

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

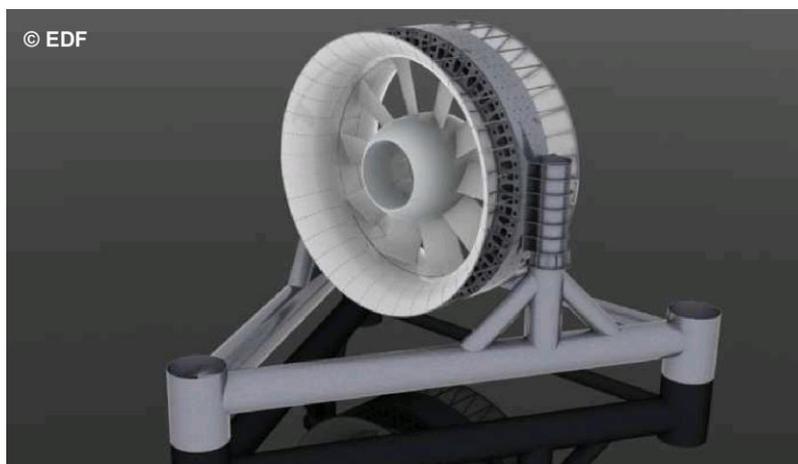
Session 2014

Sciences de l'ingénieur

Durée 5 heures

Aucun document autorisé.

Le matériel autorisé comprend toutes les calculatrices de poche, y compris les calculatrices programmables alphanumériques ou à écran graphique, à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante, conformément à la circulaire n° 99-181 du 16 novembre 1999.



Poséidon au secours d'Éole pour produire l'énergie électrique

Constitution du dossier

- **texte** (mise en situation et questionnement).....pages 2 à 18
- **documents techniques DT1 à DT12**pages 19 à 30
- **documents réponses DR1 à DR5**pages 31 à 35

Conseils au candidat

Vérifier que tous les documents définis ci-dessus sont présents.

La phase d'appropriation d'un système pluri-technologique passe par la lecture attentive de l'ensemble du sujet. Il est fortement conseillé de consacrer au moins 30 minutes à cette phase indispensable de découverte.

Les documents réponses DR1 à DR5 (pages 31 à 35) sont à rendre agrafés avec la copie (même s'ils n'ont pas été complétés).

Partie 0 - présentation de l'étude

Introduction

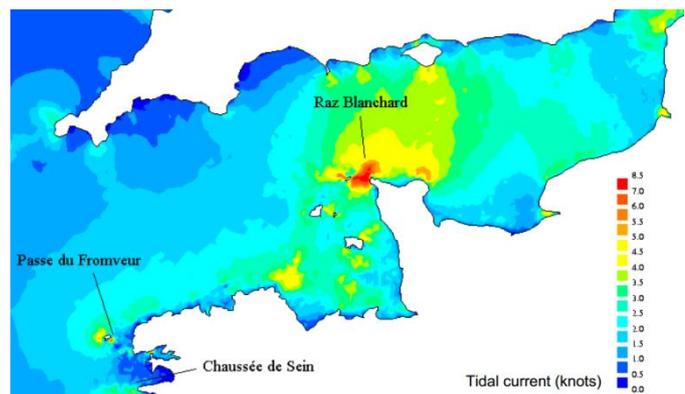
Contribution à l'émergence de la filière

La France doit atteindre en 2020 l'objectif de 23 % d'énergie renouvelable dans la production d'électricité. Ce chiffre est très ambitieux. Le Grenelle de l'environnement a structuré la réflexion sur le développement des énergies renouvelables et identifié « *l'importance des démonstrateurs comme étape clé du processus d'innovation avec la demande d'une expérimentation à grande échelle d'un parc d'hydroliennes* ».

Le projet de parc hydrolien de Paimpol-Bréhat, qui constitue une première dans le monde, a pour enjeu de tester la faisabilité technique, économique, environnementale et administrative d'un tel parc de démonstration pré-industriel, pour favoriser le développement d'une filière énergétique française et ainsi atteindre un coût du kWh compétitif à l'horizon 2020.

L'objet principal du projet est la production d'énergie électrique renouvelable qui entre dans les objectifs de la politique énergétique de la France. Le projet constitue également une piste pour diminuer la dépendance énergétique de la Bretagne. Le parc hydrolien EDF de Paimpol-Bréhat comprendra quatre hydroliennes d'une puissance unitaire de 500 kW, soit une puissance totale du parc de 2 MW. La première hydrolienne Openhydro a été installée en 2013. En 2014, trois autres hydroliennes de 500 kW la rejoindront.

Le développement de la plupart de ces énergies renouvelables connaît plusieurs difficultés d'ordre économique et technologique, dues essentiellement au nombre réduit de zones économiquement exploitables et aux coûts élevés des techniques proposées. Cependant, l'énergie hydro-cinétique des courants de marée, que l'on peut récupérer grâce à des machines appelées hydroliennes, connaît un intérêt considérable pour les chercheurs et les industriels au regard de la grande similarité avec les technologies utilisées pour les éoliennes. Les systèmes hydroliens se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. En outre, le potentiel énergétique mondial de l'hydrolien est estimé à une puissance de 100 GW, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur. Avec une ressource hydro-cinétique avoisinant les 6 GW répartie entre le Raz-Blanchard (3 GW), Fromveur (2 GW) et Raz-de-Sein (1 GW), la France est l'un des pays les plus prometteurs en Europe occidentale après le Royaume Uni (10 GW).



Le parc hydrolien EDF de Paimpol-Bréhat, au large de Ploubazlanec en Bretagne, est une première mondiale. EDF a décidé, en juillet 2008, de tester une technologie innovante de production d'électricité à partir de l'énergie **prédictible** des courants de marée. Dans la forte compétitivité entre les groupes industriels pouvant se positionner sur cette nouvelle filière énergétique porteuse, le groupe DCNS a été retenu pour à sa capacité à répondre aux problématiques liées au milieu marin et aux installations offshores.

Étapes du projet

Pour maîtriser les risques financiers du projet, ERDF a décidé de le réaliser en deux phases.

Une machine test en 2011

Une première phase est destinée à tester une machine en conditions réelles. Cette première hydrolienne a été installée durant l'été 2011 sur le site de la Horaine, pour être testée quelques mois sans raccordement au réseau. Elle a été ensuite sortie de l'eau et stockée sur une barge¹, le temps de réaliser des modifications, voire de la maintenance, et dans l'attente de la seconde phase. L'objet a été de vérifier la pertinence des choix technologiques et éventuellement d'améliorer les performances et les conditions d'installation, pour limiter ainsi les risques industriels et environnementaux lors de la mise en place du parc de quatre machines. Les résultats obtenus permettent de valider en particulier les éléments suivants : conception, fabrication, installation, maintenance et impact environnemental.

Un parc connecté au réseau en 2013 et 2014

La seconde phase consiste en l'installation, à terme, des quatre hydroliennes et en leur connexion à un convertisseur sous-marin, sur le site de la Horaine. Le passage d'un prototype de laboratoire à un démonstrateur commercial est le point clé de la réussite du projet. Cette étape permet donc la validation d'un parc hydrolien composé de quatre machines de 500 kW associées à un convertisseur immergé. Le raccordement au réseau ERDF se fera sur un poste à terre, à une distance de 15 km du parc hydrolien, par un câble immergé. Le passage à la phase d'industrialisation est conditionné par les résultats des essais en conditions réelles, en tenant compte des impératifs de rentabilité sur le cycle de vie des installations (réalisation, installation en mer, maintenance).

Cahier des charges

Une hydrolienne est une machine qui doit répondre aux critères suivants :

- se maintenir en place et résister aux forces hydrodynamiques du courant ;
- turbiner au mieux le flux d'eau du flot² et du jusant³ pour produire de l'énergie mécanique ;
- transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ;
- exporter la production électrique vers le réseau à terre ;
- produire une énergie électrique à un coût acceptable ;
- nécessiter un minimum de maintenance ;
- gêner au minimum la navigation et avoir un impact minimal sur la faune et la flore.

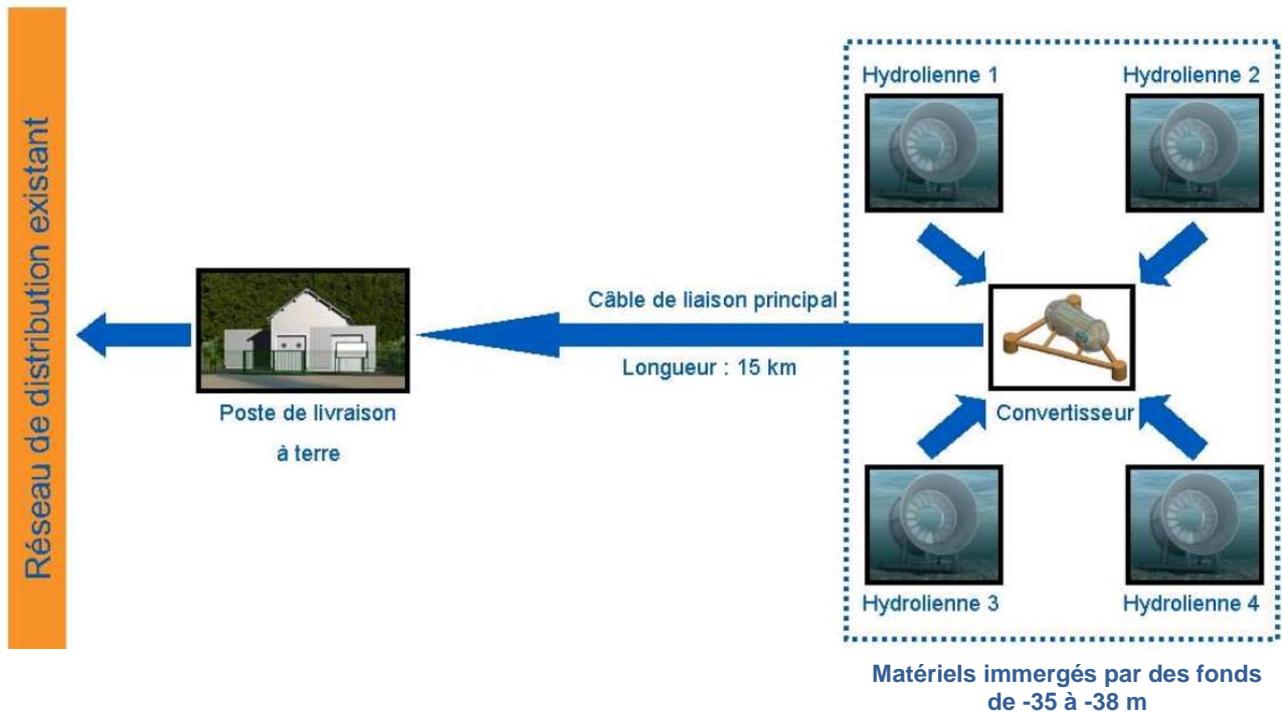
Pour ces différentes raisons, une bonne implantation est indispensable et implique une parfaite connaissance des fonds marins et des courants.

La maintenance doit être limitée. Les hydroliennes seront installées dans des zones de fort courant. Le temps d'intervention est donc contraint par les marées. Le temps disponible entre le flot et le jusant est d'environ deux heures. Les marées de faibles amplitudes (mortes eaux) sont réparties et limitent également l'organisation des opérations sur des périodes longues. C'est la raison pour laquelle le projet *Openhydro* DCNS doit être construit autour d'une solution robuste et la plus « simple » possible.

¹ Barge : bateau à fond plat.

² Flot : période pendant laquelle la marée est montante.

³ Jusant : période pendant laquelle la marée est descendante.



La conception du démonstrateur de Paimpol-Bréhat a nécessité une alternance de phases de modélisation et de validation par des tests. L'étude qui suit porte sur les différents éléments mis en œuvre depuis le démarrage du projet.

Partie 1 - analyse du besoin

L'objectif de cette partie est d'appréhender la solution proposée pour répondre au besoin exprimé par EDF de lancer la filière hydrolienne.

Les ressources énergétiques des courants marins sont estimées à 10 TWh par an pour la France (source : LNHE, laboratoire national hydraulique et environnement). L'exploitation, même partielle, de ces ressources peut contribuer de façon non négligeable au marché de l'énergie et à la réduction des émissions de CO₂.

- Q 1.** À l'aide du diagramme FAST représenté sur le document technique DT3, **compléter**, sur le document réponse DR1, la chaîne fonctionnelle en précisant les noms des constituants des différentes parties. **Indiquer** les grandeurs d'effort (au-dessus de la demi-flèche) et de flux (au-dessous de la demi-flèche).
- Q 2.** Sur le schéma de principe représenté dans le document réponse DR1, **tracer** la frontière du convertisseur. **Indiquer** les éléments suivants sur le schéma : machine synchrone, redresseur, bus continu, onduleur, et transformateur.
- Q 3.** **Justifier**, à partir de l'introduction et des informations fournies dans les documents techniques DT1 et DT2, le choix de la technologie retenue par Openhydro et DCNS, en relevant les atouts écologiques d'intégration dans le milieu marin.

