

Modélisation en vue de la simulation, la commande et l'aide à la conception de chaînes électromécaniques des Hydroliennes

Z. Zhou⁽¹⁾⁽²⁾, S. Djebbari⁽¹⁾⁽²⁾, T. El Tawil⁽¹⁾⁽²⁾, JF Charpentier⁽¹⁾, M. Benbouzid⁽²⁾, F. Scuiller⁽¹⁾

(1) IRENav, EA 3634 (2) IRDL, FRE 3744



Laboratoires pluridisciplinaires (Mécanique, Hydro, Electrotech...)

Partie I: modélisation du système de la ressource au réseau

- Contexte
- modélisation et commande d'une Génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Partie II : Méthodologie de conception avec approche globale de génératrices à aimants permanents associées avec une hélice à pas fixe

- méthodologie
- Résultats

Partie I

modélisation du système de la ressource au réseau

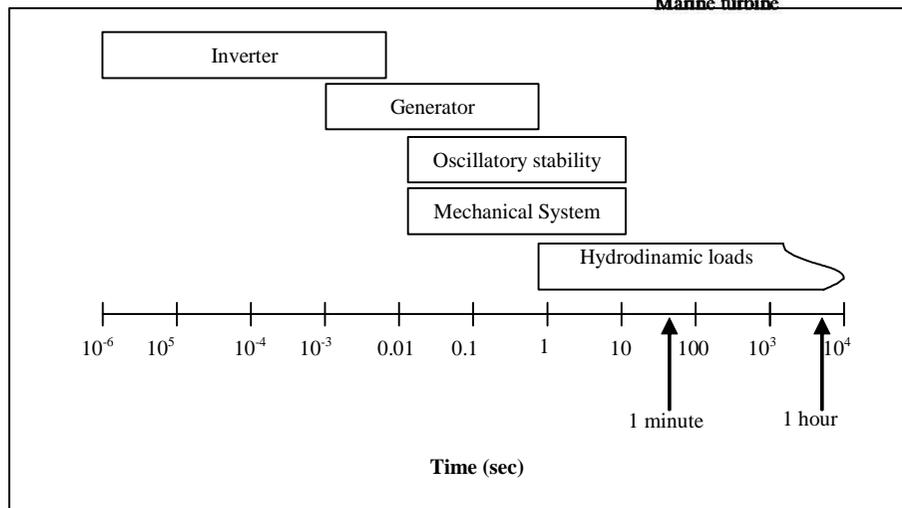
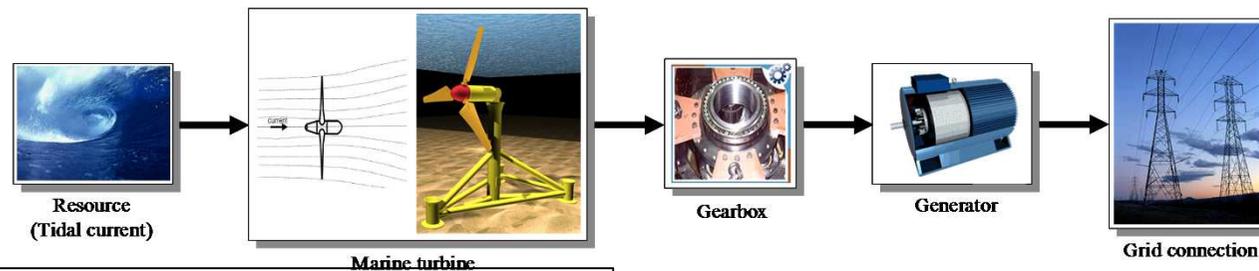
Contexte et méthodologie générale

Modélisation et commande d'une turbine
à pas fixe associée a une génératrice à
aimants permanents (Thèse de Z. Zhou)

Contexte de la modélisation du système de la ressource au réseau.

Nécessité de disposer d'un outil de modélisation du système.

- ⇒ Simulation du comportement et de la production
- ⇒ Dimensionnement global des composants
- ⇒ Elaboration de stratégies de contrôle dédiées
- ⇒ Dynamiques différentes



Benelghali, S., Charpentier, JF and Benbouzid, M. , 2013, Book chapter : "Resource to Wire Modelling for Tidal Turbines", in « Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems », edited by R. Alarcon et D. O Sullivan-IET publishing - ISBN : 978-1-84919-561-4

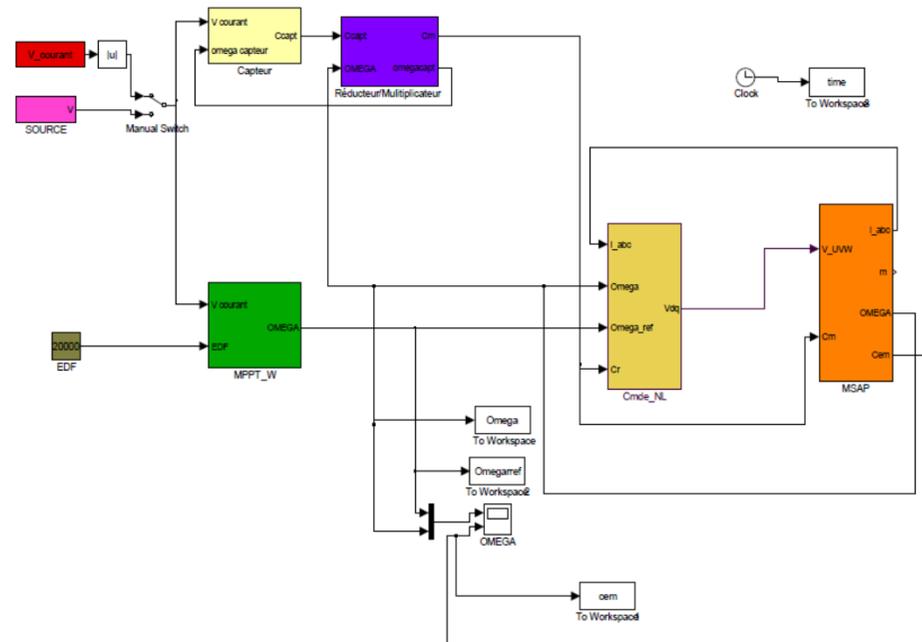
Timescale of Marine Current Turbine phenomena.

Contexte de la modélisation du système de la ressource au réseau.

Nécessité de disposer d'un outil de modélisation du système de la ressource au réseau.

⇒ Développement d'une bibliothèque de modèles de composants interconnectables et modulaires sous Matlab-Simulink

⇒ Evolution et adaptation aux différents cas traités et échelles de temps



Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

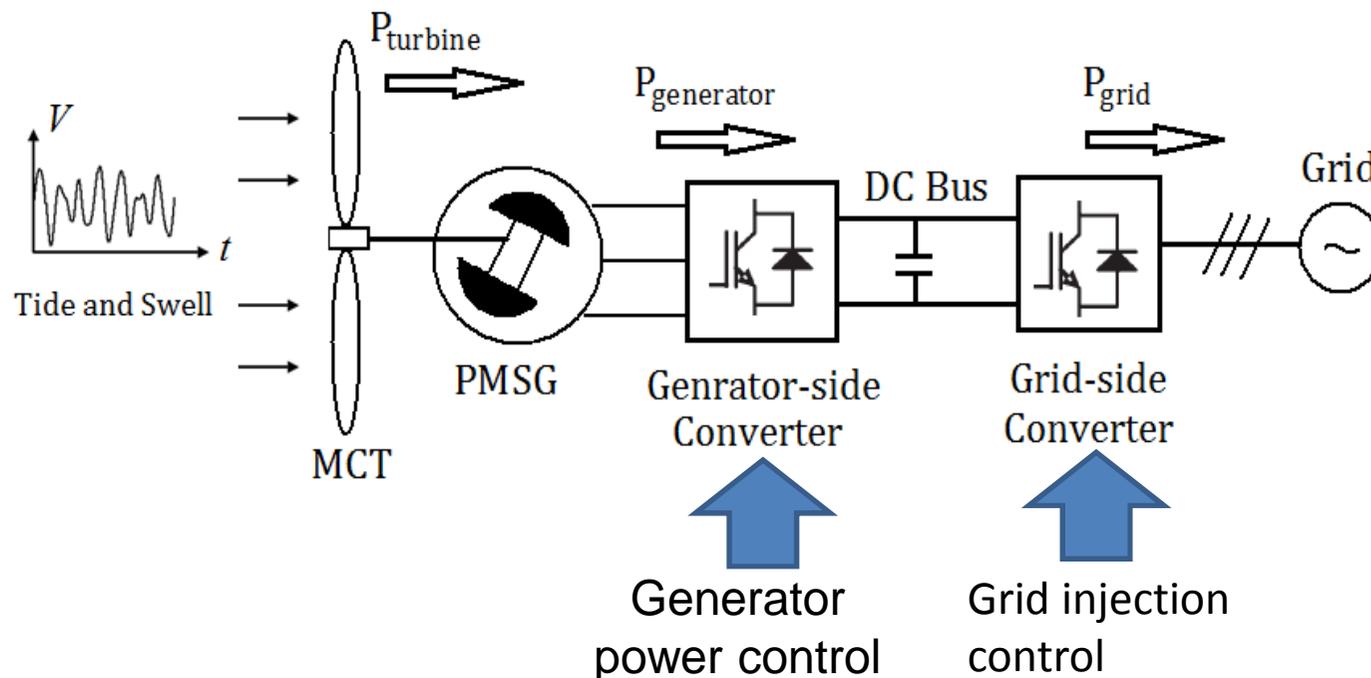
Points positifs :

