

# Projet de développement d'hydrolienne à flux transverse

Durée : 5 heures

## Plan du sujet

Préambule

Questionnement :

1 – Production hydrolienne dans le contexte mondial et national.....	page 3
2 - Développement d'une hydrolienne à flux transverse.....	page 6
3 – Étude de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique .....	page 16
4 – Turbines industrielles et transmission d'énergie au réseau.....	page 25
Documents Annexes.....	page 27
Documents Réponses.....	page 41

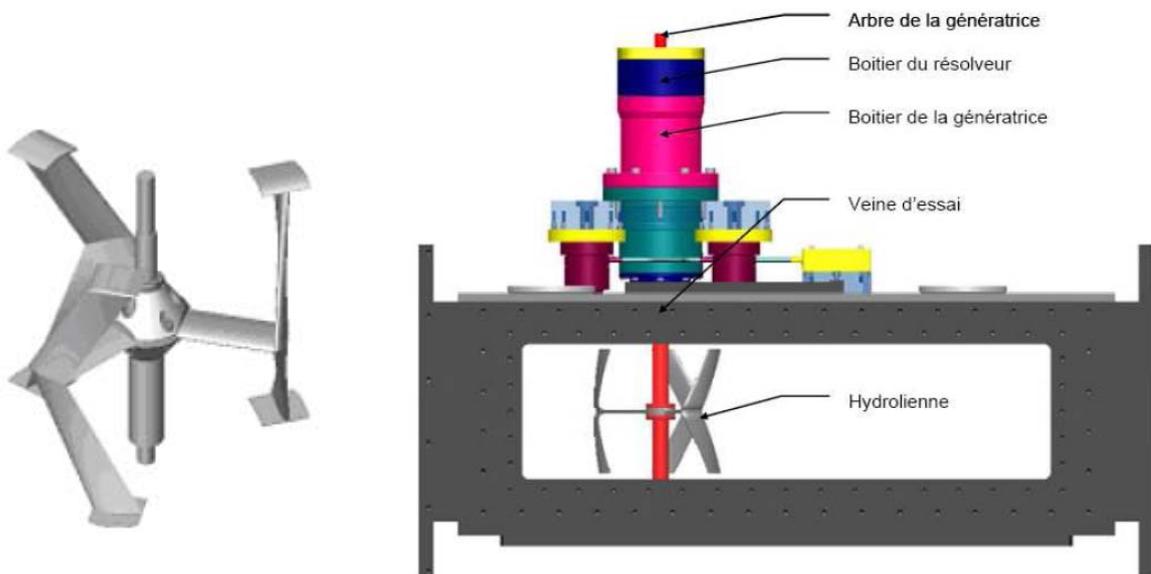
## Préambule

La question de l'accès à l'énergie constitue un enjeu majeur pour les générations futures. Les données socio-économiques, notamment le coût de l'énergie et la demande mondiale croissante, sont des données essentielles de cette problématique. Le contexte des changements climatiques, des pollutions, ou encore de la gestion des ressources fossiles est également à intégrer dans la réflexion pour faire émerger des solutions en cohérence avec un développement durable.

La création et l'innovation technologique participent largement à cette réflexion et contribuent aux développements et recherches en cours pour maîtriser la demande de consommation, faire émerger de nouveaux modes de production et limiter l'impact environnemental d'un accès à l'énergie durable. Les évolutions technologiques des trente dernières années ont permis l'émergence puis le passage à la phase industrielle des énergies renouvelables complémentaires à l'hydroélectricité avec notamment le développement de la production éolienne, solaire thermique et photovoltaïque.

L'énergie des vagues et des courants marins et fluviaux est actuellement peu exploitée mais de nouvelles solutions de récupération de l'énergie cinétique des courants à partir d'hydroliennes sont actuellement à l'étude ou en test pour développer cette production.

Le présent sujet concerne le concept d'hydrolienne à flux transverse HARVEST (*Hydrolienne à Axe de Rotation Vertical STabilisé*). Ce développement, mené par l'INP de Grenoble et soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche et EDF, participe pleinement à la réflexion en cours en réponse aux problématiques citées dans ce préambule.



*Turbine hydrolienne*

*Mise en situation dans une veine d'essai*

Après avoir appréhendé quelques éléments du contexte énergétique mondial et national, le questionnement portera sur l'analyse des solutions retenues lors du développement d'un prototype d'hydrolienne à flux transverse actuellement en phase de test. Ces résultats seront par la suite exploités afin de transposer, à l'échelle industrielle, l'hydrolienne de laboratoire précédemment étudiée.

## Première partie

### La production hydrolienne dans le contexte mondial et national

*L'objectif de cette partie est d'identifier et de quantifier les enjeux techniques et économiques liés à la production et à la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, européenne et nationale, et de justifier dans ce contexte les choix de production envisagés en milieu marin ou fluvial.*

Les réponses formulées par candidat feront – le cas échéant - référence à la documentation annexe utilisée en précisant la référence correspondante (voir documents annexes 1.1 à 1.2.3)

En préambule les éléments du contexte énergétique mondial sont exprimés ci-dessous pour l'année 2009 :

- la consommation mondiale en énergie primaire et finale

– Consommation énergétique primaire (Mtep)	– Consommation énergétique finale (Mtep)
– 12 150 Mtep	– 8 352 Mtep

Le ratio de 68,7 % entre ces deux valeurs s'explique notamment par les pertes dues aux transformations de l'énergie primaire en énergie secondaire, le transport électrique ou encore les coefficients d'équivalence entre unité propre et Tep pour les énergies nucléaire et géothermique ;

- 13,3 % d'énergie d'origine renouvelable (ENR) contribue à la consommation mondiale d'énergie primaire ;
- l'électricité produite dans le monde en 2009 se répartit de la façon suivante

	TWh	% de la production électrique mondiale
<b>Production électrique mondiale</b>	20 055	100 %
<b>Origine primaire</b>	6 598	32,9 %
<i>Dont origine nucléaire</i>	2 687	13,4 %
<i>Dont origine renouvelable</i>	3 911	19,5 %
<b>Origine Secondaire</b>	13 457	67,1 %

- selon les données de l'international energy agency (IEA), la consommation d'énergie électrique représente 17,3 % de la consommation de l'énergie finale dans le monde.

En prenant compte la ressource primaire disponible consommée pour la production d'électricité secondaire ainsi que l'électricité d'origine primaire, c'est au total 27 % de la ressource primaire disponible qui est utilisé pour produire l'électricité consommée.

## 1.1 – Contexte énergétique français en 2010, évolution et objectifs

*En 2007 le Grenelle de l'Environnement s'est fixé pour objectif général un changement d'échelle dans les modes de production décarbonée et dans la réduction des consommations d'énergie. Pour y parvenir, les parties prenantes ont défini un objectif très ambitieux de réduction du contenu carbone de l'offre énergétique française, à savoir l'atteinte du seuil de 23 % d'énergie finale d'origine renouvelable en 2020. L'objectif est d'équilibrer la production énergétique française en adossant au réseau centralisé des systèmes décentralisés permettant davantage d'autonomie. Cela suppose d'augmenter de 20 millions de Tep la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique à l'horizon 2020 en suivant deux lignes stratégiques, autonomie et décentralisation, là où cela est possible.*

**Question 1 :** exprimer la production et la consommation énergétique française en 2010. Compléter le document réponse DR1.

**Question 2 :** citer les principales pistes actuellement explorées en France et en Europe pour favoriser la maîtrise de la consommation d'énergie.

**Question 3 :** indiquer pour l'année 2010 la part des ENR dans la production énergétique nationale et dans le besoin énergétique national (voir annexe 1.2.2).

**Question 4 :** indiquer les volumes et l'origine de l'électricité produite en France en 2010. Compléter le document réponse DR2. Commenter succinctement cette répartition en comparaison de la situation mondiale et préciser la part de la production intérieure d'électricité d'origine renouvelable dans la consommation d'électricité pour cette même année.

## 1.2 – Potentiel des énergies marines et les générateurs hydroliens

Plus de 150 ans après ses premiers développements, la filière hydroélectrique constitue la deuxième source de production électrique française. Cette production est issue des grands barrages et de petites centrales délocalisées. Les générateurs hydroliens participent au développement de l'hydroélectricité uniquement pour les projets d'implantations fluviales, dans les autres cas ils sont associés à la filière marine.

Selon l'IPANEMA (Initiative PArtenariale Nationale pour l'émergence des Energies MARines), le potentiel mondial permettant techniquement d'exploiter l'énergie hydrolienne serait estimé à 450 TWh. La production hydrolienne Française atteint 529 GWh en 2010 avec une puissance installée de 240 MW. Celle-ci est exclusivement constituée des 24 turbines de 10 MW de l'usine marémotrice de la Rance.

EDF affiche un potentiel hydrolien pour la France de 2,5 à 3,5 GW (soit 5 à 14 TWh par an) et l'objectif de développement des énergies marines électrique diffusé par l'ADEME vise une puissance installée de 800 MW à l'horizon 2020. Cette projection intègre trois sources différentes : le captage de l'énergie cinétique des courants par les hydroliennes, l'énergie de la houle et l'énergie thermique des mers.

### Objectif de développement des énergies marines électriques en 2020\*

Source : Feuille de route sur les énergies renouvelables marines, 2009, Ademe

Filière	Puissance installée (MW)	Production (TWh)
Hydrolien	400	1,4
Houlomoteur	200	0,8
Énergie thermique des mers	200	1,4

\*Issu de la prospective de l'Ifremer sur les énergies marines à l'horizon 2030

**Question 5 :** quelle est en 2010 la part des énergies marines dans la production nationale d'électricité d'origine renouvelable ? Préciser, à partir des hypothèses retenues par l'ADEME, le potentiel de production d'énergie électrique de source marine en France à l'horizon 2020.

## 1.3 – Situation vis à vis des objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement

**Question 6 :** conclure succinctement quant aux objectifs visés par la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 et le Grenelle de l'environnement qui fixent notamment les objectifs suivants :

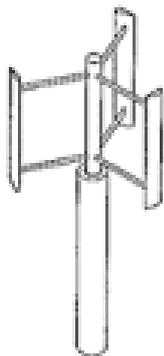
- produire 10% des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergies renouvelables à l'horizon 2010 ;
- atteindre une production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21% de la consommation en 2010 ;
- atteindre 23% d'énergie finale d'origine renouvelable en 2020 (initialement cela supposait d'augmenter de 20 Mtep la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique).

## Deuxième partie

### Développement d'une turbine hydrolienne à flux transverse

*L'objectif de cette partie est de déterminer, à partir notamment d'une étude comparative entre éoliennes et hydroliennes, l'incidence du fluide et des dimensions sur la puissance théorique que l'on peut extraire d'un générateur. Il s'agira ensuite d'analyser et de justifier la capacité de l'hydrolienne HARVEST à récupérer l'énergie cinétique du fluide en translation et enfin d'identifier l'incidence des solutions mises en œuvre pour améliorer le système.*

Les premiers brevets d'invention pour une turbine à axe de rotation transversal à la direction du courant ont été déposés en 1925 en France (1931 aux Etats-Unis) par le français Georges Jean Marie Darrieus. L'objet de l'invention est une turbomachine « pour l'utilisation de l'énergie des fluides (vents, vagues, courants de rivières ou torrents) constituée par des aubes de profil fuselé tournant autour d'un axe commun normal à la direction du courant ».



*Turbine à axe vertical - type Darrieus  
(flux transverse)*



*Turbine à axe horizontal  
(flux axial)*

## 2.1– Influence du fluide sur la puissance extraite - Étude comparative

L'objectif de cette question est d'étudier l'incidence du fluide (vent ou eau) sur le fonctionnement d'une turbine. L'hydrolienne et l'éolienne captent l'énergie cinétique d'un fluide pour la restituer en énergie mécanique de rotation.

La puissance extraite par la turbine de ces deux types de convertisseur s'exprime par la même formule :

$$P_T = 0,5 \rho C_p S_T v^3$$

avec :

- $P_T$ , puissance extraite par la turbine ;
- $\rho$ , densité volumique du fluide, (on fera pour l'air l'approximation de  $1 \text{ kg/m}^3$ ) ;
- $C_p$ , coefficient, de puissance hydrodynamique de la turbine (limité à 59 % par la loi de Betz) ;
- $S_T$ , surface équivalente balayée par les pales de la turbine, soit  $S_T = 2 R_T H_T$  pour une turbine à axe vertical (flux transverse) ou  $S_T = \pi R_T^2$  pour une turbine à axe horizontal (flux axial). Dans ces expressions,  $R_T$  et  $H_T$  sont respectivement le rayon et la hauteur de la turbine ;
- $v$ , vitesse du fluide ;
- $\Omega_T$ , vitesse de rotation de la turbine.

Pour réaliser une comparaison entre éolienne et hydrolienne, les paramètres suivants seront pris en compte :

- turbines à axe horizontal de 2,5 m de rayon et de mêmes dimensions, avec une efficacité maximale obtenue pour une vitesse spécifique  $= \frac{R_T \Omega_T}{v_{\text{eau}}} = 3$  ;
- force de traînée (force de poussée dans la direction de l'écoulement du fluide) telle que  $F_x = K \rho S_T v^2$  avec  $K$  constante liée à la géométrie de la turbine.

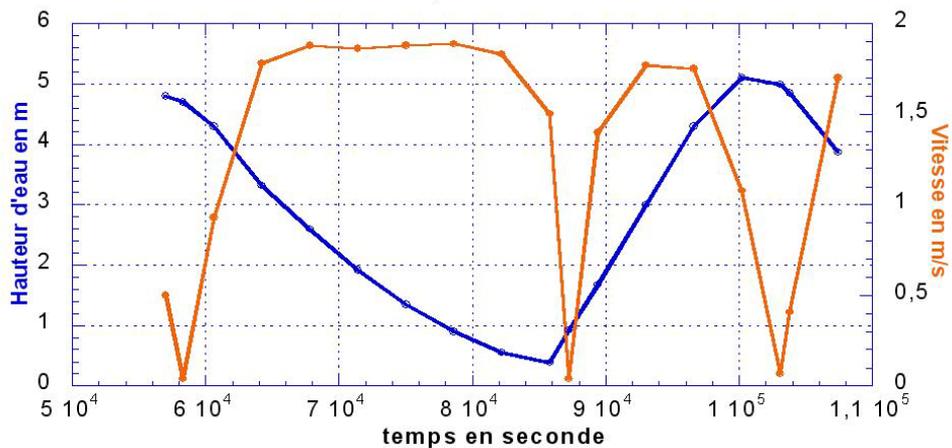
Pour optimiser les installations d'hydroliennes, les sites d'implantation sont choisis avec des vitesses d'écoulements d'eau au minimum de 2 m/s. Les éoliennes sont généralement implantées sur des sites avec des vitesses moyennes d'au moins 10 m/s.