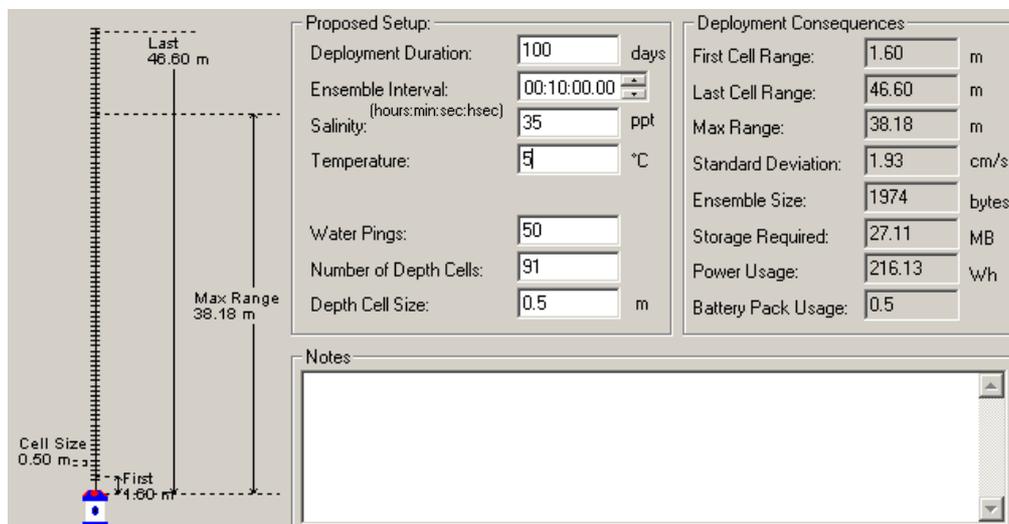
Partie 2 - estimation des courants marins

L'objectif de cette partie est de déterminer la mesure de la vitesse des courants marins en définissant l'autonomie énergétique du capteur avec les batteries utilisées par le constructeur, pour une campagne de mesures sur site.

L'implantation des hydroliennes nécessite une parfaite connaissance des courants marins. Une mesure des courants a donc été confiée à l'Ifremer. L'utilisation d'un capteur de profil de courant de type ADCP (voir document technique DT4) permet de connaître la vitesse du courant à différentes hauteurs d'eau, et ainsi de valider le potentiel du site retenu pour le projet.

Le point d'immersion est géographiquement défini et un socle de lestage y est coulé et fixé. Le capteur ADCP est immergé et fixé sur ce socle après planification du fonctionnement à l'aide d'un logiciel dédié, « Plan ADCP application » de Teledyne RD Instruments.

Les données saisies et les paramètres théoriques qui en résultent sont les suivants :



- Q 4. Indiquer** la durée de la campagne de mesures, l'intervalle entre deux mesures et le taux de décharge de la batterie après une campagne de mesures.
- Q 5.** Sur la figure ci-dessus, **relever** la plage maximale de mesure du capteur et la **comparer** avec les principales caractéristiques de l'hydrolienne (voir document technique DT1). **Conclure** sur la compatibilité de ces grandeurs.
- Q 6. Donner** la quantité d'énergie consommée par le capteur sur la campagne de mesures définie ci-dessus. **Calculer** l'énergie consommée pendant 24 heures. En **déduire** l'autonomie maximale du capteur ADCP dans ce mode de fonctionnement.

Le tableau ci-dessous précise les caractéristiques de la mémoire interne du capteur et de son protocole de communication.

Table A-5. Data Communication Specifications

| Item | Specification |
|-----------------------|---|
| Interface | RS-232 or RS-422 serial communications |
| Baud rate | 300 to 115,200 (9600 is default) |
| Input data format | ASCII commands (see Appendix-C) |
| Output data format | Binary or ASCII |
| Internal data storage | Capacity (Standard) 10 , 20 or 40 megabytes PCMCIA flash memory cards (2). Total storage available = 80 megabytes. |

Q 7. Indiquer la technologie de sauvegarde et le protocole de transfert des informations vers le micro-ordinateur de récupération des données. **Définir** l'espace de stockage nécessaire pour réaliser une campagne de mesures complète, telle que prévue ci-avant. **Choisir** la carte PCMCIA qui convient pour cette application.

Exploitation des résultats de mesure

Q 8. Sur le document réponse DR2, à l'aide du relevé de vitesse fourni, **esquisser** la courbe d'évolution de la vitesse du courant en fonction de la distance par rapport au fond marin.

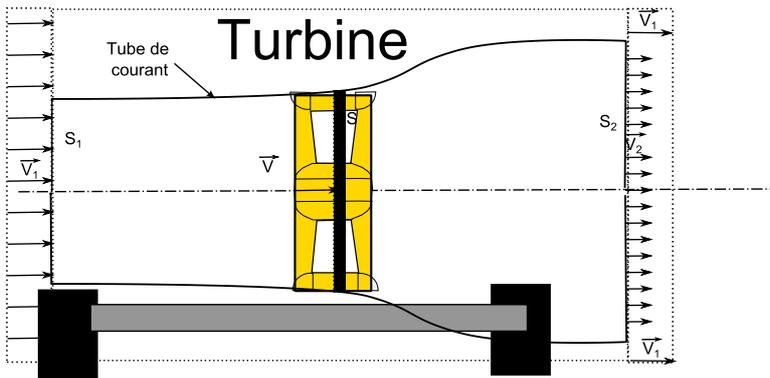
Q 9. Faire apparaître, sur le graphe, la profondeur optimale à laquelle on pourra positionner le disque de captage de l'hydrolienne. La hauteur restante est-elle compatible avec la navigation côtière sur la zone ?

Partie 3 - étude du productible

L'objectif de cette partie consiste à déterminer l'énergie électrique productible par le démonstrateur sur le site de Paimpol-Bréhat avec les quatre hydroliennes prototypes *Openhydro*.

Cette étude est basée sur la théorie de Froude, relative aux hélices de captage. La turbine de l'hydrolienne va prélever l'énergie des courants marins pour la transformer en énergie mécanique. La machine synchrone intégrée directement dans la structure de la turbine va produire de l'énergie électrique.

Formule de Froude



$$P_{méca} = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3$$

V_1 : vitesse initiale du courant

S_1 : surface à l'entrée du tube de courant

V_2 : vitesse du courant à l'aval du rotor

S_2 : surface à l'aval du rotor

S : surface du rotor (venturi extérieur inclus)

V : vitesse du courant dans la turbine

C_p : coefficient de production

A : aire du disque de captage en m^2

V : vitesse d'écoulement du fluide en $m \cdot s^{-1}$

$P_{méca}$: puissance extraite du fluide en W

ρ : masse volumique du fluide en $kg \cdot m^{-3}$ avec

$\rho = 1\,025 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ pour l'eau de mer

Le cahier des charges impose une puissance de 0,5 MW pour un courant d'une vitesse de $2,5 \text{ m} \cdot s^{-1}$. Le coefficient de production est lié aux performances de la turbine, et traduit son aptitude à extraire de l'énergie au courant.

Q 10. Rechercher le diamètre de captage de la turbine. **Calculer** le coefficient de production que doit avoir la turbine pour répondre à cette contrainte du cahier des charges. Le maximum d'énergie extractible d'un fluide est limité par le coefficient de production C_p dont la valeur optimale est de 0,56. Les coefficients C_p couramment utilisés sont de l'ordre de 0,3 à 0,4. Le calcul est-il acceptable ?

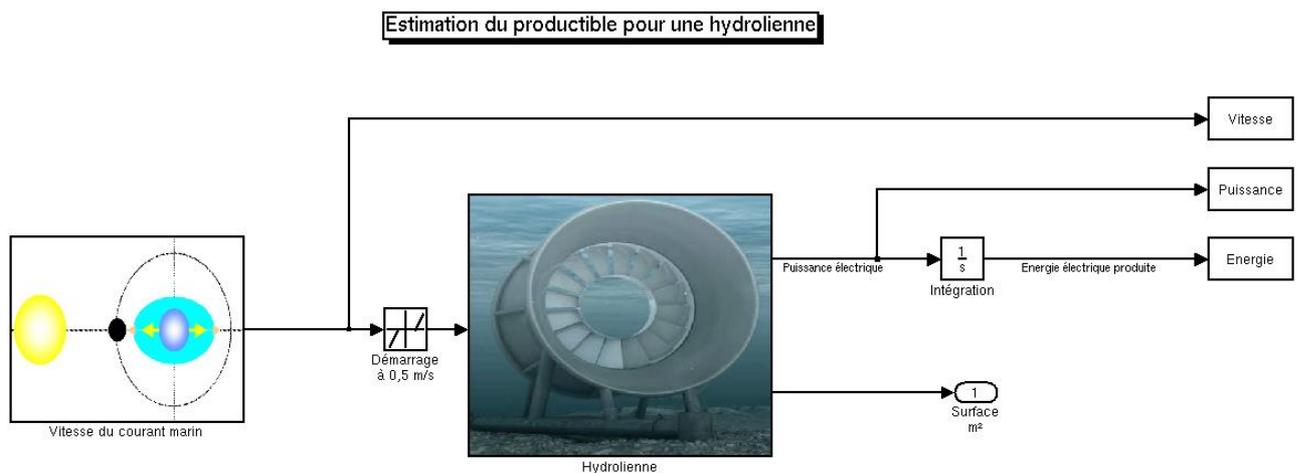
Pour la suite de l'étude, le coefficient de production C_p sera considéré égal à 0,4.

Q 11. Calculer les puissances mécaniques extractibles pour les valeurs de vitesse de courant de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, et $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. **Identifier** le paramètre le plus important dans la relation de Froude et **conclure**.

Q 12. L'exploitation des résultats d'analyse des courants sur le site de Paimpol-Bréhat nous donne une valeur moyenne de vitesse des courants de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. **Calculer** l'énergie mécanique moyenne extractible des courants par an en MWh.

Q 13. En considérant que le rendement de la machine synchrone égal à 95 % et celui du convertisseur égal à 100 %, **calculer** l'énergie produite par une hydrolienne sur une année, en MWh. L'objectif de produire 1 GWh par an est-il envisageable ?

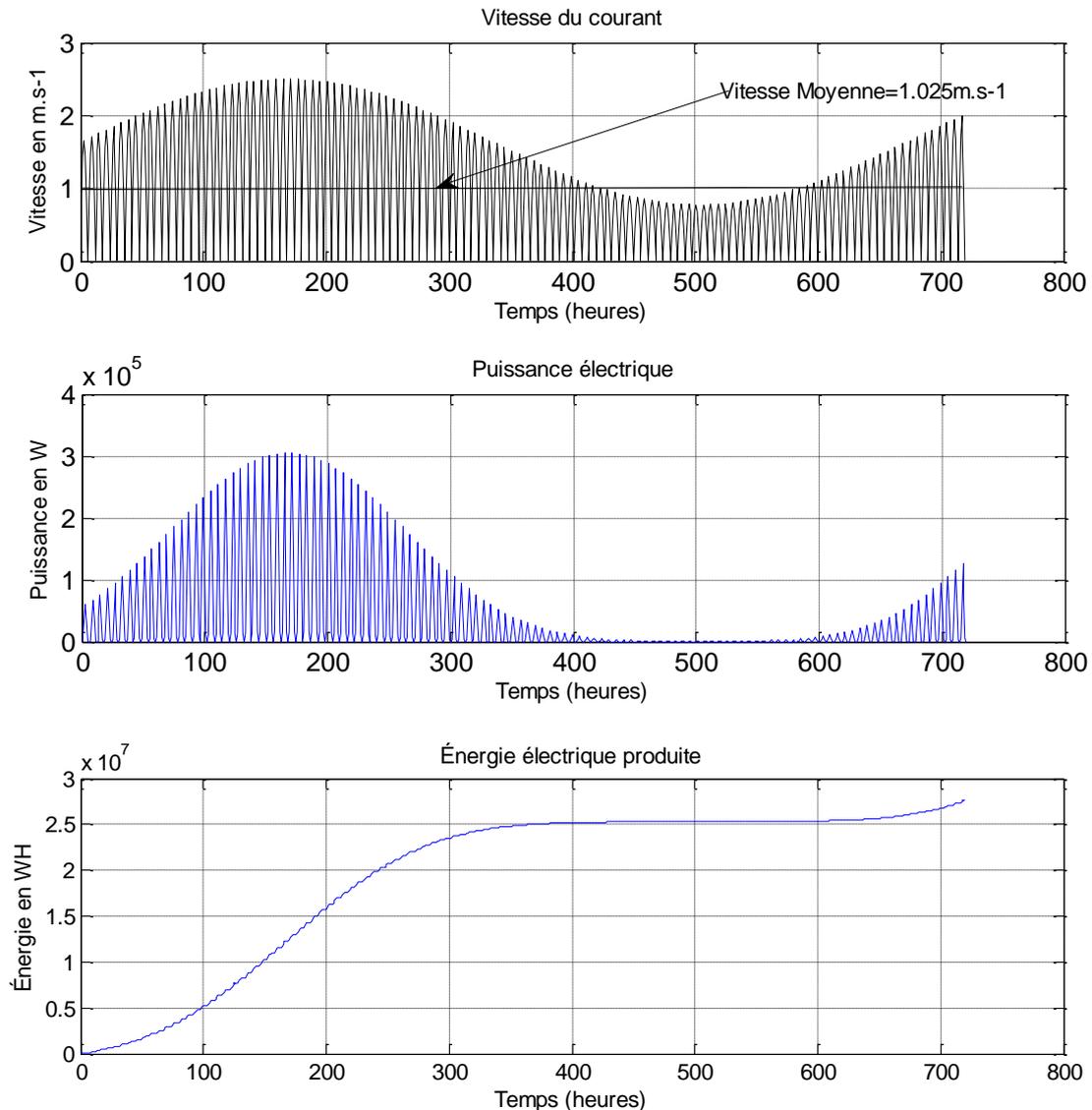
Pour affiner le productible et utiliser une meilleure modélisation de la vitesse des courants marins, le modèle suivant intègre les paramètres de la relation de Froude et le rendement d'une machine avec le convertisseur. Le démarrage de la turbine intervient pour un courant de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'énergie électrique productible est obtenue en intégrant la puissance par rapport au temps.



Modélisation du productible sur un mois pour une hydrolienne du démonstrateur de Paimpol-Bréhat

Paramètres du modèle de marée :

- vitesse maximale du courant, $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- coefficient de marée moyen variant de 95 à 45 sur un mois.