- Robustesse fortement accrue
- Possibilité d'intégration accrue (par exemple systèmes Rim-Driven)

Points négatifs

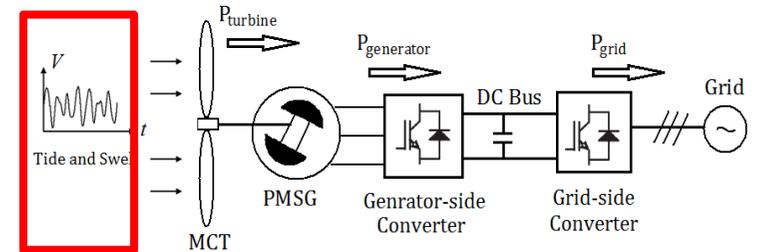
L'absence de contrôle de pas rend le contrôle plus complexe

(Le contrôle de la turbine se fait uniquement par le contrôle des convertisseurs)



Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation de la ressource



Courants d'origine marémotrice

- Interpolation par une méthode de type SHOM (pas de temps de l'ordre de l'heure ou du 1/4 heure)

$$\vec{V}(Hm, C) = \vec{V}_{45}(Hm) + \frac{(C - 45)(\vec{V}_{95}(Hm) - \vec{V}_{45}(Hm))}{50}$$

- Avantages

- Simplicité
- Modularité

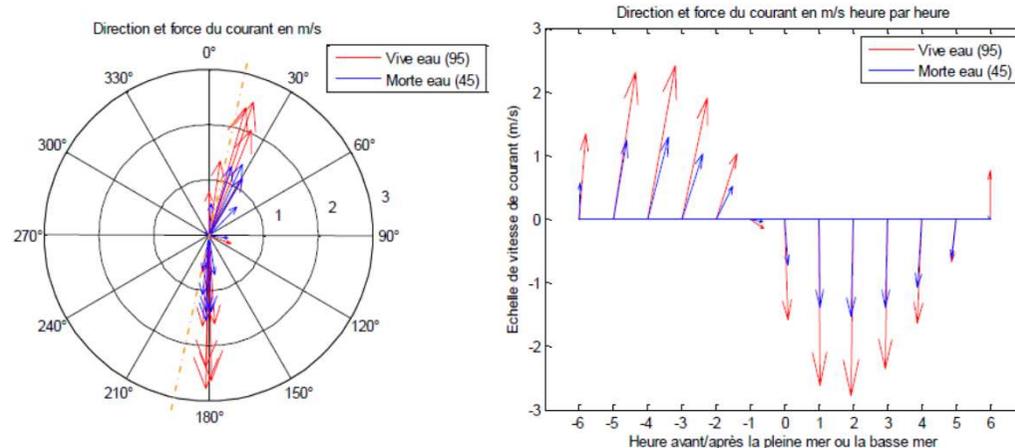
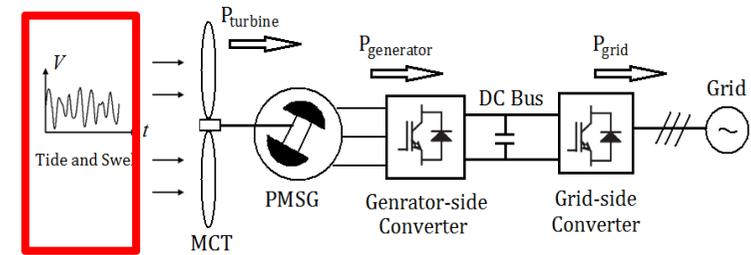


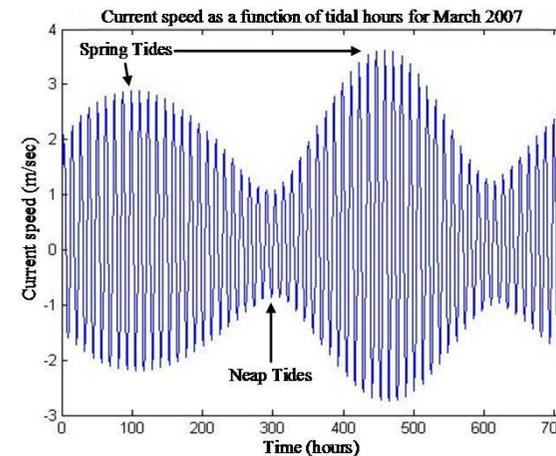
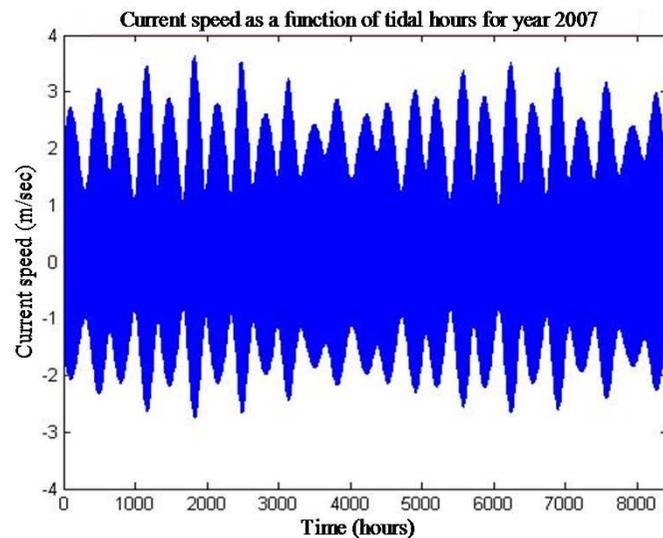
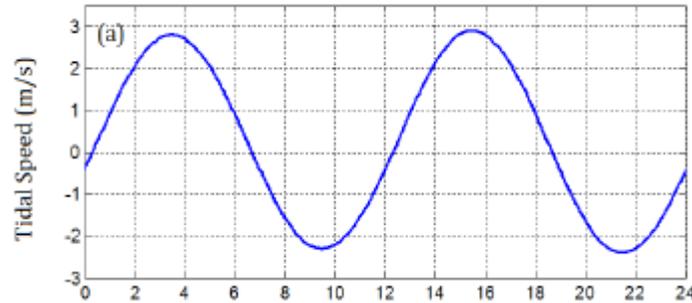
Figure 3 : Ellipses de courant puis direction et force de courants heure par heure en vives eaux et mortes eaux moyennes

Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation de la ressource

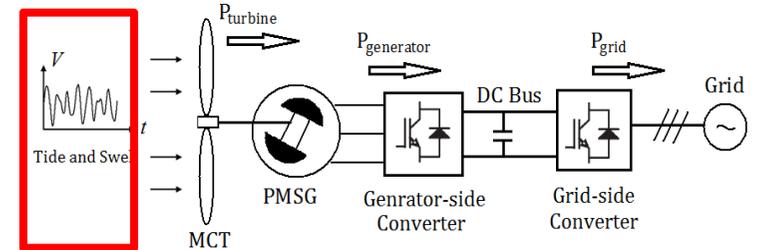


Courants d'origine marémotrice



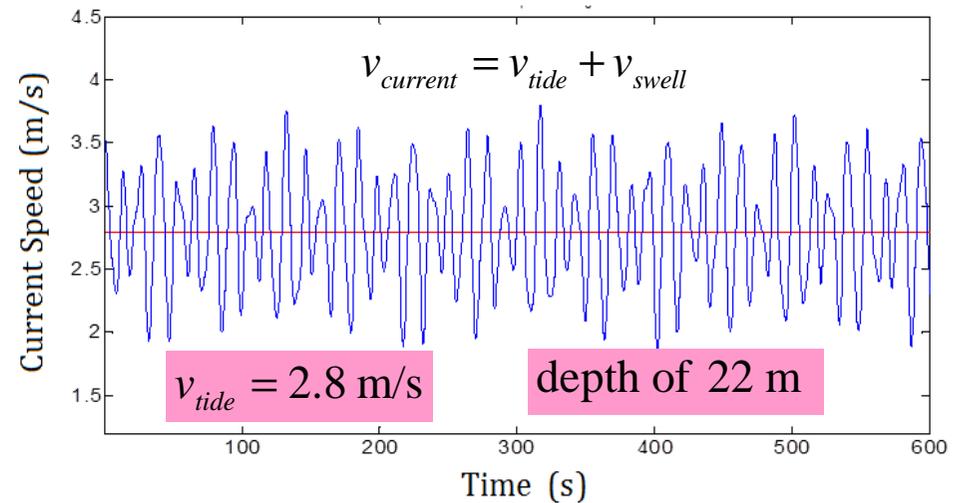
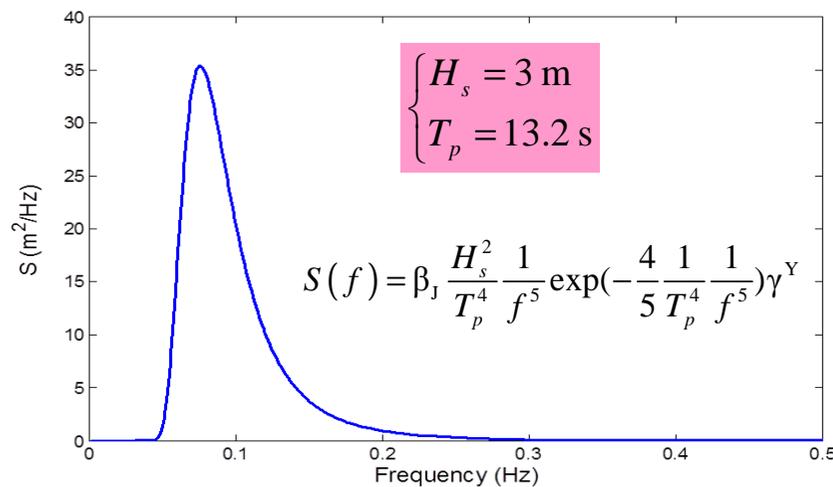
Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation de la ressource



Modélisation des perturbations liées la houle

- Modèle de Stokes de 1^{er} ordre
 - Données d'entrée : état de mer (spectre) et profondeur
- Evaluation du niveau de perturbation



Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

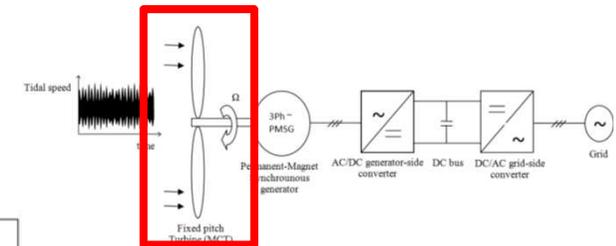
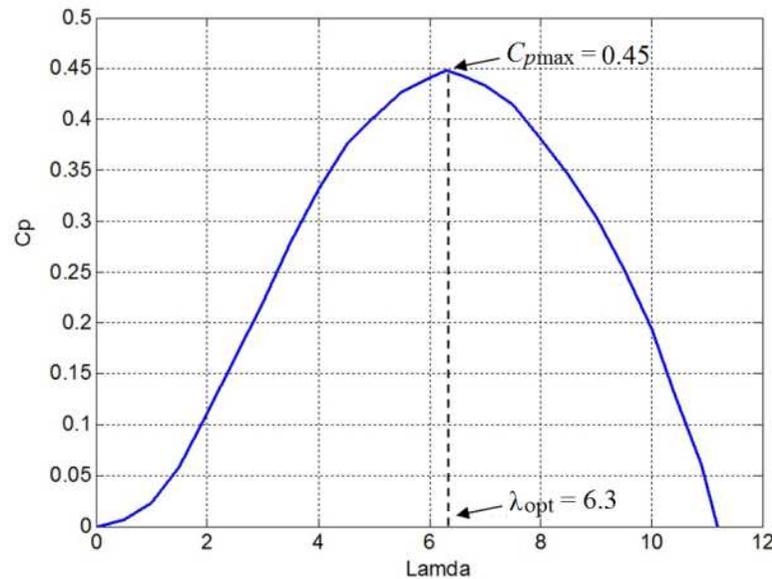
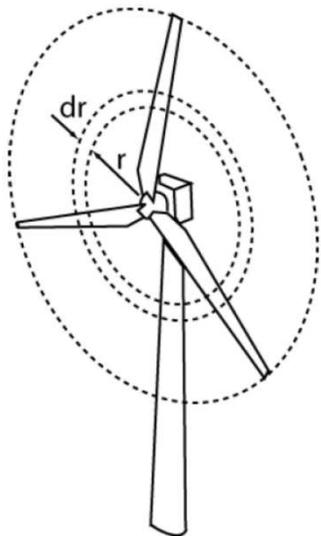
Modélisation de la turbine

Connaissance de la géométrie de la turbine



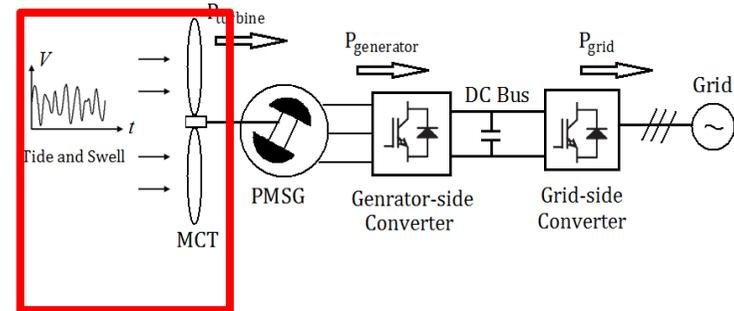
$C_p(\lambda)$

Théorie BEM

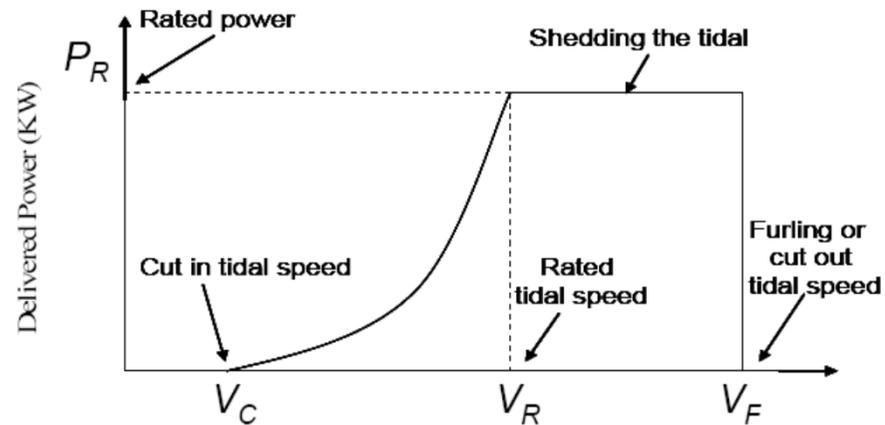
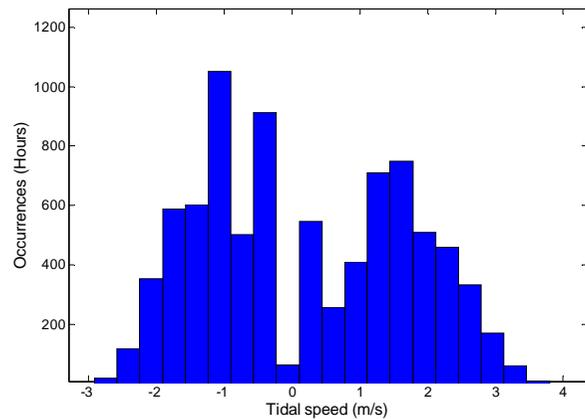


Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Définition d'une stratégie d'extraction



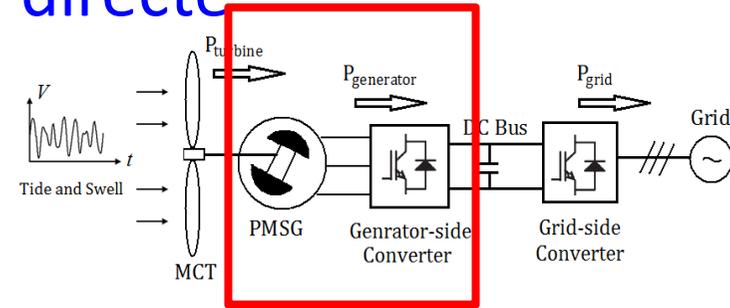
Analyse statistique \rightarrow Stratégie d'extraction



