

SESSION 2020

---

## **AGREGATION CONCOURS EXTERNE**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

### **ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

Durée : 6 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.**

**Ce sujet comporte :**

- la présentation ;
- le travail demandé de la pages 2 à 33 ;
- les documents réponses DR1 à DR5.

Il sera tenu compte de la présentation de la copie, de la qualité de la rédaction (orthographe et syntaxe), en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

### **Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

## HYDROLIENNE SABELLA D10

Ce sujet est accompagné de documents réponses à rendre avec la copie.



Figure 1 Hydrolienne Sabella D10.

### 1 Contexte et étude préliminaire

#### Objectif

Vérifier la pertinence de décarboner la production électrique de l'île d'Ouessant.

L'accord de Paris sur le climat a été conclu le 12 décembre 2015 à l'issue de la 21<sup>ème</sup> conférence des parties (COP 21) de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Cette conférence s'est achevée sur l'affirmation de la nécessité de renforcer la réponse globale à la menace du changement climatique, dans un contexte de développement durable. L'objectif est de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs, tout en luttant contre la pauvreté. Cet objectif implique notamment de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en dessous de 2°C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle. La réduction des gaz à effet de serre apparaît alors comme une nécessité incontournable pour atteindre cet objectif.

#### 1.1 Le projet PHARES

Étant donné les enjeux précédents, les territoires insulaires non raccordés au réseau national de distribution électrique cherchent à réduire leur impact environnemental, notamment en réduisant leur émission de gaz à effet de serre. Le projet PHARES (programme d'hybridation avancée pour renouveler l'énergie dans les systèmes insulaires), décline un modèle énergétique insulaire hybride, couplant différents moyens de production d'électricité d'origine renouvelable (hydroliennes, éoliennes et panneaux photovoltaïques) afin de les substituer le plus possible à la production d'électricité par groupes électrogènes. L'île d'Ouessant au large du Finistère est partie prenante du projet PHARES car elle n'est pas raccordée au réseau électrique du continent.

## 1.2 Consommation de l'île d'Ouessant en 2017

RTE (réseau de transport d'électricité) élabore et publie chaque année un bilan électrique, qui dresse une vision globale du système électrique sur l'année écoulée par zone géographique. La figure 2 représente la consommation électrique annuelle de la Bretagne par rapport à celle de la métropole française. En 2017, la Bretagne comptait 3 201 000 habitants, dont 1 000 sur l'île d'Ouessant.

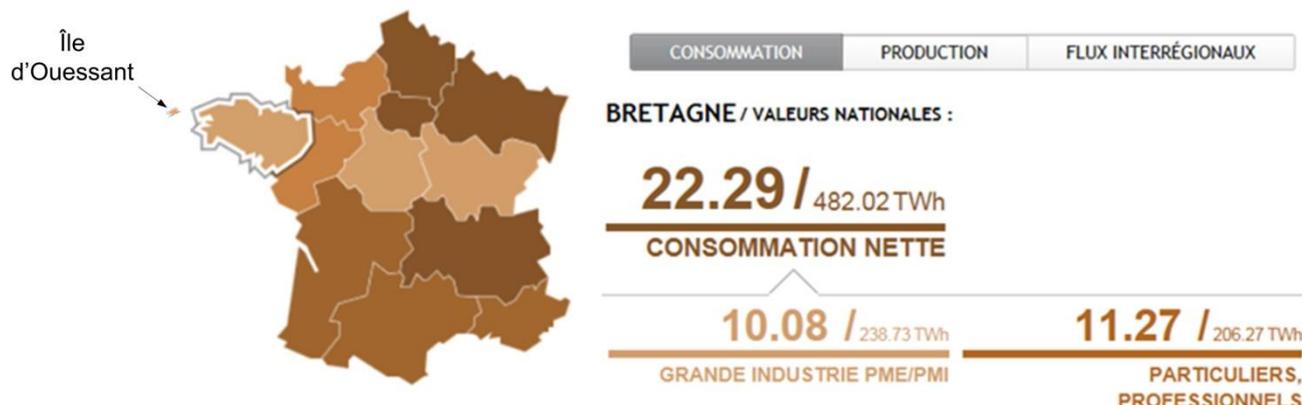


Figure 2 Consommation électrique annuelle de la Bretagne en térawatt-heure (TWh).

**Question 1** Estimer la consommation électrique annuelle de l'île d'Ouessant à partir des données annuelles de consommation électrique de la Bretagne et du contexte résidentiel de l'île.

## 1.3 Émissions en CO<sub>2</sub> sur l'île d'Ouessant

Actuellement, la production électrique sur l'île d'Ouessant est essentiellement issue d'une centrale au fioul comprenant quatre groupes électrogènes pour une puissance totale installée de 5 300 kW. Le tableau ci-après indique une estimation de la masse de CO<sub>2</sub> rejetée par mégawatt-heure d'énergie électrique produite pour différentes filières. Ces valeurs ne prennent pas en compte les émissions de CO<sub>2</sub> qui sont générées lors de la construction des moyens de production d'électricité, lors des cycles d'extraction et de transformation des combustibles ou lors de l'importation.

Filière	Masse de CO <sub>2</sub> en tonne par MWh d'électricité produite
Gaz	0,46
Fioul	0,67
Charbon	0,96
Biomasse	0,98

(Indicateurs RTE 2017)

**Question 2** Estimer la quantité de CO<sub>2</sub> émise sur l'île d'Ouessant en 2017 pour assurer la production d'électricité nécessaire.

RTE fournit également en continu une estimation des émissions de dioxyde de carbone générées par la production d'électricité en France, exprimées en grammes de CO<sub>2</sub> par kWh produit. La moyenne des émissions de la métropole se situe autour de 90 g de CO<sub>2</sub> par kWh.

**Question 3** Comparer les émissions de CO<sub>2</sub> sur l'île d'Ouessant à celles de la métropole française et conclure sur la nécessité de décarboner la production électrique de l'île.

### L'hydrolienne Sabella D10

PME quimpéroise fondée en 2008, Sabella est une société innovante d'ingénierie et de maîtrise d'œuvre, actrice majeure dans la filière hydrolienne. Sabella cible les zones insulaires ou littorales non interconnectées comme lieux privilégiés et prioritaires pour l'établissement d'un nouveau modèle énergétique fondé principalement sur l'énergie hydrolienne, propre et fiable. Après l'expérimentation réussie en 2008 de son prototype D03 (figure 3), Sabella signe une première nationale avec l'immersion et le raccordement à l'île d'Ouessant de Sabella D10 (figure 4), première hydrolienne connectée au réseau électrique français. Sabella offre une gamme de produits modulaires et compétitifs, sécurisée par un large portefeuille de brevets.

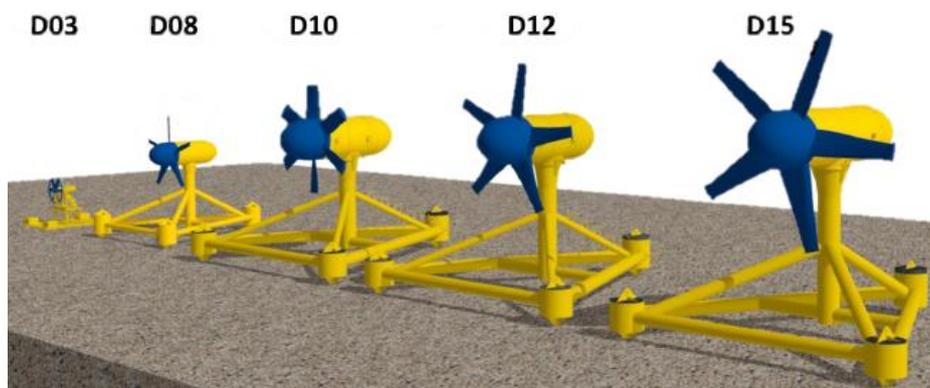


Figure 3 Famille de produits Sabella de moyenne et grande puissance.

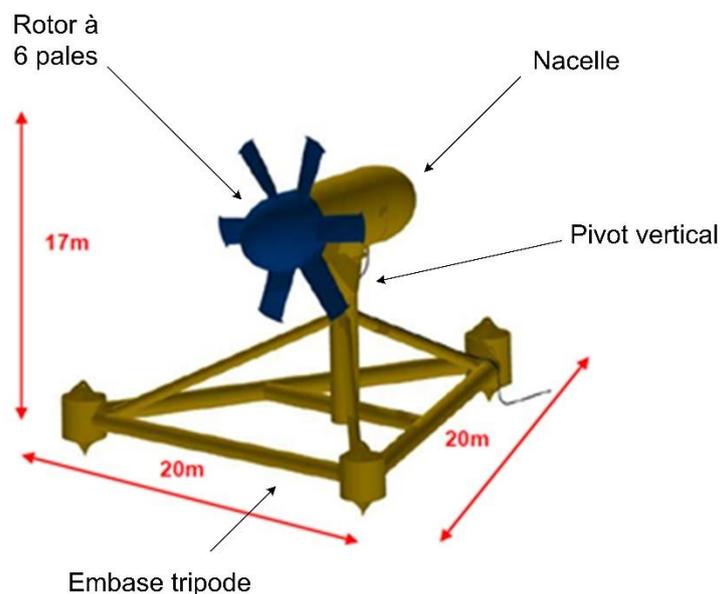


Figure 4 Hydrolienne Sabella D10

La technologie des hydroliennes Sabella utilise des turbines à flux axial ; c'est la plus répandue actuellement, car elle est la transposition directe des éoliennes dans un environnement aquatique. Il s'agit de pales, dont l'axe de rotation est parallèle au flux incident, et qui sont entraînées par les forces de portance. Ces turbines sont dites aussi horizontales, comme leur axe de rotation. La turbine doit être positionnée face à

Tournez la page S.V.P.

l'écoulement pour atteindre un rendement optimal. Elle convient donc particulièrement dans une zone de fort courant de direction presque constante comme le passage du Fromveur au large de Brest (figure 5). De ce fait, aucun système d'orientation n'est nécessaire.

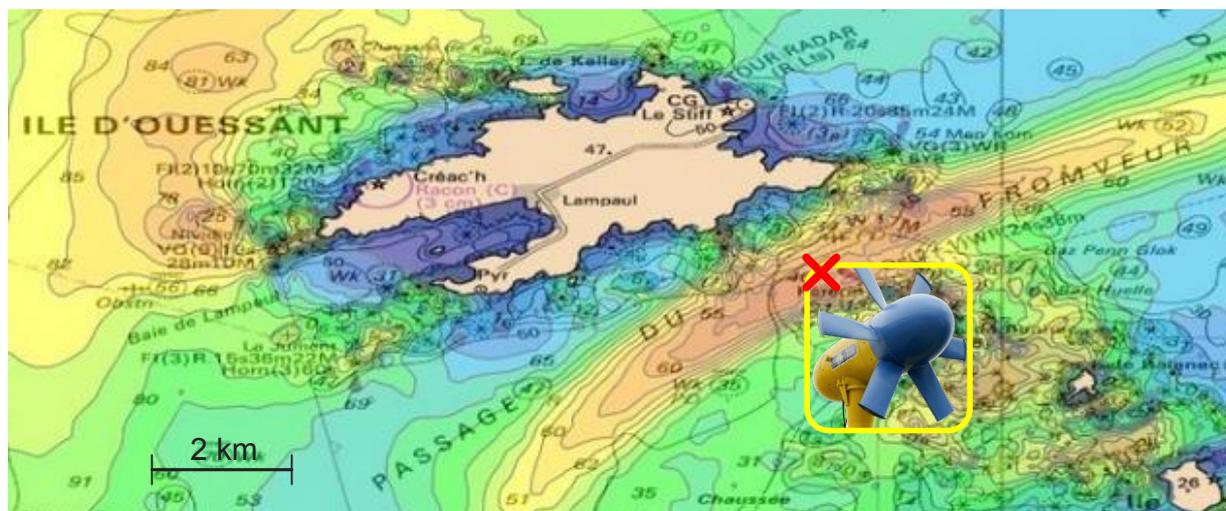


Figure 5 Localisation de l'hydrolienne Sabella D10 dans le passage du Fromveur

L'objectif de l'étude menée ici est de valider les solutions scientifiques et technologiques choisies par les concepteurs vis-à-vis des performances attendues listées par le cahier des charges représenté sur la figure 6 sous la forme d'un diagramme d'exigences.

Dans cette optique, l'étude propose de mener la démarche suivante :

- analyse de l'architecture de l'hydrolienne Sabella D10 ;
- validation de l'exigence fonctionnelle « extraire une puissance mécanique de 1 MW pour des courants marins de  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  » ;
- validation de l'exigence fonctionnelle « optimiser la production » ;
- validation de l'exigence fonctionnelle « fonctionner en toute sécurité » ;
- perspectives pour le projet PHARES.