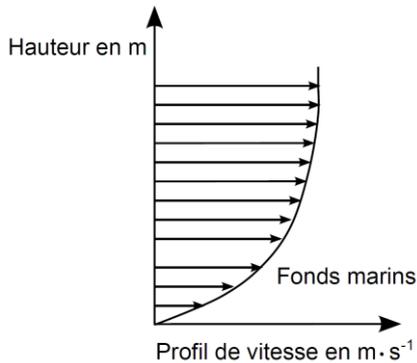
Q 14. Évaluer, à partir des graphes ci-dessus, la quantité d'énergie électrique produite sur un mois (30 jours), puis sur une année. **Commenter** ce modèle par rapport au calcul du modèle précédent basé sur la valeur moyenne de la vitesse des courants.

Q 15. Déterminer la production annuelle du démonstrateur composé des quatre hydroliennes, en considérant que les courants sont identiques dans les zones d'implantation des machines. **Conclure** sur la nécessité d'utiliser une modélisation fine de l'énergie productible.

Partie 4 - étude de la stabilité de la structure

L'objectif de cette partie est de vérifier que la structure reste en position stable sous les actions des courants marins. Cette étude valide les choix de dimensions de la structure et les densités de matériaux retenus pour obtenir des fondations gravitaires⁴. L'optimisation du productible dépend de leur hauteur par rapport au fond marin. L'optimisation de cette hauteur sera déterminée en fonction de la condition de non basculement de la structure porteuse.

Détermination de l'action du courant sur l'hydrolienne



Le courant de fond marin est moins important car ce dernier freine l'écoulement de l'eau. Le profil de la vitesse est présenté ci-contre. De la même façon, le courant est perturbé en surface par les effets de houle et de vague. Pour optimiser l'énergie produite par la machine, il est donc important de placer le disque de captage de la turbine dans la veine de courant la plus forte.

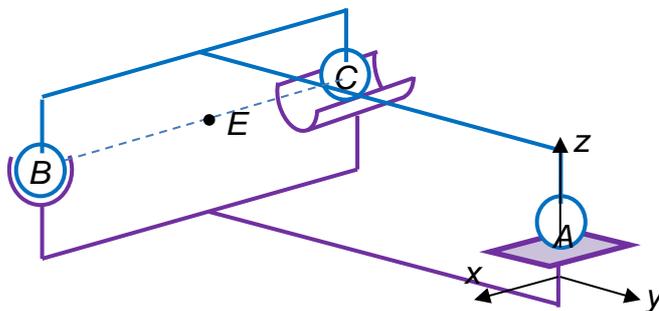
La valeur maximale des courants marins, relevée par capteur ADCP, est de $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'action mécanique exercée axialement sur la turbine est calculée à partir de l'énergie prélevée par la machine.

L'extrémité des pieds de la structure est une pointe appelée pénétrateur. L'action des pointes sur le sol entraîne l'écrasement des microreliefs granitiques situés sous chaque pied. La structure ne doit pas glisser sur le fond.

Pour déterminer la condition de non basculement de la structure, les appuis au sol sont modélisés par :

- une liaison sphérique de centre B ;
- une liaison sphère/cylindre de centre C et de direction (C, \vec{x}) ;
- une liaison sphère/plan de contact A et de normale (A, \vec{z}) .



Le poids des fondations gravitaires doit empêcher la rotation de la structure autour de la droite (BC) .

⁴ Fondation gravitaire : large base conçue pour rester stable dans des conditions de mer extrêmement violentes

Hypothèses de l'étude

- les dimensions du tripode sont fournies dans le document réponse DR3 ;
- l'accélération de la pesanteur vaut $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- la masse de l'ensemble composé du tripode et de l'hydrolienne est de 820 tonnes ;
- l'action de l'eau sur la turbine est modélisée par un glisseur appliqué au centre du rotor

$$T(\text{eau} \rightarrow \text{turbine}) = \begin{cases} \vec{R}(\text{eau} \rightarrow \text{turbine}) \\ \vec{M}(D, \text{eau} \rightarrow \text{turbine}) = \vec{0} \end{cases}_D$$
$$\vec{R}(\text{eau} \rightarrow \text{turbine}) = Y_D \vec{y} \text{ avec } Y_D < 0$$

- coordonnées du centre de masse G_1 de la structure (en m) $\overrightarrow{AG_1} = -17,2\vec{y} + 1,7\vec{z}$;
- l'action du courant marin sur le tripode ne sera pas prise en compte dans cette étude d'avant-projet (action mécanique supposée négligeable devant l'action de l'eau sur la turbine).

Le problème sera traité dans le plan de symétrie de l'hydrolienne (chargement et géométrie symétriques).

Q 16. Représenter, sur le document réponse DR3, les actions mécaniques appliquées sur l'ensemble hydrolienne et tripode.

Q 17. Exprimer littéralement les moments du poids de la structure, de l'action de l'eau sur la turbine et de la réaction du fond gravitaire, par rapport au point E , en projection sur l'axe dirigé par \vec{x} .

Q 18. Appliquer le principe fondamental de la dynamique sur l'ensemble composé de l'hydrolienne et de la structure porteuse, pour exprimer les conditions d'équilibre de la structure.

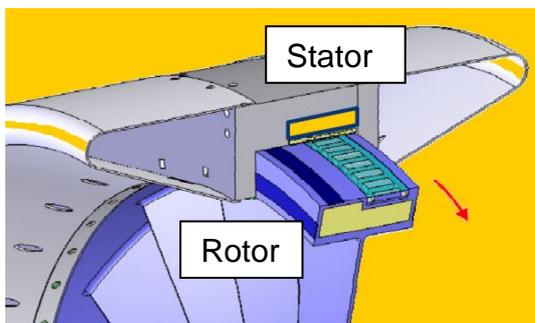
Q 19. Expliciter la condition de non-basculement de l'hydrolienne, puis **calculer** l'effort de l'eau sur la turbine que peut supporter l'hydrolienne avant que la structure gravitaire ne remplisse plus son rôle de stabilisateur.

Q 20. Vérifier que cette valeur n'est pas dépassée quand la vitesse du courant est de $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, condition maximale de fonctionnement attendue pour les hydroliennes du projet du raz Blanchard. L'action du courant sur l'hydrolienne est alors de 1 500 kN. **Conclure** en calculant le coefficient de sécurité retenu pour les fondations gravitaires dans ce cas.

Partie 5 - guidage en rotation de la turbine sur palier hydrodynamique

L'objectif de cette partie est de vérifier si le guidage en rotation de la turbine de l'hydrolienne est adapté pour les conditions de fonctionnement.

Les ingénieurs d'Openhydro ont retenu une solution de guidage en rotation par palier hydrodynamique. Ce dispositif remplace les roulements que l'on trouve sur les machines conventionnelles. Le palier est constitué du rotor qui tourne à l'intérieur du stator, séparé par un film de fluide. L'hydrolienne immergée utilise l'eau de mer comme fluide pour alimenter le palier. Celui-ci doit fonctionner dans les deux sens de rotation, dans le flot et le jusant des marées. Des rainures d'alimentation permettent l'écoulement de l'eau de mer dans le palier. L'étude menée dans cette partie se limite au fonctionnement en régime établi. Il est supposé que l'écoulement est laminaire⁵ et isotherme⁶, l'eau de mer permettant de dissiper la chaleur. Le processus de calcul permet de quantifier les performances du guidage.



Le guidage de la turbine dans son alésage doit supporter les efforts axiaux sur les pales ainsi que les efforts radiaux dus au poids du rotor.

L'étude du palier hydrodynamique est décomposée en deux parties :

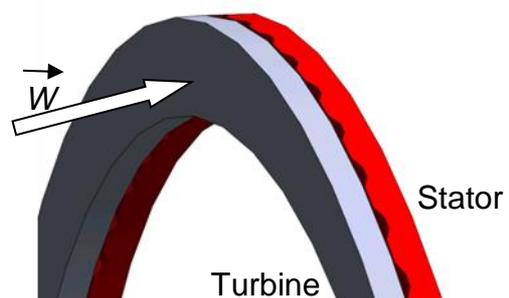
- étude axiale ;
- étude radiale.

Étude de la butée axiale

Pour les caractéristiques données, il faut quantifier les performances du guidage sur butée hydrodynamique en calculant la puissance dissipée par frottement pour cette solution.

En régime établi, dans un courant marin de $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la turbine tourne à une fréquence de $7,2 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Une démarche de calcul des paliers hydrodynamiques est décrite dans le document technique DT6. À une vitesse donnée, le fluide permet de s'opposer à une charge, notée W , en créant une pression dans la zone amont du blochet⁷. Les performances du guidage sont liées aux paramètres géométriques du blochet.

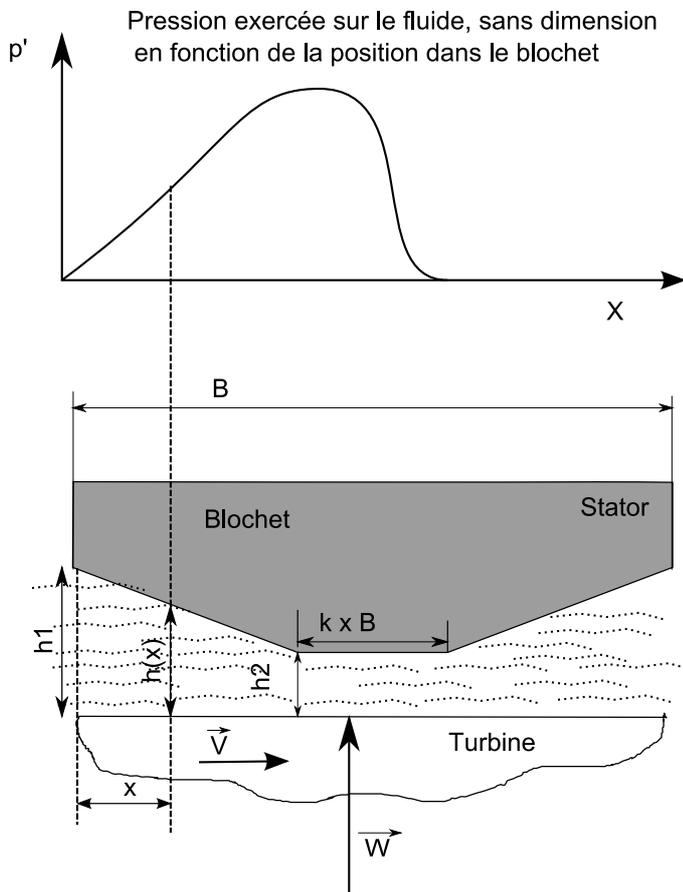
Dans les conditions de l'étude, l'effort axial noté W du courant sur la turbine est estimé à 150 kN.



⁵ Écoulement laminaire : écoulement régulier sans variation spatiale ou temporelle.

⁶ Isotherme : à température constante.

⁷ Blochet : patin incliné dans un guidage hydrodynamique (voir document technique DT6).



Pour calculer l'effort axial admissible sur un élément de la butée, il faut connaître les dimensions de celle-ci. La géométrie de la turbine est décrite dans le document technique DT5. La couronne assurant le guidage est divisée en 72 secteurs de 5° . Chaque secteur forme un blochet de la butée hydrodynamique avec une zone de contact occupant 3° et deux zones d'alimentation en fluide. Pour pouvoir fonctionner dans les deux sens de rotation, le blochet est symétrique.

L'étude du palier sera menée au niveau du diamètre moyen (voir détail B du document technique DT5) de la surface d'appui entre la turbine et le bâti de l'hydrolienne. Le calcul sera réalisé en régime établi à 7,2 tours par minute.

Chaque paramètre est calculé pour aboutir à l'estimation du rendement de ce guidage. La démarche de calcul est décrite dans les documents techniques DT6 et DT7.

Q 21. L'inclinaison du blochet permet de créer une pression dans le fluide. À l'aide du document technique DT7, **relever**, sur le document réponse DR5, la valeur de

p' maximale et la valeur du rapport $a = \frac{h_1}{h_2}$ correspondant.

Q 22. En analysant la représentation détaillée du palier hydrodynamique de l'hydrolienne dans le document technique DT5, **calculer** le rayon moyen de la surface de la butée axiale et la longueur B de l'arc de cercle d'un blochet sur la ligne moyenne de la surface de guidage de la turbine. **Calculer** la largeur L de la surface de guidage sur la turbine.

Q 23. **Calculer** l'effort W sur un blochet de la butée sachant que l'effort axial de la turbine sur le bâti est réparti uniformément sur la périphérie de l'hydrolienne.

Remarque importante : pour une butée réversible tournant dans les deux sens, le blochet est symétrique. La dépression provoquée par la sortie du fluide engendre une diminution des performances. Pour ce type de patin et à surface égale, la capacité de charge est environ 65 % de celle obtenue pour un patin formé d'un seul plan incliné.

La charge utilisée pour le calcul vaut $W = \frac{W_{réel}}{0,65}$. Pour la suite de l'étude, W sera égale à 3 200 N.

- Q 24. Calculer** la vitesse tangentielle en mètre par seconde du centre du blochet au niveau de la ligne moyenne de celui-ci.
- Q 25. Relever** sur le document réponse DR5, W , la charge sans dimension supportée avec le rapport « a » optimal déterminé précédemment. À partir de l'expression de W en fonction de W fournie dans le document technique DT7, **calculer** l'épaisseur du film d'eau h_2 entre le stator et le rotor. La viscosité μ de l'eau de mer est de $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Q 26.** Sur le document réponse DR5, avec les données des questions précédentes, **relever** le coefficient F (effort tangentiel sans dimension de frottement exercé par le fluide sur le blochet). **Calculer** F (effort tangentiel) à l'aide de la relation fournie dans le document technique DT7.
- Q 27. Calculer** le couple exercé par l'effort tangentiel sur la turbine par un blochet puis par les 72 blochets.
- Q 28. Calculer** la puissance dissipée par frottement, par les blochets en régime nominal.
- Q 29. Calculer** le rendement mécanique de la butée axiale de l'hydrolienne, en partant de la puissance théorique disponible de 0,5 MW en régime établi avec un courant marin de $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Étude du guidage en rotation

Le guidage radial de la turbine est également réalisé sur palier hydrodynamique. Les effets électromagnétiques de la machine participent au centrage du rotor dans le stator et le poids de la turbine est compensé par la poussée d'Archimède. Les venturis centraux contribuent à la flottaison de l'ensemble. Le choix de matériaux composites pour les pales permet également de réduire le chargement sur le palier et de faciliter le démarrage de la machine en début de marée.