S.E. Ben Elghali, R. Balme, K. Le Saux, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, and F. Hauville - A Simulation Model for the Evaluation of the Electrical Power Potential Harnesssed by a Marine Current Turbine in the Raz de Sein - IEEE Journal on Oceanographic engineering, Vol32 n° 4 Oct 2007, pp786-797

Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation du convertisseur machine + génératrice

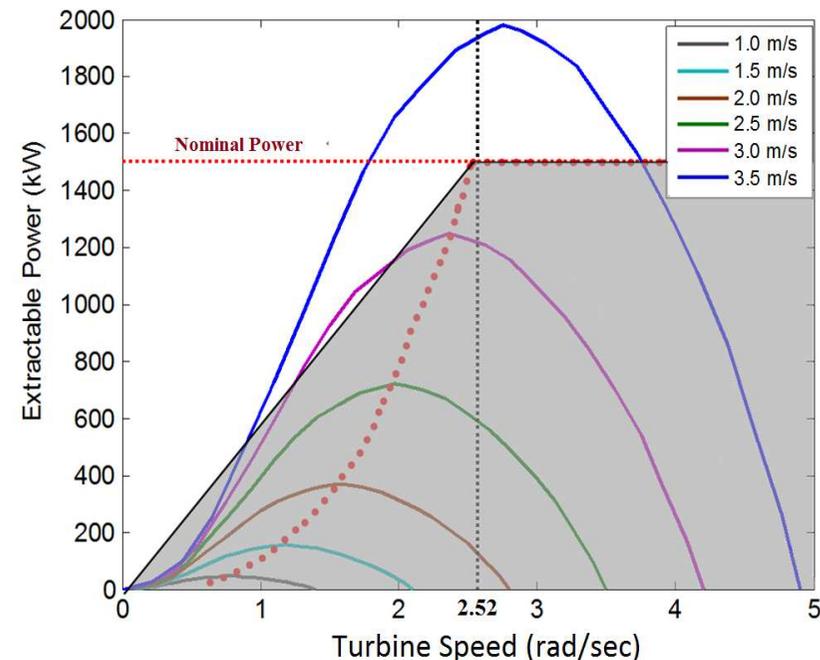


Définition d'une stratégie de contrôle en vitesse variable

Cas étudié:

Puissance nominale: $P_N = T_{eN} \omega_{mN} = 1.52 \text{ MW}$

Vitesse nominale : $n_N = 24 \text{ rpm } (\omega_{mN} = 2.52 \text{ rad/s})$



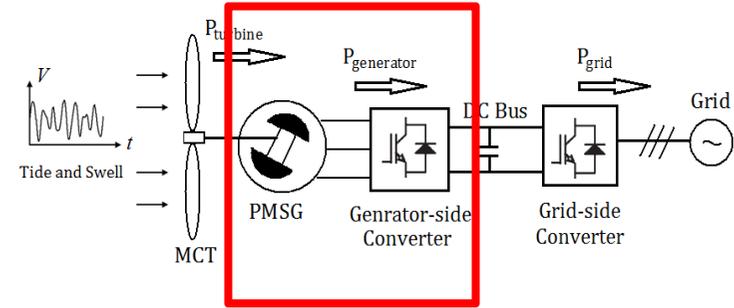
Mode opératoire :

$v_{current} \leq v_{current,rated} \longrightarrow$ **MPPT (jusu'à la vitesse de base)**

$v_{current} > v_{current,rated} \longrightarrow$ **Limitation de puissance par survitesse et défluxage**

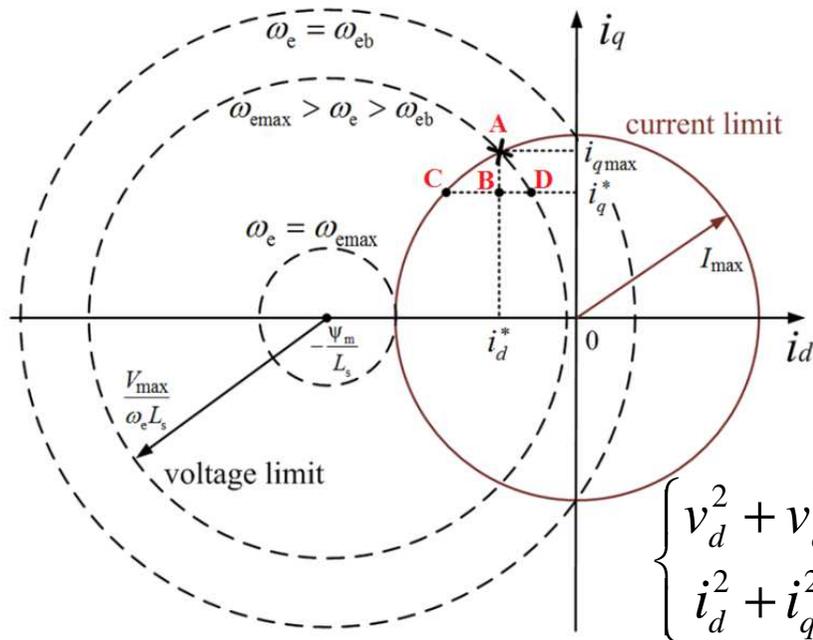
Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation du convertisseur machine + génératrice

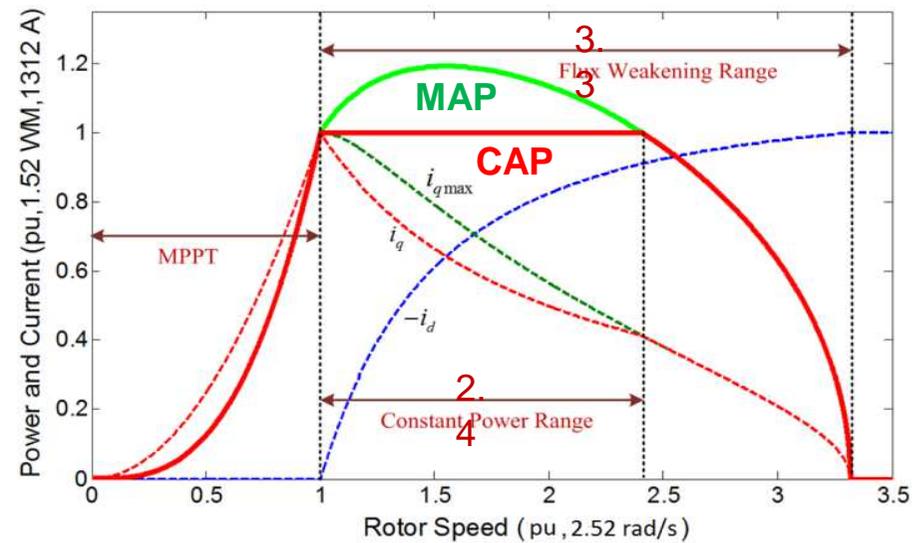


Définition d'une stratégie de contrôle en vitesse variable

Défluxage par injection de courant i_d



$$\begin{cases} v_d^2 + v_q^2 \leq V_{max}^2 \\ i_d^2 + i_q^2 \leq I_{max}^2 \end{cases}$$



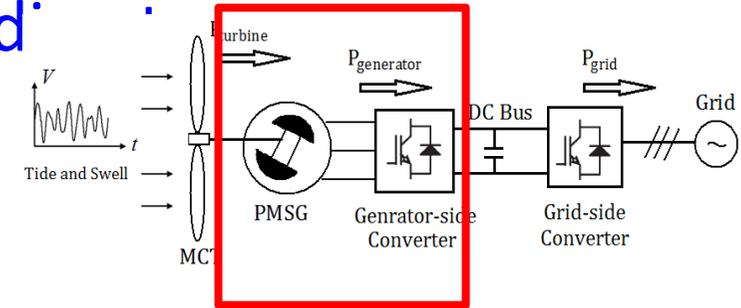
MAP $i_{qmax} = \sqrt{I_{max}^2 - i_d^{*2}}$