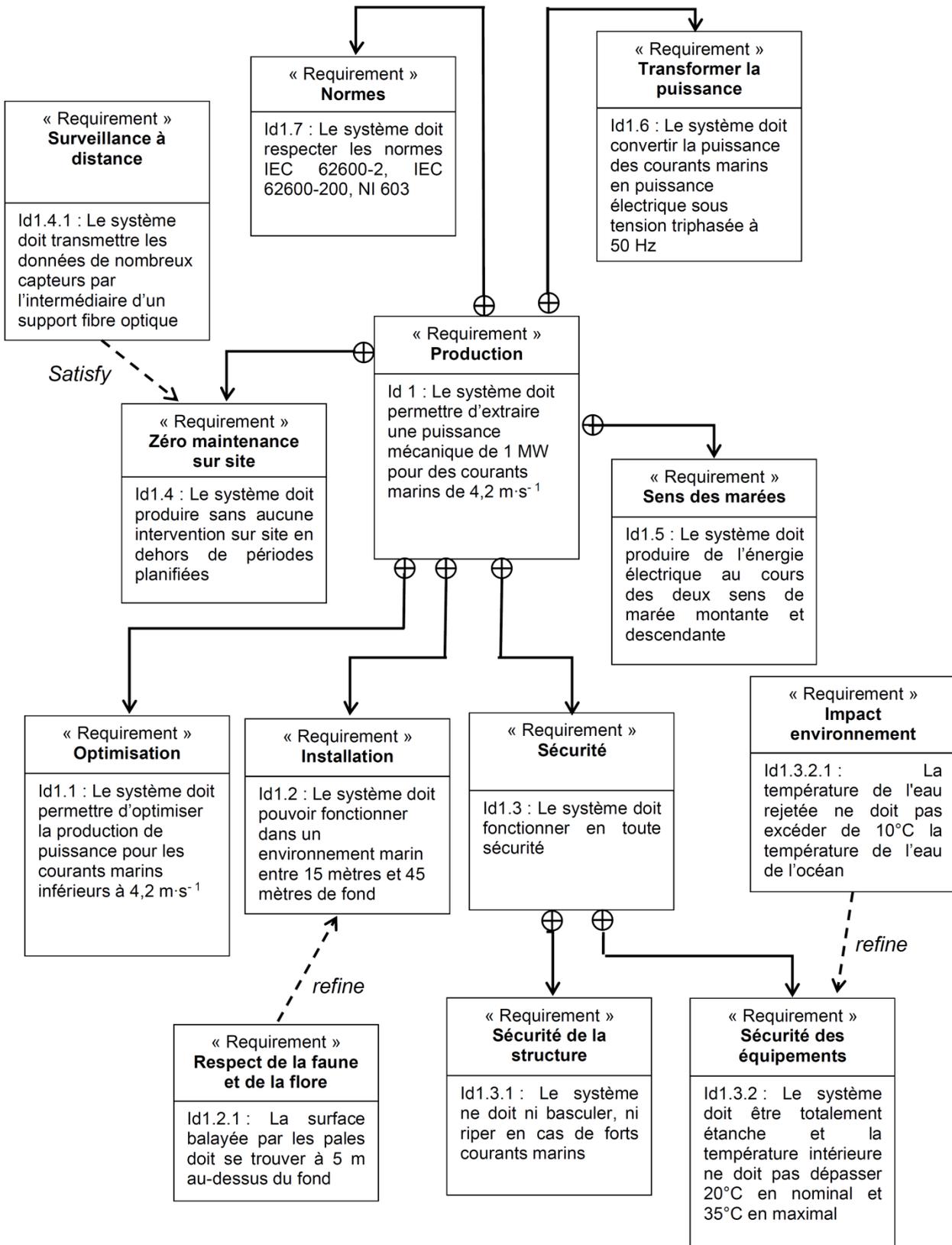


Figure 6 Diagramme des exigences partiel de l'hydrolienne Sabella D10.

## 2 Analyse de l'architecture de l'hydrolienne Sabella D10

---

### Objectif

Préciser les différents éléments de la chaîne fonctionnelle de l'hydrolienne.

---

L'hydrolienne se compose des sous-ensembles principaux suivants (figure 7) :

- une turbine ;
- une génératrice synchrone à aimants permanents ayant 120 paires de pôles et dont la fréquence de rotation  $N$  est comprise entre  $5 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  et  $15 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$  ;
- un redresseur à IGBT (insulated gate bipolar transistors, interrupteurs électroniques commandés) ;
- une batterie de supercondensateurs de stockage ;
- un onduleur à IGBT ;
- un transformateur triphasé réglable ;
- un câble sous-marin de raccordement à l'île.

L'hydrolienne peut aussi être reliée par un câble sous-marin à une future station d'interconnexion sous-marine permettant de mutualiser l'énergie produite par plusieurs hydroliennes. Le câble permet également de transporter les informations issues des différents capteurs depuis l'hydrolienne jusqu'aux installations à terre. L'hydrolienne est pilotée et surveillée depuis la terre via une interface homme-machine dédiée, disponible 100 % du temps.

**Question 4** Compléter, sur le diagramme de bloc interne de l'hydrolienne du document réponse DR1, les labels des deux blocs et des deux signaux manquants.

**Question 5** À l'aide du tableau du document réponse DR2, préciser la nature de la puissance sortante des composants listés, ainsi que les grandeurs de flux et d'effort et leur caractéristique respective (alternative ou continue). Pour les grandeurs alternatives, préciser la fréquence ou la gamme de fréquences imposée par le fonctionnement de l'hydrolienne.

**Question 6** Pourquoi la puissance en sortie de la génératrice n'est-elle pas directement exportée sur l'île d'Ouessant ? Justifier ainsi l'architecture de l'hydrolienne.

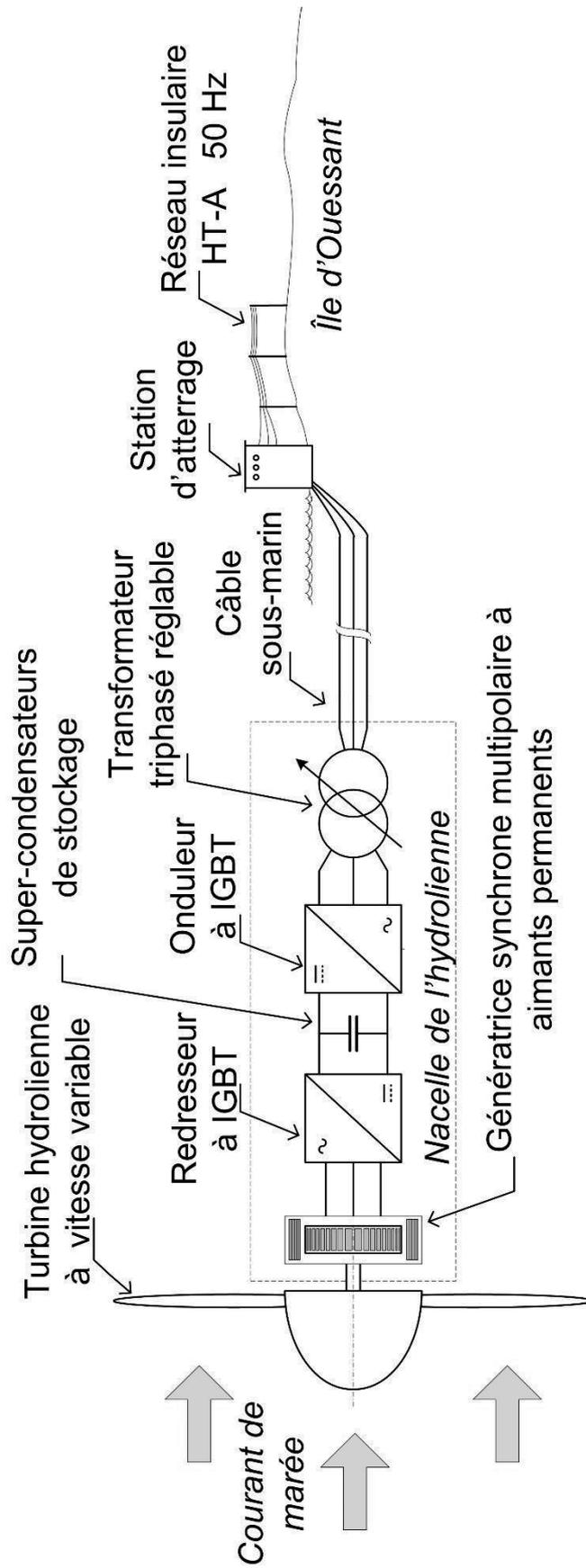


Figure 7 Schéma de principe du système de l'hydrolienne raccordée au réseau électrique insulaire.

Sur le poste de contrôle de la station d'atterrissage est affiché un synoptique qui donne les informations nécessaires au suivi de la production de l'hydrolienne. Le calculateur embarqué dans l'hydrolienne envoie régulièrement les valeurs nécessaires au suivi.

**Question 7** Après analyse d'un extrait du code calculateur ci-dessous, déterminer les grandeurs physiques, avec leur unité, envoyées dans *valeur1*, *valeur2* et *valeur3*.

```
//fonction F1
function valeur=F1(T)
    n=length(T);
    for k=1:n
        C(k)=T(k)*T(k);
    end;
    valeur=sqrt(mean(C));
endfunction
//fonction F2
function valeur=F2(T, R)
    n=length(T);
    for k=1:n
        C(k)=T(k)*R(k);
    end;
    valeur=mean(C);
endfunction

//programme
//données issues des capteurs en sortie du transformateur triphasé et équilibré
// I tableau contenant i(t) intensité de ligne en ampère, I(k)=i(k*Te), Te période d'échantillonnage
// V tableau contenant v(t) tension simple en volt, V(k)=v(k*Te), Te période d'échantillonnage

valeur1=F1(I);
disp(valeur1);

valeur2=3*F2(V,I)
disp(valeur2);

valeur3=F2(V,I)/(F1(I)*F1(V))
disp(valeur3);
```

### 3 Exigence fonctionnelle « extraire une puissance mécanique de 1 MW pour des courants marins de 4,2 m·s<sup>-1</sup> »

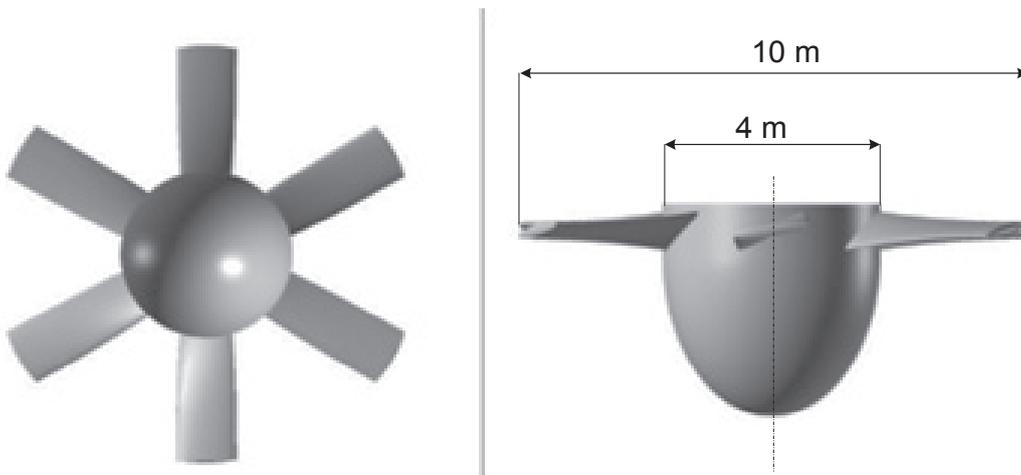
#### Objectif

Caractériser la géométrie de la turbine et la puissance fournie à la génératrice afin de définir les paramètres de la partie commande dans le but de valider les performances attendues imposées par le cahier des charges.

Exigence	Critères	Niveaux
Extraire une puissance mécanique provenant des courants marins	Puissance mécanique fournie Vitesse des courants marins	$P_M = 1 \text{ MW}$ $V_C = 4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

#### Données :

- masse volumique de l'eau de mer autour de 15°C à 5 bars (40 mètres de profondeur)  $\rho_{\text{eau salée}} = 1\,045 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ;
- diamètre du rotor :  $D_{\text{rotor}} = 10 \text{ m}$  ;
- diamètre du moyeu :  $D_{\text{moyeu}} = 4 \text{ m}$  ;
- nombre de pales : 6 ;
- largeur des pales : environ 1/3 de leur longueur.



La vitesse spécifique notée  $\lambda = \frac{u}{V_C} = \frac{R \cdot \Omega}{V_C}$  est une grandeur scientifique significative caractéristique d'une turbomachine avec :

- $R$ , rayon du rotor (m) ;
- $u$ , vitesse périphérique des pales (m·s<sup>-1</sup>) ;
- $\Omega$ , vitesse angulaire du rotor (rad·s<sup>-1</sup>) ;
- $V_C$ , vitesse du fluide traversant la turbine (m·s<sup>-1</sup>).

### 3.1 Validation de la puissance fournie à la génératrice

#### Objectif

Valider la puissance fournie par le rotor à la génératrice.

Pour cette étude, un système matériel est placé dans un fluide de masse volumique  $\rho$  en écoulement uniforme et stationnaire de vitesse  $V_{fl}$ . Ce système subit de la part du fluide une force élémentaire  $\overrightarrow{dF}_{(fluide \rightarrow \text{système matériel})} = \overrightarrow{dP} + \overrightarrow{dT}$  en chaque point de sa surface avec :

- $\overrightarrow{dT}$  la traînée qui correspond à la composante de  $\overrightarrow{dF}$  colinéaire à  $\overrightarrow{V_{fl}}$  modélisée par  $\|\overrightarrow{dT}\| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dS \cdot C_x \cdot V_{fl}^2$  ;
- $\overrightarrow{dP}$  la portance qui correspond à la composante de  $\overrightarrow{dF}$  orthogonale à  $\overrightarrow{V_{fl}}$  modélisée par  $\|\overrightarrow{dP}\| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dS \cdot C_z \cdot V_{fl}^2$  ;
- $dS$  l'élément de surface du système matériel sur un plan de normale  $\overrightarrow{V_{fl}}$  ;
- $C_x$  le coefficient de traînée ;
- $C_z$  le coefficient de portance.