- Q 30.** À l'aide des données fournies dans le document technique DT8, **calculer** le volume immergé de la turbine composée du rotor et des venturis. **Vérifier** que la poussée d'Archimède sur l'ensemble compense le poids. **Conclure** sur le guidage radial de la turbine dans le stator.
- Q 31.** Au regard de l'étude menée dans toute cette partie sur le guidage par palier hydrodynamique, **conclure** sur l'efficacité de cette solution pour répondre au besoin attendu, en rédigeant une synthèse sur le fonctionnement et sur les performances.

Partie 6 - raccordement au réseau RTE

L'objectif de cette partie est l'étude du raccordement au réseau de distribution de l'électricité. L'énergie produite par les hydroliennes doit pouvoir être injectée sur le réseau sans le perturber. Il faut aussi maîtriser les pertes d'énergie pendant le transport.

Le démonstrateur de Paimpol-Bréhat doit être raccordé à un poste à terre par un câble sous-marin. Pour la phase industrielle sur le raz Blanchard, le choix géographique du raccordement sur le réseau sera primordial. L'injection sur le réseau peut se faire seulement sur des postes suffisamment importants. Il est donc nécessaire d'identifier les possibilités de raccordement.

Les fonctions *convertir* et *adapter* le signal électrique sont assurées par le convertisseur développé par la société Convertteam (voir modèle sur le document technique DT9, figure 3). Son rôle est d'adapter l'énergie électrique produite pour permettre le raccordement sur le réseau à une fréquence de 50 Hz, et une tension adaptée pour le transport de l'électricité.

Les quatre hydroliennes ne vont pas parfaitement tourner à la même vitesse angulaire.

Q 32. Préciser le rôle des composants L1 et C (voir document DT9).

La différence de potentiel aux bornes de C, appelée U_c , peut être assimilée à un signal continu.

Étude de la sortie du convertisseur continu/alternatif sinusoïdal commandé en MLI (modulation de largeur d'impulsion)

Le signal en sortie, $u_{res}(t)$, de cet étage est périodique, décomposable en une somme de signaux sinusoïdaux, appelés fondamental et harmoniques. La valeur instantanée du fondamental s'exprime par :

$$u_{res1}(t) = A \sin \omega t$$
$$\omega = 2\pi f$$

avec $f = 50$ Hz.

Étude de la modulation de largeur d'impulsion

La tension continue récupérée aux bornes de C est transformée en signal alternatif sinusoïdal de fréquence 50 Hz. La commande de la partie puissance par IGBT⁸ est obtenue par comparaison d'un signal triangulaire avec un signal sinusoïdal. La largeur des impulsions du signal de sortie varie alors au rythme de l'amplitude du signal sinusoïdal selon l'algorithme suivant :

Si $\text{signal}_{\text{triangle}} > \text{signal}_{\text{sinus}}$
|
Alors sortie = 0
Sinon sortie = 1
Fin Si

⁸ IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor

Q 33. Compléter le chronogramme de sortie sur le document réponse DR4 (état logique haut : 2 V, état logique bas : 0).

Q 34. Relever la période du signal sinusoïdal qui pilote la MLI. **Calculer** sa fréquence et **vérifier** sa conformité avec le cahier des charges.

La cellule « PWM IGBT Inverter » est décrite par les schéma équivalent suivant :

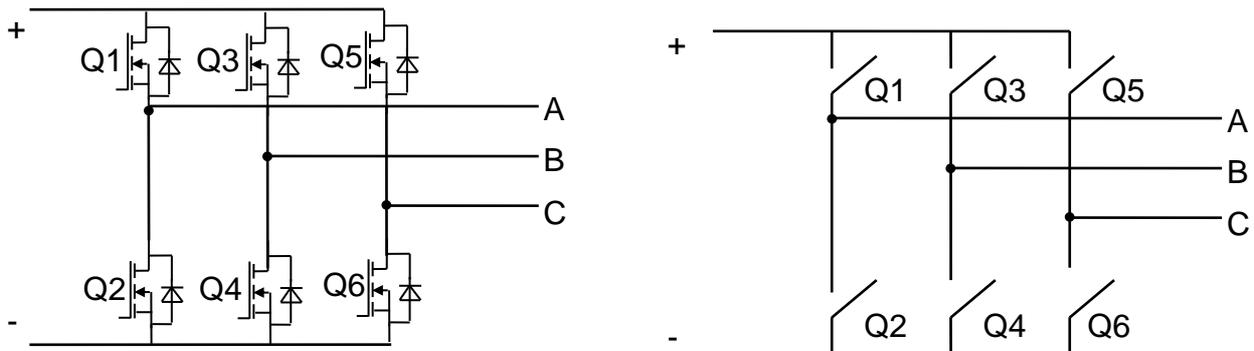


Tableau de commande de la MLI

Q 35. Le tableau du document réponse DR4 représente les états des interrupteurs (1 = fermé, 0 = ouvert) correspondant aux niveaux de tension attendus en A, B, C. Les états des interrupteurs pour les sorties V_{AB} et V_{BA} sont déjà reportés. **Compléter** le tableau pour les autres sorties.

Q 36. Le dimensionnement du convertisseur MLI a été réalisé en laboratoire avec des outils de modélisation. Un premier résultat (document technique DT11, figures 5 et 6) donne le graphe de la tension de sortie de la cellule de filtrage après le convertisseur pour deux réglages différents du filtre. Celui de la figure 5 présente des caractéristiques (tension – fréquence) fortement perturbées : le taux de distorsion harmonique⁹ (THD) est supérieur à 50 %. La cellule « LC filter » est décrite à la figure 7 dans le document technique DT11. **Proposer** une modification des paramètres pour réduire le niveau du signal harmonique à celui de la figure 6 du document technique DT11 (THD = 1,84).

⁹ Taux de distorsion harmonique : rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (appelée aussi somme quadratique des valeurs efficace) sur la valeur efficace de la composante fondamentale.

Bilan des puissances

Le calcul de la puissance en sortie du convertisseur triphasé est donné par l'expression $P = 3VI \cos \varphi$, avec :

- V valeur efficace de la tension $v(t)$ entre phase et neutre ;
- I valeur efficace du courant $i(t)$ par phase ;
- φ retard du courant $i(t)$ par rapport à la tension $v(t)$.

La valeur efficace d'un signal sinusoïdal est donnée par l'expression : $V_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$

Analyse des signaux produits par le démonstrateur (figure 4 du document technique DT10)

Q 37. À partir de l'analyse des chronogrammes fournis dans le document technique DT10, **calculer** la puissance électrique fournie au poste d'atterrage.

Q 38. Une résistance de charge triphasée est mise en place en sortie de l'onduleur. Elle est raccordée via un contacteur de puissance piloté par la tension réseau. En cas d'absence de tension du réseau, le contacteur se ferme. Quel est le rôle de cette résistance dite de ballast ?

L'acheminement de l'énergie vers le poste à terre est assuré par un câble triphasé présentant une section de 240 mm² par phase. Ce câble est dimensionné pour une puissance de 8 MW en vue de futures expérimentations d'autres technologies sur le site.

La résistance d'un conducteur est caractérisée par les relations suivantes :

| | |
|------------------------|---|
| $R = \rho \frac{L}{S}$ | R résistance en Ω L longueur du câble en m S section du câble en m ² ρ résistivité du matériau en $\Omega \cdot m$ (cuivre $17 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$) |
|------------------------|---|

Q 39. **Calculer** les pertes par effet Joule dans le câble triphasé d'une longueur de 15 kilomètres pour le démonstrateur de Paimpol-Bréhat composé des quatre hydroliennes. Quel pourcentage de la production cela représente-t-il ?

Étude du raccordement au réseau

Sur le raz Blanchard, la puissance plus importante (de 50 à 100 MW dans un premier temps) rendra le raccordement plus complexe. Il faut que le réseau puisse accepter cet apport d'électricité.

Q 40. À partir de la carte du réseau RTE de l'ouest de la France fournie dans le document technique DT12, **analyser** la zone permettant le raccordement du parc hydrolien. L'énergie produite étant prédictible, quelles mesures devront être prises pour respecter l'équilibre du réseau ?

Partie 7 : conclusion

Le raz Blanchard appartenant au domaine public maritime, situé entre l'île anglo-normande d'Aurigny et la presqu'île du Cotentin, présente un excellent potentiel avec des courants de plus de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et pouvant atteindre $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La profondeur varie entre 30 et 50 m. Si l'on considère que le site utilisable s'étend sur 12 km de long et 7 km de large, on obtient une puissance moyenne récupérable de 840 MW avec une puissance produite de 10 MW par km^2 en répartissant un champ d'hydroliennes sur la zone. Ceci représente une puissance optimale estimée à 845 MW. Les investisseurs sont nombreux et les grands groupes industriels sont en concurrence sur cette nouvelle filière naissante.

Le projet d'EDF à Paimpol-Bréhat est vu comme une étape d'apprentissage et non une étape de rentabilité. Son coût est estimé à 20 millions d'euros pour une puissance de 2 MW, soit 10 M€/MW. EDF estime que l'apprentissage devrait être plus rapide avec les hydroliennes qu'avec les éoliennes et que ces machines pourraient devenir compétitives à moyen terme.

Q 41. Les aspects économiques peuvent freiner le lancement d'une nouvelle technologie. **Analyser** le potentiel économique de l'hydrolien à long terme, quand la technologie encore expérimentale passera à la phase industrielle.

Source DGEC et EDF

| | Éolien terrestre | Éolien offshore | Hydrolien |
|--------------------------------|---|----------------------|--|
| Coût de l'énergie | Entre 63 et 77 €/MWh Selon l'âge des installations | 104 €/MWh | 78 €/MWh (phase industrielle en 2020) |
| Durée de fonctionnement | 2400 heures | 2800 heures | 3000 heures |
| Disponibilité | Aléatoire | Aléatoire | Prédictible |
| Tarif de rachat par EDF | 82 €/MWh sur 10 ans | 130 €/MWh sur 10 ans | 150 €/MWh sur 20 ans |

Q 42. La création d'une nouvelle filière de production d'énergie comporte des risques pour les investisseurs. Au vu des différentes parties traitées, **conclure** quant à la faisabilité d'une production d'énergie hydrolienne en tenant compte des enjeux « géo-technico-économiques » liés à la rentabilité et des aspects environnementaux spécifiques aux hydroliennes.

Document technique DT1 : solutions innovantes du démonstrateur

Les principales caractéristiques techniques retenues pour le démonstrateur sont :

- 4 hydroliennes (rotor de 12 mètres de diamètre, venturi¹⁰ de 16 mètres de diamètre, puissance de 500 kW, fondation gravitaire de 700 tonnes) ;
- une implantation dans la zone de plus fort courant à une profondeur d'environ 35 mètres ;
- une installation au moyen d'une barge-catamaran construite spécialement pour ces machines (voir photographie ci-dessous) ;
- un poste de conversion immergé à proximité des machines ;
- un câble sous-marin de raccordement à la terre (15 kilomètres) au droit de l'anse de Launay ;
- une évacuation de l'énergie via un poste de livraison à terre.



L'installation d'une hydrolienne est effectuée par une barge spécifique assurant le transport du chantier de fabrication à la ferme hydrolienne. La dépose sur les fonds est entièrement réalisée depuis la barge sans intervention sous-marine.

Génératrice *Openhydro*

C'est une machine synchrone à aimants permanents. Les aimants sont intégrés dans le rotor. Les bobinages sont dans le bâti de l'hydrolienne.

La principale innovation de l'*Openhydro* est sa turbine. Le guidage en rotation est obtenu par palier hydrodynamique directement dans l'eau de mer. La fréquence de rotation relativement faible ne perturbe pas la faune sous-marine et le centre évidé permet le passage des plus grandes espèces. Le carénage à effet Venturi permet d'augmenter le prélèvement de l'énergie des courants. Le choix des matériaux est adapté aux agressions du milieu sous-marin. Les pales réalisées par DCNS Lorient sont en matériaux composites. Le profil des pales est optimisé pour fonctionner dans les deux sens du courant, le flux et le jusant. La turbine ne s'oriente pas en fonction du courant. Sa position est définitive à l'installation. Le minimum de pièces mobiles permet de limiter les risques de dysfonctionnement et ainsi de gagner en fiabilité.

¹⁰ Venturi : en mécanique des fluides, tube qui présente un rétrécissement employé pour mesurer les fluides.

Document technique DT2 : informations complémentaires sur le projet

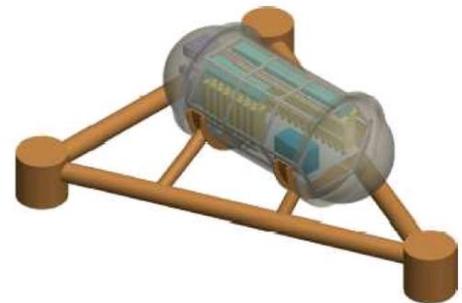
Les fondations gravitaires



La structure des fondations est un tripode en acier lesté par du béton. Sa masse immergée est de 700 tonnes. Ce choix de géométrie permet de définir le plan d'assiette de la machine défini sur trois points. L'installation sur les fonds granitiques se fera par dépose sur ces points de la structure porteuse. Aucun réglage n'est nécessaire de façon à limiter les opérations sous-marines. Le triangle de sustentation est défini par ces trois points de la structure.