**Question 7 :** avec ces hypothèses, exprimer les rapports de puissances, couples mécaniques et forces de traînée entre une turbine implantée dans l'eau et dans l'air. Les résultats seront exprimés dans le document réponse DR3 en fonction des grandeurs littérales préinscrites.

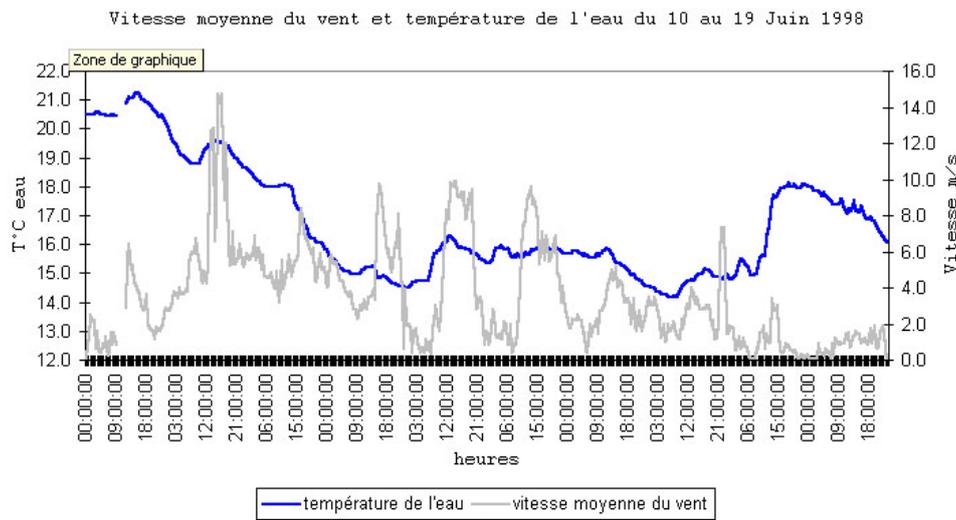
**Question 8 :** pour une même puissance récupérée, déterminer avec les hypothèses précédentes, le facteur d'échelle pour une turbine de même type placée dans l'eau à 2 m/s et dans l'air à 10 m/s. Le facteur d'échelle  $\delta$  est défini par  $\delta = \frac{RT_{\text{air}}}{RT_{\text{eau}}}$  ou  $\delta = \frac{HT_{\text{air}}}{HT_{\text{eau}}}$ .

**Question 9 :** commenter les courbes de vitesses ci-dessous, obtenues à partir de deux générateurs, une hydrolienne implantée dans l'estuaire de la Gironde et une éolienne.

**Comparaison entre marées et courant  
à Bordeaux  
Coef. 70, débit 650m<sup>3</sup>/s**

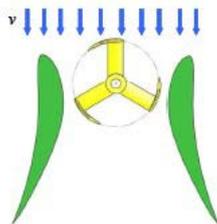


**Figure 1 :** vitesse de l'eau dans l'estuaire.



**Figure 2 :** vitesse du vent sur une journée

**Question 10 :** l'implantation d'une hydrolienne dans un canal de faible largeur ou encore l'utilisation d'un carénage font apparaître un coefficient de puissance nettement plus élevé. Commenter qualitativement cette remarque.



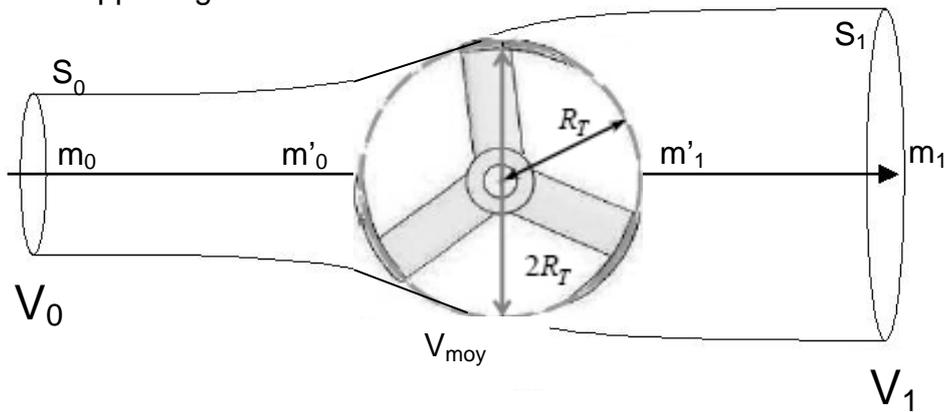
**Figure 3 :** carénage d'une hydrolienne

**Question 11 :** en s'appuyant sur l'étude précédente, lister dans le document réponse DR4 les avantages et inconvénients de la production par hydroliennes et conclure succinctement quant à la pertinence de cette piste pour la production d'énergie électrique.

## 2.2 – Étude de la conversion de l'énergie fluide en énergie mécanique

La suite concerne l'étude de l'hydrolienne à flux transverse HARVEST immergée dans un fluide animé d'une vitesse  $V_0$  donnée. Il s'agit notamment de définir la quantité d'énergie théoriquement récupérable par une turbine ainsi que les facteurs influents afin de proposer des voies d'améliorations possibles du système.

Nous considérons, pour la description et modélisation suivante, un écoulement monodimensionnel par section, stationnaire d'un fluide parfait homogène. On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen.



**Figure 4 :** Convention pour les vitesses du fluide

Dans le cas examiné le débit massique est constant :  $D_m = \rho S_T v = \text{constante}$ .

Pour toutes les variables suivantes, l'indice 0 correspond à l'entrée de la turbine et l'indice 1 correspond à la sortie :

$\rho$ , masse volumique du fluide ;  
 $g$ , accélération de la pesanteur ;  
 $S_T$ , surface du capteur hydrolien ;  
 $H_T$ , hauteur du capteur hydrolien ;  
 $R_T$ , rayon du capteur hydrolien ;  
 $c$ , corde de la pale ;  
 $S$ , section occupée par le flux capté ;

$p$ , pression ;  
 $v$ , vitesse du fluide ;  
 $D_m$ , débit massique ;  
 $F$ , force exercée sur la turbine ;  
 $P$ , puissance développée par la force exercée ;  
 $z$  : altitude de l'étude.

### **Détermination de la puissance maximale disponible**

Considérons quatre points sur une même ligne de courant : un point  $m_0$  en amont (sur  $S_0$ ), un point  $m'_0$  « juste avant » le capteur hydrolien proprement dit, un autre  $m'_1$  « juste après », et un dernier,  $m_1$  en aval (sur  $S_1$ ) :

- aux points éloignés du capteur, sur  $S_0$  et  $S_1$  la pression est égale à  $p_0$  qui est la pression de référence à la profondeur considérée à l'exclusion d'une discontinuité de pression notée  $p_1$  située immédiatement en aval de la turbine ;
- aux points proches de la turbine, la section est égale à la surface  $S_T = 2R_T H_T$ , comme le débit massique est constant la vitesse de l'eau notée  $V_{\text{moy}}$  est constante.

Cette ligne de courant étant située à une profondeur constante, on considère que l'effet du champ de pesanteur est nul.

**Question 12** : appliquer le théorème de Bernoulli (voir annexe 2.1) une première fois entre l'amont  $S_0$  et le point juste avant la turbine et une deuxième fois entre le point juste après la turbine et l'aval  $S_1$ . En déduire une relation entre les pressions en amont  $p_0$  et en aval  $p_1$  et entre les vitesses en amont  $V_0$  et en aval  $V_1$ .

**Question 13** : exprimer l'effort  $F$  exercé par le fluide sur la turbine en fonction de la surface  $S_T$  du capteur hydrolien, des vitesses en amont et en aval et de la masse volumique du fluide.

**Question 14** : le rendement théorique de la turbine est égal à  $\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}(1-x^2)(1+x)$  avec

$x = \frac{V_1}{V_0}$  le rapport des vitesses en amont et en aval.

À partir de l'expression du rendement, conclure sur la puissance théorique maximale que l'on peut extraire d'un générateur de ce type.

## Étude de la récupération de l'énergie mécanique

(Les questions suivantes font référence aux annexes 2.1 à 2.4)

Afin d'analyser les conditions de fonctionnement d'une turbine et de déterminer l'expression du couple disponible nous nous intéresserons dans un premier temps à un modèle de type « Achard » (nom de son concepteur) constitué de 3 pales disposées à 120°, sans dévers ni effilement tel que représenté figure 5.

Le profil des pales utilisé ici est un NACA 0018 dont les caractéristiques hydrodynamiques de trainée et de portance sont symétriques par rapport à l'angle d'incidence et données en annexe.



Figure 5 : turbine Achard NACA 0018

L'écoulement sera supposé plan. Nous prendrons comme repère de référence, le repère  $R = (O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  où  $\vec{X}$  est suivant la direction de l'écoulement et  $\vec{Z}$  vertical ascendant.

On associe à la turbine un repère tournant  $R_{turv} = (O, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{Z})$ .

Nous repèrerons par  $\theta = (\vec{Y}, \vec{e}_r)$  la position angulaire de la première pale prise comme référence.

La vitesse incidente du fluide est donnée par :  $\vec{V}(\text{fluide}/R) = \vec{V}_0 = V_0 \vec{X}$ .

On pose de plus  $\omega$  la vitesse de rotation de la turbine par rapport au support fixe, **éfinil** alors la vitesse spécifique par  $\lambda = \frac{R\omega}{V_0}$  où  $R$  est le rayon sur lequel évolue la pale.

La vitesse relative du fluide par rapport à la pale est alors donnée par :

$$\vec{V}(\text{fluide}/\text{pale}) = \vec{W} = \vec{V}(\text{fluide}/R) - \vec{V}(\text{pale}/R) = \vec{V}_0 - R \vec{\omega}$$

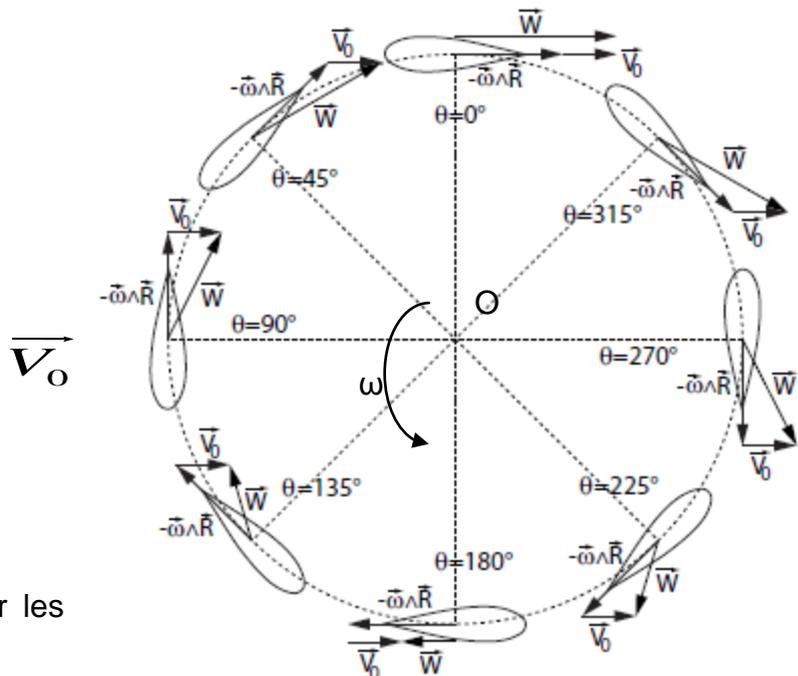


Figure 6 : triangles de vitesse sur les pales en vue de dessus.

L'objectif étant de quantifier le couple suivant  $(O, \vec{Z})$  engendré par les forces hydrodynamiques sur les pales, il est nécessaire d'étudier leurs variations en fonction de la position angulaire des pales.

**Question 15 :** démontrer à partir d'une construction graphique, que l'angle d'incidence  $\alpha$  du fluide sur la pale en fonction de sa position angulaire  $\theta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  s'exprime par la relation :

$$\alpha(\theta) = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}\right)$$

**Question 16 :** Comment évoluent le  $C_x$  et le  $C_z$  en fonction de  $\alpha$  ? Que risque-t-il de se passer si la vitesse spécifique  $\lambda$  devient trop faible et si elle devient trop grande ?

**Expression de la vitesse relative du fluide par rapport à une pale :**

Soit  $(\vec{e}_T, \vec{e}_P, \vec{Z})$  la base liée à l'écoulement telle que  $\vec{W} = W \vec{e}_T$  et  $\vec{T} = T \vec{e}_T$ . On a donc  $\alpha = (\vec{e}_\theta, \vec{e}_T)$ . La vitesse relative du fluide par rapport à la pale est définie par la relation :

$\vec{W} = W \vec{e}_T = \omega R \vec{e}_\theta - V_0 \vec{e}_\theta$ . Par projection sur  $\vec{e}_\theta$ , nous obtenons  $W \cos \alpha = R \omega + V_0 \cos \theta$ . Une projection sur le repère lié à la pale permet de calculer la norme de  $W$  soit :

$$W = V_0 \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta}$$

**Question 17 :** Déduire des questions et relations précédentes les éventuelles symétries par rapport à  $(O, \vec{Y})$ .

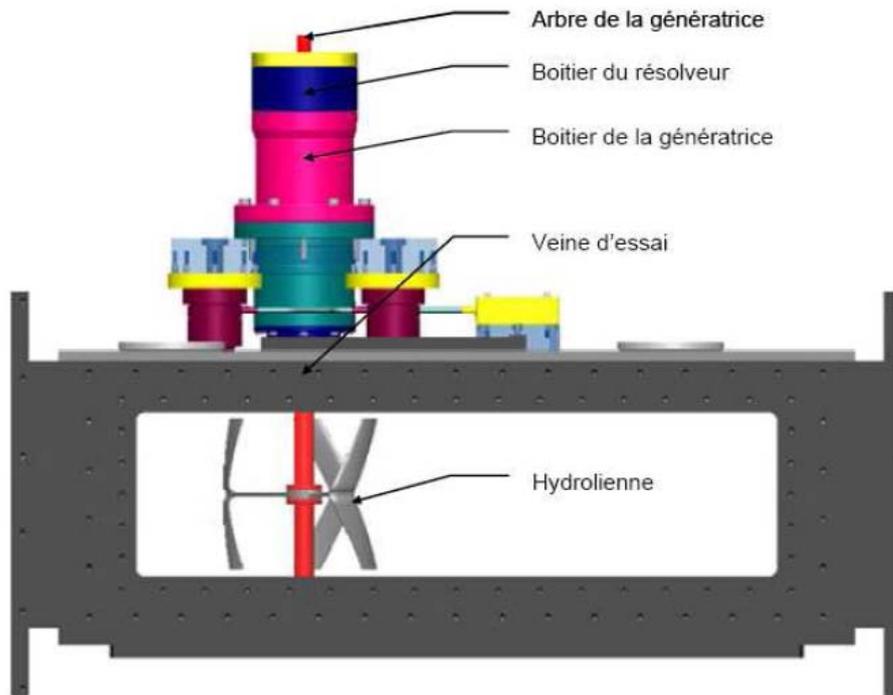
**Expression de la composante d'effort tangentiel :**

À partir des définitions de  $T$  et  $P$  données en annexe nous pouvons démontrer que la composante d'effort tangentiel, responsable du couple sur l'arbre moteur,  $F_T = \vec{F}_T \cdot \vec{e}_\theta = P \vec{e}_\theta \cdot \vec{e}_P - T \vec{e}_\theta \cdot \vec{e}_T = P \sin \alpha - T \cos \alpha$  peut s'exprimer par la relation :

$$F_T(\theta) = P \sin \alpha - T \cos \alpha = \frac{1}{2} \rho c H_T V_0^2 (1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \theta) (C_z \sin \alpha - C_x \cos \alpha)$$

**Question 18 :** sachant que l'on dispose 3 pales à  $120^\circ$  (première pale à  $\theta=0$ ) sur un rayon  $R$ , conclure en donnant l'expression du couple disponible  $C$  sur l'arbre de la turbine.