#### 3.1.1 Modélisation de la turbine

La turbine de l'hydrolienne est principalement constituée de six pales et d'un rotor (figure 8). Le rotor est guidé en rotation par rapport à la nacelle autour de l'axe  $(O, \overrightarrow{z_0})$ . Cet axe est colinéaire à la vitesse du courant de marée définie par  $\overrightarrow{V_{(eau/nacelle)}} = -V_C \cdot \overrightarrow{z_0}$ .

#### Hypothèses :

- les coefficients adimensionnels  $C_x$  et  $C_z$  sont théoriquement deux fonctions du nombre de Reynolds  $R_e$ . Cependant, dans la gamme de nombres de Reynolds dans laquelle fonctionne l'hydrolienne, ces deux fonctions peuvent être considérées comme indépendantes de  $R_e$  ;
- le référentiel lié au repère  $R_0(O, \overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_0})$  est galiléen et est fixe par rapport à la nacelle ;
- la vitesse angulaire de la turbine par rapport à la nacelle, notée  $\overrightarrow{\Omega_{turbine/nacelle}} = \Omega \cdot \overrightarrow{z_0}$  est supposée constante.

#### Données et notations du modèle (figure 8) :

- une pale est associée à une base orthonormée directe  $(\overrightarrow{e_r}, \overrightarrow{e_\theta}, \overrightarrow{z_0})$  ;
- la position d'un point  $P$  de cette pale est telle que  $\overrightarrow{OP} = r \cdot \overrightarrow{e_r}$  ;
- la direction de la corde de référence de la pale est définie par la direction  $\overrightarrow{e_c}$  ;
- le plan moyen de la pale est défini par  $(P, \overrightarrow{e_r}, \overrightarrow{e_c})$  ;
- l'angle de calage formé par la pale et la direction de la vitesse du point  $P$  engendrée par la rotation de la turbine est  $\alpha = (\overrightarrow{e_\theta}, \overrightarrow{e_c})$  ;
- l'angle d'incidence formé par la corde de référence de la pale et la direction de la vitesse apparente du courant est  $i = (\overrightarrow{e_c}, \overrightarrow{V_{(P \in \text{pale}/\text{eau})}})$ .

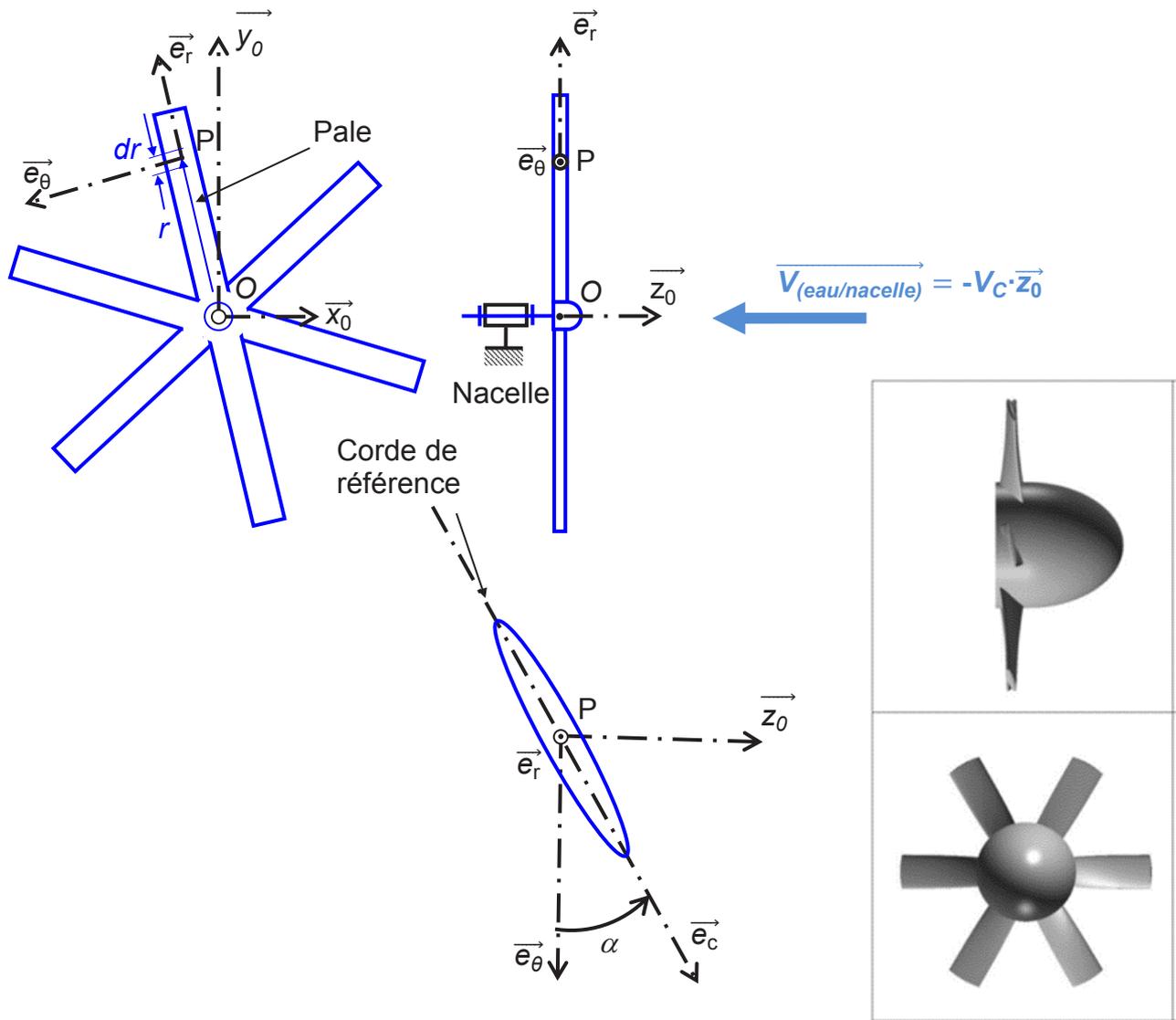


Figure 8 Modèle simplifié plan de la turbine.

**Question 8** Exprimer dans la base  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z}_0)$  la vitesse du point  $P$  appartenant à la pale par rapport à l'eau notée  $\vec{V}_{(P \in \text{pale}/\text{eau})}$  en fonction de  $r$ ,  $\Omega$  et  $V_C$ .

Pour maximiser le rendement d'une hydrolienne, il est nécessaire que le rapport de la portance sur la traînée, appelé « finesse », soit maximal. L'un des paramètres influents est la somme de l'angle de calage  $\alpha$  et de l'angle d'incidence  $i$ .

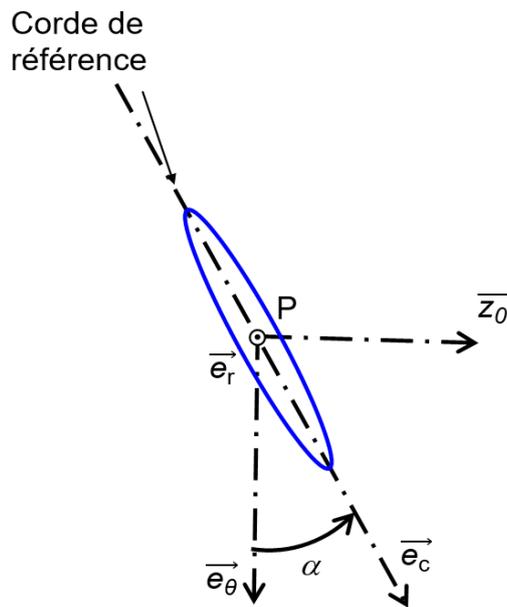
**Question 9** Donner l'expression littérale de l'angle d'incidence  $i$  en fonction de  $r$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$  et  $V_C$ .

Remarque

En faisant l'hypothèse que l'épaisseur de la pale est négligeable, l'aire  $dS$  de la projection de l'élément de pale situé entre les rayons  $r - \frac{dr}{2}$  et  $r + \frac{dr}{2}$  sur un plan de normale  $\vec{V}_{(P \in \text{pale}/\text{eau})}$  a pour expression  $dS = L \cdot dr \cdot \sin(i)$  où  $L$  est la longueur de la corde de référence.

**Question 10** En faisant l'approximation que les expressions de la remarque préliminaire sont applicables à l'élément de pale étudié, exprimer les normes  $\|dP_{(eau \rightarrow pale)}\|$  et  $\|dT_{(eau \rightarrow pale)}\|$  respectivement de la portance élémentaire et de la trainée élémentaire exercées par l'eau sur l'élément de pale de longueur  $dr$ , en fonction de  $L$ ,  $dr$ ,  $C_x$ ,  $C_z$ ,  $\rho$ ,  $r$ ,  $\Omega$ ,  $i$  et  $V_C$ .

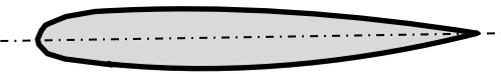
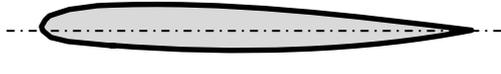
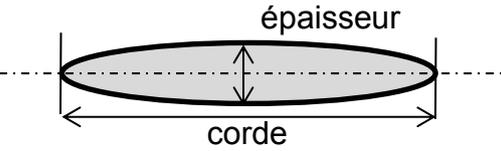
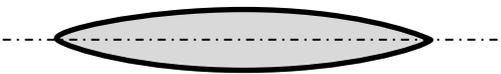
**Question 11** Reproduire le schéma ci-après sur votre feuille de copie, puis tracer le vecteur vitesse  $\vec{V}_{(P \in pale/eau)}$ , la portance élémentaire  $dP_{(eau \rightarrow pale)}$  ainsi que la trainée élémentaire  $dT_{(eau \rightarrow pale)}$  s'exerçant sur l'élément de pale précédemment défini. Les trois vecteurs doivent avoir pour origine le point P, une longueur arbitraire et un angle d'incidence  $i$  positif.



**Question 12** En vous aidant de la question précédente, montrer en détaillant votre démarche, que l'expression littérale de la norme du moment élémentaire de la force exercée par l'eau sur l'élément de pale, noté  $\|d\vec{\Gamma}\|$ , par rapport à l'axe de rotation  $(O, \vec{z}_0)$ , est de la forme :

$$d\vec{\Gamma} \cdot \vec{z}_0 = \frac{1}{2} \cdot r \cdot \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \cdot (-C_x \cdot \cos(\alpha+i) + C_z \cdot \sin(\alpha+i))$$

Les valeurs de  $C_x$  et  $C_z$  dépendent du profil de pale et sont fonctions de l'angle d'incidence  $i$ . Le tableau ci-après présente différents profils de pale bi-convexes.

	Profil
Symétrique	
Assymétrique	
Elliptique	
Amande	

**Question 13** Justifier en vous aidant du diagramme des exigences le choix par le constructeur d'un profil elliptique ou en amande.

Les deux graphes de la figure 9, issus de simulations numériques par la méthode d'évaluation « Navier-Stokes 2D », fournissent les coefficients de portance  $C_z$  et de trainée  $C_x$  des pales en fonction de l'angle d'incidence  $i$  pour les profils suivants :

Type de profil	Épaisseur relative en % de la longueur de la corde
Elliptique	10 %, 15 %
Amande	5 %, 10 %

La figure 10 représente la polaire d'Eiffel c'est-à-dire le lieu des points de coordonnées  $(C_x, C_z)$  pour différents angles d'incidence.

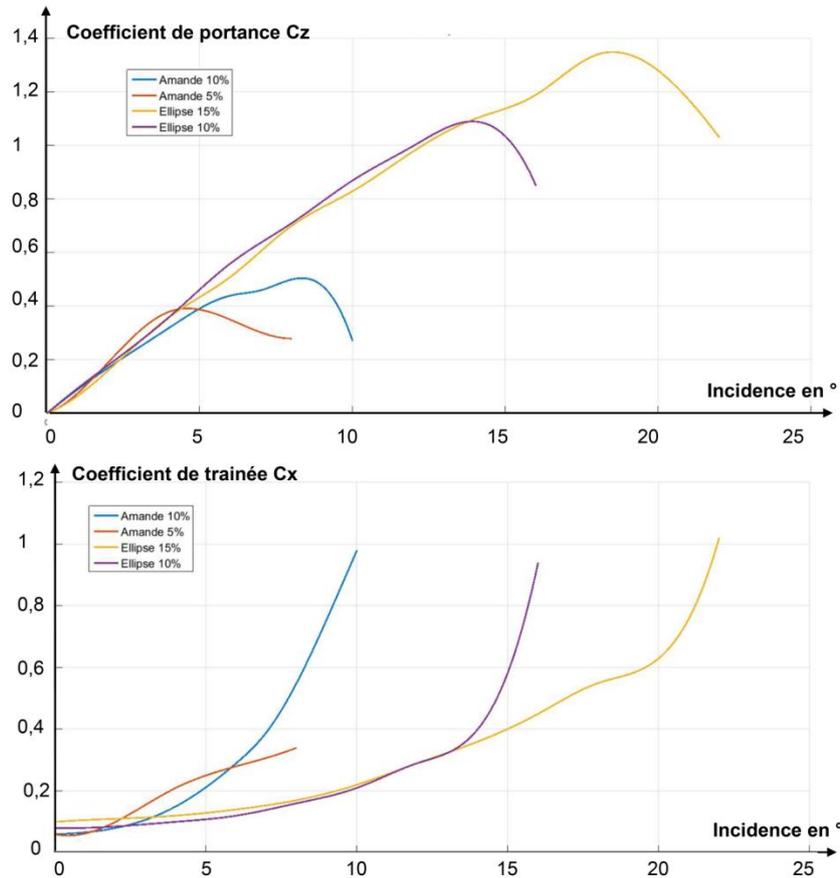


Figure 9 Coefficients de portance  $C_z$  et de trainée  $C_x$  de différents profils en fonction de l'angle d'incidence  $i$  pour un angle de calage fixe.

