frau, "Tidal energy: Promising projects. La Rance, a successful industrial-scale experiment," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 8, n°3, pp. 552-558, September 1993.
- [9] 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting Panel Session, "Harnessing the untapped energy potential of the oceans: Tidal, wave, currents and OTEC," San Francisco (USA), June 2005.
- [10] Technomare SpA and IT Power Ltd., "Non Nuclear Energy—JOULE II, Wave energy project results: The Exploitation of tidal marine currents," *Non-Nuclear Energy R&D Component*, EU JOULE Contract J02-CT94-0355, 1996.
- [11] P.W. Ullman, "Offshore tidal power generation – A new approach to power conversion of the oceans' tides," *MTS Journal*, vol. 36, n°4, pp. 16-24, 2002.
- [12] I.G. Bryden et al., "Choosing and evaluating sites for tidal current development," *Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 218, n°8, pp. 567-578, 2004.
- [13] B.V. Davis, "Low head tidal power: A Major source of energy from the world's oceans," in *Proceedings of IECEC'97*, vol. 3, pp. 1982-1989, Honolulu (USA), July-August 1997.
- [14] I.G. Bryden et al., "An assessment of tidal streams as energy sources in Orkney and Shetland," *Underwater Technology*, vol. 21, n°2, 1995.
- [15] I.G. Bryden, "Tidal stream power for Orkney and Shetland?," *Underwater Technology*, vol. 9, n°4, 1993.
- [16] T.G. Pugh, *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. London, UK: Wiley, 1987.
- [17] L.S. Bluden et al., "Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 121-132, 2006.
- [18] I.G. Bryden et al., "Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy," *Applied Ocean Research*, vol. 26, pp. 198-204, 2004.
- [19] J.S. Couch et al., "Tidal current energy extraction: Hydrodynamic resource characteristics," *Proc. IMechE, Part M: Journal of Engineering for the Maritime*, vol. 220, n°4, pp. 185-194, 2006.
- [20] A.S. Bahaj et al., "Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 2205-2211, 2003.
- [21] L. Myers et al., "Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 197-208, 2006.
- [22] P.L. Fraenkel, "Power from marine currents," *Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 216, n°1, pp. 1-14, 2002.
- [23] I.G. Bryden et al., "ME1 – Marine energy extraction: Tidal resource analysis," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 133-139, 2006.
- [24] <http://www.marineturbines.com/home.htm> (last accessed January 2008).

- [25] <http://www.e-tidevannsenenergi.com/> (last accessed January 2008).
- [26] <http://www.pontediarchimede.com/> (last accessed January 2008).
- [27] <http://www.engb.com/> (last accessed January 2008).
- [28] <http://www.teleos.co.uk/Home.htm> (last accessed January 2007).
- [29] <http://www.berr.gov.uk/files/file15998.pdf> (last accessed January 2008).
- [30] <http://www.lunarenergy.co.uk/> (last accessed January 2008).
- [31] <http://www.hydrohelix.fr/> (last accessed January 2008).
- [32] S. Kiho et al., "The power generation from tidal currents by Darrieus turbine," *Renewable Energy*, vol. 9, n°1-4, pp. 1242-1245, 1996.
- [33] <http://www.blueenergy.com/> (last accessed January 2008).
- [34] <http://www.gcktechnology.com/GCK/> (last accessed January 2008).
- [35] A.M. Gorlov, "The Helical Turbine and its applications for tidal and wave power," in *Proceedings of IEEE OCEANCS'03*, vol. 4, pp. 1996, San Diego (USA), September 2003.
- [36] <http://www.legi.hmg.inpg.fr/cavit/Data/Harvest.html> (last accessed January 2007).
- [37] Development of a floating tidal energy system suitable for use in shallow water., SR Turnock and Al, in proceedings (CD rom) 7th EWTEC 2007, Porto 11-13sept 2007
- [38] <http://www.hydro-gen.fr> (last acceded January 2008)
- [39] <http://www.rgu.ac.uk/cree/general/page.cfm?page=10769> (last acceded January 2008)
- [40] <http://www.pulsegeneration.co.uk/> (last acceded January 2008)
- [41] <http://www.biopowersystems.com/biostream.html> (last acceded October 2007)
- [42] <http://wagram.ecole-navale.fr/fr/irenav/cv/damay/projet.swf> (last acceded january 2008).
- [43] Ben Ramdane, S., Damay, T., Hauville, F., Deniset, F. and Astolfi, J-A., "Etude de l'écoulement sur un hydrofoil en mouvements forcés : application à la propulsion cycloïdale", 10^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, Ecole Centrale de Nantes, pp. 39-52, 7-9 Mars, 2005
- [44] J.A. Clarke et al., "Regulating the output characteristics of tidal current power stations to facilitate better base load matching over the lunar cycle," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 173-180, 2006.
- [45] M.E.H. Benbouzid et al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems," in *Proceedings of ICEM'06*, Chania (Greece), September 2006.
- [46] H. Polinder et al., "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, n°3, pp. 725-733, September 2006.
- [47] J.W. Park et al., "Wide speed operation of a doubly-fed induction generator for tidal current energy," in *Proceedings of IEEE IECON'04*, vol. 2, pp. 1333-1338, Busan (Korea), November 2004.
- [48] S.M. Abu Sharkh et al., "Performance of an integrated water turbine pm generator," in *Proceedings of IEE PEMD'02*, vol. 2, pp. 486-491, Bath (UK), April 2002.
- [49] <http://www.openhydro.com/home.html> (last accessed January 2007).
- [50] Drouen, L. Charpentier, J.F. Semail, E. Clenet, S. "Study of an innovative electrical machine fitted to marine current turbines" in IEEE OCEAN07 Aberdeen Scotland 18-21 Juin 2007 6pp in CDROM proceedings
- [51] Ø. Krøvel et al., "Design of in integrated 100 kW permanent magnet synchronous machine in a prototype thrusters for ship propulsion," in *Proceedings of ICEM'04*, Krakow (Poland), September 2004.
- [52] J.R. Bumby et al., "Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines," *IEE Proc Electric Power Applications*, vol. 152, n°5, pp. 1065-1075, September 2005.