CAP $i_q^* = \frac{P_N}{k_T \omega_m} \leq i_{qmax}$

$i_q^* = \frac{2}{3 * n_p * \psi_m} T^*$

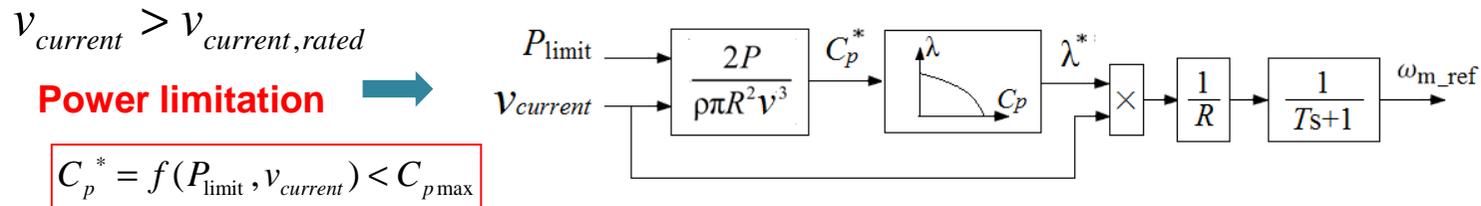
Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque d'avec une turbine à pas fixe

Modélisation du convertisseur machine + génératrice



- **Control de vitesse de la turbine**

nécessite la connaissance de la vitesse du courant



- **Control direct du couple de la turbine**

ne nécessite pas la connaissance de la vitesse du courant

$$T^* = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \omega_m^2, & \text{if } \omega_m \leq \omega_{mN} \\ \frac{P_{limit}}{\omega_m}, & \text{if } \omega_m > \omega_{mN} \end{cases}$$

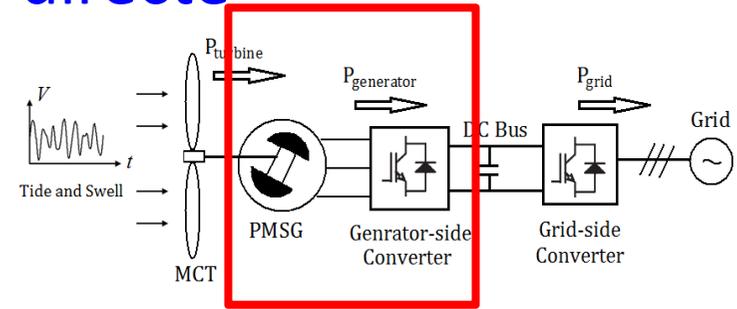
MPPT

Limitation de puissance

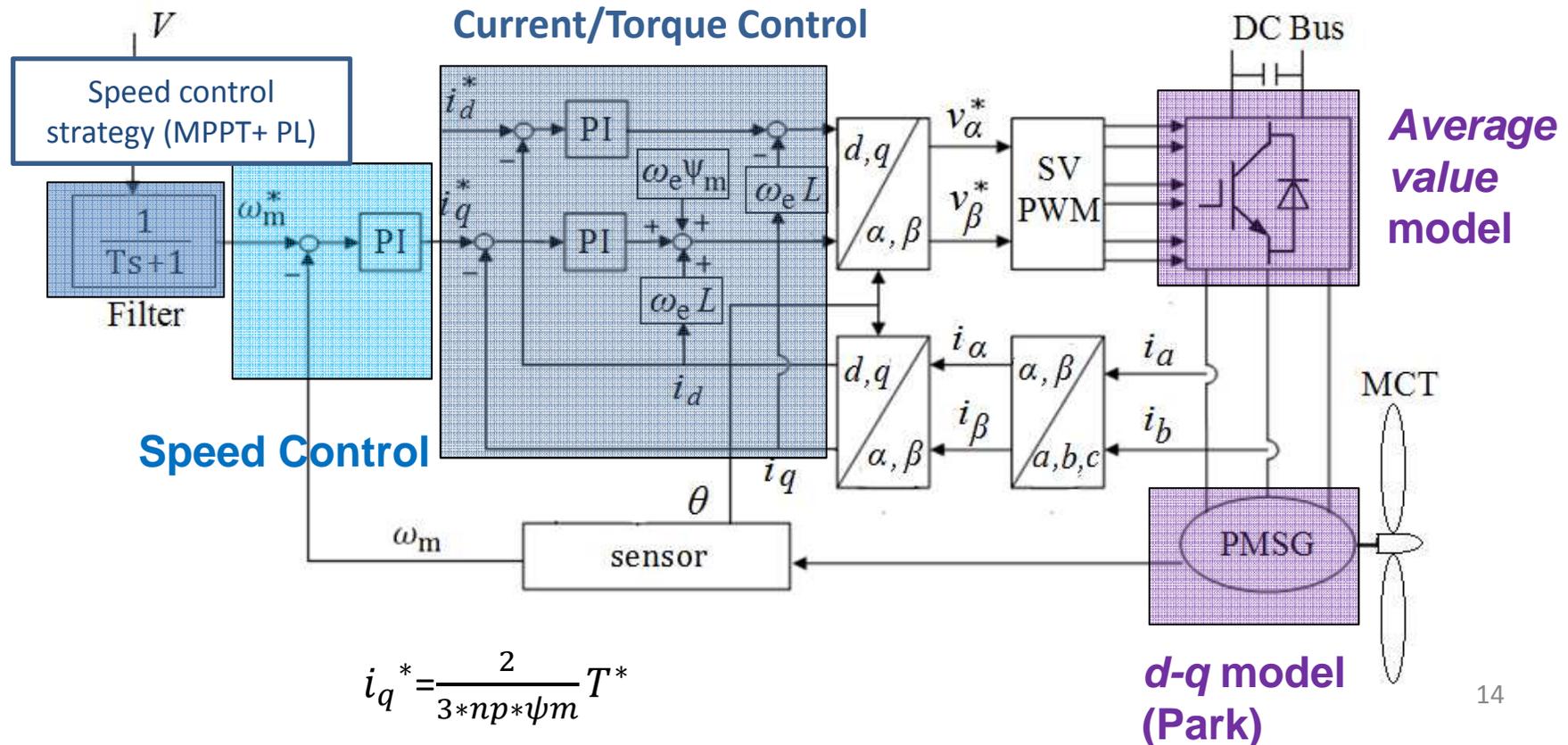
$$i_q^* = \frac{2}{3 * n * p * \psi_m} T^*$$

Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

Modélisation du convertisseur machine + génératrice

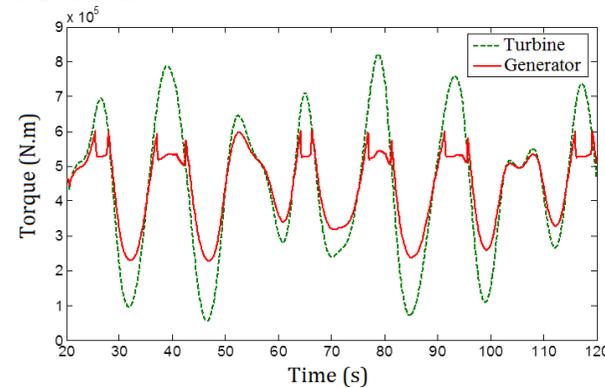
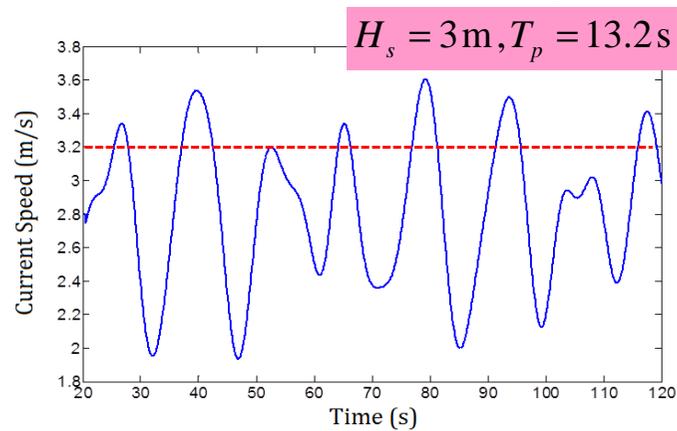


$V_{current}$ (measured)

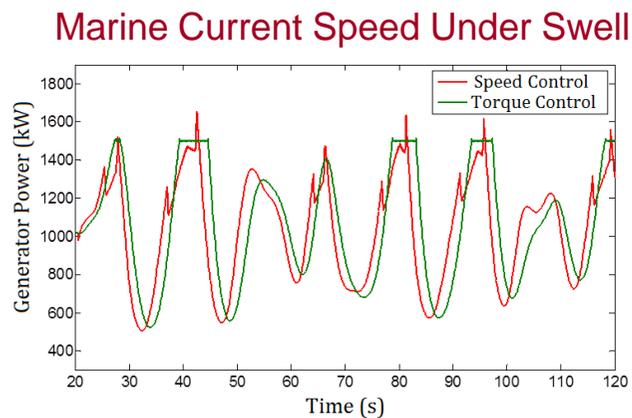


Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

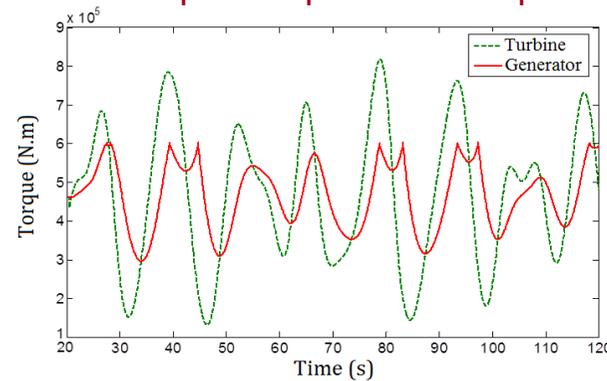
Résultats de simulation sur une ressource perturbée par la houle