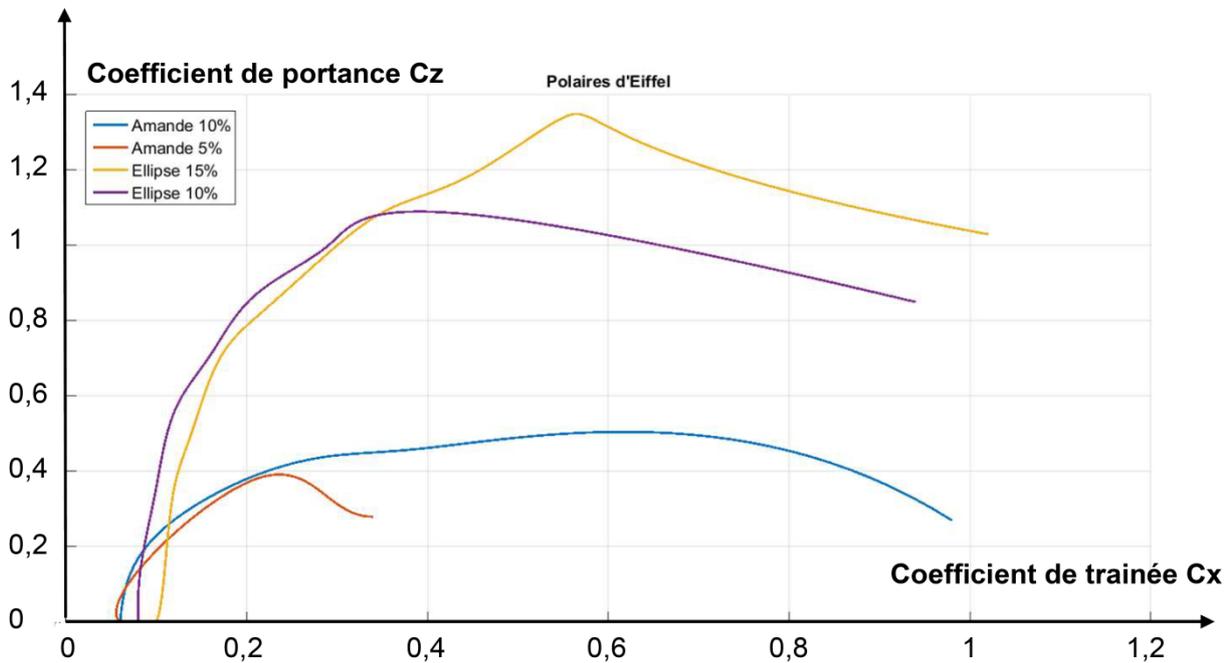


Figure 10 Polaires d'Eiffel ( $C_x, C_z$ ).

**Question 14** À l'aide des courbes de la figure 10 montrer que la finesse maximale est obtenue au point où la tangente à la polaire d'Eiffel passe par l'origine. Proposer un choix de profil de pale.

La question 9 a montré que l'angle d'incidence  $i$  est fonction de  $r$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$  et  $V_C$ . À partir de l'expression du couple défini à la question 12, il est possible de tracer  $\frac{d\vec{T} \cdot \vec{z}_0}{dr}$  pour le profil de pale choisi précédemment, avec tous les paramètres fixés, sauf l'angle de calage  $\alpha$ , et ceci pour deux points de la pale situés à des distances différentes de l'axe (figure 11).

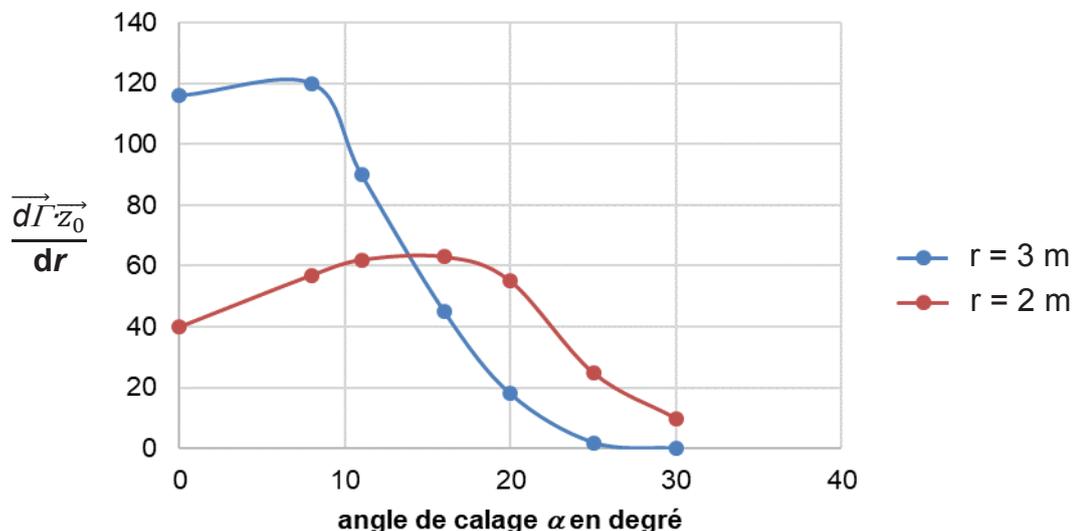


Figure 11 Tracé de  $\frac{d\vec{T} \cdot \vec{z}_0}{dr}$  en fonction de l'angle de calage  $\alpha$  pour deux valeurs du rayon  $r$ , pour une vitesse de courants marins  $V_C$  de  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et une fréquence de rotation de la turbine de  $N = 13 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Question 15** À l'aide de la figure 11, proposer une solution constructive pour la forme des pales sur toute leur longueur dans l'objectif d'augmenter le rendement de la turbine de l'hydrolienne. Justifier votre réponse.

**Question 16** Écrire la formule globale du couple total généré par l'ensemble des six pales de la turbine et justifier la nécessité d'avoir recours à la simulation numérique pour calculer sa valeur.

Sur le document réponse DR3 sont représentés les résultats de la résolution numérique de la relation précédente. Ils fournissent les courbes de puissance et de couple total à l'arbre de la turbine en fonction de la fréquence de rotation de la turbine pour différentes vitesses de courant de marée  $V_C$ .

**Question 17** Conclure sur la capacité de l'hydrolienne à respecter l'exigence Id1 du cahier des charges. En déduire le couple généré par la turbine et la vitesse spécifique optimale  $\lambda_{opt}$  pour le point de fonctionnement imposé par Id1.

## 3.2 Vérification d'un fonctionnement sans cavitation

### Objectif

Déterminer la fréquence minimale de rotation de l'hydrolienne permettant d'éviter l'apparition du phénomène de cavitation.

La possibilité de voir apparaître un phénomène de cavitation, c'est à dire l'apparition de bulles de vapeur dans le sillage de la turbine, doit être évalué. En effet, l'implosion de ces bulles est à l'origine de chocs qui érodent les pales et diminuent leur durée de vie. Des bulles apparaissent sans changement important de la température lorsque le champ de pression à la surface de la machine est inférieur à la pression de vapeur saturante de l'eau de mer :

$$P_{locale} \leq P_{vap\_sat} \text{ (condition de cavitation)}$$

La pression de vapeur saturante de l'eau de mer est une fonction de la température (figure 12).

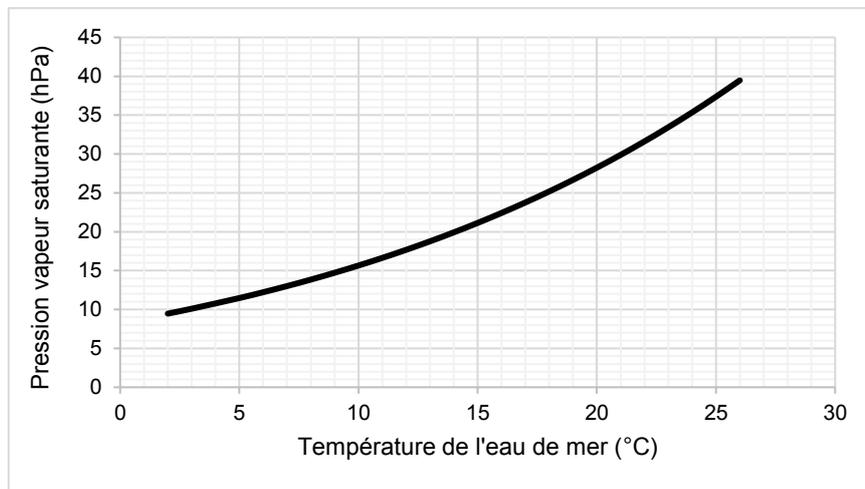


Figure 12 Pression de la vapeur saturante de l'eau de mer en hPa en fonction de la température en °C.

La pression locale sur la pale est la somme de la pression hydrostatique et de la pression hydrodynamique :

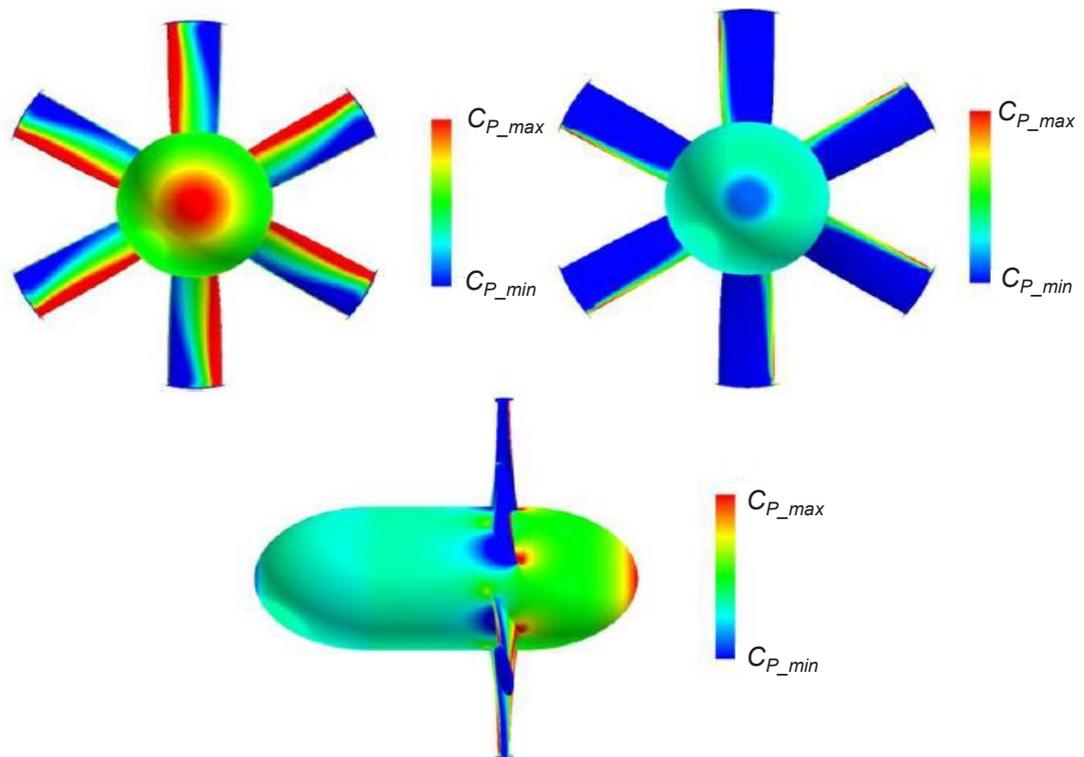
$$P_{locale} = P_{hydrostatique} + P_{hydrodynamique} = [P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h] + \left[ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_P \cdot V_C^2 \right]$$

- $P_{atm}$  : pression atmosphérique (Pa) ;
- $g$  : accélération de la pesanteur ( $m \cdot s^{-2}$ ) ;
- $\rho$  : masse volumique du fluide ( $kg \cdot m^{-3}$ ) ;
- $h$  : hauteur de la colonne d'eau (m) ;
- $C_P$  : coefficient de pression (sans unité) ;
- $V_C$  : vitesse amont du fluide ( $m \cdot s^{-1}$ ).

### Données :

- température de l'eau comprise entre 10°C et 15 °C ;
- masse volumique de l'eau de mer à 1 bar aux températures précédentes,  $\rho = 1\,025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ;
- masse volumique de l'eau de mer à 4 bars aux températures précédentes,  $\rho = 1\,035 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ;
- pression atmosphérique comprise entre 990 hPa et 1 040 hPa ;

- profondeur d'immersion (pale haute) comprise entre 15 et 40 mètres ;
- hauteur de houle maximale comprise entre +/- 1 m et +/- 8 m ;
- vitesse du courant de marée dans le Fromveur  $V_C$  comprise entre 2 et  $4,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;
- le champ de pression hydrodynamique sur la turbine a été calculé à partir d'un modèle numérique par éléments finis. La figure 13 montre la répartition indicative des zones de surpression (en rouge,  $C_p > 0$ ) et des zones de dépression (en bleu,  $C_p < 0$ ), ainsi que les valeurs extrémales du coefficient  $C_p$  pour plusieurs allures.