**Une campagne de mesure en laboratoire est réalisée à partir de l'intégration du prototype implanté dans une veine d'essai instrumentée**



**Figure 7 : Banc d'essai**

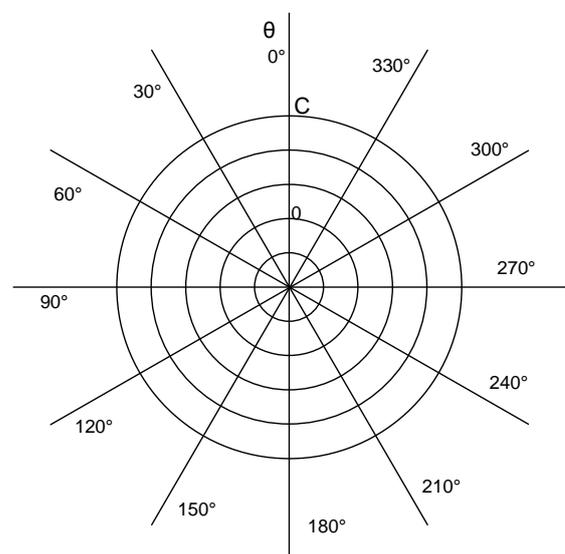
Dans ce banc expérimental les essais seront réalisés avec une vitesse incidente du fluide de  $V_0 = 2\text{ m/s}$  et une vitesse spécifique  $\lambda = 3$ . L'objectif étant de valider expérimentalement l'expression du couple obtenu précédemment.

Les applications numériques seront réalisées à partir des dimensions du prototype hauteur  $H_T = 500\text{ mm}$ , rayon  $R_T = 250\text{ mm}$  et corde d'une pale  $c = 92\text{ mm}$ .

**Question 19 :** compte-tenu des hypothèses et des données précédentes, déterminer les valeurs numériques de  $\alpha$ ,  $W$  et  $C$  pour une pale (compléter les documents réponses DR5 et DR6), on supposera égaux les couples  $C(\theta)$  et  $C(\pi - \theta)$ . Conclure sur l'allure du couple théorique obtenu.

**Question 20 :** comparer l'allure de la courbe figure 8 avec celle de la courbe théorique obtenue lors de la question précédente. Conclure qualitativement en identifiant les facteurs qui permettent d'expliquer les différences.

**Figure 8 :** mesure du couple obtenue expérimentalement pour 1 pale à partir du prototype et du banc d'essais



### 2.3 - Étude des voies d'améliorations possibles du système

Tel que nous l'avons vu dans les questions précédentes, même si elle permet de récupérer l'énergie du fluide, une turbine seule à pales droites présente certains inconvénients. Afin d'améliorer les performances du système, on décide donc d'utiliser une pale en aile delta, comme illustré figure 9.

Les pales couvrant un secteur angulaire plus important, le couple sera mieux réparti lors de la rotation et donc le couple global plus homogène.



**Figure 9** : turbine Achard aile delta

#### **Association des turbines en colonnes**

Afin d'augmenter le couple capté par le système, le choix a été effectué d'associer quatre turbines hydroliennes en colonne sur un même axe. Cette partie du questionnement a pour objectif de justifier ce choix.

Les applications numériques demandées seront réalisées à partir du prototype précédemment étudié (hauteur  $H_T = 500$  mm et rayon  $R_T = 250$  mm) dans des conditions de fonctionnement optimales avec  $\lambda = 2,5$  et  $V_0 = 3$  m/s.

Pour lisser le fonctionnement de la tour ainsi créée, on introduit un décalage angulaire entre les turbines.



**Figure 10** : association en colonne

**Question 21** : quelle doit être la valeur de ce décalage angulaire afin d'obtenir le meilleur lissage ?

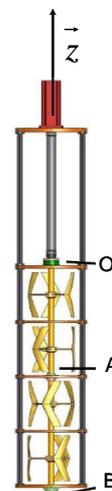
**Question 22** : dans les conditions de fonctionnement spécifiées, déterminer l'expression de la vitesse de rotation de la tour,  $\omega$  et donner sa valeur numérique.

L'étude d'une turbine unique réalisée dans la partie précédente a montré que les efforts hydrodynamiques sont cycliques sur les pales. Chaque pale de turbine subit donc une excitation par tour.

**Question 23** : déterminer alors l'expression de la fréquence d'excitation de la tour dans son ensemble. En faire l'application numérique.

Deux solutions de montage de la tour sur son support sont envisagées : l'une par deux paliers, à chaque extrémité, l'autre par trois, aux extrémités et au milieu. Un logiciel de simulation fournit alors les modes de résonance de la structure complète. Un récapitulatif des résultats est fourni en annexe 2.5.

**Question 24** : au regard des données précédentes et des documents annexes, une solution à trois paliers est retenue (voir figure 11). Justifier le choix ainsi réalisé et conclure en justifiant l'association en colonne des turbines du point de vue de la maintenance.



**Figure 11** : positionnement des paliers

## Troisième partie

### Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Suite à l'identification et à la caractérisation des principaux facteurs influant sur la conception mécanique d'une turbine à axe vertical et flux transverse, l'objectif de cette troisième partie est de justifier des solutions techniques mises en œuvre et des choix technologiques effectués lors du développement de deux prototypes. Le premier est constitué uniquement par des machines électriques pour une exploitation en laboratoire, le second est implanté dans un canal fluvial.

#### 3.1 – Transmission de la puissance captée

Les essais réalisés à partir du premier banc expérimental permettent de relever l'allure, figure 12, du rendement de la turbine en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda = \frac{R\omega}{V_0}$ .

La valeur théorique du rendement est par ailleurs définie par la relation suivante :

$$\eta = \frac{C\omega}{\frac{1}{2}\rho S V_0^2}$$

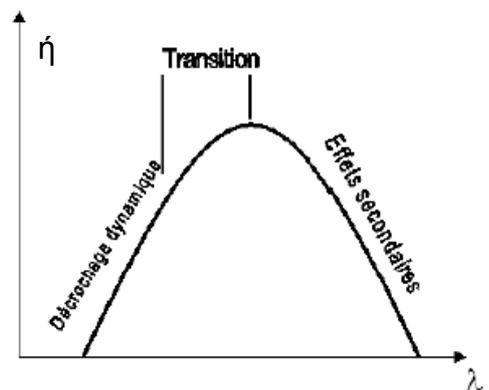


Figure 12 : rendement  $\eta = f(\lambda)$

**Question 25 :** commenter la figure 12. Quelle en est l'incidence sur les dispositifs à prévoir pour le raccordement de l'hydrolienne sur le réseau électrique ?

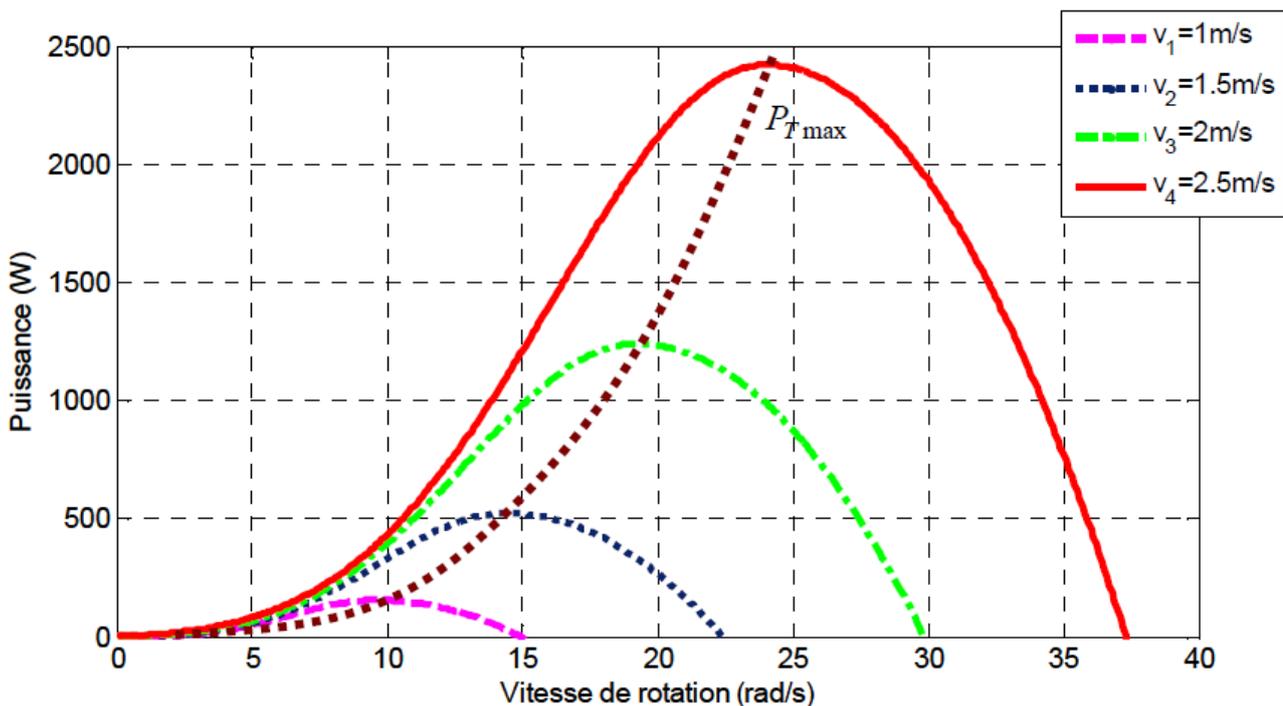
La machine utilisée est une machine synchrone à aimant permanent refroidie par un moto ventilateur et autopilotée (commande en couple  $\Gamma$  à partir d'une consigne de couple  $\Gamma_{ref}$ ). Sa fonction de transfert est la suivante (« p » est la variable de Laplace)  $\frac{\Gamma}{\Gamma_{ref}} = \frac{1}{1 + \tau p}$  avec la constante de temps électrique  $\tau = 10^{-6}$  s.

La génératrice est couplée à la turbine qui fournit le couple  $C_T$ . Les caractéristiques mécaniques de l'ensemble sont :

- inertie équivalente ramenée sur l'arbre de la génératrice,  $J = 2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  ;
- coefficient de frottement visqueux,  $f = 0,01 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{s}$ .

Exprimer la projection du théorème du moment dynamique sur l'axe de la génératrice, en utilisant un modèle moteur.

Afin d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble et de rechercher le maximum de puissance (MPPT), il est nécessaire d'asservir la vitesse de rotation de la turbine comme le montre la figure suivante :



**Figure 13 : maximum Power Point Tracking**

La consigne de vitesse de rotation de la génératrice, notée  $\Omega_{\text{ref}}(p)$  est élaborée à partir d'une mesure de la vitesse du fluide.

Comme nous le constatons sur ce graphique, l'erreur en régime permanent suite à un échelon en vitesse doit être nulle de manière à récupérer la puissance maximale pour une vitesse de fluide donnée. De même, les variations de vitesse de l'eau dans les conditions naturelles évoluent lentement tant pour les courants marins et fluviaux que pour les déplacements dus aux marées. Le système ne nécessite pas une grande rapidité. En revanche, les efforts dynamiques sur les pales étant liés à la vitesse de rotation, un dépassement de vitesse ou d'instabilité risque de détruire la turbine.

Il en résulte que l'asservissement de vitesse devra respecter le cahier des charges suivant :

Stabilité	marge de phase de 60° marge de gain de 12 dB
Rapidité	temps d'établissement $t_e < 30$ s
Précision	Erreur, en régime permanent en réponse à un échelon, nulle
Amortissement	pas de dépassement

**Analyse des performances du système :**

**Question 26 :** compléter sur le document réponse DR7 le schéma bloc de l'asservissement de la vitesse rotation de la génératrice intégrée au banc d'essai.

Il est nécessaire dans un premier temps d'estimer la rapidité du système. Nous prendrons une valeur unitaire pour le correcteur  $C_\Omega$ . De plus, cette première étude de l'asservissement sera réalisée en poursuite c'est-à-dire avec  $C_{T(s)} = 0$ .

**Question 27 :** après avoir simplifié le bloc diagramme précédent, calculer la fonction de transfert en boucle fermée  $H_\Omega(p) = \frac{\Omega_{mes}}{\Omega_{ref}}$  dans les conditions spécifiées.

En déduire les expressions littérales des caractéristiques de la fonction de transfert.

Nous poserons pour la suite  $H_\Omega(p) = \frac{1}{1 + 3,3p + \frac{p^2}{3,2 \cdot 10^5}}$ .

**Question 28 :** en utilisant le graphique annexe 3.1.1, estimer alors le temps de réponse à 5 % du système et conclure par rapport au cahier des charges en justifiant des extrapolations éventuellement réalisées.

L'analyse des critères de précision et de stabilités se fait par l'étude du comportement en boucle ouverte de l'ensemble turbine-génératrice. Les diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte  $T(j\omega)$  sont donnés en annexe 3.1.2.

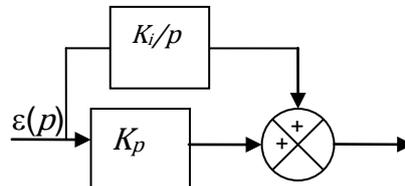
**Question 29 :** en expliquant votre démarche donner, à partir des diagrammes fournis en annexe 3.1.2, l'expression numérique du gain statique et des pulsations de coupure pour  $T(j\omega)$ .

**Question 30 :** à partir du résultat précédemment obtenu, justifier en expliquant les simplifications réalisées, l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte.

Afin d'améliorer la précision du système on envisage tout d'abord un correcteur de type proportionnel :  $C_\Omega(p) = K_\Omega$ .

**Question 31 :** déterminer, en fonction de  $K_{\Omega}$ ,  $\varepsilon_{\text{stat}}$  définie comme l'erreur en régime permanent pour une entrée consigne de type échelon. Le respect du critère de précision est-il possible grâce à un tel correcteur ?