Torque Response with Speed Control



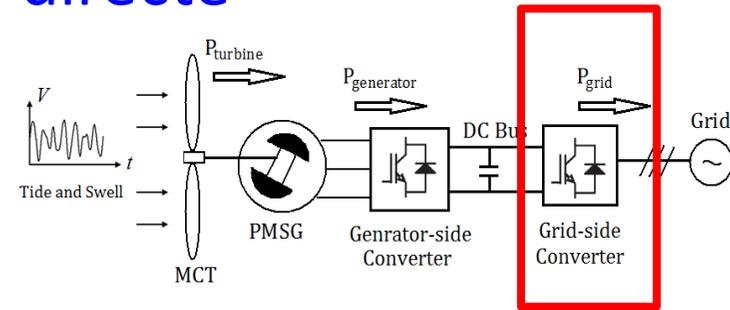
Generator Produced Power



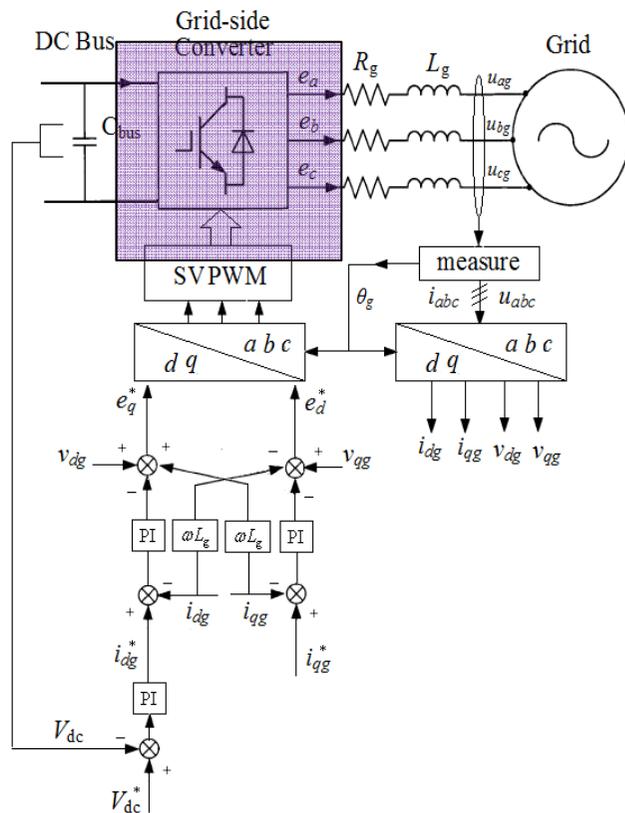
Torque Response with Torque Control

Exemple de modélisation et commande d'une génératrice à AP associée en attaque directe avec une turbine à pas fixe

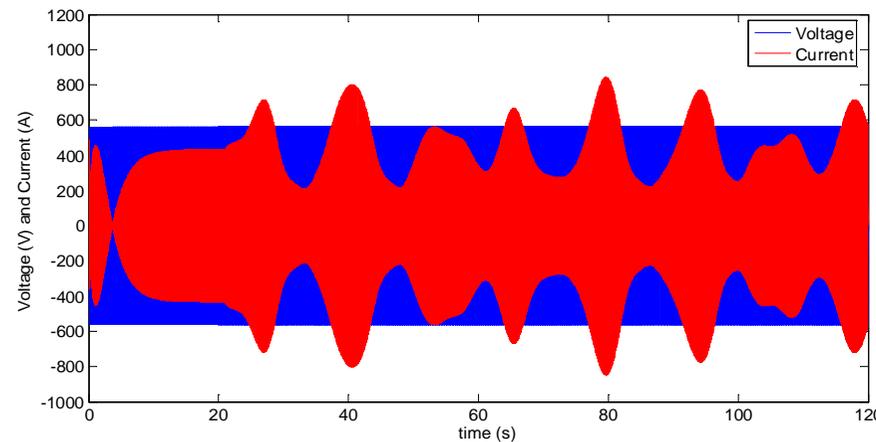
Modélisation et commande du convertisseur coté réseau



Average value model



$$\begin{cases} P_{grid} = 1.5v_{dg}i_{dg} = 1.5|V_{gn}|i_{dg} \\ Q_{grid}^* = -1.5v_{dq}i_{qg}^* = 0 \end{cases}$$



Partie II

**Méthodologie de conception
avec approche globale de
génératrices à aimants
permanents associées avec une
hélice à pas fixe**

(thèse de S. Djebbari)

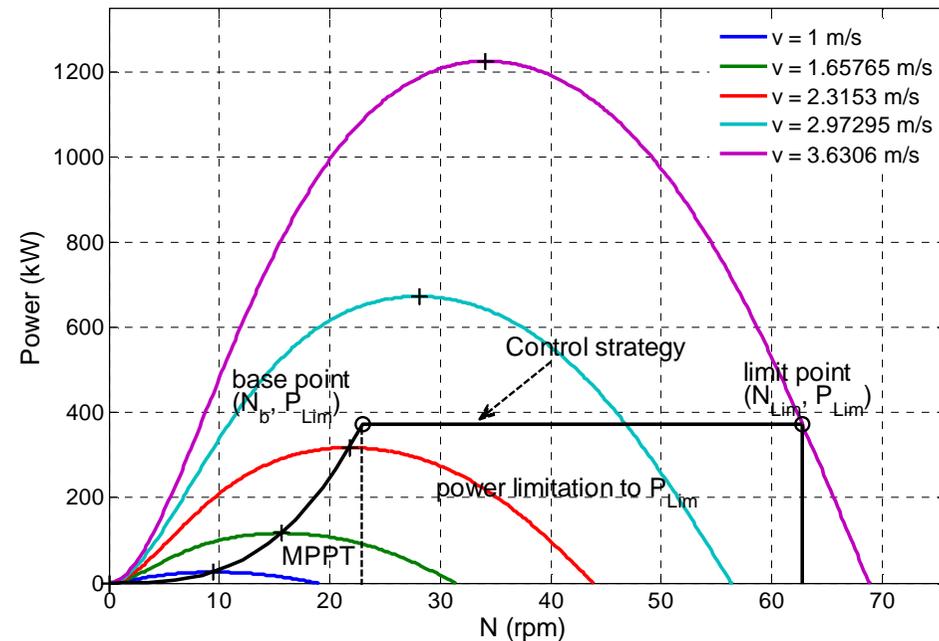
- méthodologie
- Résultats

Méthodologie : définition du niveau de limitation

Objectif : proposer une stratégie de dimensionnement adaptée à la stratégie de commande précédente

$$P_{turbine} = \frac{\pi}{8} \rho_{water} D_{turbine}^2 C_p(\lambda) |v^3|$$

$$P^* = \begin{cases} \frac{\pi}{8} \rho_{water} D_{turbine}^2 C_{pmax} |v^3| & \text{if } |v| \leq v_{Lim} \\ P_{Lim} & \text{if } |v| > v_{Lim} \end{cases}$$



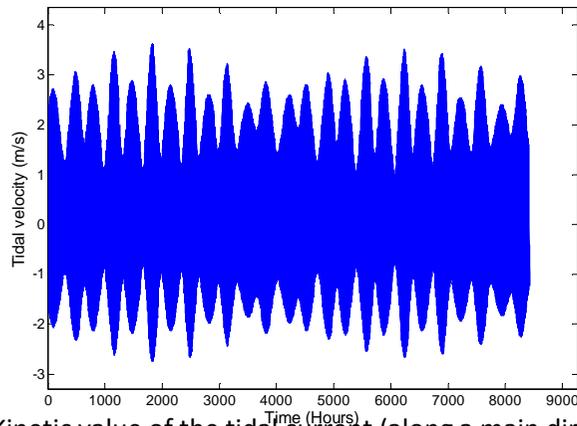
Cas d'étude turbine de 12m de diamètre

Le niveau de limitation de puissance résulte d'un compromis entre le cout de la chaîne électrique et l'énergie extraite