Vitesse spécifique $\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_C}$	$C_{P\_max}$	$C_{P\_min}$
2,62	7,08	-4,65
2,09	4,76	-7,45
1,85	3,8	-9,83
1,57	2,98	-13,06
1,31	2,3	-17,13
1,16	2,01	-19,86
1,05	1,78	-18,6

Figure 13 Pression hydrodynamique sur la turbine et valeurs extrémales du coefficient de pression  $C_p$  pour différentes vitesses spécifiques.

Pour évaluer le risque de cavitation, la démarche entreprise est celle de l'étude du pire scénario, appelé « *worst case* » : donner aux paramètres des valeurs correspondant au risque maximal de voir apparaître le phénomène non désiré.

**Question 18** Déterminer les valeurs numériques de  $P_{atm}$ ,  $h$  et  $C_p$  correspondant au « *worst case* ».

Tournez la page S.V.P.

- Question 19** Déterminer en fonction de  $P_{atm}$ ,  $P_{vap\_sat}$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $g$  et  $C_{P\_min}$  l'expression de la vitesse du courant de marée  $V_{Cmin}$  à partir de laquelle apparaît le phénomène de cavitation. Calculer la valeur numérique de  $V_{Cmin}$  dans le cas le plus défavorable « *worst case* ».
- Question 20** Montrer que le risque de cavitation est écarté dans les conditions normales de fonctionnement si l'hydrolienne Sabella D10 est installée à plus de 40 mètres de profondeur.
- Question 21** Comment agir sur la fréquence de rotation de la turbine si le seuil de cavitation est cependant atteint ? Proposer une solution technique complémentaire pour sécuriser le fonctionnement de l'hydrolienne en cas de fort courant.
- Question 22** Conclure en précisant les objectifs à assigner au système de commande de la Sabella D10.

## 4 Exigence fonctionnelle « optimiser la production »

---

### Objectif

Définir la commande à appliquer à la génératrice afin d'optimiser la production issue des courants marins.

---

La génératrice est dimensionnée pour extraire une puissance crête  $P_M = 1$  MW obtenue avec une vitesse de courant  $V_C = 4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Cette puissance peut être dépassée de manière temporaire (jusqu'à 30 minutes), mais pas en régime permanent.

L'exigence d'optimiser la production est assurée par l'association turbine-génératrice-redresseur.

### 4.1 Réglages de l'association turbine / génératrice / redresseur

---

#### Objectif

Identifier les moyens de réglage de la génératrice permettant d'extraire une puissance sur la turbine.

---

La génératrice synchrone est triphasée, elle est connectée au redresseur lui aussi triphasé. Le système triphasé ainsi créé est considéré comme équilibré.

Le modèle d'une des phases de la génératrice débitant sur la source de tension simple  $v(t)$  est représenté figure 14. La force électromotrice de rotation  $e(t)$  générée par la génératrice est sinusoïdale et prise comme origine des phases.

Le redresseur, grâce à la commande de ses interrupteurs IGBT, impose à la génératrice une source de tension sinusoïdale triphasée réglable en amplitude, en fréquence et en phase. Il impose ainsi la valeur de la tension simple  $v(t)$  aux bornes de la génératrice.

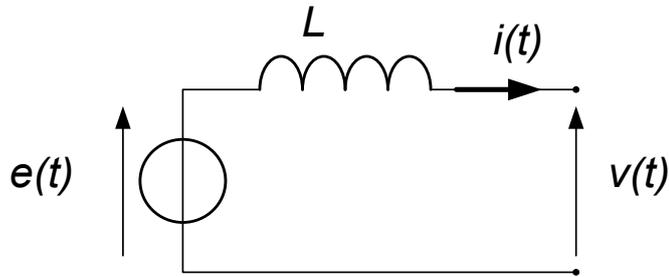


Figure 14 Modèle d'une phase de la génératrice.

**Données :**

- expression de la tension simple instantanée :  $v(t) = V\sqrt{2} \cdot \cos(\omega_{red} t - \varphi_{red})$  ;
- expression de la force électromotrice instantanée:  $e(t) = E\sqrt{2} \cdot \cos(\omega_{gen} t)$  ;
- dans le domaine utile  $E = K_e \cdot \Omega$  avec  $K_e$  la constante de force électromotrice de la génératrice synchrone ;
- le rotor de la génératrice comporte 120 paires de pôles magnétiques.

**Question 23** Déterminer, pour une vitesse de courant marin  $V_C = 4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et une fréquence de rotation  $N = 13 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ , la valeur de la pulsation de la force électromotrice de rotation notée  $\omega_{gen}$  13.

**Question 24** Justifier qu'il est nécessaire de maintenir  $\omega_{gen} = \omega_{red}$ .

Cette condition étant satisfaite, la valeur de la pulsation commune est notée  $\omega_f = \omega_{gen} = \omega_{red}$ .

**Notations :**

- $i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega_f t - \psi)$  le courant statorique d'une phase ;
- $\underline{I} = I \cdot e^{-j\psi}$  la représentation complexe de  $i(t)$  ;
- $\underline{V}$  la représentation complexe de  $v(t)$  ;
- $\underline{E}$  la représentation complexe de  $e(t)$ .

**Question 25** Ecrire la relation liant  $\underline{V}$ ,  $\underline{E}$  et  $\underline{I}$ , en fonction des éléments du circuit. Tracer l'allure du diagramme de Fresnel associé. Faire apparaître les angles  $\varphi_{red}$  et  $\psi$ .

**Question 26** Exprimer les puissances active  $P_{gen}$  et réactive  $Q_{gen}$  fournies par la génératrice synchrone au redresseur en fonction de  $E$ ,  $I$  et  $\psi$ . Quelle est la valeur de  $\psi$  qui maximise  $P_{gen}$  ? Justifier la valeur.

La valeur de  $\psi$  qui maximise la puissance électrique produite est adoptée. La commande du redresseur comprend :

- une composante  $S\_amp$  contrôlant l'amplitude de  $v(t)$  ;
- une composante  $S\_ph$  contrôlant la phase de  $v(t)$  et permettant donc de contrôler  $\psi$  ;
- une composante  $S\_f$  contrôlant la pulsation de  $v(t)$ .

La figure 15 représente, sous forme de schéma-bloc, les relations fonctionnelles entre les divers sous-ensembles du système muni de sa commande.

En ne considérant que les blocs « machine tournante » et « électronique de puissance » de la figure 15 (boucles de courant et de vitesse ouvertes), il s'agit d'identifier le moyen de réglage de la génératrice.

Dans un souci de simplification, seule la composante  $S\_amp$  apparaît sur la figure 15 et la relation  $\overline{|V|} = k \cdot S\_amp$  avec  $k > 0$  est admise.

**Question 27** Le but est de maîtriser la vitesse du groupe tournant qui peut varier en exploitation. Expliquer s'il faut augmenter ou diminuer le signal de commande  $S\_amp$  pour ralentir la turbine. Indiquer pourquoi il n'y a pas d'autre moyen de réglage de la vitesse.

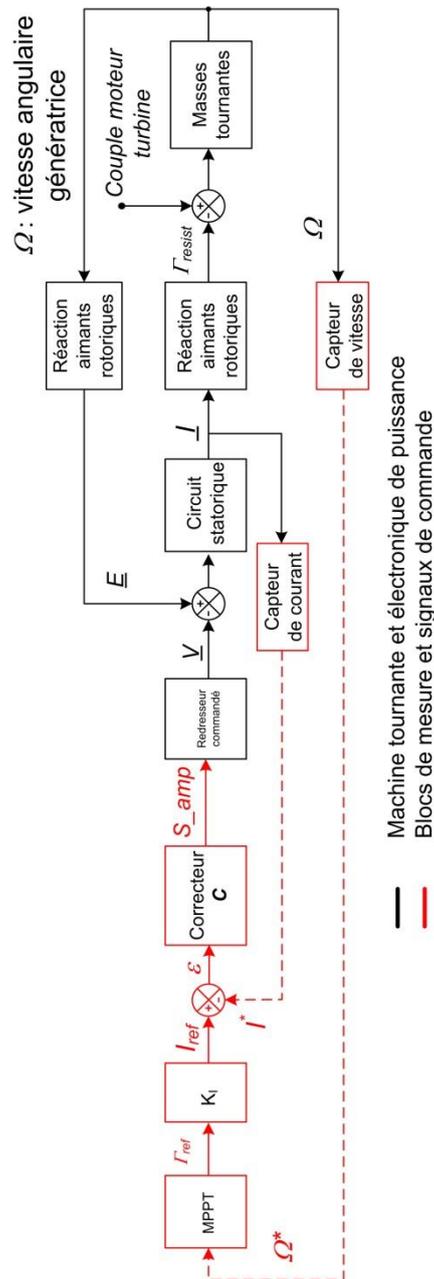


Figure 15 Schéma bloc simplifié de la génératrice (une phase) et de son redresseur commandé (configuration avec capteur de vitesse).

## 4.2 Choix d'une stratégie de commande pour assurer une production optimale

---

### Objectif

Définir la stratégie de commande à appliquer à la génératrice afin d'optimiser la production issue des courants marins.

---

Les courbes caractéristiques de la turbine sont tracées sur le DR3 pour différentes valeurs de vitesse du courant marin.

**Question 28** Placer sur la caractéristique  $P = f(N)$  le point de fonctionnement « crête » (noté  $M$ ) correspondant au maximum de puissance pour la vitesse de courant de  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Relever la valeur  $P_M$  ainsi que la vitesse de rotation  $N_M$  de la turbine. Calculer la valeur du couple mécanique  $\Gamma_M$  fourni par la turbine pour ce point de fonctionnement. Puis placer ce point de fonctionnement (noté  $M$ ) sur la caractéristique de couple de la turbine  $\Gamma = f(N)$  du document réponse DR3.

Dans la suite, l'étude propose dans un objectif d'optimisation de production, d'analyser deux stratégies envisageables de commande de l'hydrolienne :

- commande à couple constant qui impose à la turbine un couple résistant constant  $\Gamma_M = 740 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , quelle que soit la vitesse des courants marins ;
- commande au maximum de puissance disponible, appelé "maximum power point tracking" (MPPT) quelle que soit la vitesse des courants marins.

### 4.2.1 Analyse d'une stratégie de commande « à couple constant »

**Question 29** Le couple résistant de la génératrice est fixé tel que  $\Gamma_M = \Gamma_{resist}$ . Placer sur les courbes de couple de la turbine du document réponse DR3 les points de fonctionnement possibles notés  $[A_1, \dots, A_n]$  pour les différents courants marins. En déduire la gamme de vitesses des courants marins qui permet le fonctionnement à la valeur de couple fixée.

**Question 30** A l'aide de la caractéristique de puissance  $P = f(N)$  de la turbine du document réponse DR3, déterminer la puissance fournie aux points de fonctionnements  $[A_1, \dots, A_n]$  vérifiant la stratégie de commande à couple constant, en faisant apparaître clairement les points utiles correspondants.

**Question 31** Analyser la validité de l'exigence d'optimisation de la production pour les vitesses de courants marins inférieures à  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Analyser la limite du fonctionnement pour les vitesses de courants marins supérieures à  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Conclure sur le choix d'une stratégie de commande de l'hydrolienne à couple constant.

### 4.2.2 Analyse d'une stratégie de commande « au maximum de puissance disponible, maximum power point tracking » (MPPT)

**Question 32** Pour les vitesses de courants marins inférieures à  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , placer sur le document réponse DR3 les points de fonctionnement, notés  $[B_1, \dots, B_n]$  qui maximisent la puissance extraite.

**Question 33** Justifier, en vous appuyant sur la puissance maximale de la génératrice, pourquoi la stratégie MPPT n'est pas acceptable sur toute la gamme des vitesses des courants marins. Proposer une solution pour permettre de rendre applicable la stratégie MPPT pour toute la gamme des courants marins pouvant se produire dans le passage du Fromveur.

**Question 34** Conclure sur le choix d'une stratégie de commande de l'hydrolienne de type MPPT au regard de l'exigence d'optimisation de la production.

Dans la suite de l'étude, la stratégie de commande de type MPPT est retenue.

### 4.3 Mise en œuvre de la commande afin d'assurer une production optimale

#### Objectif

Mettre en œuvre une commande MPPT dans le calculateur de pilotage.

L'étude suivante vise à déterminer comment programmer les blocs MPPT,  $K_i$  et  $C$  du modèle simplifié de la génératrice et de son redresseur commandé représenté figure 15 et détaillé figure 16.

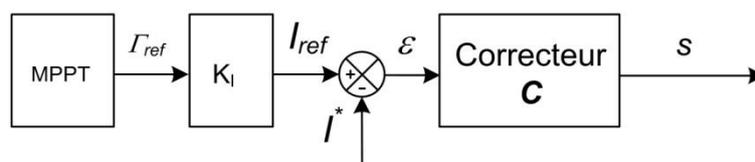


Figure 16 Extrait du schéma bloc simplifié de la génératrice et de son redresseur commandé.

L'objectif de l'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) est de permettre à l'hydrolienne de suivre le point de fonctionnement à puissance maximale malgré les variations des courants marins et de la houle.

La stratégie MPPT est réalisée par un algorithme pour lequel différentes solutions sont possibles selon les informations disponibles sur l'état de la machine. L'étude suivante vise à analyser deux solutions constructives :

- une solution avec capteur de vitesse angulaire ;
- une solution sans capteur de vitesse angulaire.