Convertisseur

Un convertisseur offshore, fourni par la société française Converteam, est installé à proximité des hydroliennes. Son rôle est d'élever la tension produite par les machines à 10 kV afin de pouvoir la transporter. Le convertisseur a une forme cylindrique (diamètre de 3 m et longueur de 8 m). D'une hauteur totale de 5 mètres, il est immergé et également fixé sur une structure porteuse gravitaire de type tripode, de dimensions extérieures 12,5 m x 10,5 m, dont les pieds ont un diamètre unitaire de 1,5 m. Il contient un liquide réfrigérant non toxique et biodégradable.



Câble

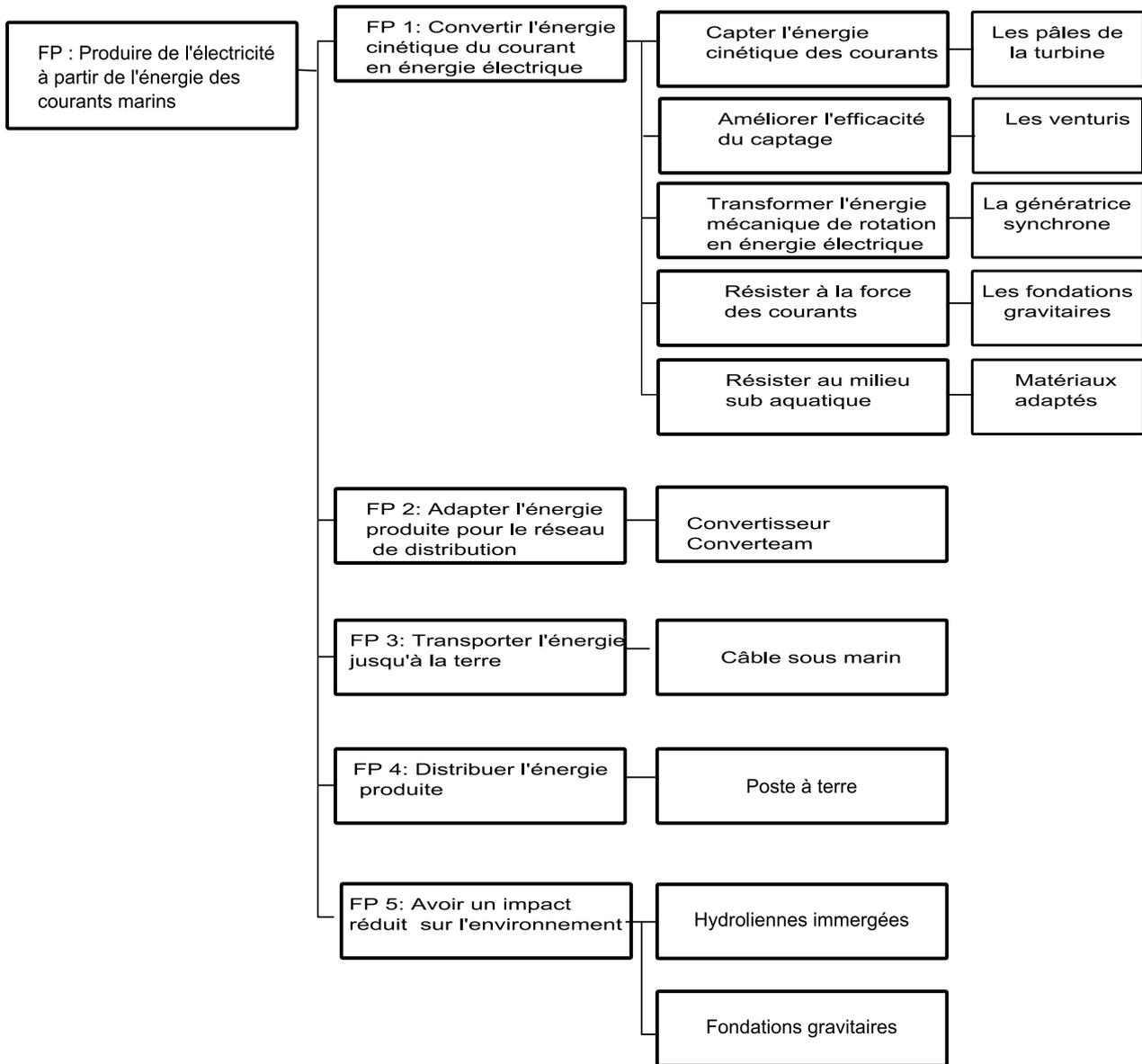
D'une longueur de 15 kilomètres, il permet le transport d'une puissance électrique jusqu'à 8 MW. Le câble est déposé sur les fonds granitiques sur la majorité du parcours reliant le convertisseur au poste à terre. Sur les derniers kilomètres de l'estran¹¹, le câble est ensouillé¹² à une profondeur de 1 à 2 mètres.

Le poste de raccordement à terre fait l'objet d'un traitement architectural et d'une intégration paysagère (végétalisation périphérique). Il sera également doté de protections antibruit pour faciliter l'acceptation par le grand public.

¹¹ L'estran est la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

¹² Ensouiller : enterrer une canalisation, une conduite.

Document technique DT3 : diagramme FAST



Principe de l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Ces appareils émettent des trains d'ondes sonores (« ping ») qui se réfléchissent sur les particules (figure 1) en suspension dans l'eau, supposées sans mouvement propre, et se déplaçant avec les courants. La différence entre les fréquences émises et réfléchies (effet Doppler) est proportionnelle à la composante de la vitesse des particules suivant l'axe de propagation de l'onde. Pour obtenir les trois composantes de la vitesse, quatre faisceaux sont utilisés, inclinés à 30 ° de la verticale.



Pour chaque cycle de mesures, les capteurs ADCP évaluent les composantes horizontales et verticales du courant, corrigées du roulis et du tangage. Chaque profil mesuré est découpé en segments uniformes, appelés cellules (« bins ») ; la vitesse associée à chaque cellule est une moyenne des vitesses mesurées sur l'épaisseur de la cellule. Les capteurs ADCP enregistrent : l'indice du cycle de mesures, le nombre de cellules, l'heure de l'acquisition, la température, le cap, le tangage et le roulis, mesurés par capteurs internes, la vitesse du son utilisée.

En outre, les trois composantes de la vitesse sont également enregistrées : l'erreur de vitesse, l'intensité d'écho des ondes sonores, l'amplitude de corrélation et le pourcentage de données correctes. Pendant l'acquisition, les mesures de vitesse sont transformées et enregistrées en coordonnées terrestres.

Lorsque la bathysonde se déplace verticalement, les mesures individuelles des ADCP sont entachées d'un bruit très élevé à cause du mouvement propre du système. Mais chaque cellule de mesure est évaluée un grand nombre de fois successivement par l'appareil regardant vers le bas et celui regardant vers le haut. C'est cette superposition des profils qui permet d'obtenir un profil continu de la surface au fond tout en diminuant le bruit aléatoire de chaque ping.

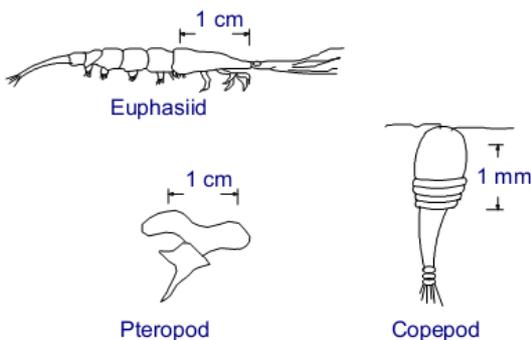


Figure 1 : typical océan scatterers

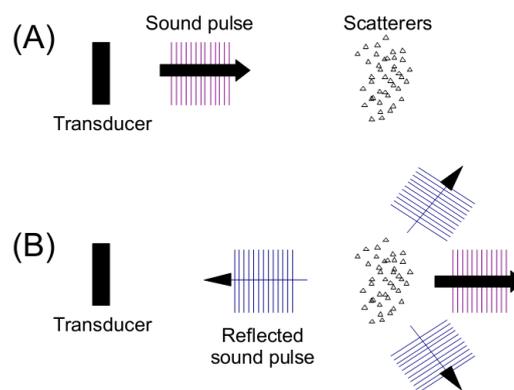
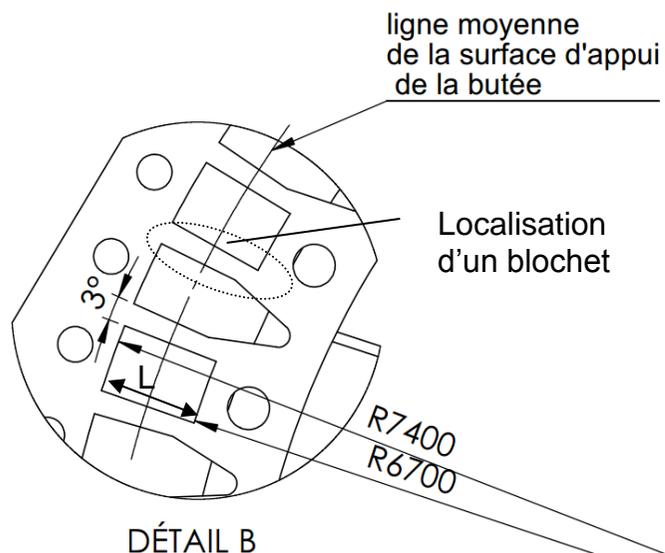
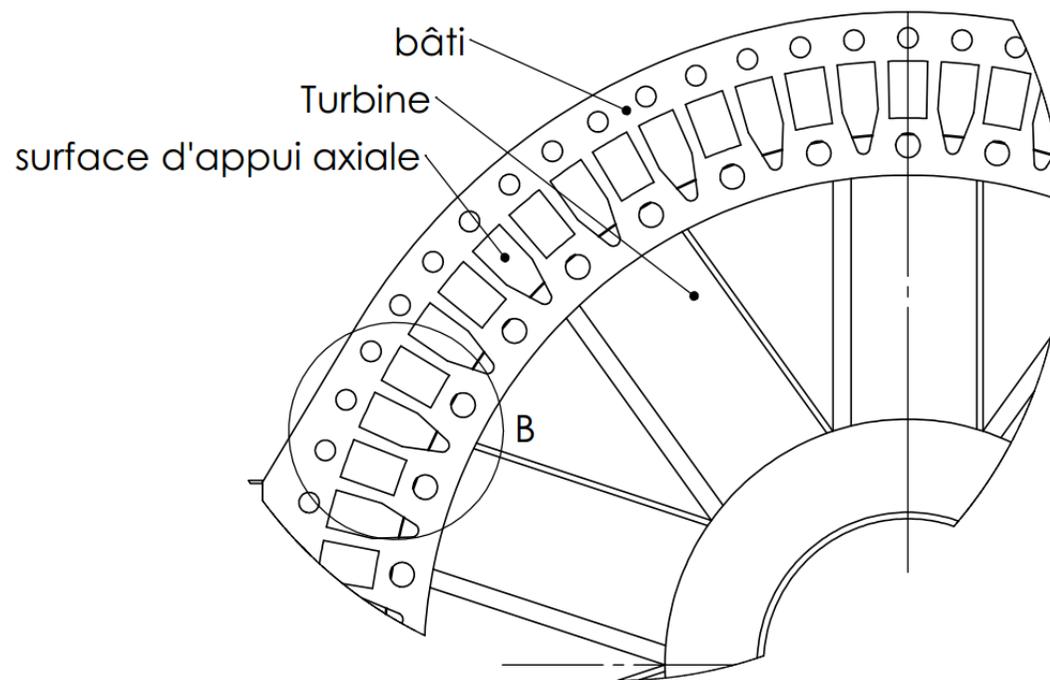
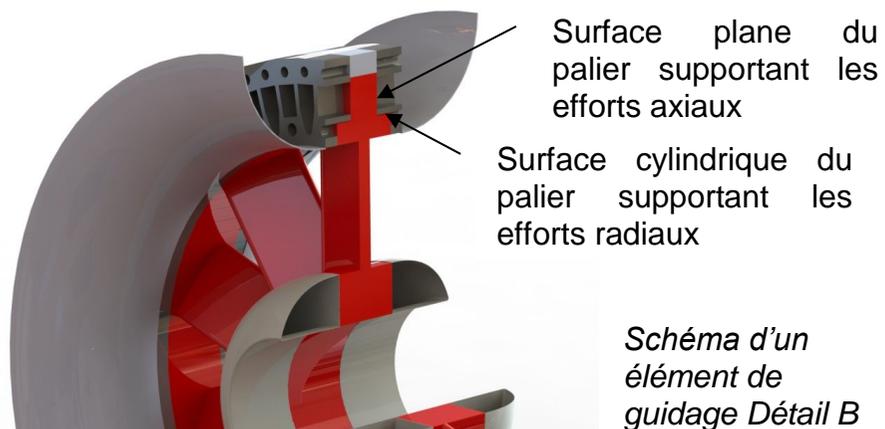


Figure 2 : back scatered sound

- (A) transmitted pulse
- (B) a small amount of the sound energy is reflected back (and doppler shifted) most of the energy goes forward.

Document technique DT5 guidage hydrodynamique de la turbine

Détail du palier hydrodynamique de l'hydrolienne

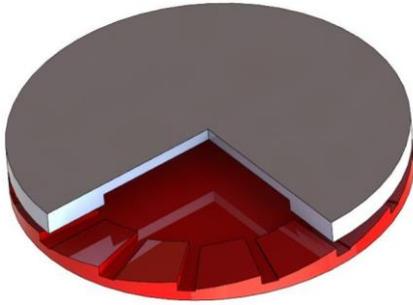


La périphérie de la turbine est découpée en éléments de guidage appelé blochet. Chaque élément occupe un secteur angulaire de 5 °soit 72 zones de guidage.

longueurs en mm.