On se propose dans un second temps de corriger le système avec le correcteur défini sur le schéma bloc ci-dessous :



**Figure 14 :** correcteur

On donne les valeurs :  $K_p = 13\,950$  et  $K_i = 20\,207$ . Les diagrammes asymptotiques de  $T(j\omega)$  sont représentés en noir sur le document réponse DR8.

**Question 32 :** représenter la fonction de transfert  $C(p)$  de ce correcteur sur DR8. Comment nomme-t-on le type de la correction ainsi apportée. Quelle est l'influence d'un tel correcteur sur la précision et la stabilité ? Justifier les réponses apportées.

**Question 33 :** évaluer les marges de gain et de phase du système ainsi corrigé et conclure vis-à-vis du respect de l'ensemble des critères du cahier des charges.

### 3.2 – Choix technologiques

Le tableau en annexe 3.2 donne des pistes de choix pour différentes technologies de machines électriques.

**Question 34 :** à partir de ce tableau et en ajoutant un critère lié à l'entretien et la maintenance, effectuer un premier tri. Justifier l'incompatibilité de certaines technologies.

#### ***Incidence du mode de raccordement sur le choix technologique***

Deux configurations sont envisageables pour le générateur hydrolien : le mode connecté au réseau (appelé mode PQ) et le mode îloté (appelé mode Vf). Dans ce deuxième cas, la génératrice est la seule source d'énergie électrique disponible. Selon le mode de connexion retenu les lois de commande et de pilotage sont différentes :

- quand le générateur hydrolien est connecté à un réseau puissant (mode PQ), on demande au système d'assurer le niveau de puissance active (ou éventuellement réactive) requis ;
- dans le cas du mode îloté (Vf), le générateur hydrolien se trouve connecté soit à des charges soit à un micro réseau local. Le système doit alors assurer le contrôle de l'amplitude et de la fréquence de la tension au point de raccordement.

**Question 35 :** dans le cadre d'un fonctionnement en mode îloté, une machine asynchrone peut-elle fournir de l'énergie électrique en disposant uniquement de l'apport d'énergie mécanique extérieur ? Pour cela, effectuer un raisonnement qualitatif à l'aide des équations ci-après.

On rappelle les équations d'une phase de cette machine :

$$V_1 - \frac{d\varphi_1}{dt} - l_1 \frac{di_1}{dt} = r_1 i_1 \quad \text{et} \quad 0 - \frac{d\varphi_2}{dt} - l_2 \frac{di_2}{dt} = r_2 i_2$$

### Notations utilisées

$i_1$	Courant efficace statorique	$i_2$	Courant efficace rotorique,
$l_1$	Inductance cyclique de fuite d'une phase au stator	$l_2$	Inductance cyclique de fuite d'une phase au rotor
$r_1$	Résistance d'une phase au stator	$r_2$	Résistance d'une phase au rotor
$n_1$	Nombre de spires par phase du bobinage statorique,	$n_2$	Nombre de spires par phase du bobinage rotorique,
$k_1$	Coefficient de bobinage de l'enroulement du stator	$k_2$	Coefficient de bobinage de l'enroulement du rotor
$\varphi_1$	Flux total à travers la phase (si on ne tient pas compte de la magnétisation $\varphi_1 = k_1 \cdot n_1 \cdot \phi$ )	$\varphi_2$	Flux total à travers la phase (si on ne tient pas compte de la magnétisation $\varphi_2 = k_2 \cdot n_2 \cdot \phi$ )
$\omega$	Pulsation statorique	$\omega'$	Pulsation rotorique
$V_1$	Tension efficace statorique		

Le flux tournant dans l'entrefer, commun au stator et au rotor, est noté  $\phi$ . Il est constant pour un fonctionnement donné. Le flux  $\varphi_1$  est orienté dans le même sens que le flux  $\phi$ , mais  $\varphi_2$  est orienté en sens inverse. Le glissement  $g$  est tel que  $\omega - \omega' = g \omega$ .

**Question 36 :** dans les mêmes conditions préciser, en justifiant qualitativement votre réponse, si la machine synchrone à aimant permanent peut fournir de l'énergie électrique en n'ayant qu'un apport d'énergie mécanique extérieur ?

**Question 37 :** en conclusion, préciser en fonction du mode de raccordement retenu, le type de technologie de génératrice pouvant être utilisé.

### Organisation structurelle, étude du redressement

La chaîne de conversion nécessite une structure complète dans laquelle nous retrouvons une fonction redressement, stockage de l'énergie et production de signaux sinusoïdaux comme illustré par la figure suivante. Les commutateurs K1 et K2 permettent de configurer le banc d'essai présenté dans la figure 7 de la partie 2.2. en mode iloté ou connecté réseau.

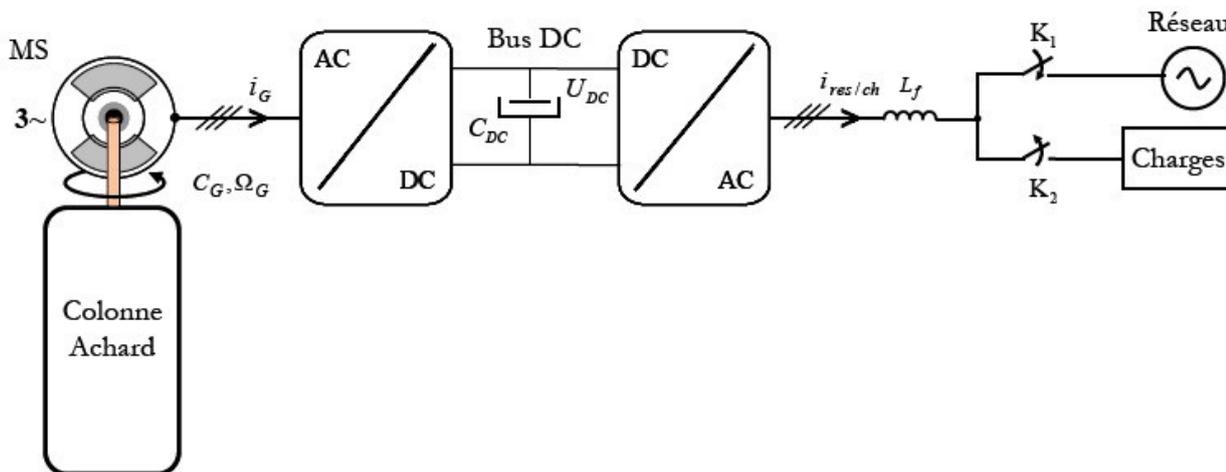


Figure 15 : chaîne de conversion

**Question 38 :** justifier cette structure en mode connecté au réseau, sachant que la machine synchrone fonctionne à une vitesse angulaire comprise entre 115 et 344 tr/min.

Dans les dispositifs de production de petites puissances, comme le banc d'essai étudié dans cette partie, nous retrouvons des redresseuses triphasées doubles alternances (montage PD3 représenté ci-dessous) :

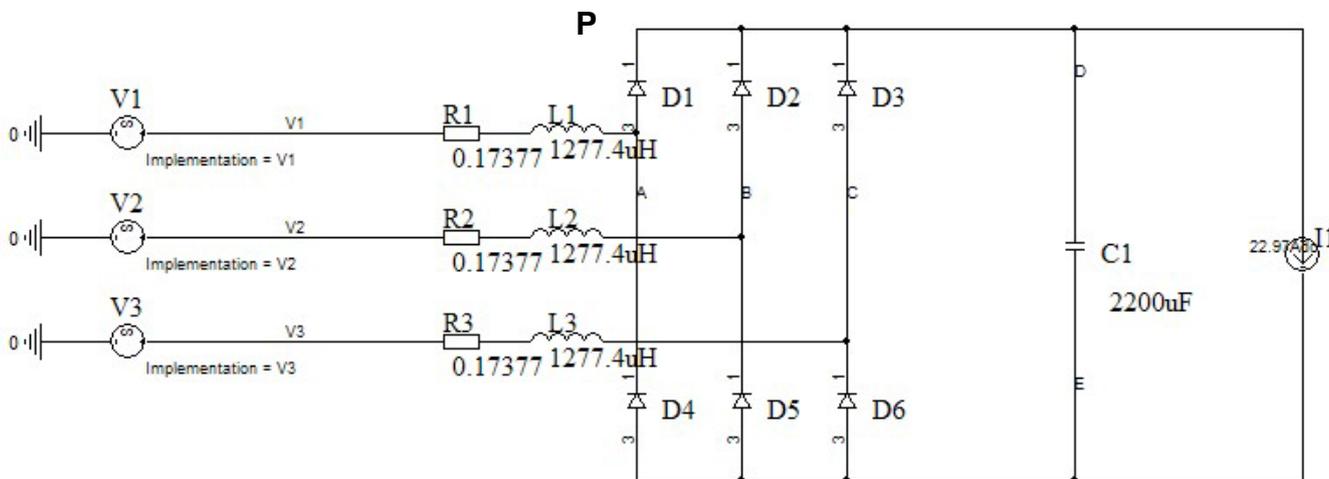


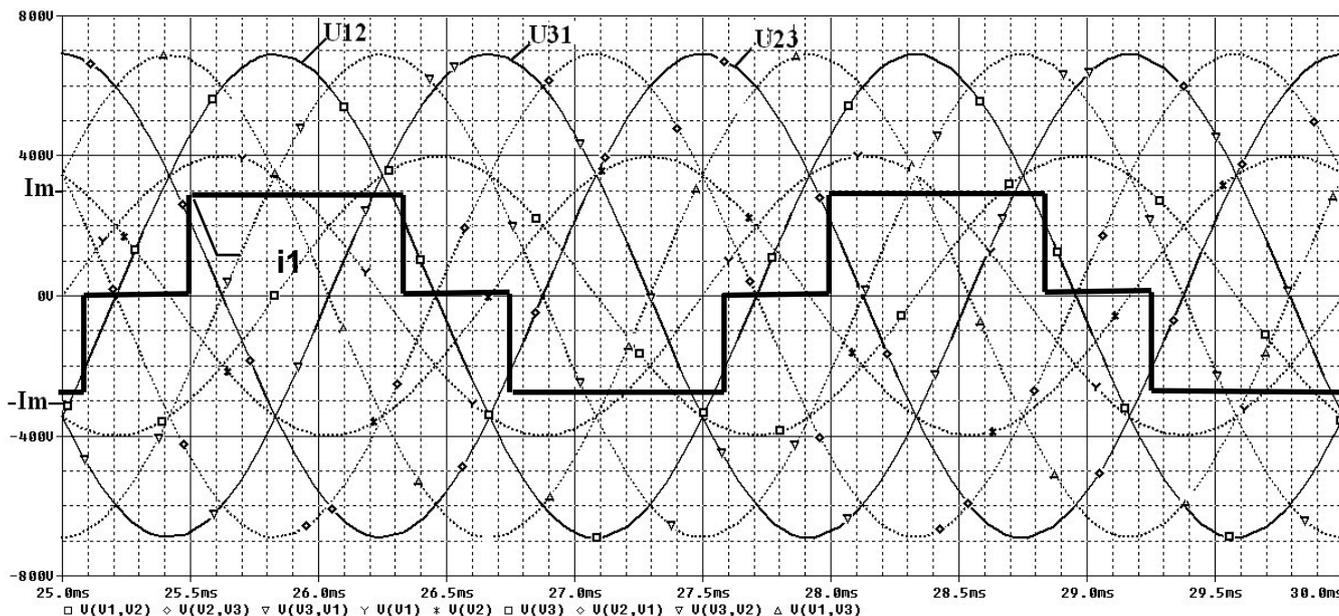
Figure 16 : Redresseur PD3

On précise pour la question suivante que la machine fonctionne quasiment au régime nominal établi et que dans ces conditions la tension  $U_{DE}$  aux bornes du condensateur C1 est considérée comme constante et égal à E.

**Question 39 :** en négligeant l'effet des inductances de fuite, tracer sur le document réponse DR9, le courant  $i_p$  passant au point P situé sur la cathode de D1, et le courant  $i_1$  circulant dans le générateur référencé  $V_1$ .  
En déduire l'angle de conduction d'une diode (durée de conduction exprimé en radian au regard de la période T, elle aussi exprimé en radian).

**Cas du redressement commandé**

Dans un montage industriel les diodes peuvent être remplacées par des thyristors afin de piloter la variation de la valeur de la tension continue  $U_{DE}$ .



**Figure 17 :** Redressement par pont commandé

La figure ci-dessus représente le courant dans la phase 1 de la génératrice, dans le cas d'un redressement commandé lorsque l'angle de retard à l'amorçage est de  $\psi = 45^\circ$ .

**Question 40 :** justifier des différences entre l'allure du courant présentée figure ci-dessus et l'allure obtenue précédemment. Préciser l'angle de conduction d'un thyristor.

**Question 41 :** à partir du courant  $i$  l'allure suivante représentant le courant dans une phase de la génératrice, donner la forme littérale des coefficients de la décomposition en série de Fourier du courant dans une phase de la génératrice.

On exprimera  $i(t)$  sous la forme :

$$i(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$$

avec  $A_0$  la valeur moyenne,  $B_n$  et  $C_n$  les coefficients de rang  $n$ .

En posant  $\theta = \omega t$ , calculer ces coefficients  $A_0$  ainsi que  $B_n$  et  $C_n$  jusqu'au rang 8 en prenant  $I_m = 22,97 \text{ A}$ .

### Étude de la qualité de l'énergie en sortie de l'onduleur :

La décomposition obtenue dans l'étude précédente est théorique puisque les phénomènes de commutation des interrupteurs (empiètement...) ne sont pas pris en compte. L'objectif de cette question est de comparer deux technologies d'onduleurs et de justifier des choix effectués dans le respect de la réglementation. La première solution, nommée onduleur quasi-sinus utilise un PD3 tous thyristors, la seconde fonctionne en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

Le tableau suivant présente les valeurs (%) du fondamental des coefficients de la décomposition en série de Fourier pour ces deux équipements :

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C <sub>n%</sub> Quasi-sinus en %	100	0	45,16	0	16,77	0	14,2	0	10,36	0	8,19	0	7,46
C <sub>n%</sub> MLI en %	100	0,24	0,6	0,0	0,09	0,06	0,06	0,05	0,21	0,04	0,12	0,04	0,06

Pour simplifier, nous considérons que le fondamental est de 20A pour les deux types d'onduleurs.

**Question 42 :** calculer la valeur efficace I<sub>effrms</sub> de i<sub>1(t)</sub> (signal complet : moyenne + fondamental + harmonique).