#### 4.3.1 Détermination d'une solution MPPT avec la donnée vitesse angulaire de la turbine

La chaîne fonctionnelle dispose d'un capteur de vitesse angulaire placé sur le rotor de la turbine. Avec cette solution constructive, l'algorithme MPPT doit respecter le cahier des charges suivant :

- lire la donnée d'entrée  $\Omega^*$  issue de la grandeur de sortie du capteur de vitesse angulaire de l'hydrolienne, information image de la grandeur physique ;
- calculer la puissance optimale  $P_{opt}$  à partir de  $\Omega^*$  figure 17 (les points forment une courbe modélisable par la loi  $P_{opt} = K_{opt} \cdot \Omega^{*3}$ ) ;
- fixer la consigne de couple  $\Gamma_{ref}$  donnée de sortie ;
- arrêter la turbine pour des vitesses de courants marins engendrant une puissance optimale qui est supérieure à 1 MW.

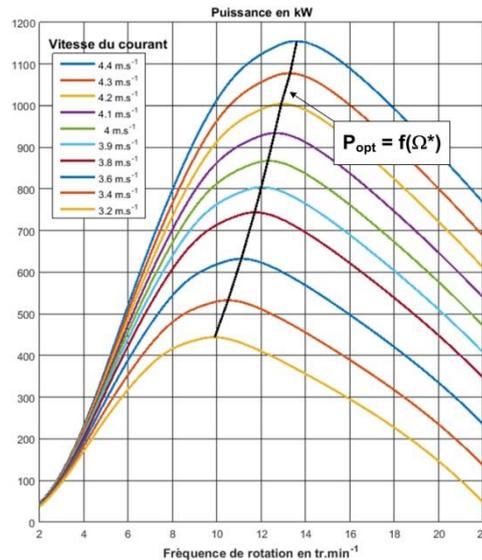


Figure 17 Puissance optimale en fonction de la fréquence de rotation de la turbine.

**Question 35** Écrire l’algorithme du traitement MPPT respectant le cahier des charges précédent en complétant l’algorithme du document réponse DR4.

#### 4.3.2 Détermination d’une solution MPPT sans la donnée vitesse angulaire de la turbine

Une solution pour respecter le diagramme des exigences et s’affranchir du capteur de vitesse angulaire est d’utiliser les grandeurs électriques disponibles. Cette solution constructive utilise un algorithme P&O (Perturb and Observe). Cet algorithme MPPT doit vérifier le cahier des charges suivant :

- la donnée d’entrée est la puissance  $P$  électrique fournie par la génératrice ;
- la donnée de sortie est  $T_{ref}$ , consigne de couple ;
- à chaque instant  $k$ , la puissance  $P$  est mesurée et comparée à la puissance de l’instant précédent ( $k-1$ ) ;
- si la puissance augmente, le point de fonctionnement se rapproche du point à maximum de puissance (PMP) ; alors la consigne de couple est incrémentée d’un incrément de couple  $\delta$  ;
- si la puissance diminue, le point de fonctionnement a dépassé le PMP ; alors un incrément de couple  $\delta$  est soustrait à la consigne de couple.

**Question 36** Écrire l’algorithme du traitement MPPT avec la solution P&O respectant le cahier des charges ci-dessus, en complétant le pseudo-code du document réponse DR5.

#### 4.3.3 Détermination de la constante de couple $K_t$

Le traitement MPPT fournit une consigne de couple  $T_{ref}$ , il est donc nécessaire pour commander la génératrice de fournir une consigne de courant  $I_{ref}$  par le biais de la constante de couple  $K_t$  de la génératrice synchrone, dont le modèle est représenté figure 14.

**Question 37** Exprimer le couple électromagnétique résistant  $T_{resist}$  développé par la génératrice, en fonction de  $K_e$ ,  $\psi$  et  $I$ . Montrer que pour toutes choses égales par ailleurs, ce couple est maximal pour  $\psi = 0$ .

La commande choisie permet de maintenir nul l'angle  $\psi$  entre  $I$  et  $E$ .

**Question 38** Montrer que dans ces conditions le couple  $\Gamma_{resist}$  de la génératrice peut s'écrire sous la forme  $\Gamma_{resist} = K_I \cdot I$ . Conclure en exprimant la constante de couple  $K_I$  en fonction de  $K_e$ , constante de force électromotrice donnée par le constructeur de la machine synchrone.

#### 4.3.4 Détermination du correcteur numérique à programmer pour réaliser la commande choisie

##### Objectif

Définir l'équation de récurrence correspondant au traitement numérique du correcteur de la Figure 18.

La consigne de courant  $I_{ref}$  générée par l'algorithme MPPT est comparée au courant  $I^*$  mesuré en sortie de la génératrice synchrone. Le générateur de commande de la boucle d'asservissement est composé d'un correcteur qui traite l'écart  $\varepsilon = I_{ref} - I^*$  et fournit au redresseur commandé le paramètre de commande  $s$  (figure 18).

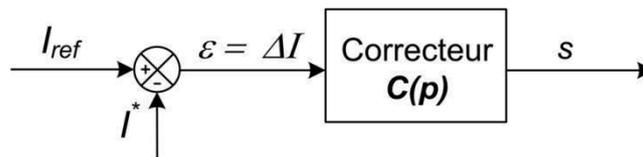


Figure 18 Correcteur  $C(p)$  agissant sur l'amplitude des tensions avec  $\psi = 0$ .

Le correcteur  $C$  choisi est un correcteur proportionnel et intégral (PI), dont la fonction de transfert dans le domaine de Laplace est la suivante :

$$C(p) = K \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$$

Le choix de ce type de correction et le réglage des constantes  $K$  et  $T_i$  (non traité dans ce sujet) ont été guidés par le besoin d'atteindre les performances attendues, notamment celle d'annuler l'erreur statique en couple et ainsi d'assurer l'optimisation de la stratégie de commande MPPT.

Le traitement numérique des informations est réalisé dans le calculateur avec une période d'échantillonnage très petite devant les constantes de temps du système.

##### Notations :

- la période d'échantillonnage est notée  $T_e$  ;
- les valeurs de  $\varepsilon(t)$  et de  $s(t)$  à l'instant  $nT_e$  sont notées  $\varepsilon[n]$  et  $s[n]$  ;
- les valeurs de  $\varepsilon(t)$  et de  $s(t)$  à l'instant  $(n-1)T_e$  sont notées  $\varepsilon[n-1]$  et  $s[n-1]$ .

À partir de la valeur numérique de l'écart  $\varepsilon[n]$ , le signal de commande numérique  $s[n]$  est généré. Pour implanter le correcteur dans le calculateur, il faut déterminer l'équation de récurrence permettant d'approcher numériquement le comportement souhaité pour le correcteur PI.

**Question 39** Donner, pour des conditions initiales nulles, l'équation différentielle de  $s(t)$  en fonction de  $\varepsilon(t)$ ,  $K$  et  $T_i$ .

**Question 40** En présentant les approximations numériques nécessaires, mettre l'équation de récurrence du correcteur numérique sous la forme :

$$s[n]=A \cdot s[n-1]+B \cdot \varepsilon[n]+C \cdot \varepsilon[n-1]$$

Conclure en précisant les expressions des constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$  à programmer pour réaliser le correcteur numérique adéquat en fonction de  $K$ ,  $T_i$  et  $T_e$  fixés par l'opération de réglage.

**Question 41** Quels sont les avantages de la solution MPPT sans capteur ?

## 5 Exigence fonctionnelle « fonctionner en toute sécurité »

### Objectif

Maitriser la température intérieure de la nacelle dans le but d'éviter la détérioration des composants et vérifier le non-basculement de la nacelle par les courants du Fromveur.

Une fois la turbine de l'hydrolienne dimensionnée et la commande choisie pour répondre à l'exigence de production attendue, il est indispensable de vérifier que celle-ci fonctionne sans possibilité de se détériorer alors que la transformation d'énergie s'effectue dans un espace confiné par 40 mètres de fond et situé sur le site géographique du Fromveur.

### 5.1 Refroidissement de l'intérieur de la nacelle

#### Objectif

Maintenir la température intérieure de la nacelle à 20°C en nominal et 35°C au maximum afin de ne pas détériorer l'électronique embarquée.

#### 5.1.1 Analyse du refroidissement de la nacelle

La conversion de l'énergie par la génératrice synchrone engendre de la chaleur. Les composants électroniques ont par ailleurs des limites en température qui nécessitent de prévoir un système de refroidissement dont le schéma de principe est représenté figure 19.

La nacelle est refroidie par une circulation d'eau de mer dans un serpentin dans sa double enveloppe. La puissance calorifique à évacuer a été estimée à 61 kW lorsque la machine fonctionne à pleine puissance. La température de l'eau de mer varie entre 10°C (hiver) et 15°C (été).

Cette évacuation de chaleur permet d'assurer une production jusqu'à 1 mégawatt pendant un temps limité, qui correspond aux valeurs extrêmes des courants de marée.

Le cahier des charges partiel du système de refroidissement impose les niveaux suivants :

Exigences	Critères	Niveaux
Maintenir constante la température intérieure de la nacelle	Température nominale Température maximale Puissance calorifique maximale à évacuer	20°C 35°C 61 kW
Respecter le milieu aquatique	Température en sortie	$T_{sortie} = T_{entrée} + 10^\circ\text{C}$

Tournez la page S.V.P.

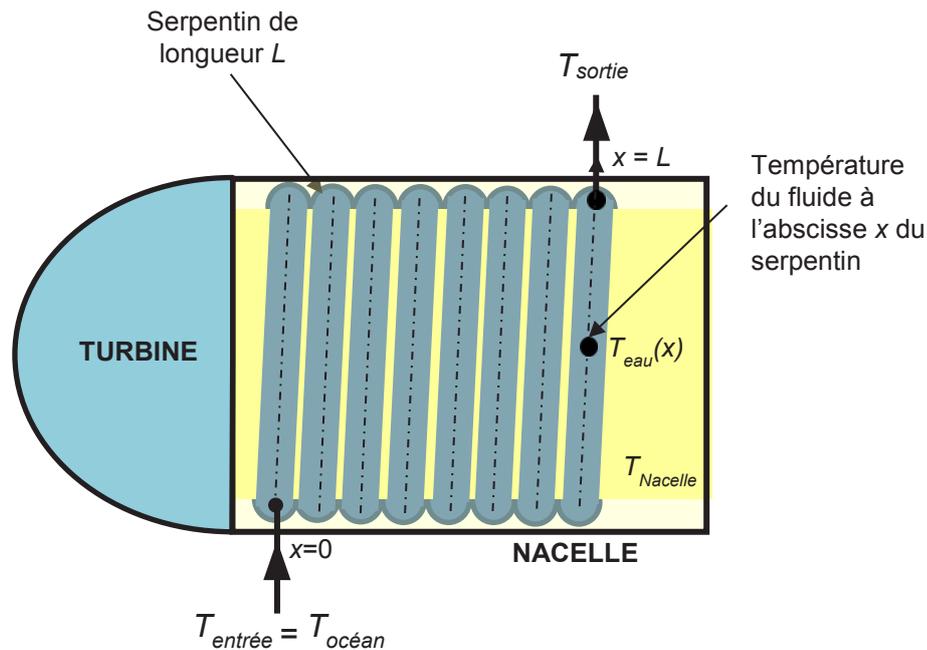


Figure 19 Schéma de principe du refroidissement de la nacelle par double enveloppe.

### 5.1.2 Modélisation de l'échange thermique entre l'eau de mer dans le serpentin et l'air dans la nacelle

La figure 20 présente le principe de l'échange thermique entre l'eau de mer dans la double enveloppe et l'intérieur de la nacelle par le biais du serpentin.

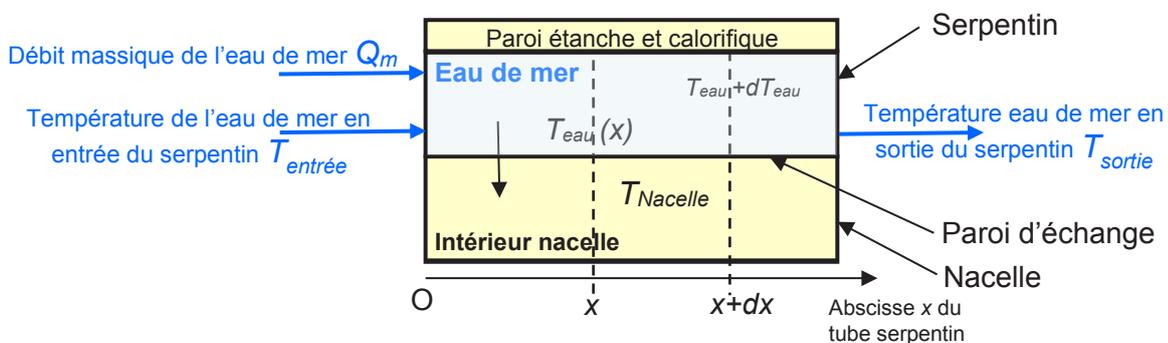


Figure 20 Modélisation de l'échange thermique.

#### Hypothèses :

- l'étude se fait en régime permanent et le serpentin est supposé unidimensionnel ;
- les masses volumiques et les capacités calorifiques des fluides mis en jeu sont constantes ;
- le flux de chaleur fourni par l'eau de mer est intégralement absorbé par l'azote contenu dans la nacelle ;
- le transfert thermique s'effectue uniquement à travers la paroi d'échange ;
- la température  $T_{Nacelle}$  est la même en tout point de la nacelle.