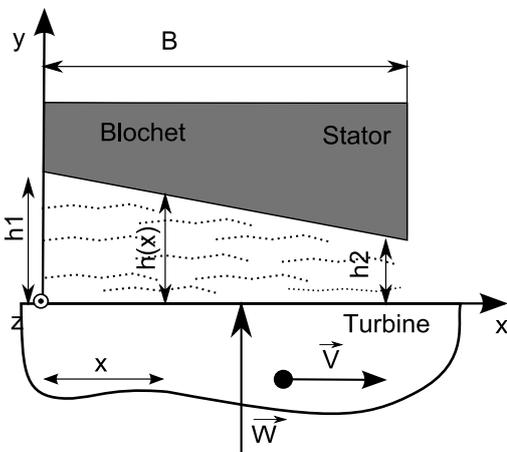
Document technique DT6 : guide de calcul du palier hydrodynamique

Guide de calcul pour palier hydrodynamique¹³



Le système hydrodynamique le plus simple, et à la base de beaucoup de réalisations complexes, est le patin incliné ou blochet. Il est constitué de deux faces planes non parallèles. La face inférieure est animée d'une vitesse de translation V ; La face supérieure est inclinée d'un angle α . L'angle α est petit, de même que l'épaisseur moyenne entre les faces inférieures et supérieures.

Par son mouvement de translation, et compte tenu de l'adhérence du fluide aux parois, la plaque supérieure (la turbine dans notre étude) entraîne le fluide dans l'espace convergent ainsi constitué ; ce mouvement crée un champ de pression qui permet de supporter la charge W appliquée sur le solide support de la face inclinée, le rotor dans notre étude.



La démarche proposée ci-dessous permet de calculer les paramètres caractéristiques de fonctionnement du blochet :

- charge supportée W ;
- force de frottement horizontale F sur la partie mobile et le facteur de frottement associé f^* .

Démarche de calcul

Les relations sont obtenues par intégration de l'équation de Reynolds en fonction de h , l'épaisseur du film dans le blochet.

$$p(h) = \frac{6\mu V}{\tan \alpha} \left[\frac{1}{h} - \frac{1}{h^2} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} - \frac{1}{h_1 + h_2} \right]$$

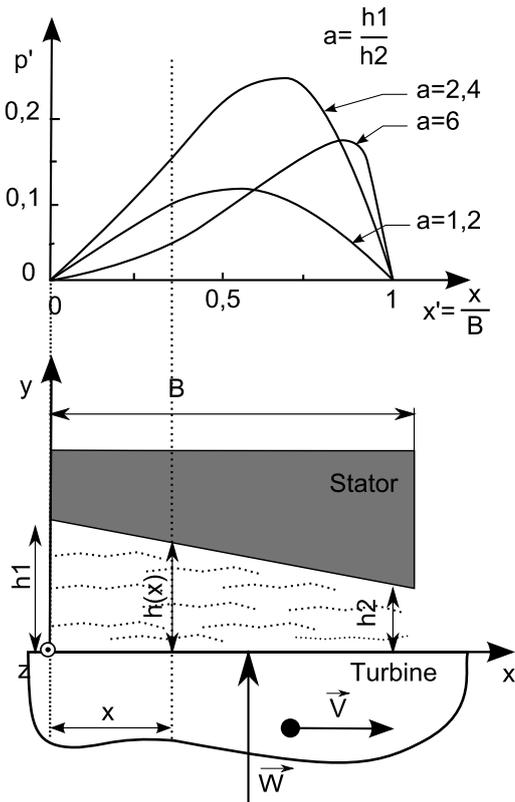
Pour une pression sans dimension, afin d'identifier les paramètres intervenant dans le phénomène de pression, on pose alors : $h' = \frac{h}{h_2}$ et $a = \frac{h_1}{h_2}$ avec $a > 1$ et $p' = \frac{p h_2^2}{\mu V B}$

Il vient alors : $p'(h') = \frac{6}{a-1} \left(\frac{1}{h'} - \frac{1}{h'^2} \frac{a}{a+1} - \frac{1}{1+a} \right)$

¹³ Source document : Aublin et co-auteurs, systèmes mécaniques - théorie et dimensionnement.

Document technique DT7 : charge admissible

Charge admissible en fonction de a



La figure ci-contre montre les variations de pression sans dimension p' pour différents rapports de $a = \frac{h_1}{h_2}$.

Calcul de la capacité de charge

La charge supportée est obtenue par intégration du champ de pression. Pour une largeur L suivant z nous avons :

$$W = \int_0^a pL dx$$

Définissons la charge sans dimension comme suit :

$$W' = \frac{h_2^2 W}{\mu V L B^2}$$

Il vient alors : $W' = \frac{6}{(a-1)^2} \left(\ln a - 2 \cdot \left(\frac{a-1}{a+1} \right) \right)$

La charge sans dimension est fonction du rapport $a = \frac{h_1}{h_2}$.

En variables dimensionnées, $W = W' \frac{\mu V L B^2}{h_2^2}$

Cette dernière relation fait apparaître le rôle joué par la viscosité μ et l'épaisseur minimale h_2 du film.

Force de frottement et coefficient de frottement sur la plaque mobile

Cette action mécanique est obtenue par intégration de la contrainte de cisaillement agissant sur la surface plane. On a $F = \int_0^B [T]_{y=0} L dx$.

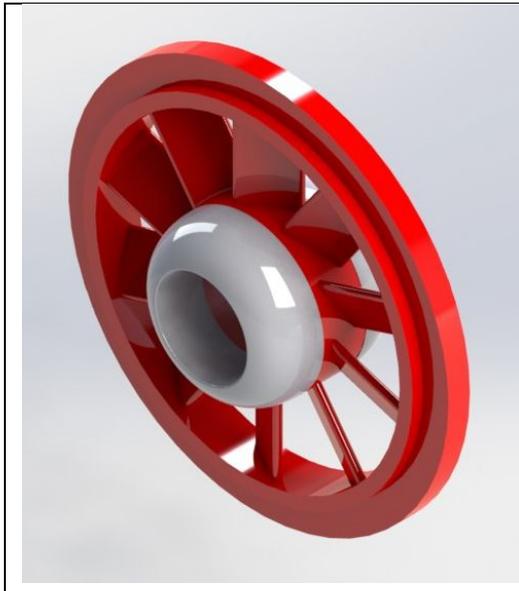
Cette intégrale nous amène à la force F sans dimension : $F' = \frac{F h_2}{\mu V L B}$

$$\text{avec } a = \frac{h_1}{h_2}, F' = \frac{1}{a-1} \left[4 \ln a - 6 \frac{a-1}{a+1} \right]$$

Le facteur de frottement se définit alors par le rapport : $f = \frac{F}{W}$.

On définit par commodité le nombre de frottement f^* tel que : $f^* = \frac{B f}{h_2}$.

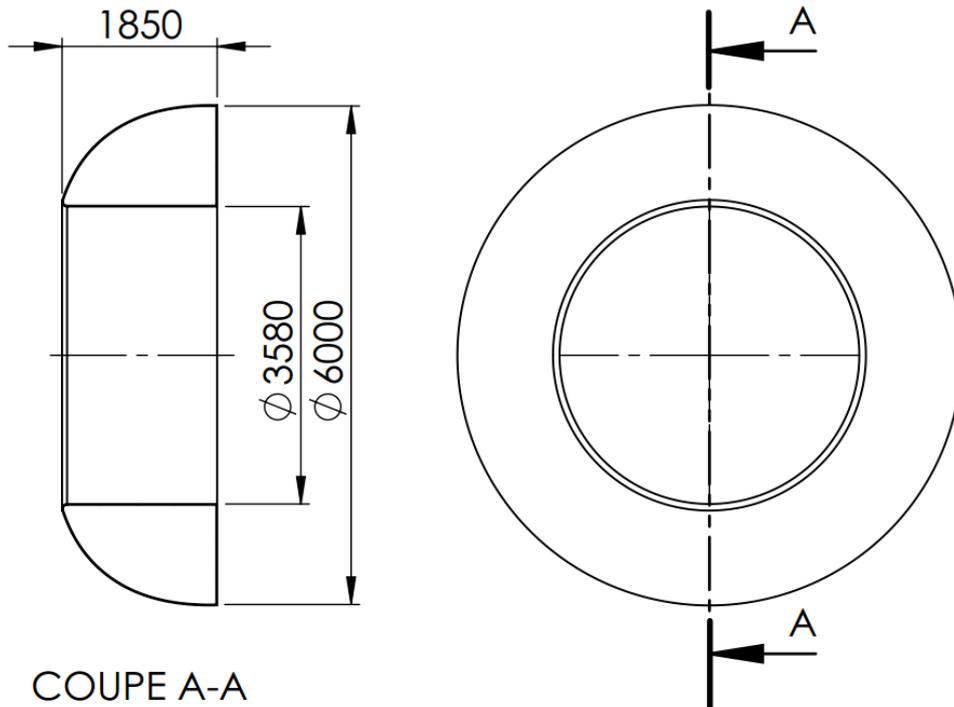
Document technique DT8 : géométrie de la turbine



- La turbine est composée :
- du centre en acier inoxydable : cylindre creux permettant la fixation des pales ;
 - des pales en matériaux composites ;
 - de la couronne en acier inoxydable contenant les aimants de la génératrice synchrone.

Masse de l'ensemble rotor composé de la turbine et des venturis centraux : 120 tonnes
 Volume de la turbine seule : 117 780 dm³

Dimensions du venturi central



Volume du venturi = 785 dm³

Poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est l'action mécanique que subit un corps plongé en tout ou en partie dans un fluide (liquide ou gaz) soumis à un champ de gravité.

| | |
|-------------------------------|---|
| $\vec{P}_A = -\rho V \vec{g}$ | P_A poussée d'Archimède en N ρ densité de l'eau de mer = 1,025 kg/dm ³ V volume immergé en dm ³ g accélération de la pesanteur en m·s ⁻² |
|-------------------------------|---|