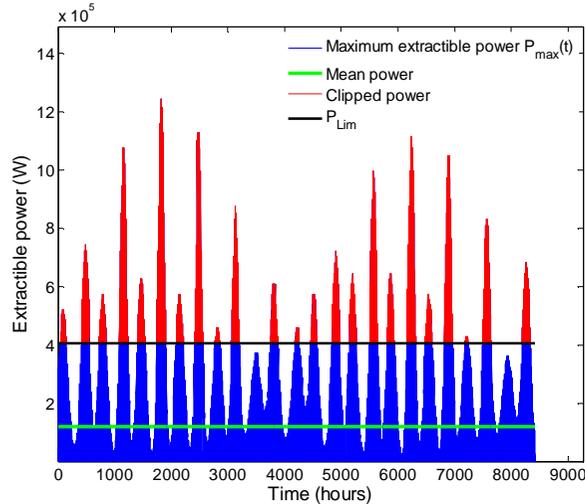
Méthodologie : définition du niveau de limitation

Une série temporelle typique (Raz de Sein-Fr, 8424h [1]) est prise en compte pour déterminer P_{lim}

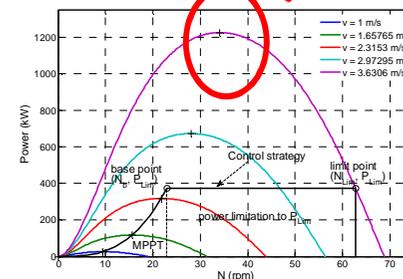
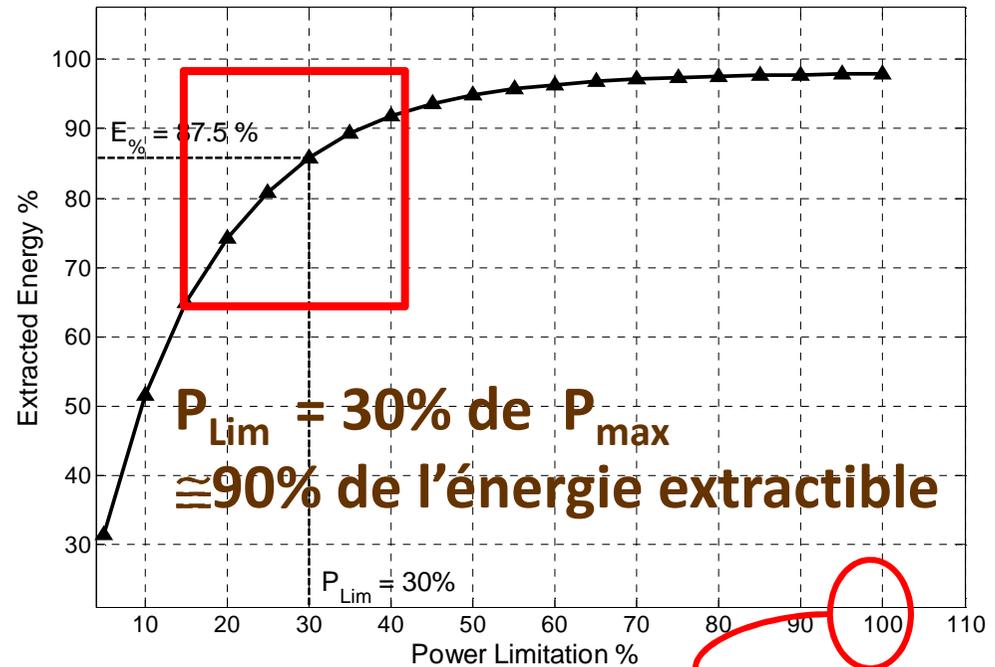
[1] S. Benelghali, R. Balme, K. Le Saux, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier and F. Hauville, "A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine," *IEEE Journal on Oceanic Engineering*, vol. 32, n°4, pp. 786-797, October 2007.



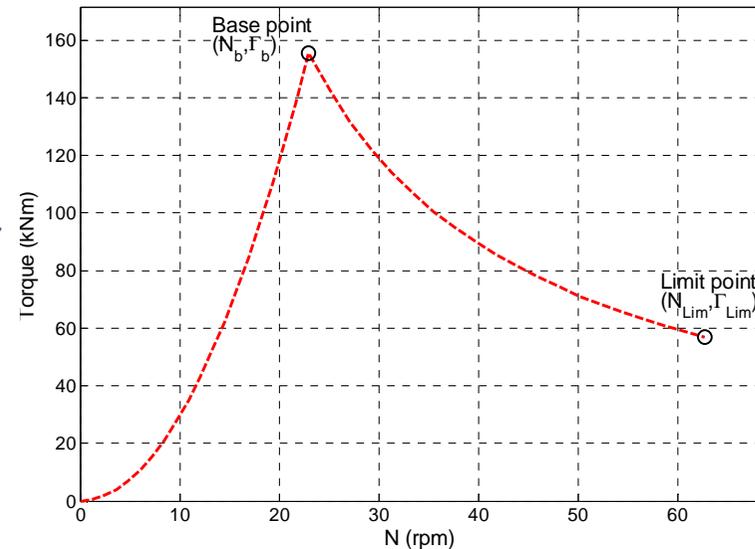
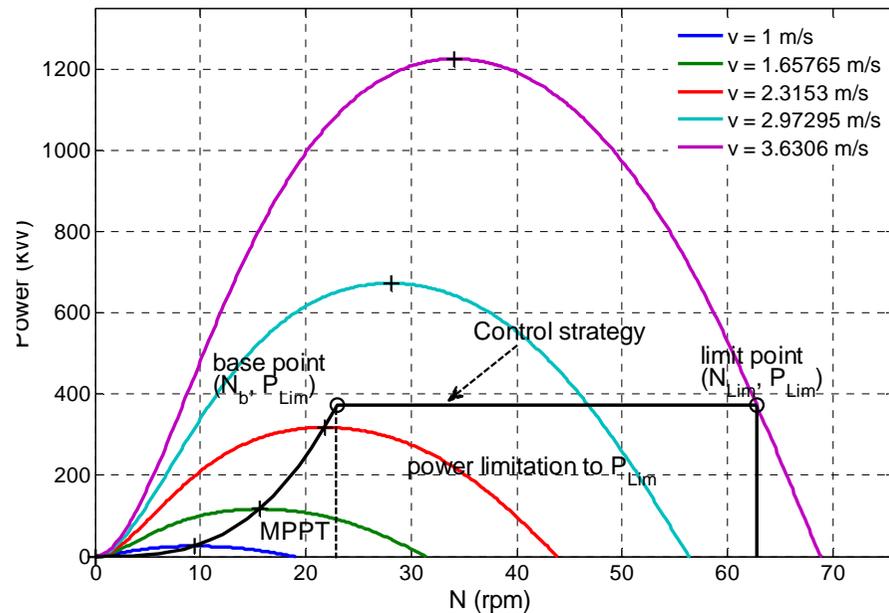
Kinetic value of the tidal current (along a main directional axis)



Extracted power for a 12m diameter turbine with $C_{pmax}=0.46$



Méthodologie : caractéristique couple vitesse



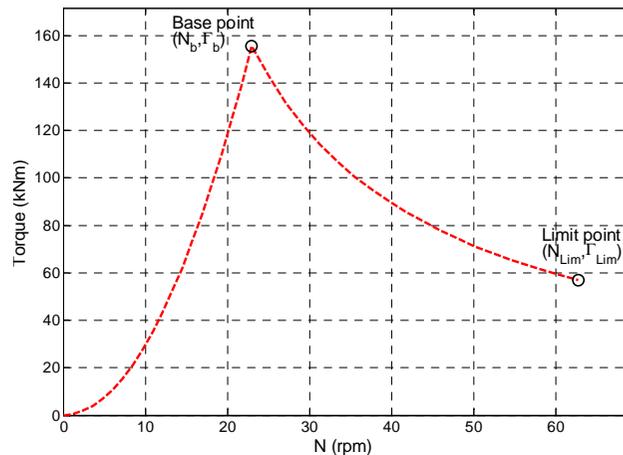
La stratégie de contrôle considérée permet de définir une caractéristique couple /vitesse que l'ensemble convertisseur/machine doit être en mesure de fournir (couple récupérateur)

Cette caractéristique peut être considérée comme l'un des éléments principaux du cahier des charges pour l'ensemble convertisseur machine.