## Notation et données numériques

$T_{entrée}$	température de l'eau de mer en entrée de serpent (constante)	15°C
$T_{sortie}$	température de l'eau de mer en sortie de serpent	
$T_{eau}(x)$	température de l'eau de mer à l'abscisse $x$ du serpent	
$\Sigma$	surface totale d'échange de la paroi d'échange	20 m <sup>2</sup>
$T_{Nacelle}$	température à l'intérieur de la nacelle	20°C nominal 35°C maximal
$\theta$	coefficient global d'échange à travers la paroi	500 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
$\rho$	masse volumique de l'eau de mer (*)	1 045 kg·m <sup>-3</sup>
$C_{p\_eau}$	capacité thermique massique de l'eau de mer (*)	3 875 J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
$Q_m$	débit massique d'eau de mer de la pompe	

(\*) = eau de mer à 15°C à une pression de 5 bars (40 m de profondeur)

Les modèles de connaissance des transferts thermiques sont les suivants :

- la quantité de chaleur qui transite par une unité de temps est appelée flux thermique et est homogène à une puissance ;
- la convection correspond au transfert de chaleur entre un fluide et la surface d'un solide ; dans un milieu à température  $T_{\infty}$ , une surface d'échange où circule le fluide à température  $T_{fluide}$  émet le flux défini par :  $\phi = \theta \cdot S \cdot (T_{\infty} - T_{fluide})$  ;
- la quantité d'énergie nécessaire à un fluide pour passer d'un état d'équilibre 1 à un état d'équilibre 2 est :  $E = m \cdot C_p \cdot \Delta T$  (avec  $m$  la masse du fluide,  $C_p$  la capacité thermique massique du fluide,  $\Delta T$  la variation de température entre les deux états).

**Question 42** Réaliser un bilan thermique de l'ensemble {nacelle + serpent}. Déterminer le débit massique minimal de la pompe permettant de vérifier l'exigence sur l'impact environnemental en fonctionnement à plein régime de l'hydrolienne.

**Question 43** Réaliser le bilan thermique en écrivant que le flux de chaleur reçu par l'eau de mer lors de son passage entre les plans d'abscisses  $x$  et  $x + dx$  est passé intégralement à travers un élément de paroi d'échange  $dS$ .

**Question 44** Montrer que la température de sortie de l'eau de mer en tout point d'abscisse  $x$  du serpent obéit à la loi :

$$\frac{dT_{eau\ de\ mer}(x)}{T_{eau\ de\ mer}(x) - T_{nacelle}} = - \frac{\theta \cdot dS}{Q_m \cdot C_{p\_eau}}$$

**Question 45** À partir de l'expression précédente et des conditions aux limites dans le serpent, montrer que l'expression de la température de l'eau de mer dans le serpent en sortie de double enveloppe, notée  $T_{sortie}$ , est de la forme  $T_{sortie} = \alpha + \beta \cdot e^{-\gamma}$ . Exprimer les constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  en fonction de  $T_{Nacelle}$ ,  $T_{entrée}$ ,  $\theta$ ,  $\Sigma$ ,  $Q_m$  et  $C_{p\_eau}$ .

Tournez la page S.V.P.

**Question 46** Déterminer la température de l'eau rejetée dans l'océan dans le cas le plus défavorable c'est-à-dire en hiver  $T_{entrée} = 10^{\circ}\text{C}$  et  $T_{Nacelle} = 35^{\circ}\text{C}$  maximale à l'intérieur de la nacelle. Conclure sur la validité du cahier des charges et justifier le choix d'un débit massique de la pompe 4 fois plus important que celui déterminé à la question 42.

## 5.2 Détermination des lests garantissant la stabilité du tripode porteur de la nacelle

### Objectif

Déterminer les masses des lests situés aux pieds de l'hydrolienne dans le but de vérifier les critères de bonne stabilité.

Le cahier des charges partiel du tripode impose les critères et niveaux suivants :

Exigences	Critères	Niveaux
Empêcher le basculement du tripode	Moment stabilisant	Strictement supérieur à 1,5 fois le moment de renversement dû à la trainée (valeur majorée à 825 kN)
Empêcher le ripage du tripode	Effort total d'appui au sol	Strictement supérieur à 2,5 fois la trainée (valeur non majorée 660 kN)
Exclure l'enfoncement de l'ensemble {nacelle + tripode + lest}	Masse	250 tonnes maximum

L'hydrolienne posée sur le fond marin doit résister aux efforts dus à la poussée hydrodynamique des courants amont sans basculer ni glisser (figure 21).

Les conditions d'installation sont déterminées comme suit :

- l'axe du rotor est horizontal ;
- l'hélice, à pas fixe, présente un profil symétrique ;
- la turbine est fixe une fois posée, c'est à dire que lors de la pose elle est orientée une fois pour toutes dans le flux du courant.

### Hypothèses :

- la poussée d'Archimède sur l'embase tripode est négligée ainsi que son poids ;
- par symétrie, les poids des lests au point B et au point C sont égaux ;
- la force de poussée hydrodynamique notée  $F_H$  se situe dans le plan  $(\vec{x}, \vec{z})$ .

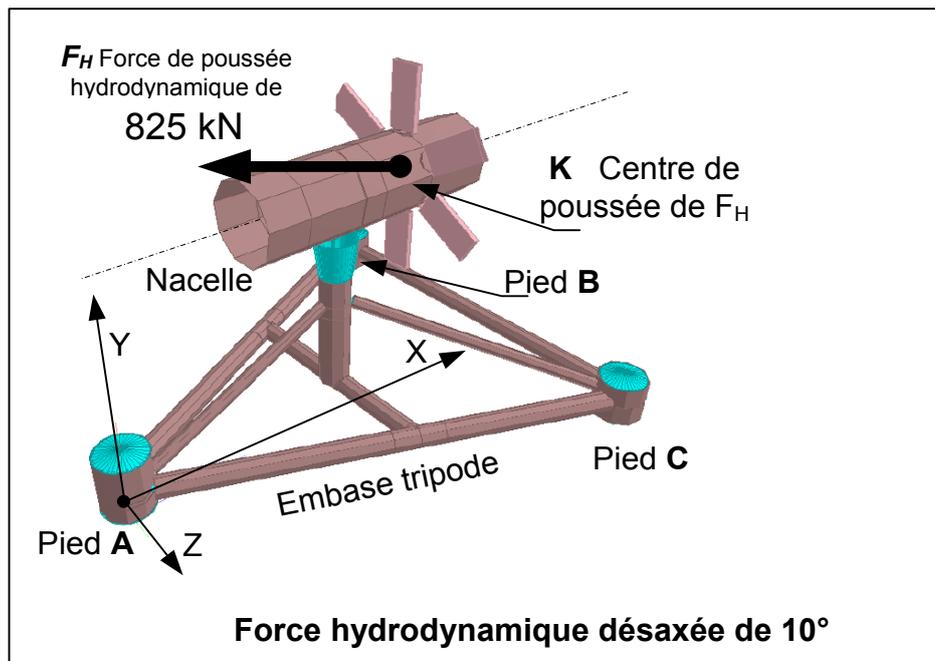


Figure 21 Cas d'étude des efforts dus au courant amont.

### Données

- accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,
- masse de la nacelle  $m = 66\,238 \text{ kg}$  ;

Coordonnées en mm	Point A	Point B	Point C	Centre de masse G de la nacelle	Centre de poussée d'Archimède	Centre de poussée hydrodynamique K
X	0	20 954	20 954	14 300	14 300	13 760
Y	0	0	0	12 000	12 000	12 000
Z	0	-9 722	9 722	0	0	0

La simulation numérique des écoulements sur l'hydrolienne Sabella D10 lorsque la turbine est en rotation montre que, pour des courants marins de  $4,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la résultante de la force de trainée sur l'ensemble turbine-nacelle a une intensité maximale de 660 kN. Cette résultante est globalement alignée avec l'axe de l'hydrolienne, l'écart d'alignement étant compris dans l'intervalle  $[-10^\circ ; +10^\circ]$ . En raison de l'incertitude liée au manque de connaissance sur le comportement d'une structure hydrolienne, un coefficient de sécurité de 1,25 est appliqué à cette force de trainée, soit une trainée maximale  $F_H$  à prendre en compte de valeur majorée 825 kN (figure 22).

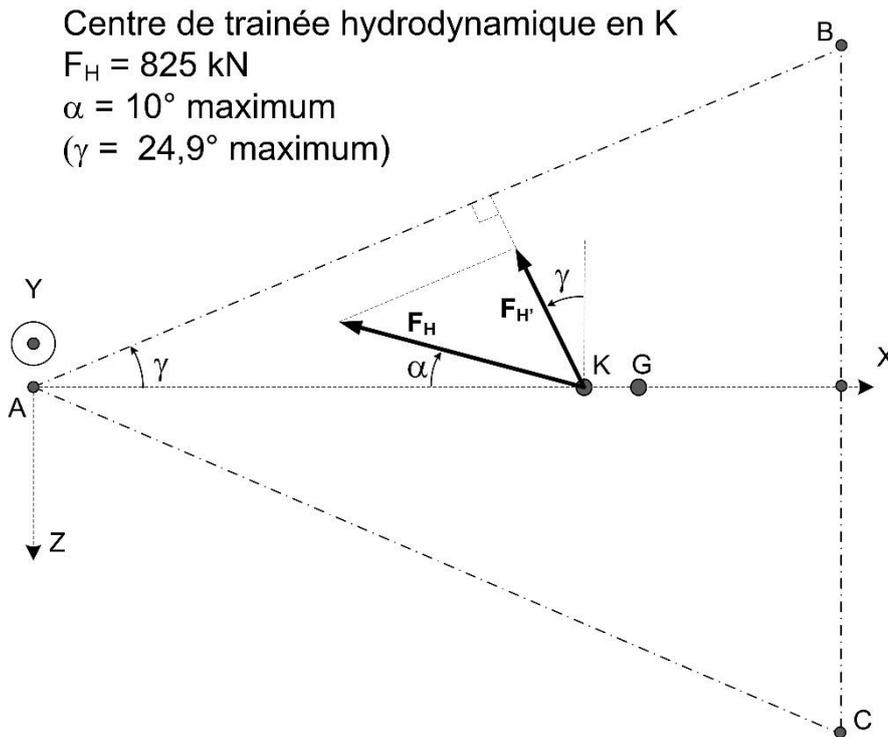


Figure 22 Force hydrodynamique  $F_H$  due au courant amont, désaxée de  $10^\circ$  dans le plan  $(\vec{x}, \vec{z})$

Les concepteurs ont dimensionné le volume de la nacelle afin que le poids apparent de cette dernière soit nul.

**Question 47** En prenant en compte le dimensionnement des concepteurs d'un poids apparent nul de la nacelle, déterminer la masse minimale de lest à installer au point C empêchant le renversement du tripode autour de l'axe (AB).

Un calcul similaire donne 72 tonnes pour la masse minimale de lest à installer au point A pour éviter le basculement de la structure pour les courants avals.

**Question 48** En prenant en compte le dimensionnement des concepteurs d'un poids apparent nul de la nacelle, déterminer la valeur numérique du poids total de lest minimal empêchant le phénomène de ripage.

**Question 49** En prenant en compte la masse maximale autorisée de l'ensemble (250 tonnes), déduire des études précédentes le domaine de validité des masses  $m_A$ ,  $m_B$  et  $m_C$  des lests et le représenter dans le plan  $(m_A, m_C)$ .  
 Échelle : 20 tonnes = 1 cm

## 6 Perspectives

Le projet PHARES prévoit d'alimenter d'ici 2022 l'île d'Ouessant avec 70 % d'énergies renouvelables et 30 % d'énergie d'origine fossile contre 90 % actuellement.

**Question 50** Après analyse des documents fournis ci-dessous, expliciter comment techniquement cet objectif peut être atteint et préciser le gain de  $\text{CO}_2$ . La note de synthèse ainsi rédigée ne doit pas excéder une demi-page et doit faire référence aux données fournies.

### Document 1

#### L'histoire d'Ouessant face à la question énergétique

L'électricité est arrivée sur l'île d'Ouessant en 1939 avec la mise en place de groupes électrogènes pour alimenter le phare du Créac'h. Cette centrale a fourni l'électricité aux habitants, de 1953 à 1970. A partir de cette date, la centrale EDF actuelle, près du bourg, a pris le relais. Aujourd'hui, la centrale fioul comprend 4 groupes électrogènes pour une puissance totale installée de 5 300 kVA et dessert 1 053 clients.