Document technique DT9 : modèle multiphysique

Modélisation du prototype d'une hydrolienne

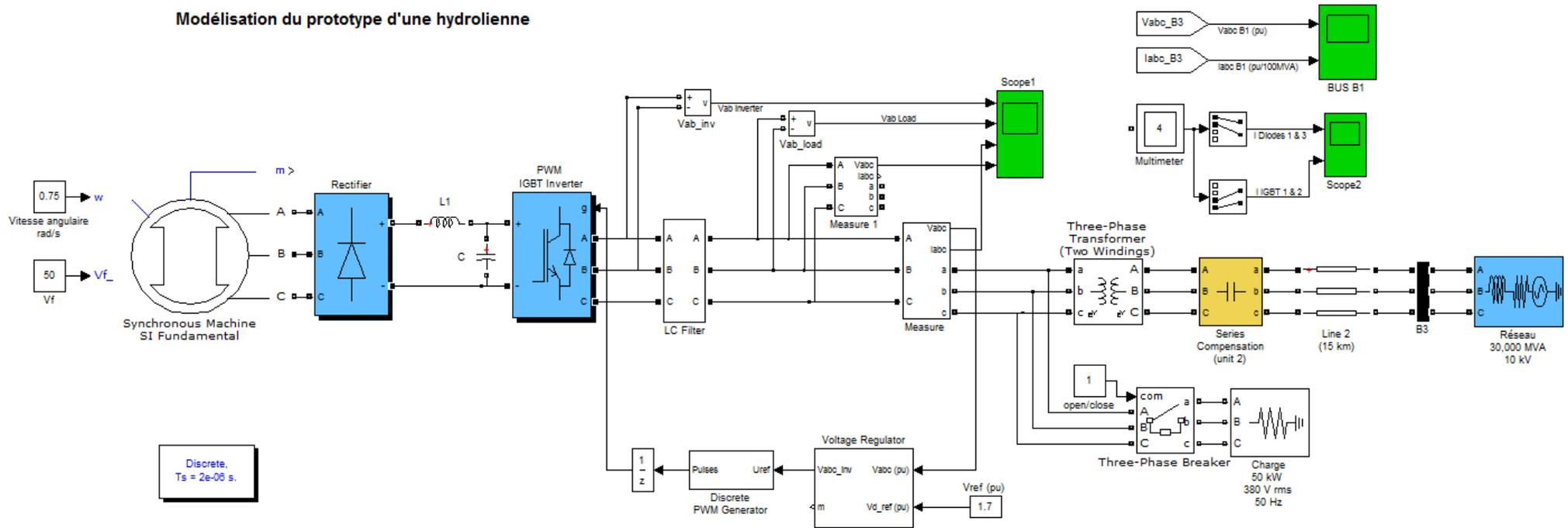


Figure 3 : modèle multiphysique du prototype d'hydrolienne

Document technique DT10 : chronogrammes de simulation

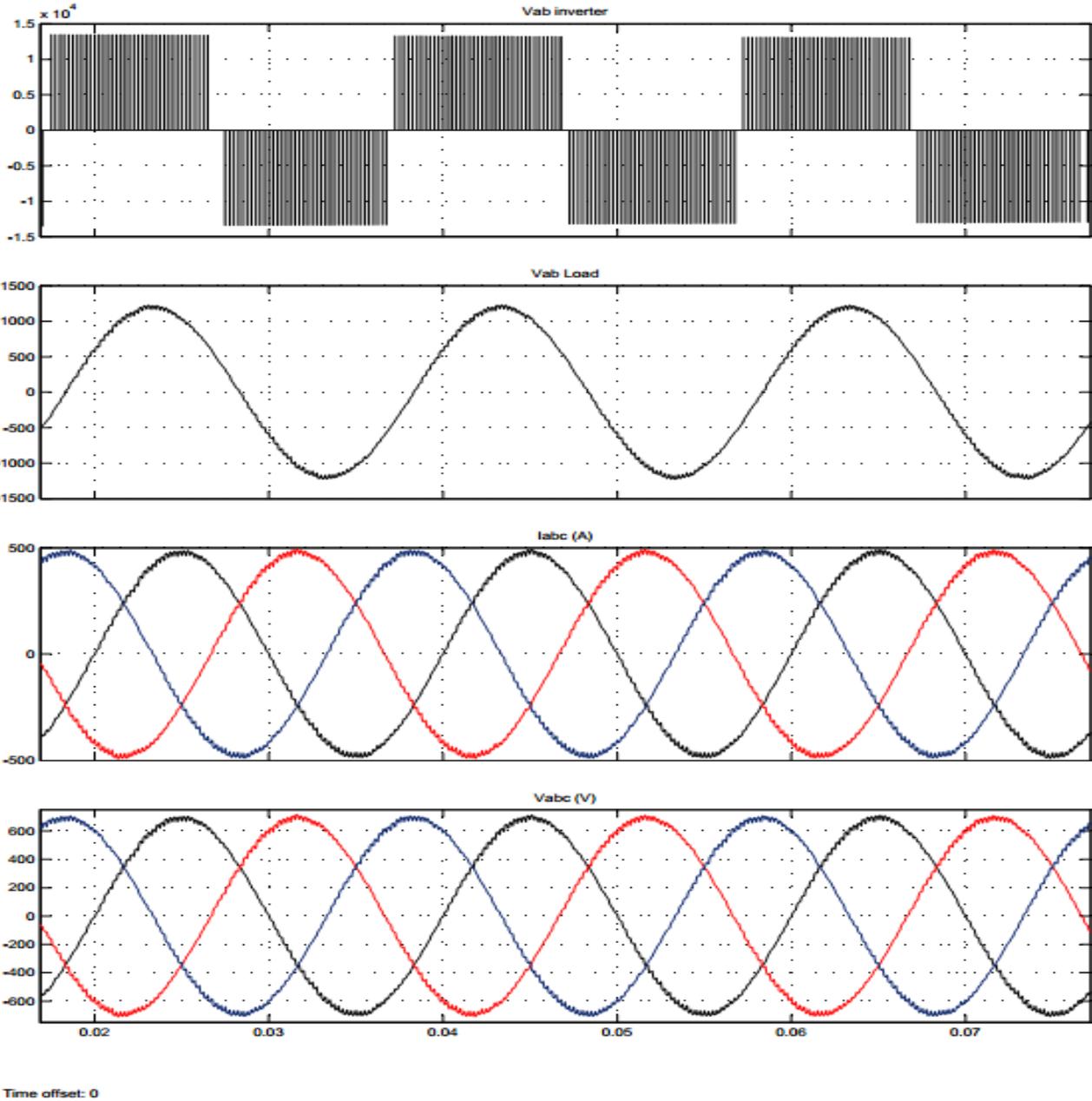


Figure 4 : chronogrammes de simulation

Document technique DT11 : allure du signal électrique produit

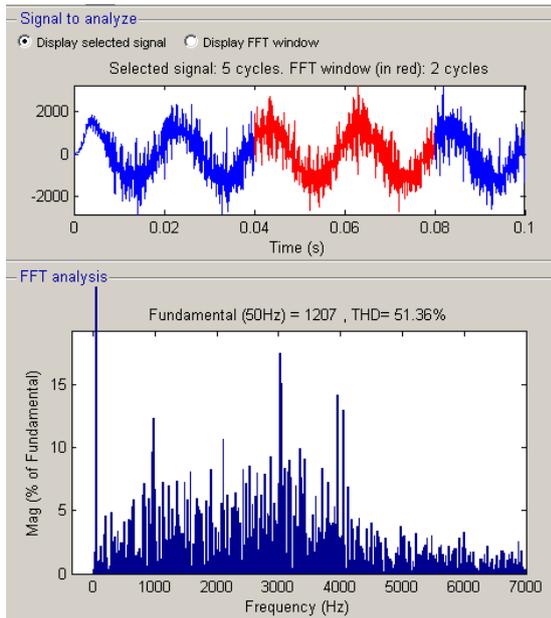


Fig. 5 : défaut de filtrage

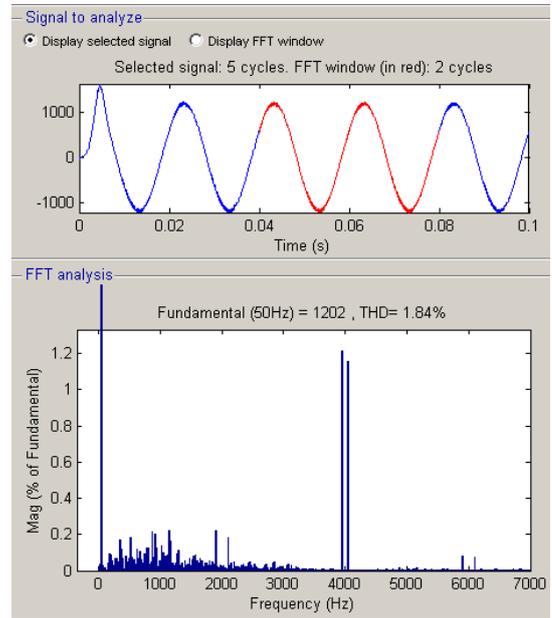


Fig. 6 : filtrage correct

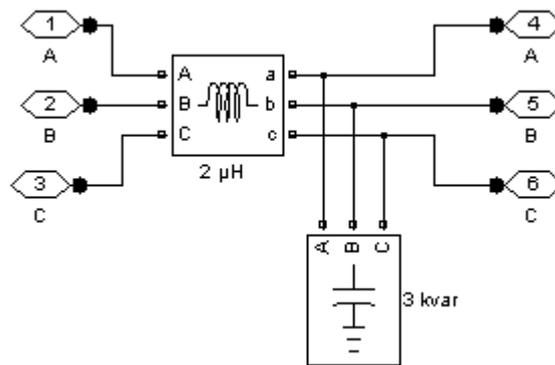
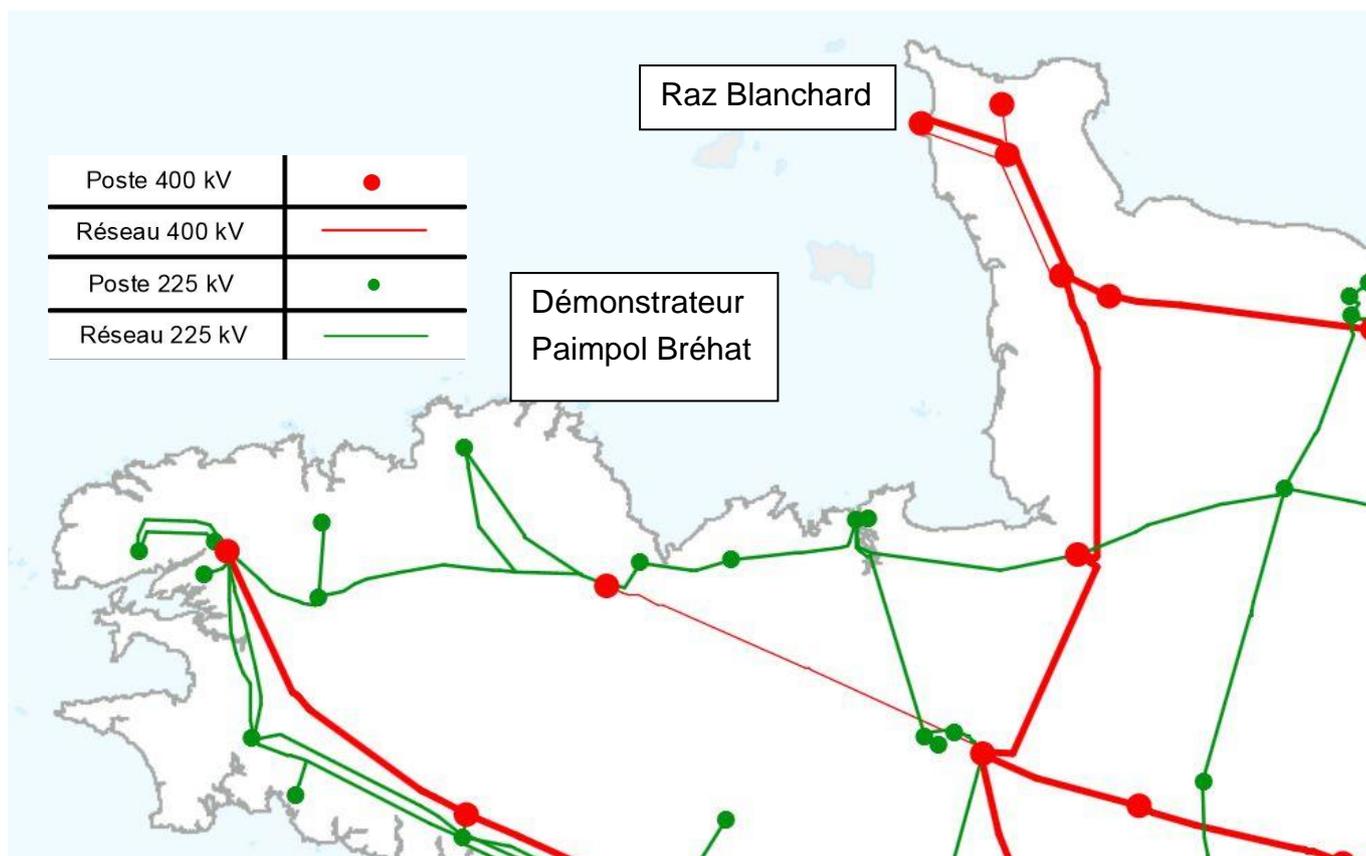


Fig. 7 : cellule LC Filter

Document technique DT12 : carte du réseau de transport d'électricité (RTE)



Source : RTE (réseau de transport d'électricité 225 et 400 kV)

Extrait du rapport

"Étude et prospective du RTE - Accueil de la production hydrolienne" (février 2013)

« ...Le réseau terrestre existant présente une capacité d'accueil importante, mais devra être renforcé au regard du gisement total actuellement estimé... »

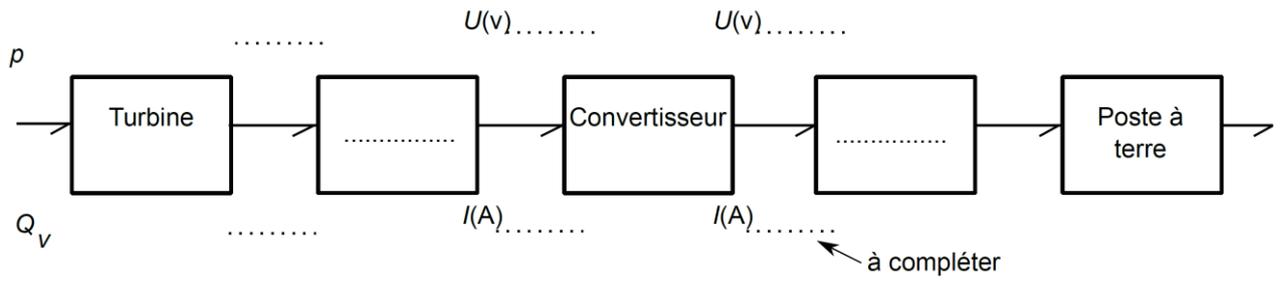
« ...Dans le Cotentin, grâce à la capacité de transit apportée par la liaison Cotentin Maine, l'accueil de la production hydrolienne jusqu'à 1 500 MW ne nécessiterait que des adaptations légères du réseau existant. Au-delà, des contraintes apparaissent progressivement dans certaines configurations, mais ces contraintes doivent pouvoir être gérées par des mesures d'exploitation à un coût raisonnable. En tout état de cause, au-delà de 2 500 MW, il sera indispensable de renforcer le réseau 400 kV par de nouveaux ouvrages... »

« ...Les zones propices à l'atterrage des câbles de raccordement sont rares et constituent le facteur dimensionnant de la stratégie de raccordement du potentiel hydrolien... »

« ...Compte tenu à la fois de la topographie de la côte, des protections juridiques dont bénéficie le littoral et des contraintes techniques d'implantation de câbles électriques, RTE n'a identifié que quelques zones restreintes propices à l'atterrage. Au-delà d'un certain volume de production, il devient nécessaire de disposer d'équipements de transformation en mer, qui doivent être hébergés sur une plate-forme émergée... »