L'expression théorique de la valeur efficace d'un signal s'obtient par la formule :

$$I_{\text{effrms}} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}$$

**Question 43 :** en déduire le taux de distorsion harmonique THD pour les deux technologies.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

D'après la norme CEI, les taux individuels d'harmoniques en courant rejetés ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

Rangs		$H_n = \frac{I_n}{I_{\text{effrms}}}$ en %
Pairs	Impairs	
2		2
	3	4
4		1
≥4		0,5
	5	5
	7	5
	9	2
	11	3
	13	3
	≥13	2

Norme pour les utilisateurs CEI 1000-2-4

**Question 44 :** conclure en justifiant quantitativement du choix de la technologie à retenir selon la nature du mode de raccordement envisagé.

### 3.3 - Dimensionnement et choix de la machine pour une implantation en milieu fluvial

*En prévision d'un développement industriel, les mesures et essais réalisés en laboratoire sont complétés par une série de tests réalisés lors de l'implantation d'un prototype dans un canal. L'objectif de cette partie est de dimensionner le modèle de génératrice qui sera implantée sur ce prototype.*

De par sa rectitude et la régularité de sa section, la vitesse d'écoulement est constante sur de grandes distances. Cela permet notamment une étude de l'impact de la turbine sur l'écoulement du canal. La vitesse d'écoulement du fluide varie entre 0 et 3 m.s<sup>-1</sup>. Ces vitesses sont représentatives des sites naturels d'exploitation.

Dans ces conditions, on mesure la puissance mécanique fournie à la génératrice :

$V_0$ en m·s <sup>-1</sup>	$\omega$ en rad·s <sup>-1</sup>	P en W
1	12	295
2	24	2357
3	36	7953

Ces résultats sont mesurés avec un prototype de turbine unitaire de dimension H = 500 mm et D = 500 mm

**Question 45 :** pour un fonctionnement de la turbine avec une vitesse de fluide dans la plage considérée de 1 à 3 m·s<sup>-1</sup>, choisir la génératrice dans la série 300STK (voir annexe 3.3). On précisera pour le modèle retenu :

- le choix du bobinage (haute ou basse vitesse) ;
- la tension à la puissance nominale pour une vitesse  $V_0 = 3$  m·s<sup>-1</sup>.

Préciser également le risque encouru si la vitesse dépasse celle pour laquelle la machine a été dimensionnée.

#### **Étude thermique du générateur**

*La génératrice produit sa puissance nominale sur des durées longues. La température interne de celle-ci doit se stabiliser à une valeur acceptable pour le bobinage. L'objectif de cette partie est de définir le type de bobinage capable de supporter les conditions de fonctionnement imposé par le milieu ambiant.*

La génératrice est placée dans une enceinte fermée avec l'électronique de puissance ( $\eta_e = 96\%$ , rendement de l'ensemble de l'électronique de puissance). Nous ferons hypothèse que cette enceinte constitue une boîte cubique de 1 m de côté, en acier inoxydable d'épaisseur 3 mm.

**Question 46 :** les essais thermiques ont été réalisés pour une puissance de 7 953 W avec une vitesse de rotation  $N = 344$  tr · mn<sup>-1</sup> et la température interne de la génératrice mesurée était de  $\theta = 133^\circ\text{C}$ .

Conclure sur la classe de l'isolant nécessaire à la machine. Quelles solutions proposer pour utiliser des génératrices avec une classe plus basse en température ? Préciser les inconvénients associés.

## Quatrième partie

### Turbines industrielles et transmission d'énergie au réseau

L'objectif de cette quatrième partie est d'évaluer la puissance fournie par une machine de taille supérieure pour analyser ensuite une partie de la problématique de transmission d'énergie au réseau dans le cas d'une implantation maritime.

**La turbine industrielle (échelle 1) est une transposition du prototype testé en laboratoire**

Dimensions du prototype : hauteur  $H_T = 500$  mm et rayon  $R_T = 250$  mm.

Dimensions de la turbine industrielle : hauteur  $H_T = 2,5$  m et rayon  $R_T = 1,25$  m.

**Question 47 :** en retenant la solution d'une structure de 4 turbines industrielles couplées sur une même génératrice justifier le rapport de puissance égal à 100 entre un prototype unitaire ( $H_T = 500$  mm) et une colonne de quatre turbines à l'échelle 1.

**Question 48 :** en référence à la puissance de 8 KW fournie par le prototype lors des essais dans un canal, calculer la puissance électrique pouvant être fournie par une colonne industrielle et indiquer l'intérêt de ce dimensionnement pour la réalisation et le choix respectifs des turbines et de la génératrice.

**Question 49 :** en posant l'hypothèse pour cette échelle d'une vitesse de rotation de  $11,5 \text{ tours} \cdot \text{min}^{-1}$  et  $\lambda = 3$  pour la turbine, déterminer la fréquence des tensions lors d'un fonctionnement avec les caractéristiques du réseau français. En déduire le nombre de pôles nécessaires pour que la machine puisse être directement raccordée sur le réseau. Conclure quant à un usage à l'échelle de la production ?

**Question 50 :** à l'instar du plus petit des cinq parcs éoliens offshore validés par le gouvernement en 2012, calculer la puissance apparente circulant sur une unique ligne électrique ramenant l'énergie à terre dans le cas d'un parc hydrolien constitué de 75 tours. Un schéma du raccordement proposé est donné dans le document annexe 4. L'hypothèse suivante sera faite sur le déphasage électrique des tours :

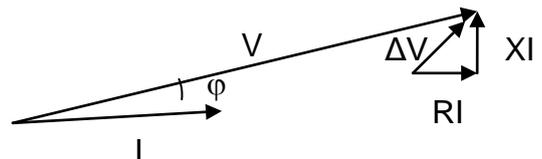
- 25 tours fonctionnent avec un déphasage de  $\varphi_1 = 9$  degrés ;
- 20 tours fonctionnent avec un déphasage de  $\varphi_2 = 20$  degrés ;
- 30 tours fonctionnent avec un déphasage de  $\varphi_3 = 15$  degrés.

Faire l'application numérique pour une puissance de 0,8 MW par tour.

**Question 51 :** déterminer le courant dans cette ligne dans le cas d'une liaison vers le continent en tension composée de 20 KV.

Estimer la chute de tension en ligne dans le cas d'un système équilibré avec les données suivantes :

- la ligne mesure 8 km ;
- sa section est de  $1\,260 \text{ mm}^2$  ;
- la réactance linéique vaut  $0,08 \text{ m}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$  ;
- la résistivité linéique est de  $22,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .



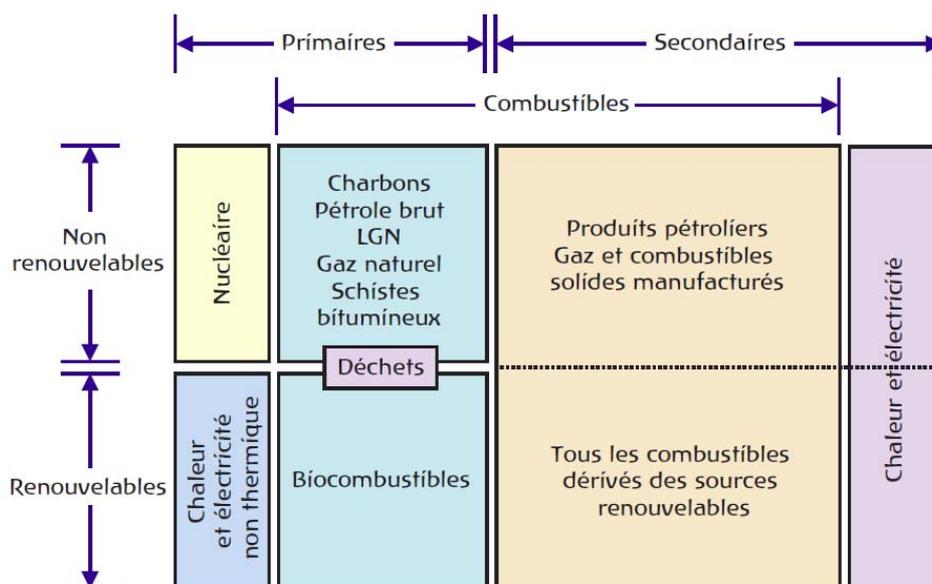
En déduire la valeur de la chute de tension relative  $\Delta V$  à la tension de la source.

Conclure sur l'influence d'une telle implantation sur la variation de tension subie pour un client domestique dont l'installation est raccordée sur un transformateur situé à proximité de la ligne.

# DOCUMENTS ANNEXES

- Première Partie : *Production hydrolienne dans le contexte mondial et national-*

**Annexe 1.1 - Terminologie des produits énergétiques, conversion et comptabilité :**



**- Équivalents de conversion entre unités d'énergie :**

De:	TJ	Gcal	Mtoe	MBtu	GWh
De :	multiplier par :				
Térajoule (TJ)	1	238,8	$2,388 \times 10^{-5}$	947,8	0,2778
Gigacalorie	$4,1868 \times 10^{-3}$	1	$10^{-7}$	3,968	$1,163 \times 10^{-3}$
Mtep*	$4,1868 \times 10^4$	$10^7$	1	$3,968 \times 10^7$	11630
Million Btu	$1,0551 \times 10^{-3}$	0,252	$2,52 \times 10^{-8}$	1	$2,931 \times 10^{-4}$
Gigawattheure	3,6	860	$8,6 \times 10^{-5}$	3412	1

\*Million de tonnes équivalent pétrole.

**- Méthodologie de comptabilité énergétique :**

Les coefficients d'équivalence entre unité propre et tonne d'équivalent pétrole (tep) sont précisés ci-après. Pour l'électricité, trois cas doivent être distingués :

- l'électricité produite par une centrale nucléaire est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 33 % ; le coefficient de substitution est donc  $0,086/0,33 = 0,260606$  tep/MWh ;
- l'électricité produite par une centrale à géothermie est aussi comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, mais avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 10 % ; le coefficient de substitution est donc  $0,086/0,10 = 0,86$  tep/MWh ;
- toutes les autres formes d'électricité (production par une centrale thermique classique, hydraulique, éolienne, marémotrice, photovoltaïque, etc., échanges avec l'étranger, consommation) sont comptabilisées selon la méthode du contenu énergétique, avec le coefficient 0,086 tep/MWh.

## Annexe 1.2.1 – Données 2010 relatives à la production et la consommation énergétique en France (Service de l'Observation et des Statistiques)

### Production d'énergie primaire

En Mtep

	1973	1990	2002	2008	2009	2010	Variation en % par an				
							Entre 1973 et 1990	Entre 1990 et 2002	Entre 2002 et 2008	Entre 2008 et 2009	Entre 2009 et 2010
<b>Total production primaire</b>	<b>43,5</b>	<b>111,2</b>	<b>135,4</b>	<b>138,4</b>	<b>131,2</b>	<b>138,6</b>	<b>5,7</b>	<b>1,7</b>	<b>0,4</b>	<b>-5,2</b>	<b>5,7</b>
Électricité primaire	8,0	86,8	119,6	120,9	112,8	118,4	15,1	2,7	0,2	-6,7	4,9
- Nucléaire	3,8	81,7	113,8	114,5	106,8	111,7	19,7	2,8	0,1	-6,8	4,6
- Hydraulique, éolien, photovoltaïque	4,1	5,0	5,7	6,4	6,1	6,7	1,1	1,1	1,9	-5,5	10,4
ENRT et déchets	9,8	10,7	10,9	14,8	15,9	17,6	0,6	0,2	5,1	7,9	10,7
Pétrole	2,2	3,5	2,3	1,8	1,6	1,8	2,6	-3,3	-4,3	-11,9	15,4
Gaz naturel	6,3	2,5	1,4	0,8	0,8	0,6	-5,3	-4,5	-9,1	-6,2	-15,8
Charbon	17,3	7,7	1,2	0,1	0,1	0,1	-4,6	-14,7	-32,4	-45,5	83,3
<b>Taux d'indépendance énergétique</b>	<b>23,9%</b>	<b>49,5%</b>	<b>50,8%</b>	<b>50,9%</b>	<b>50,3%</b>	<b>51,2%</b>	<b>4,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>-1,2</b>	<b>1,8</b>

### Consommation d'énergie primaire

En Mtep

	1973	1990	2002	2008	2009	2010	Variation en % par an				
							Entre 1973 et 1990	Entre 1990 et 2002	Entre 2002 et 2008	Entre 2008 et 2009	Entre 2009 et 2010
Réelle	182,4	224,6	266,3	271,7	260,5	270,4	1,2	1,4	0,3	-4,1	3,8
<b>Corrigée des variations climatiques</b>	<b>179,7</b>	<b>228,3</b>	<b>271,8</b>	<b>273,2</b>	<b>261,4</b>	<b>265,8</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>0,1</b>	<b>-4,3</b>	<b>1,7</b>
- dont transformation énergie	35,1	75,2	97,0	98,1	93,8	96,1	4,6	2,1	0,2	-4,4	2,5
- dont finale énergétique	133,6	140,7	160,5	161,4	155,5	157,7	0,3	1,1	0,1	-3,7	1,4
- dont non énergétique	10,9	12,4	14,3	13,8	12,1	12,0	0,8	1,2	-0,6	-11,8	-0,7

## Annexe 1.2.2 – Données relatives à la production d'énergies renouvelables en France

### Production d'énergie primaire par filière renouvelable

En ktep

	2008	2009	2010 p	Variation 2008-2009	Variation 2009-2010
Bois-énergie	8 726	8 997	10 100	271	1 104
Hydraulique	5 515	4 940	5 421	-575	481
Biocarburants	1 946	2 256	2 362	310	106
Pompes à chaleur	996	1 292	1 649	296	356
Déchets urbains renouvelables	1 093	1 169	1 196	76	27
Éolien	490	681	830	191	149
Biogaz	426	538	608	112	70
Résidus de l'agriculture et des IAA*	362	371	381	9	10
Géothermie	88	89	90	1	2
Solaire thermique	44	51	59	8	8
Solaire photovoltaïque	4	15	49	11	34
<b>Total</b>	<b>19 690</b>	<b>20 399</b>	<b>22 745</b>	<b>710</b>	<b>2 346</b>