### Document 2

#### Production type d'une installation photovoltaïque

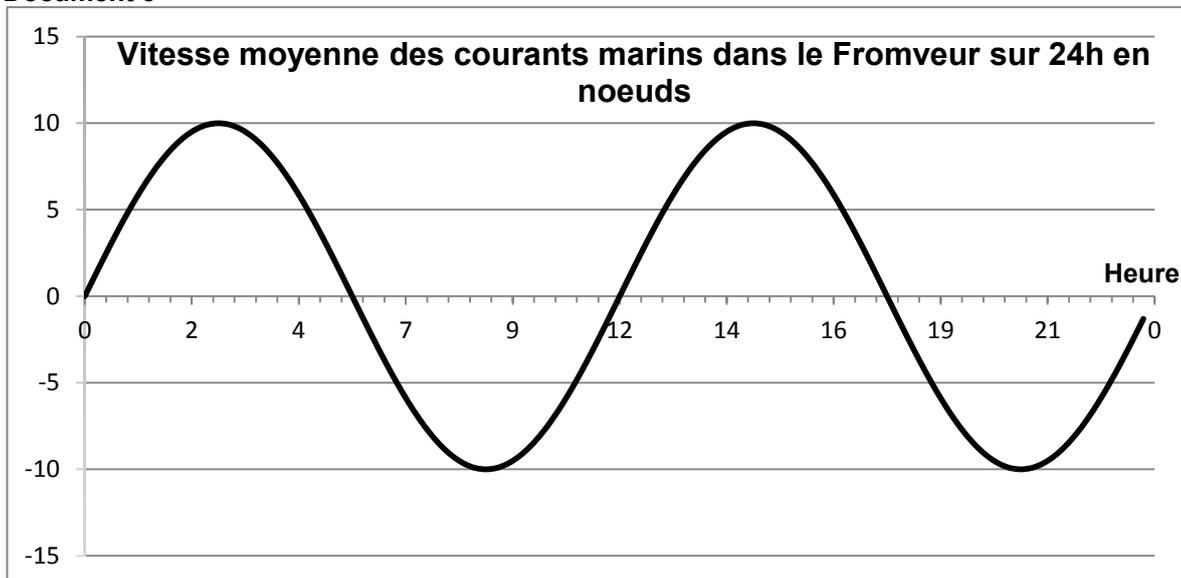
En moyenne une installation de 25 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques produit 5000 kWh par an en France.

#### Production type d'une éolienne

Le facteur de charge (puissance moyenne/puissance nominale) a été en moyenne de 21,1 % en 2018.

Les éoliennes terrestres les plus récentes ont une puissance de 3 MW. Sur une journée, une éolienne de ce type produit en moyenne 14 400 kWh.

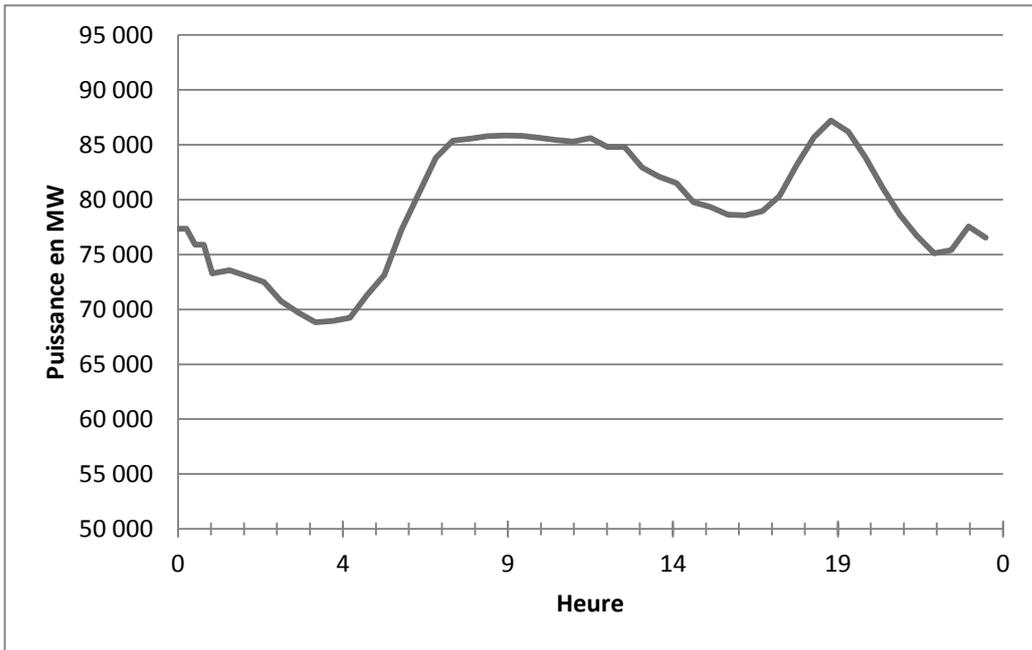
### Document 3



1 noeud = 1,852 km·h<sup>-1</sup>

Document 4

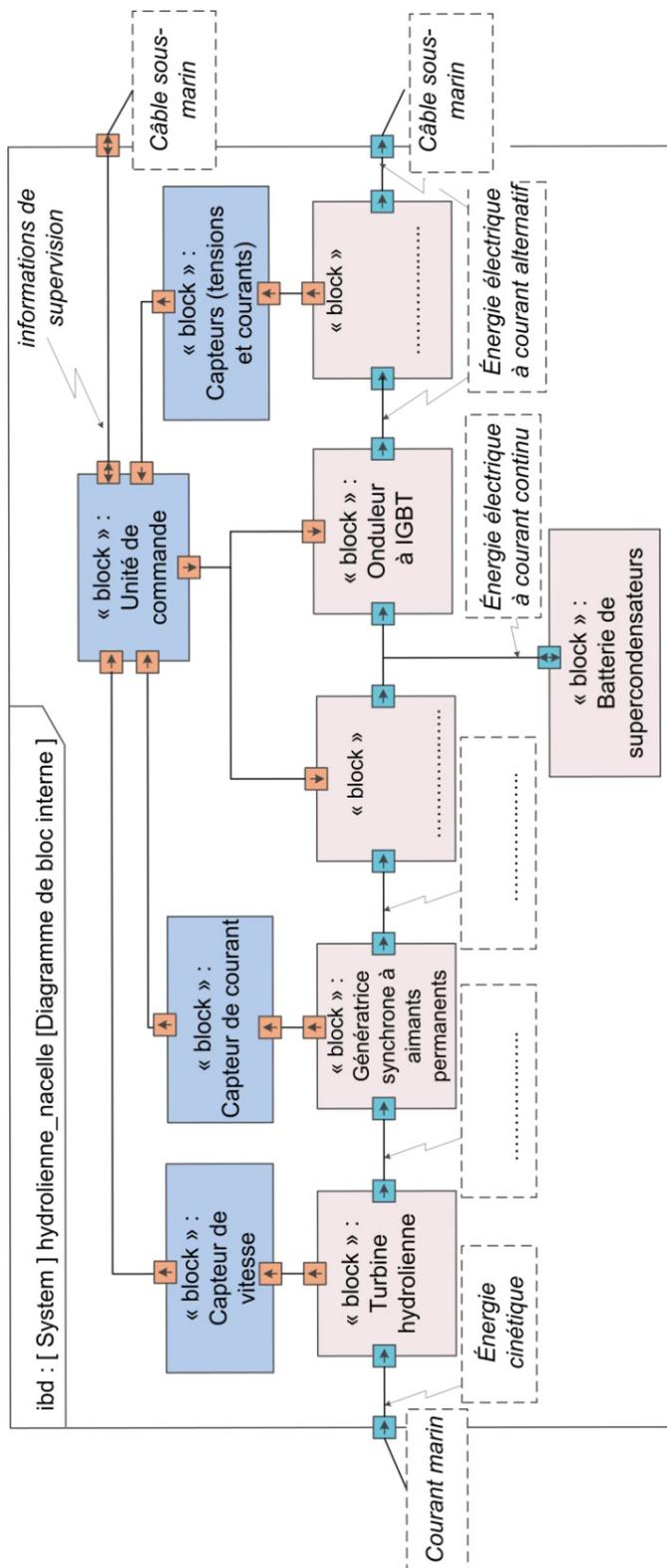
**Puissance électrique consommée en France (65 millions d'habitants) sur une journée d'hiver**





NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

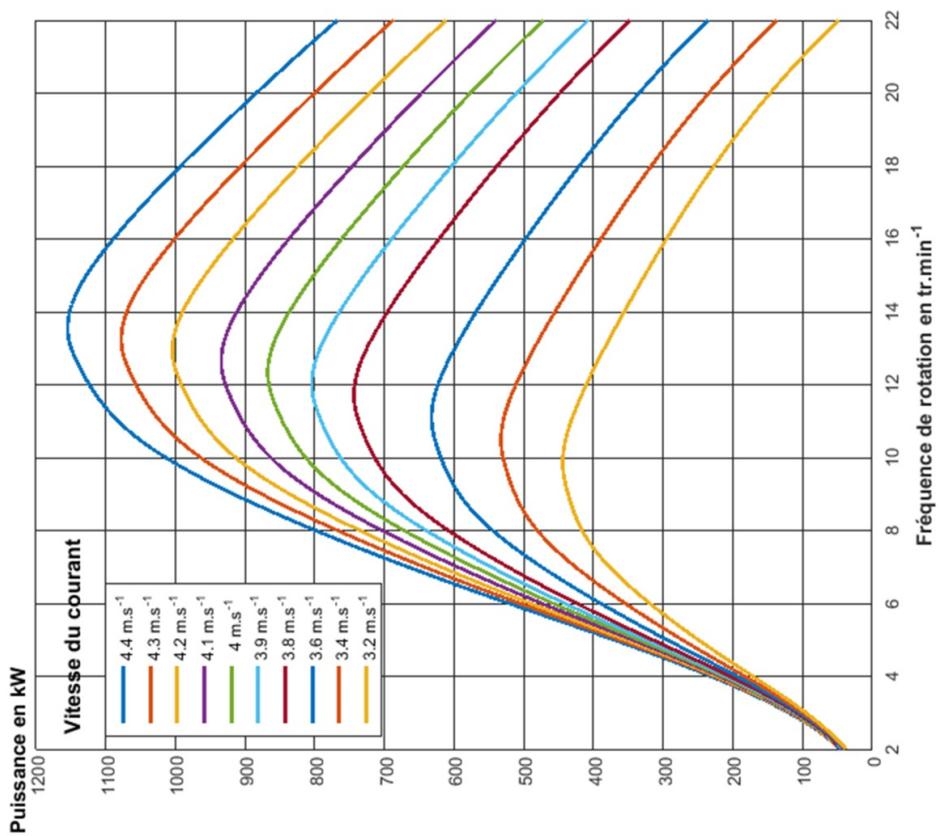
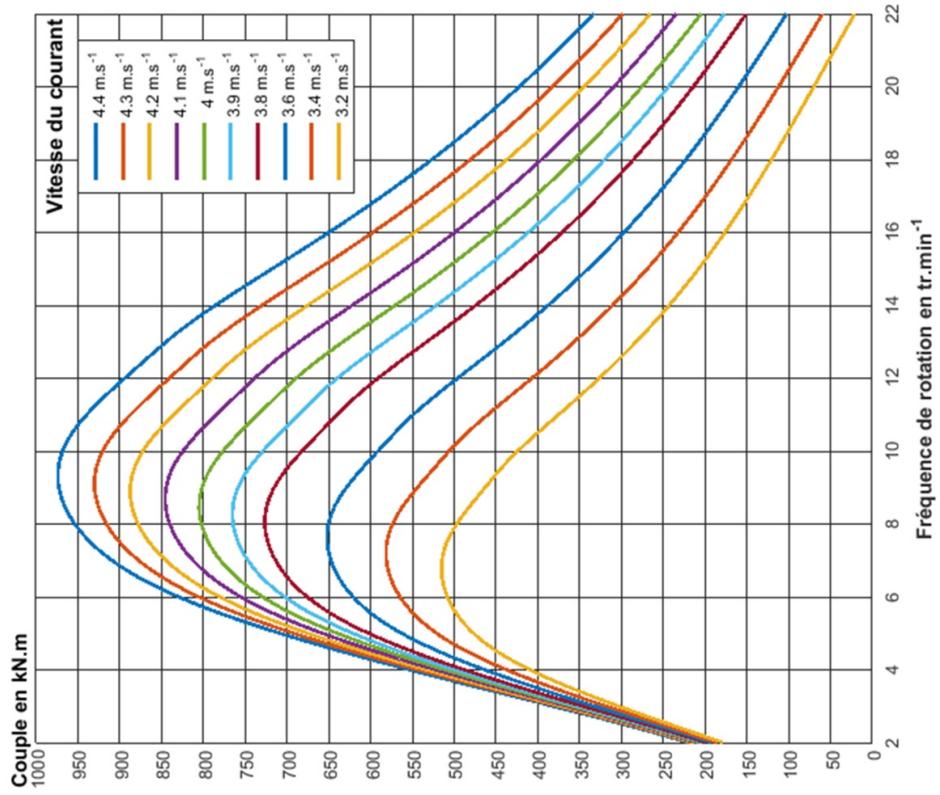
## DOCUMENT RÉPONSE DR1



## DOCUMENT RÉPONSE DR2

Composant	Nature de la puissance sortante	Grandeur de flux		Grandeur d'effort	
		Nom de la grandeur physique	Caractéristique alternative (préciser fréquence) ou continue	Nom de la grandeur physique	Caractéristique alternative (préciser fréquence) ou continue
<b>Turbine</b>		Fréquence de rotation	Continue $N \in [5 ; 15] \text{ tr.min}^{-1}$		
<b>Génératrice</b>					
<b>Onduleur</b>					

# DOCUMENT RÉPONSE DR3

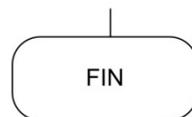
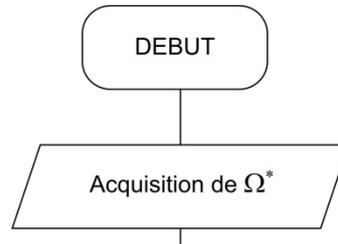




**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

## DOCUMENT RÉPONSE DR4

Algorithme MPPT connaissant  $\Omega^*$



## DOCUMENT RÉPONSE DR5

// Initialisation

$P_1 \leftarrow \text{mesurer\_P}()$  //Calcul de la puissance

$P_2 \leftarrow P_1$

$\Gamma_{\text{ref}} \leftarrow 0$

// P & O : « Perturb ans observe »

Boucle

Aller à Boucle