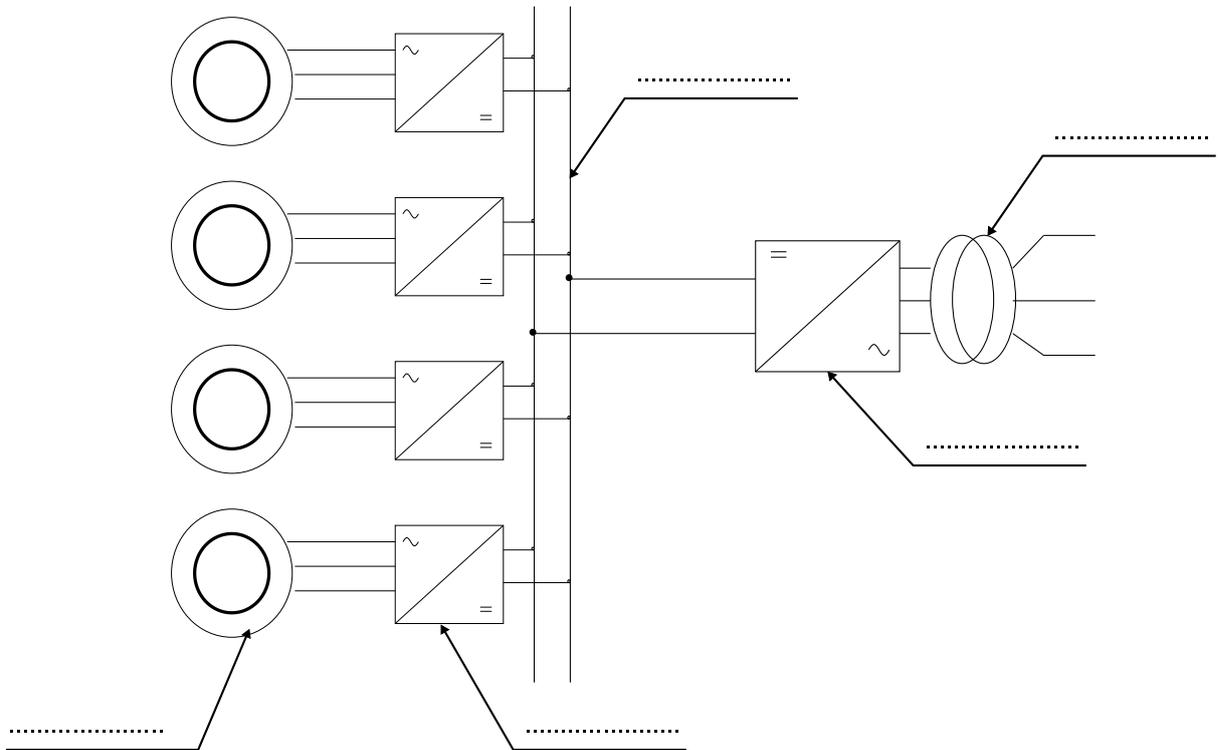
Document réponse DR1

Chaîne fonctionnelle

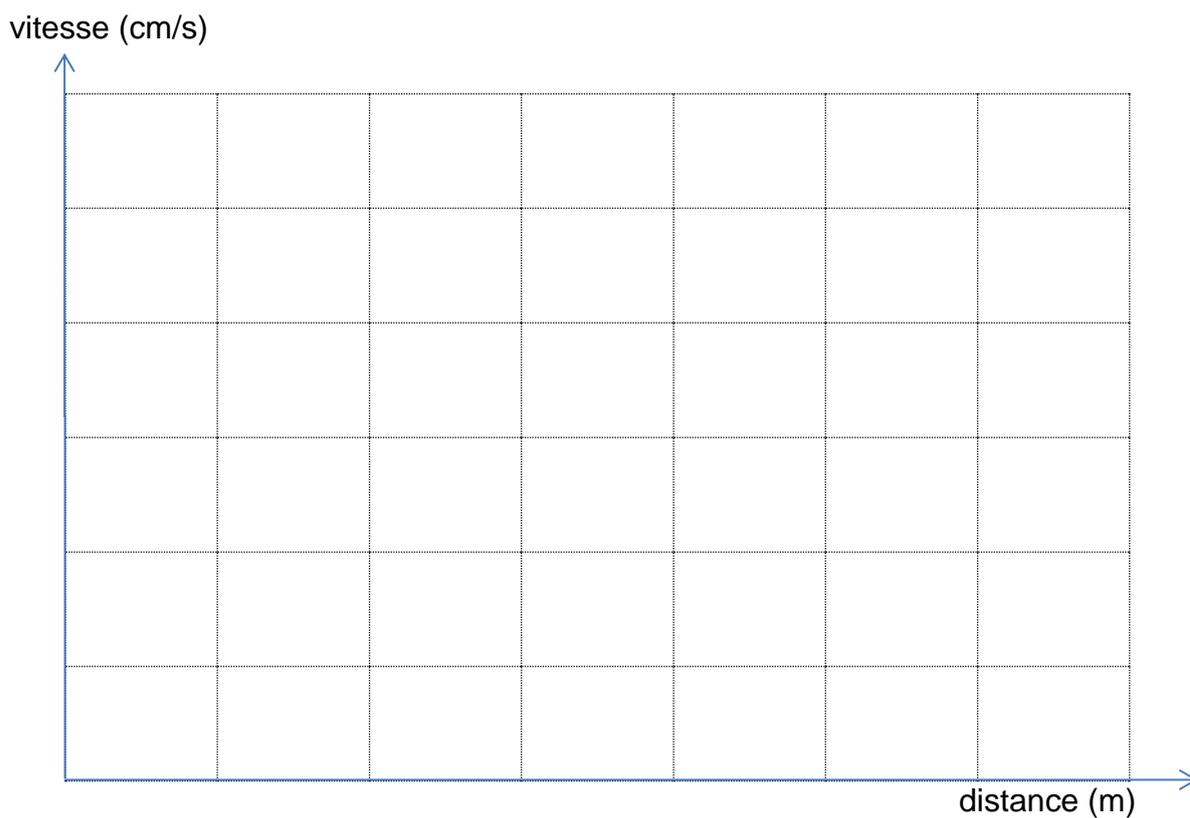


→ **lien de puissance** : un lien de puissance véhicule deux informations dont le produit est une puissance (exemple U et I dans le domaine électrique).

Schéma de principe



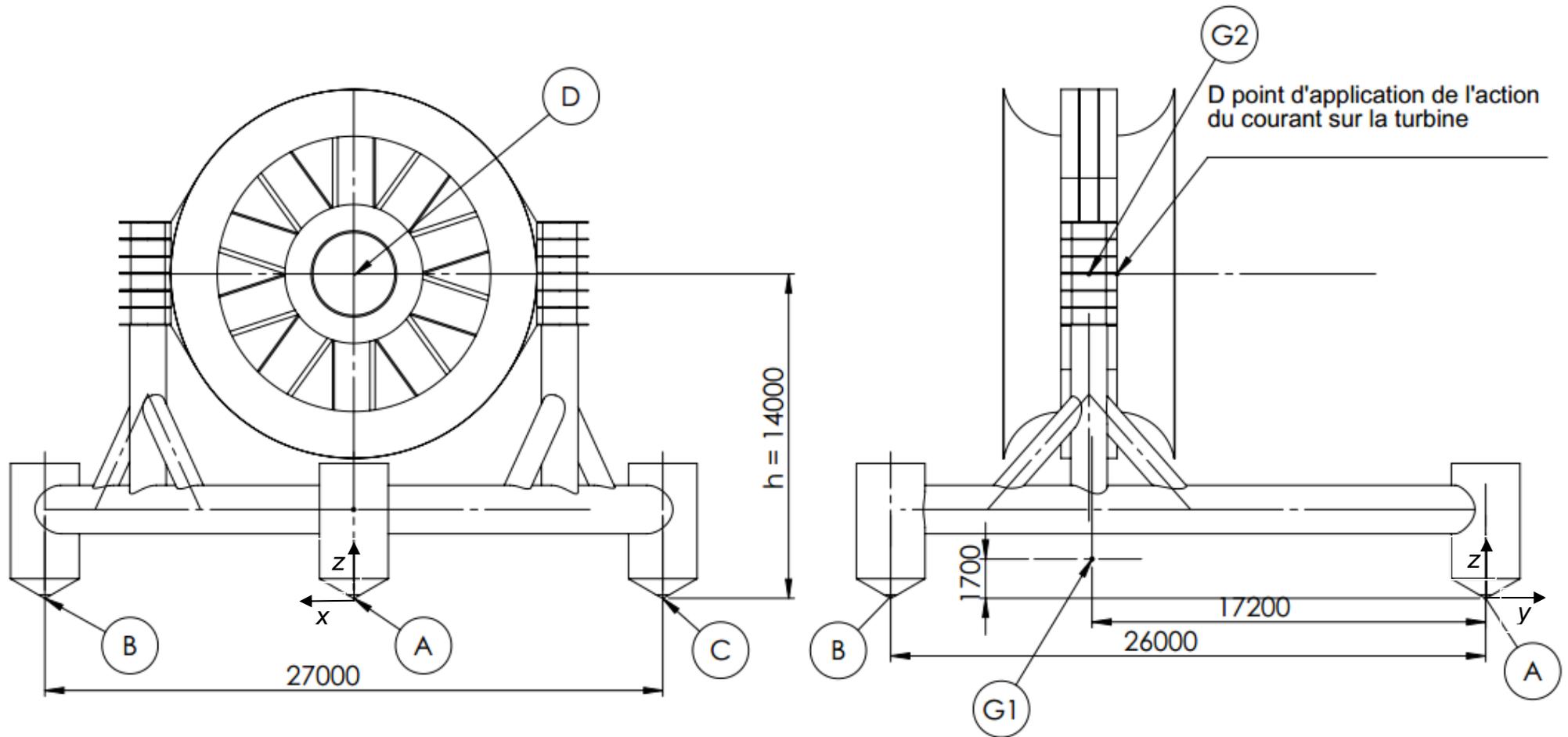
Document réponse DR2



| Distance (m) par rapport au fond | Vitesse (cm/s) | Distance (m) par rapport au fond | Vitesse (cm/s) |
|--|----------------|--|----------------|
| 3 | 150,633 | 17 | 229,745 |
| 4 | 165,86 | 18 | 225,369 |
| 5 | 174,551 | 19 | 217,344 |
| 6 | 184,985 | 20 | 213,576 |
| 7 | 189,7 | 21 | 231,078 |
| 8 | 191,6 | 22 | 236,035 |
| 9 | 199,049 | 23 | 230,036 |
| 10 | 198,468 | 24 | 228,585 |
| 11 | 196,123 | 25 | 234,987 |
| 12 | 205,994 | 26 | 240,69 |
| 13 | 220,76 | 27 | 241,591 |
| 14 | 217,449 | 28 | 225,769 |
| 15 | 225,779 | 29 | 234,337 |
| 16 | 213,588 | 30 | 238,817 |
| | | 31 | 239,66 |

Document réponse DR3

Masse immergée de l'hydrolienne composée du tripode lesté et de la machine *Openhydro* = 820 tonnes, en tenant compte de la poussée d'Archimède (poids appliqué sur la droite ($G1, G2$)).

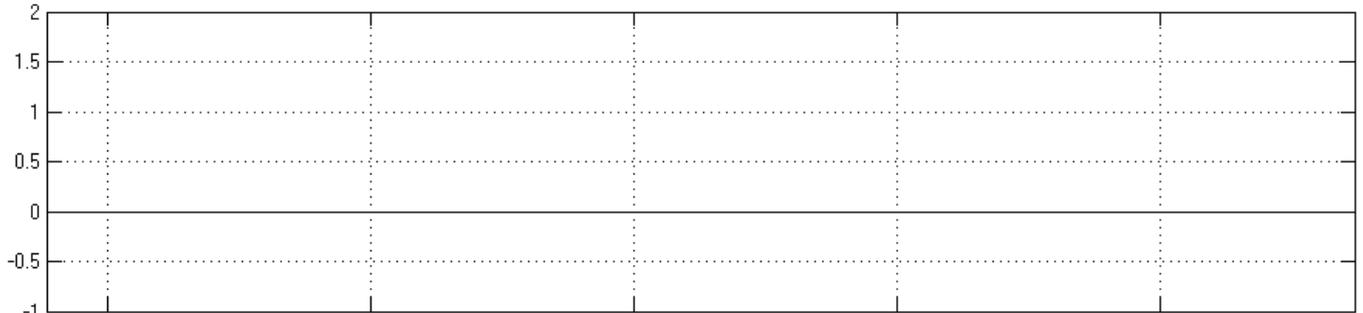


Document réponse DR4

Compléter le chronogramme de sortie (état logique haut : 2 V, état logique bas : 0).

Relever la période du signal sinusoïdal qui pilote la MLI. **Calculer** sa fréquence et **vérifier** sa conformité avec le cahier des charges.

Signal de sortie du comparateur



Triangle et sinus

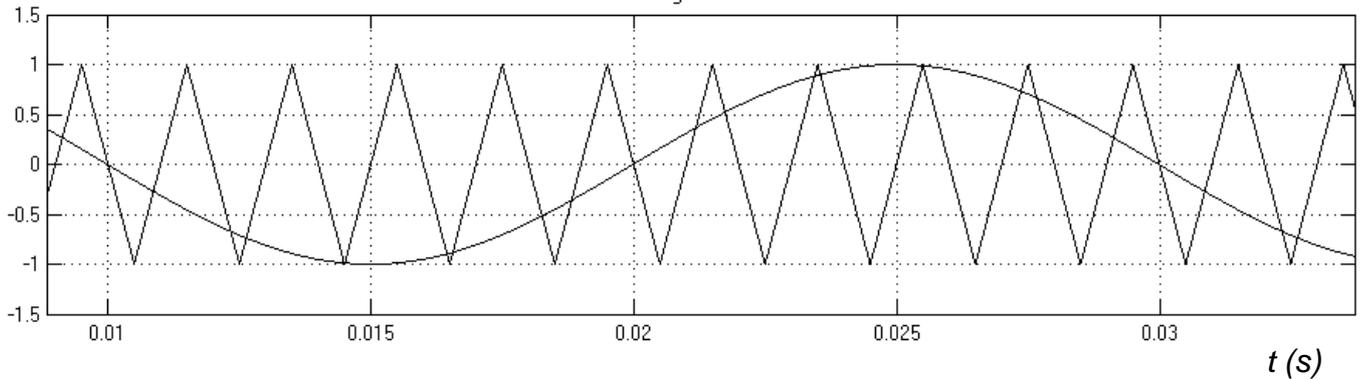


Tableau de commande de la MLI

Le tableau ci-dessous représente les états des interrupteurs (1 = fermé, 0 = ouvert) correspondant aux niveaux de tension attendus en A, B, C. Les états des interrupteurs pour la sortie V_{AB} et V_{BA} sont reportés sur le tableau. **Compléter** le tableau pour les autres sorties.

| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| V_{AB} | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V_{BA} | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_{BC} | | | | | | |
| V_{CB} | | | | | | |
| V_{AC} | | | | | | |
| V_{CA} | | | | | | |

Document réponse DR5