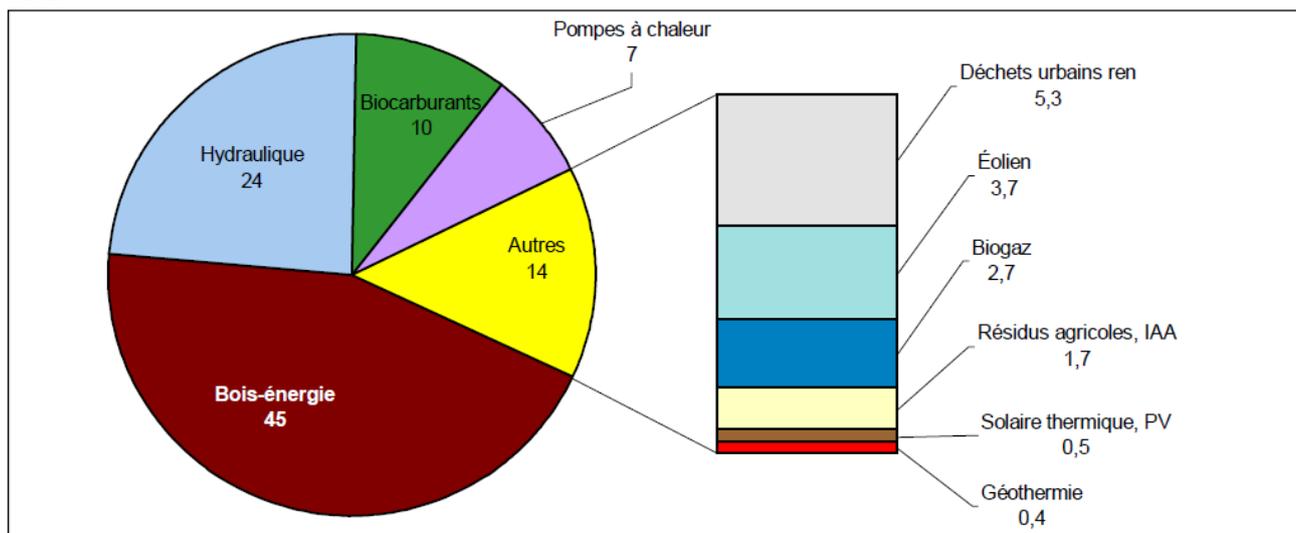
\* Industries agro-alimentaires

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2010

**Complément annexe 1.2.2 .../...**

## Part de chaque filière dans la production primaire d'énergie renouvelable en 2010

En %



Source : SOeS, bilan de l'énergie 2010

## Annexe 1.2.3 – Bilan simplifié de l'électricité en France

En TWh <sup>1</sup>	1973	1979	1985	1990	2000	2005	2009	2010
Production brute	182	242	344	420	540	576	539	569
Hydraulique, éolien et photovoltaïque	48	68	64	58	72	58	70	78
Thermique nucléaire	15	40	224	314	415	452	410	429
Thermique classique <sup>2</sup>	119	134	56	48	53	67	59	63
Solde des échanges	-3	6	-23	-46	-69	-60	-26	-31
Importations	5	16	6	7	4	8	19	19
Exportations	-8	-11	-29	-52	-73	-68	-45	-50
Pompages	-	-1	-2	-5	-7	-7	-7	-7
Consommation des auxiliaires	-8	-10	-16	-20	-24	-26	-24	-26
Consommation <sup>5</sup>	171	236	303	350	441	482	496	506

<sup>1</sup> 1 TWh = 1 milliard de kWh.

Source : SOeS, bilan de l'énergie

<sup>2</sup> Thermique à combustibles fossiles (charbon et lignite, fiouls, gaz naturel) ou divers<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Divers : gaz de haut fourneau, de raffinerie, déchets urbains, résidus industriels, bois, etc.

<sup>4</sup> Fioul lourd, fioul domestique et coke de pétrole.

<sup>5</sup> Consommation intérieure ou énergie appelée, non corrigée du climat.

## - Deuxième partie : Développement d'une éolienne à flux transverse –

### Annexe 2.1 - Équation de Bernoulli

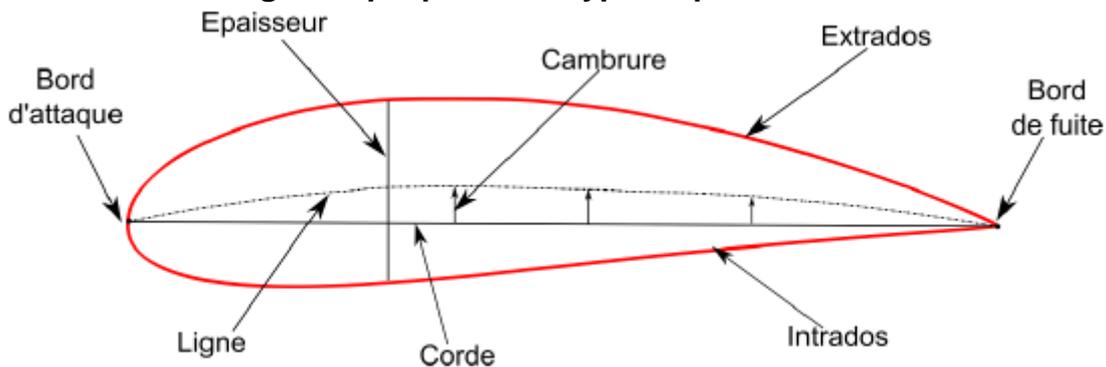
Pour l'écoulement d'un fluide **incompressible** (masse volumique constante) et **parfait** (effets visqueux négligeables et pas de pertes de charges), en se plaçant le long d'une même ligne de courant. On vérifie l'équation de Bernoulli en régime permanent, si l'on néglige les transferts de chaleur :

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{constante}$$

$\rho$ , masse volumique du fluide ;  
 $g$ , accélération de la pesanteur ;

$p$ , pression ;  
 $v$ , vitesse du fluide ;  
 $z$ , altitude de l'étude.

### Annexe 2.2 - Vocabulaire générique pour tout type de profil :

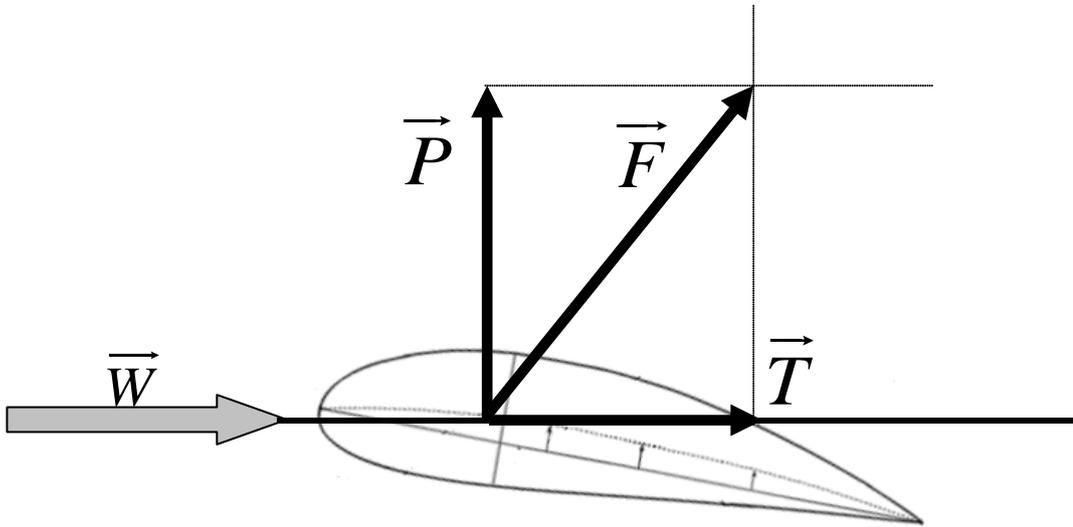


D'une manière générale, la résultante des actions mécaniques de pression sur une pale est un glisseur noté  $\vec{F}$  qui s'applique au centre de poussée de la pale.

On a pour habitude de projeter cette résultante sur l'axe de l'écoulement et sur sa perpendiculaire de manière à faire apparaître naturellement :

- la composante de traînée  $\|\vec{T}\| = T = \frac{1}{2} \rho S C_x W^2$  ;
- la composante de portance  $\|\vec{P}\| = P = \frac{1}{2} \rho S C_z W^2$ .

avec  $S$  surface projetée de la pale égale à la corde  $c$  multipliée par la hauteur  $H_T$  de la turbine.



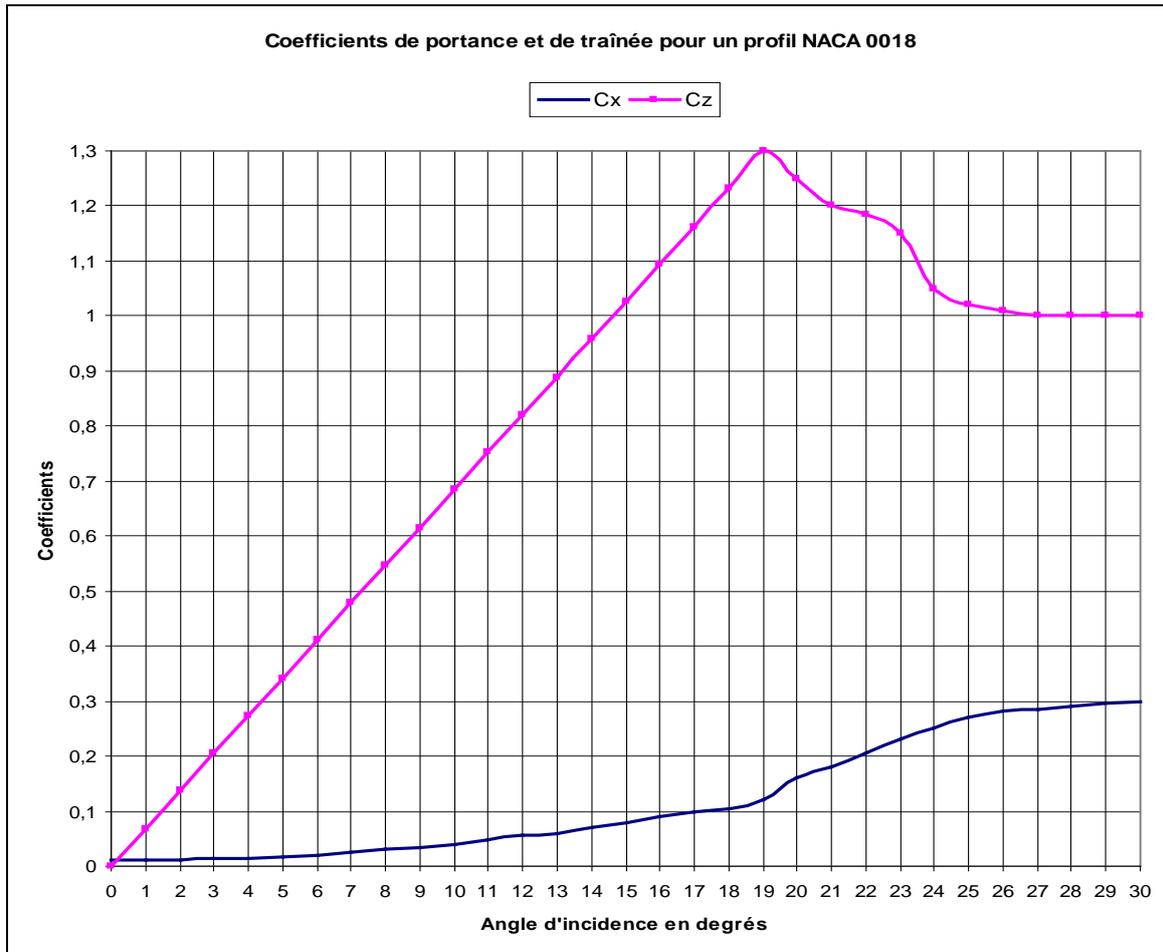
*Mise en évidence des composantes de traînée et portance de la poussée*

**Annexe 2.3 - Éléments de simulation pour une pale**

alpha (deg)	Cx	Cz	alpha (deg)	Cx	Cz
0	0,01	0	16	0,09	1,095
1	0,01	0,068	17	0,1	1,163
2	0,01	0,136	18	0,105	1,232
3	0,013	0,205	19	0,12	1,3
4	0,015	0,273	20	0,16	1,25
5	0,017	0,342	21	0,18	1,2
6	0,02	0,41	22	0,205	1,185
7	0,025	0,479	23	0,23	1,15
8	0,03	0,547	24	0,25	1,05
9	0,035	0,616	25	0,27	1,02
10	0,04	0,684	26	0,282	1,01
11	0,047	0,753	27	0,285	1
12	0,055	0,821	28	0,29	1
13	0,06	0,889	29	0,295	1
14	0,07	0,958	30	0,3	1
15	0,08	1,026			

**Complément annexe 2.3 .../...**

## Caractéristiques hydrodynamiques d'un profil NACA 0018



## Annexe 2.4 – Perturbation du flux par une turbine

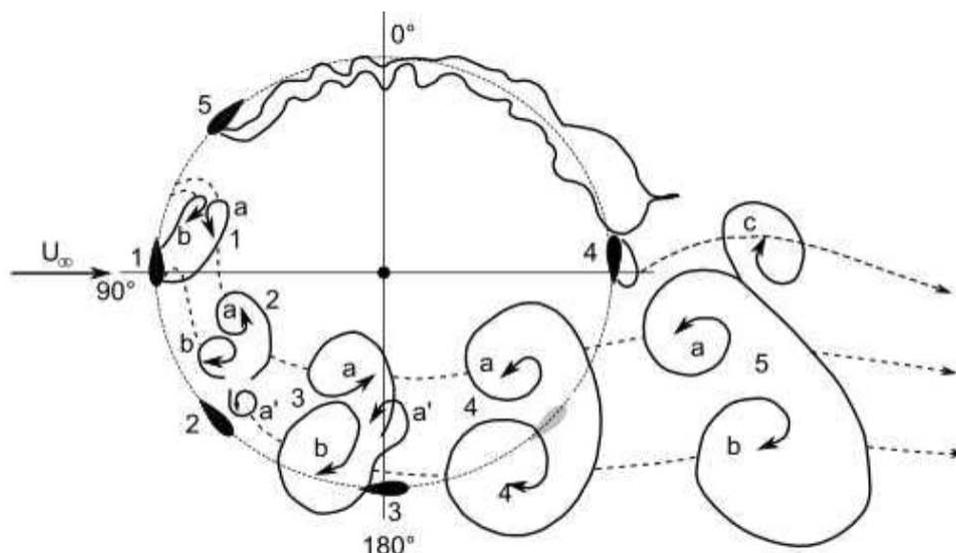


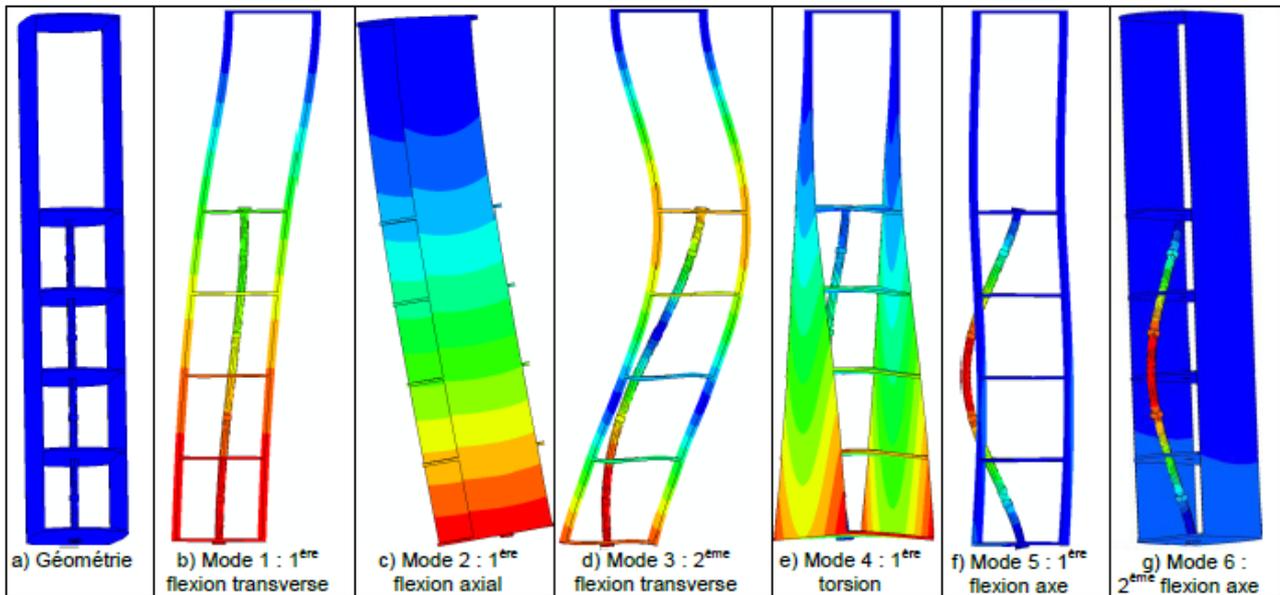
Figure 3-4 : Formation des tourbillons [Brochier, 1986]