Cette caractéristique dépend de plusieurs paramètres

- 1) Valeur de la limitation de puissance
- 2) gamme de la vitesse du courant de marée (lié au site)
- 3) Forme de la courbe C_p

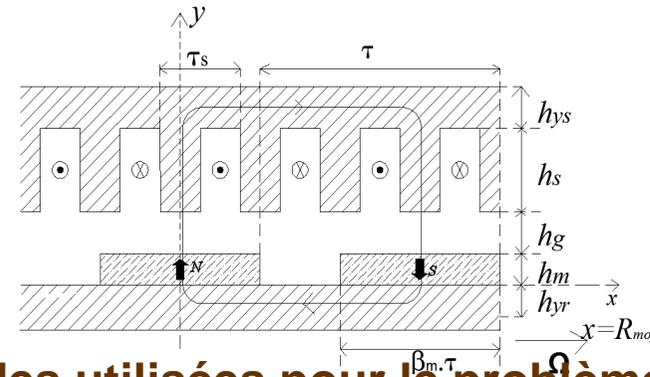
Méthodologie : problème de conception



Résolution d'un problème d'optimisation NL sous contraintes

$$\mathbf{x}^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \|C(\mathbf{x})\|$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma(\mathbf{x}, \Omega_b) - \Gamma_b^* = 0 \\ V(\mathbf{x}, \Omega_b) - V_{max} = 0 \\ -\Gamma(\mathbf{x}, \Omega_{Lim}) + \Gamma_{Lim}^* \leq 0 \\ -PF(\mathbf{x}, \Omega_b) + PF_{min} \leq 0 \\ T(\mathbf{x}, \Omega_b) - T_{max} \leq 0 \\ |H_{max}(\mathbf{x}, \Omega_b)| - |H_{cj}| \leq 0 \\ -\eta_{elec}(\mathbf{x}, \Omega_b) + \eta_{elec_{min}} \leq 0 \\ LB \leq \mathbf{x} \leq UB \end{array} \right.$$



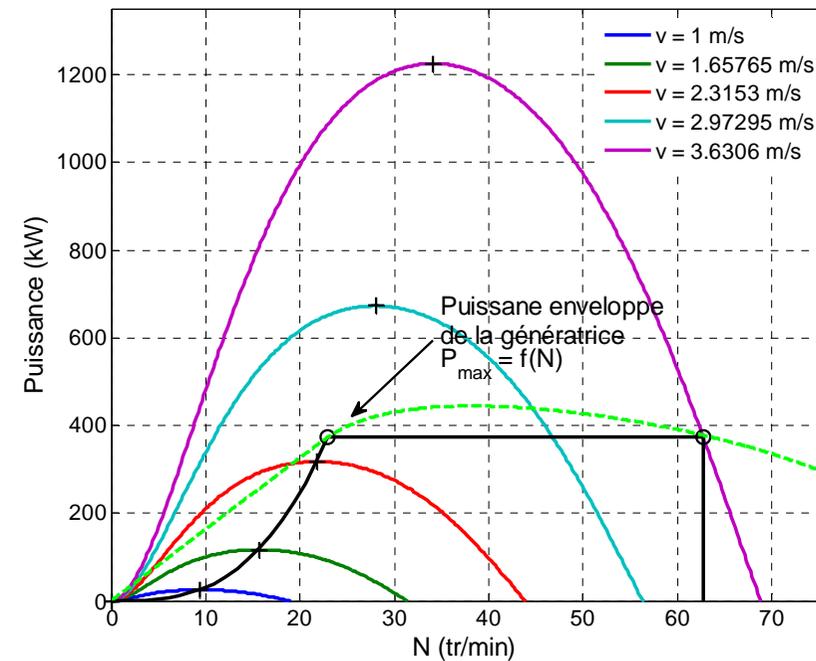
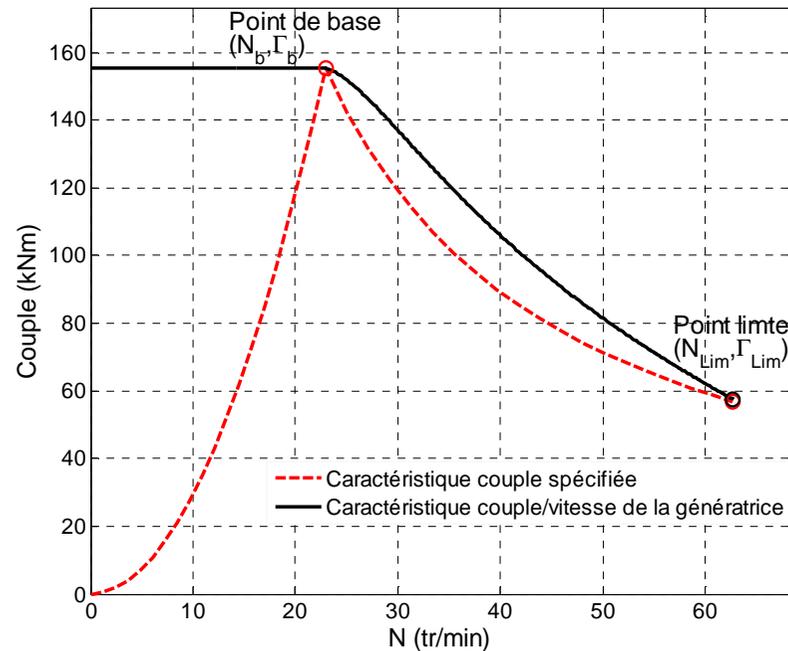
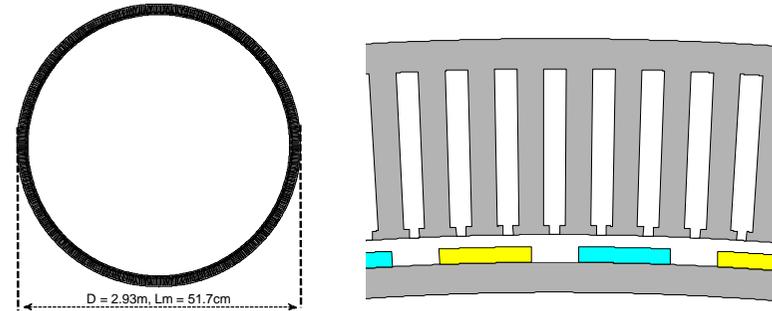
méthodes utilisées pour le problème de conception

- Un modèle électromagnétique analytique est utilisé pour le calcul des Forces électromotrices, de l'inductance, du couple, et des grandeurs magnétiques
- Un réseau de résistances thermiques est utilisé pour déterminer la température maximale dans les bobines
- Le modèle électrique en Régime permanent du générateur conduit au calcul du couple en fonction de la vitesse en considérant les opérations de défluxage et en incluant les contraintes en tension du convertisseur de puissance

La valeur limite de la contrainte sur le facteur de puissance est déterminée par plusieurs itérations du problème d'optimisation

Exemple de Résultats

Generator external diameter	$D_{generator}$	3	m
Turbine torque at base speed	Γ_b	155.6	kNm
Turbine base speed	N_b	22.35	rpm
Turbine torque at maximum speed	Γ_{Lim}	57	kNm
Turbine limit speed	N_{Lim}	62.7	rpm
Tidal speed at base point	v_{Lim}	2.5	m/s
Power converter input voltage	V_{max}	690	V(rms)
Generator power factor at base speed	PF	0.82	-
Minimal generator electrical efficiency	$\eta_{elecmin}$	0.95	-
Maximum generator temperature	T_{max}	100	°C
Magnets coercive field	H_{cj}	10^6	A/m



Sofiane Djebbari, Jean Frédéric Charpentier, Franck Scuiller, Mohamed Benbouzid, "Systemic Design Methodology for Fixed-Pitch RFPM Generator-Based MCT", IEEE-ICGE Sfax Tunisia Mars 2014, 6pp

S. Djebbari, J.F. Charpentier, F. Scuiller, M.E.H. Benbouzid, "Influence of Fixed-Pitch Tidal Turbine Hydrodynamic Characteristic on the Generator Design" EWTEC 2015 sept 2015 Nantes France 10pp

Contact

JF Charpentier,
Ecole Navale, France

Jean-frederic.charpentier@ecole-navale.fr

Institut de Recherche de l'Ecole Navale : <https://www.ecole-navale.fr/RECHERCHE%2C1803>

Page personnelle : <https://www.ecole-navale.fr/node/50574>

Scholar google : <https://scholar.google.fr/citations?user=vemiYBoAAAAJ&hl=en>

Articles récents (la plupart téléchargeables)

http://sam.ensam.eu/discover?filtertype=author&filter_relational_operator>equals&filter=CHARPENTIER%2C+Jean-Frederic&locale-attribute=en