## Annexe 2.5 - Association des turbines en colonnes

### Éléments de simulation pour une colonne de turbine

N° mode	Fréquence (Hz) avec 2 paliers	Fréquence (Hz) avec 3 paliers
1	7,96	8,22
2	22,11	26,43
3	30,00	31,24
4	34,37	34,69
5	40,30	----
6	41,70	----

Fréquences d'excitation de la tour complète avec 2 et 3 paliers

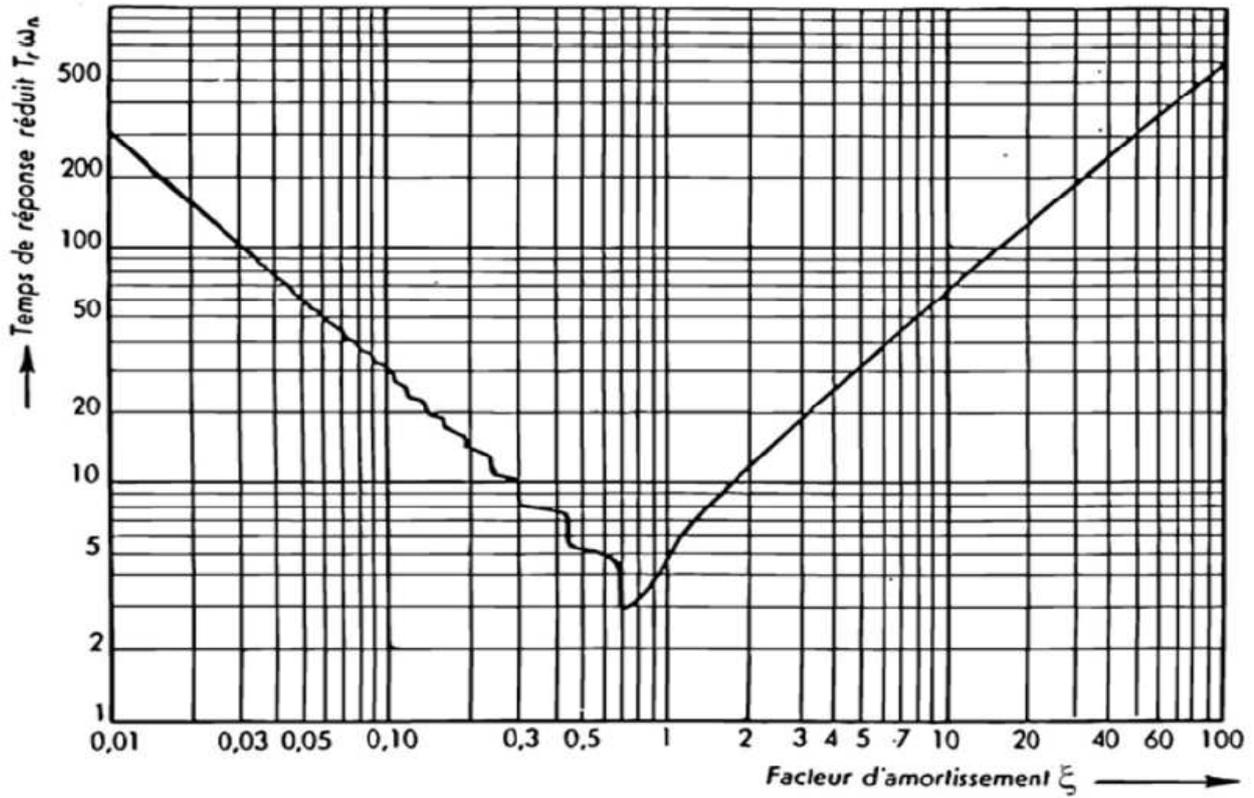


Visualisation des modes propres

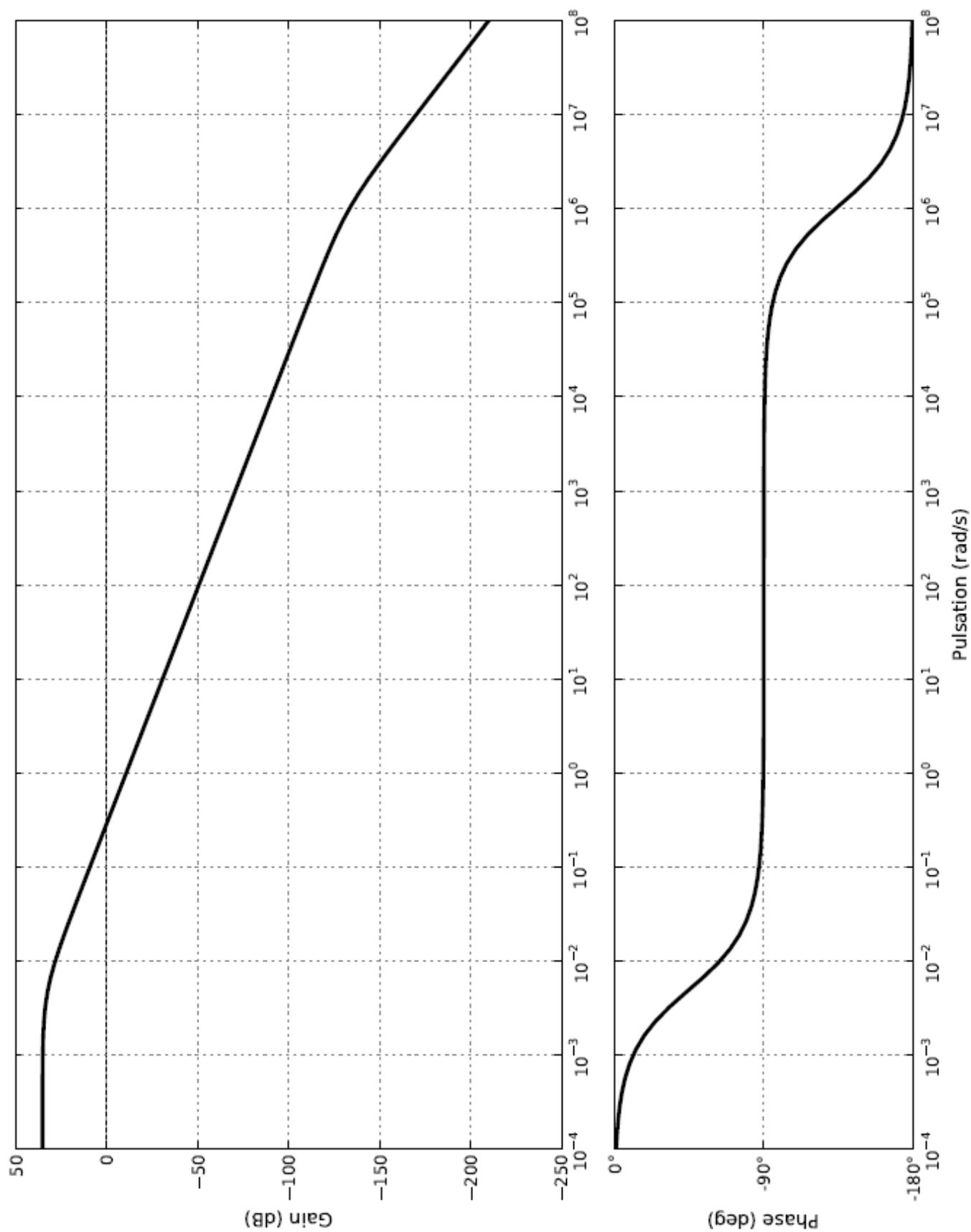
- Troisième partie -

Étude de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Annexe 3.1.1 – temps de réponse réduit



### Annexe 3.1.2 – Diagrammes de Bode de $T(j\omega)$



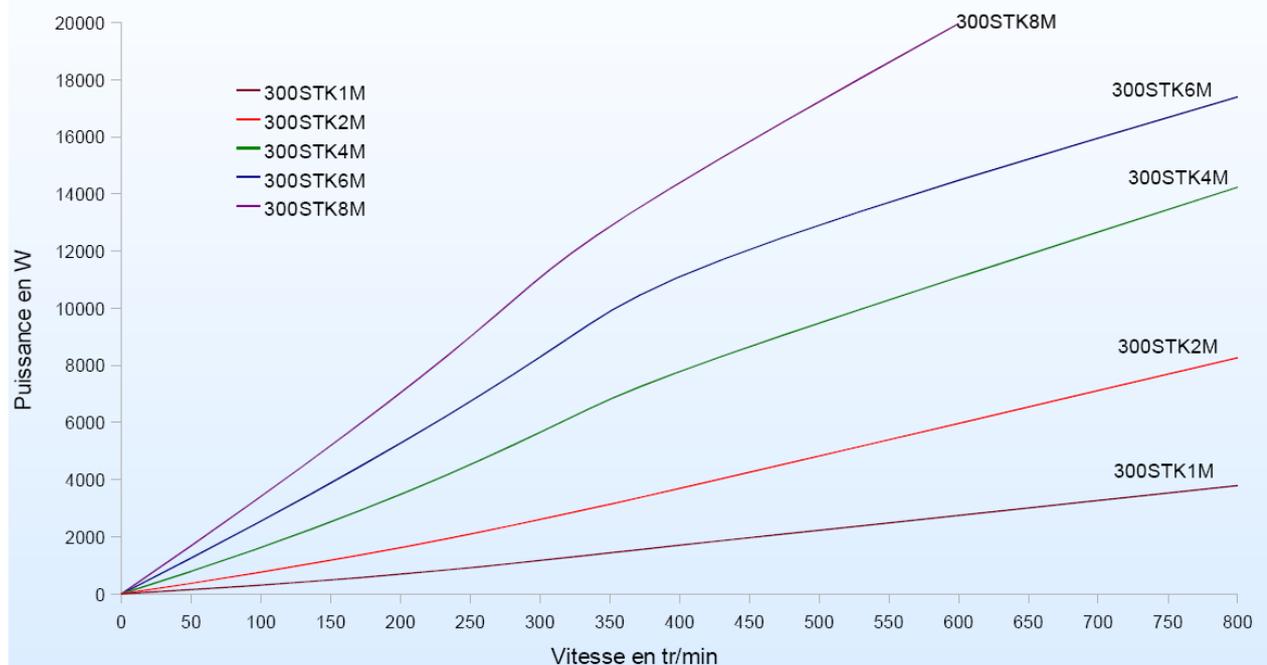
## Annexe 3.2 - Tableau de choix des moteurs (cahier technique Schneider CT207)

Type de moteur	Asynchrone à cage		Asynchrone à bague	Synchrone à rotor bobiné	rotor terres rares	Pas à pas	A courant continu
	triphasé	monophasé					
Coût du moteur	Faible	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	Faible	Elevé
Moteur étanche	Standard	Possible	Sur demande, coûteux	Sur demande, coûteux	Standard	Standard	Possible Très coûteux
Démarrage direct sur le réseau	Aisé	Aisé	Dispositif de démarrage particulier	Impossible à partir de quelques kW	Non prévu	Non prévu	Non prévu
Variation de vitesse	Facile	Très rare	Possible	Fréquent	Toujours	Toujours	Toujours
Coût de la solution variation de vitesse	De plus en plus économique	Très économique	Economique	Très économique	Assez économique	Très économique	Très économique
Performance en variation de vitesse	De plus en plus élevée	Très faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	Moyenne à élevée	Elevée à très élevée
Emploi	Vitesse constante ou variable	En majorité, vitesse constante	Vitesse constante ou variable	Vitesse constante ou variable	Vitesse variable	Vitesse variable	Vitesse variable
Utilisation industrielle	Universelle	Pour les petites puissances	En diminution	Dans les grandes puissances en moyenne tension	Machines outils, forte dynamique	Positionnement en boucle ouverte, pour les petites puissances	En diminution

### Annexe 3.3 – Caractéristiques techniques, alternateurs 300STK

		300STK1M		300STK2M		300STK4M		300STK6M		300STK8M		
Vitesse nominale		mn-1		350	800	350	800	350	800	350	800	
Données pour vitesse nominale	Puissance nominale (1)(2)	W	1444	3793	3141	8270	6858	14240	9782	17399	13201	19965
	Couple d'entrée nécessaire (1)(2)	N.m	52,5	52,4	104	111	225	187	310	226	415	348
	Rendement à puissance nominale (1)(2)	%	75	87	82	89	84	92	87	92	87	92
	Courant à puissance nominale (1)	A	3,7	9,9	7,3	19,2	16,8	34,2	23,6	42,9	30,4	50
	Tension à puissance nominale (1)(2)(3)	V	232	230	255	258	242	251	247	247	258	240
Données pour mi-vitesse	Puissance à mi-vitesse (1)(2)	W	496	1706	1276	3665	2688	7985	4333	11700	5853	11058
	Couple d'entrée nécessaire à mi vitesse (1)(2)	N.m	40,5	52,4	99	104,5	186	225	310	309	415	414
	Rendement à mi vitesse (1)(2)	%	67	78	71	84	78	85	77	88	77	85
Nombre de pôles (Nombre de paires de pôles)		24 (12)										
Couple d'encochage (cogging)		N.m	0,5		1		2		3		4	
Résistance de phase à 20°C		Ohm	8,75	1,24	2,87	0,51	0,97	0,15	0,53	0,08	0,4	0,1
Inductance de phase (5)		mH	33,4	4,8	17,3	3	8,1	1,25	5,2	0,75	4,1	1,03
Tension à vide (Fem) à 20°C (4)		V	329	284	335	316	323	289	311	277	323	277
Inertie rotorique		10 <sup>-3</sup> Kg.m <sup>2</sup>	26,4		52,7		105,5		158,2		211	
Masse		Kg	11,5		18		31		44		57	
Section câble puissance (6)		mm <sup>2</sup>	4x1,5		4x1,5		4x2,5		4x1,5		4x6	
Diamètre câble puissance		mm	Ø8		Ø8		Ø9,6		Ø8		Ø13,4	

Alternateur 300STK Puissance - Vitesse

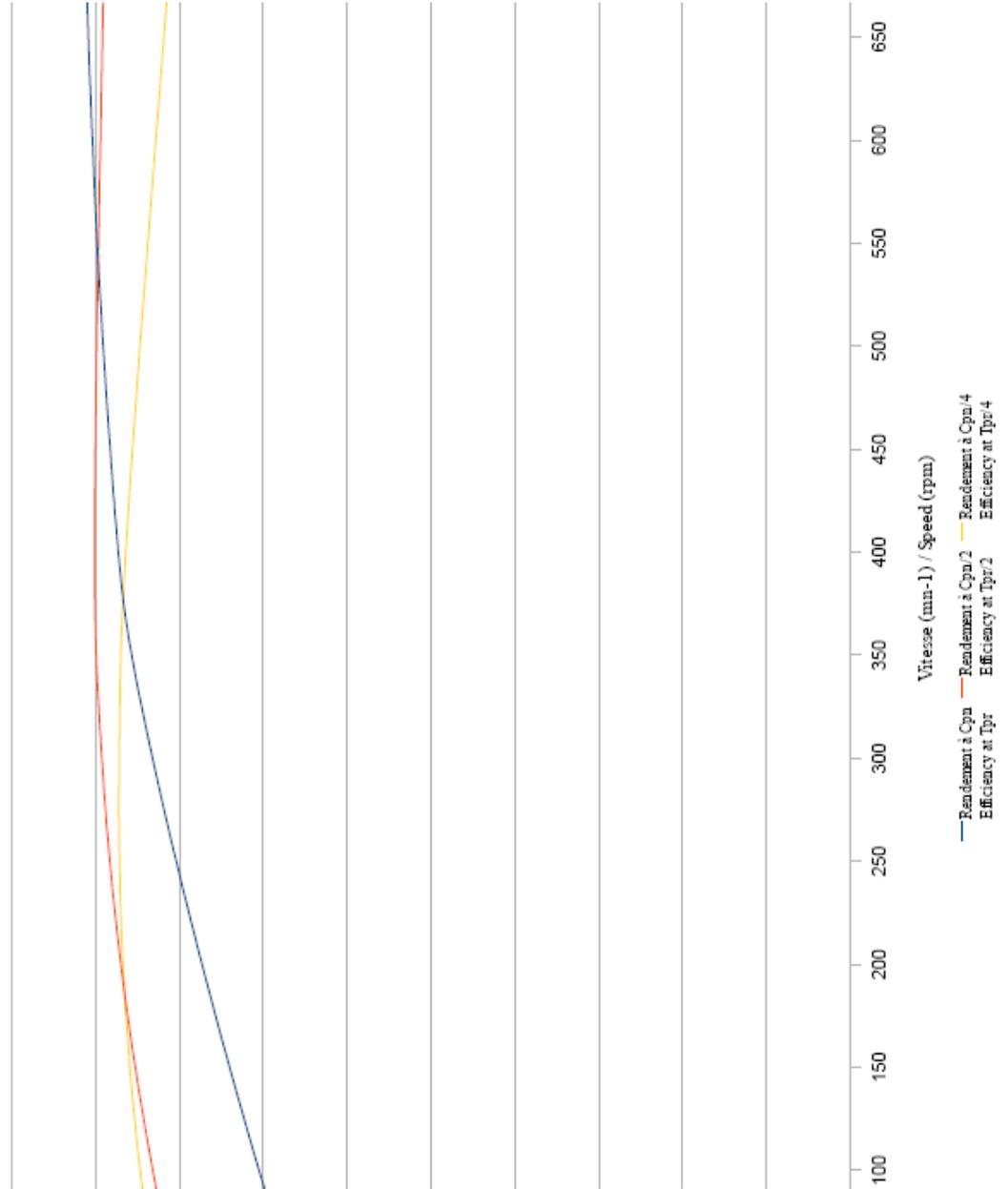


### Classe des isolants

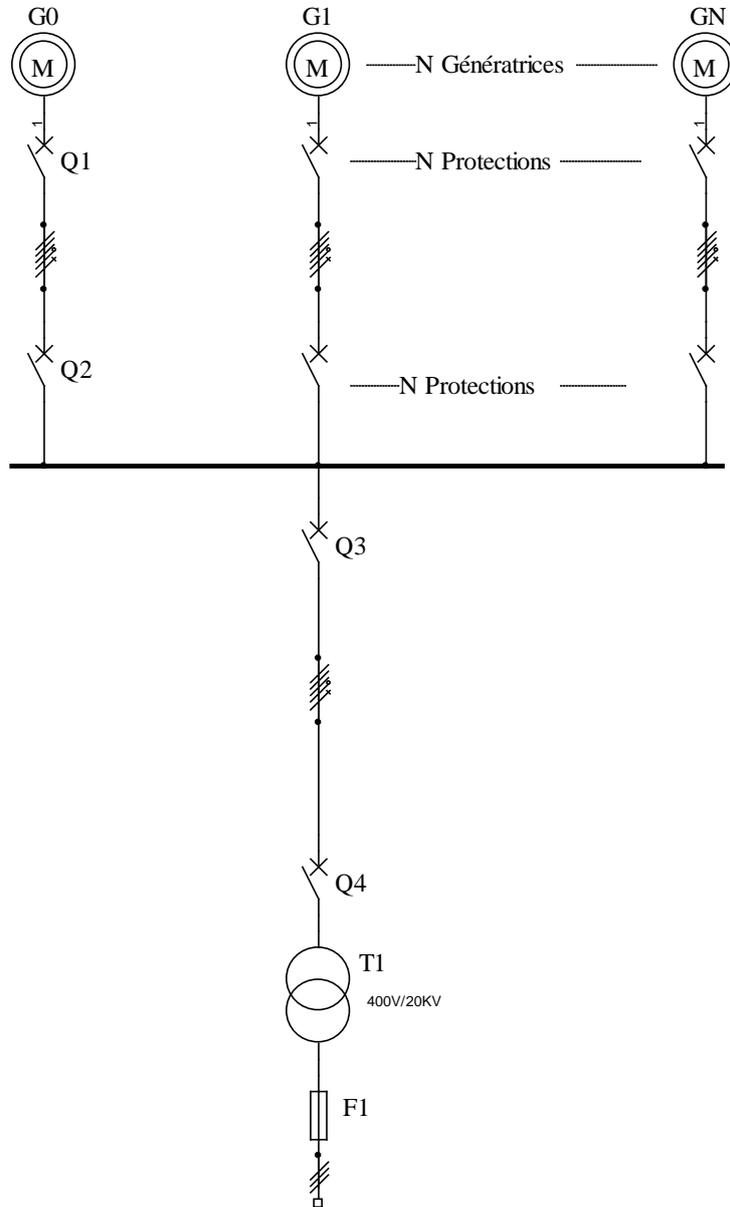
Classe de l'isolant	Échauffement limite $\Delta t$ en °C	Température limite $\Delta t + t_a$ ( $t_a = 40^\circ\text{C}$ )
A	60	100
E	75	115
B	80	120
F	100	140
H	125	165

Alternateur / Alternator  
300STK

Rendement / Efficiency



Annexe 4 – Schémas simplifiés de connexion des hydroliennes



# DOCUMENTS RÉPONSES

## Documents réponse - première partie

### La production hydrolienne dans le contexte mondial et national

#### Question 1

##### Document réponse DR1

Production d'énergie primaire (Mtep)	Consommation énergétique primaire (Mtep)	Consommation finale (Mtep)

#### Question 4

##### Document réponse DR2

Production Électrique Français	TWh	% de la production
Brute nationale		100,0%
Origine primaire		
<i>Dont origine Nucléaire</i>		
<i>Dont origine renouvelable</i>		
Origine Secondaire		
Consommation	TWh	% de la production
Consommation intérieure		

## Deuxième partie

### Développement d'une turbine hydrolienne à flux transverse

#### Question 7

Document réponse DR3

Comparaisons d'une même turbine dans différentes situations	Turbine dans l'air à 10 m/s	Turbine dans l'eau à 1 m/s	Turbine dans l'eau à 2 m/s
Puissance		$P_T$	
Vitesse du fluide		$v$	
Vitesse de rotation		$\Omega_T$	
Force de traînée		$F_x$	
Couple		$C_T$	

#### Question 11

Document réponse DR4

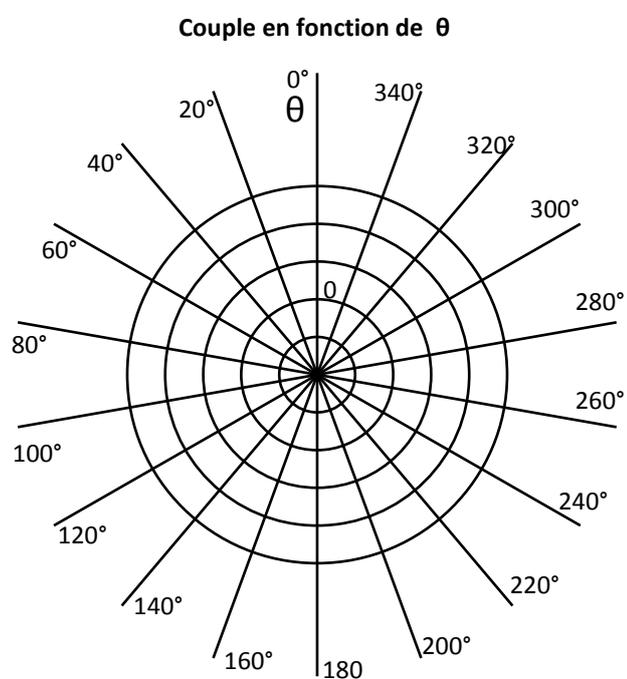
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS

### Question 19

#### Document réponse DR5

$\theta$ (deg)	$\alpha$ (deg)	W (m/s)	C (N·m) pour 1 pale
0			
20			
40			
60			
80			

#### Document réponse DR6

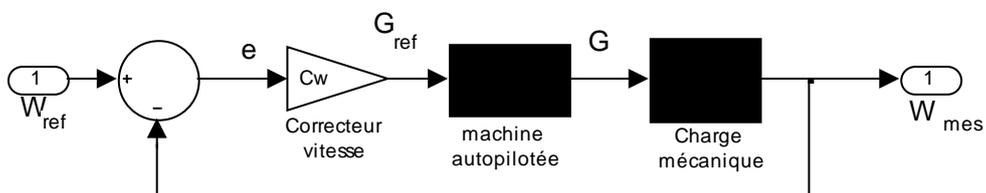


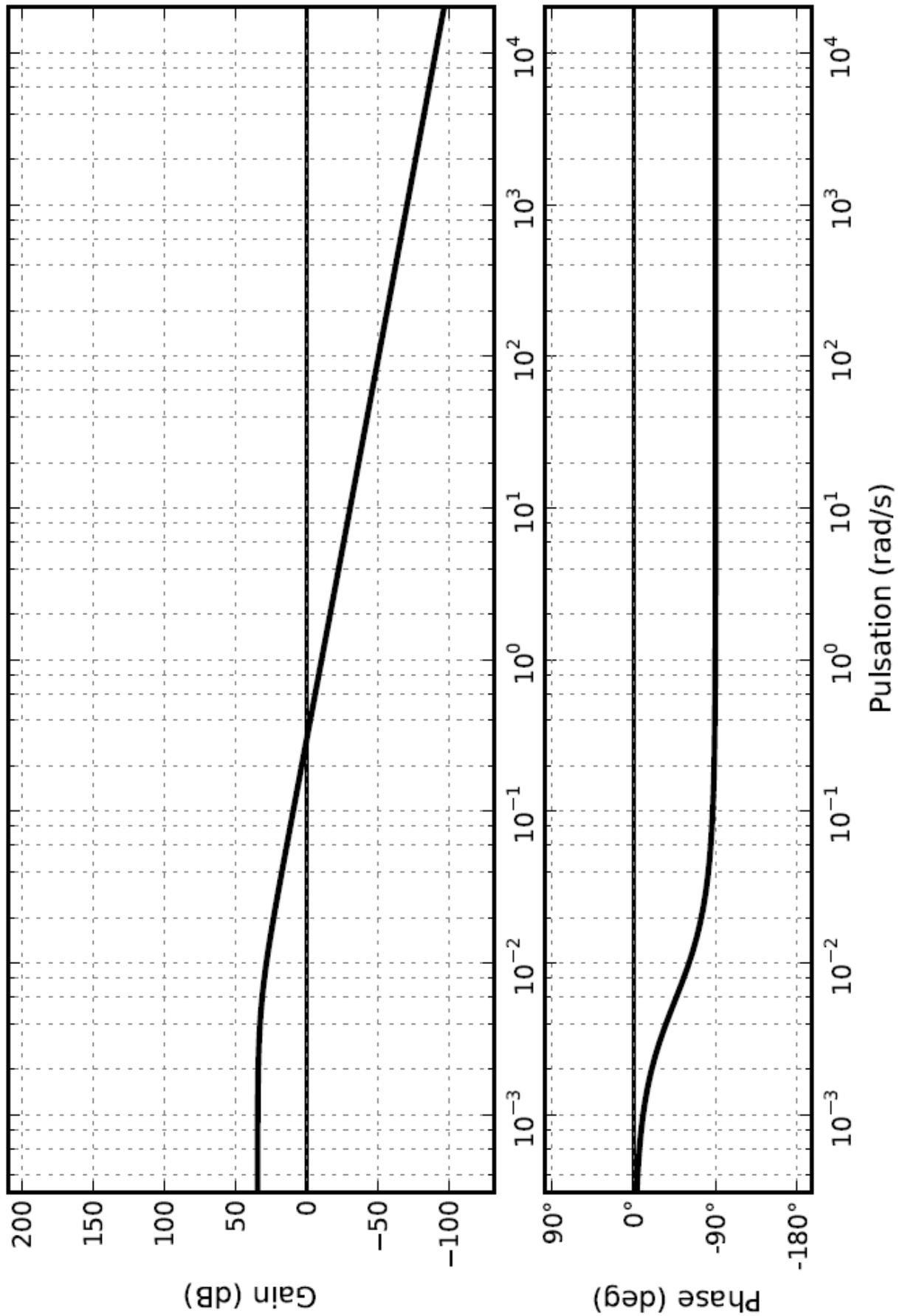
# Troisième partie

## Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

### Question 26 - Document réponse DR7

Dans le diagramme suivant « s » est la variable de Laplace :





Question 39 - Document réponse DR9

U<sub>dc</sub>

