

# Modélisation dynamique et commande d'un propulseur naval

Matthieu Vonnet

9 Décembre 2008

Co-directeurs : Luc Loron (IREENA) et Jean-François Hetet (LMF de l'ECN)

Encadrante : Nadia Aït-Ahmed (IREENA)

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives

# Contexte

Robotique navale en plein essor :

## Véhicules issus de la robotique navale

- De surface ou sous-marins
- Commandés à distance ou autonomes

## Applications existantes et potentielles

- Exploration des fonds marins
- Intervention sur des épaves présentant des risques écologiques ou un intérêt scientifique et/ou historique
- Installation, connexion et maintenance de pipelines ou de câbles
- Surveillance et inspection (zones sensibles, ports maritimes, ...)
- Déminage

# Problématique

## Positionnement Dynamique

- Maintien d'une position ou suivi d'une trajectoire par action sur les propulseurs
  - Opérations à vitesse d'avance faible ou nulle
- ⇒ Calcul des poussées que les propulseurs doivent produire pour assurer un bon positionnement

## Commande des propulseurs

- Assurer que la poussée produite tend vers la poussée désirée
- ⇒ Maîtrise des comportements statique et dynamique du propulseur à faible vitesse d'avance
- ⇒ Rejet des perturbations externes (houle, courants, ventilation, ...)

# La commande des propulseurs dans la littérature

## Mise en évidence du problème

- en 1990 par Yoerger et Slotine
- ⇒ Le comportement dynamique des propulseurs influence les performances des commandes en DP à faible vitesse de déplacement
  
- Problème fortement lié au comportement des hélices
- ⇒ Peu d'hydrodynamiciens travaillant sur ce sujet
- ⇒ Chercheurs majoritairement issus de la filière EEA
  
- Principaux acteurs
- ⇒ Ecole Navale NPS (affiliée à la marine Américaine)
- ⇒ Département de Mécanique de l'Université de Johns Hopkins
- ⇒ Université de Science et Technologie de Norvège
- ⇒ IREENA

# La commande des propulseurs à l'IREENA

## Motivations

- Situation géographique de Saint-Nazaire
- Proximité des chantiers de l'Atlantique
- Expérience du laboratoire en propulsion navale

## DEA et Masters de Recherche

- Gilles Messenger (2001), Caroline Baratte (2002), Weiping Liu (2004), Ngac Ky Nguyen (2006)

## Thèse de doctorat

- Cédric Guibert (2005) : Modélisation et commande en poussée de moteurs à courants alternatifs en propulsion navale

# La commande des propulseurs à l'IREENA

Cédric Guibert a pointé plusieurs problèmes au cours de sa thèse :

## Modèles de propulseur

- ⇒ Pas de modèle dynamique d'hélice performant et adapté à la commande

## Commandes en poussée

- ⇒ Sensibles aux erreurs de modélisation et d'identification de l'hélice
- ⇒ Perturbations externes mal rejetées

Cédric a également participé à la mise en œuvre d'un bassin d'essais à l'IREENA

- ⇒ Bassin opérationnel seulement à la fin de sa thèse
- ⇒ Exploitation et identification des paramètres du propulseur à réaliser



# Bassin d'essais de l'IREENA

## Propulseur naval étudié

- machine synchrone à AP couplée à un convertisseur statique
- hélice symétrique à 3 pales à pas fixe, carénée
- poulies et courroie avec rapport de réduction unitaire



# Bassin d'essais de l'IREENA

## Propulseur naval étudié

- machine synchrone à AP couplée à un convertisseur statique
- hélice symétrique à 3 pales à pas fixe, carénée
- poulies et courroie avec rapport de réduction unitaire



## Instrumentation

- capteur de force
- codeur incrémental
- vélocimètre (25 Hz)

# Bassin d'essais de l'IREENA

## Propulseur naval étudié

- machine synchrone à AP couplée à un convertisseur statique
- hélice symétrique à 3 pales à pas fixe, carénée
- poulies et courroie avec rapport de réduction unitaire



## Instrumentation

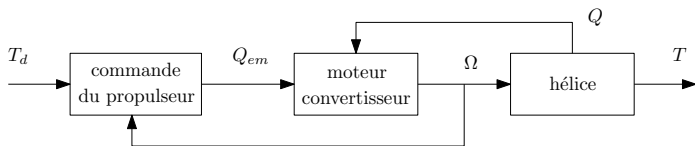
- capteur de force
- codeur incrémental
- vélocimètre (25 Hz)

## Tests réalisables

- vitesse d'avance nulle
- statique et dynamique
- ventilation

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur**
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives

# Modèle électromécanique



## Ensemble moteur-convertisseur

- ⇒ Commande vectorielle en couple électromagnétique précise et rapide
- ⇒ Phénomènes électriques très rapides par rapport aux phénomènes mécaniques et hydrodynamiques

## Modèle mécanique des parties tournantes

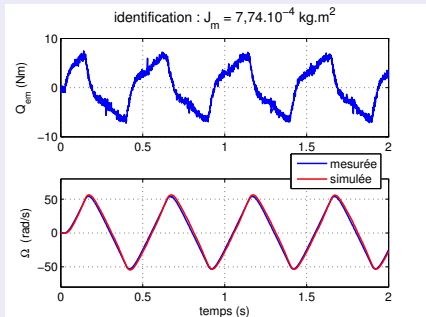
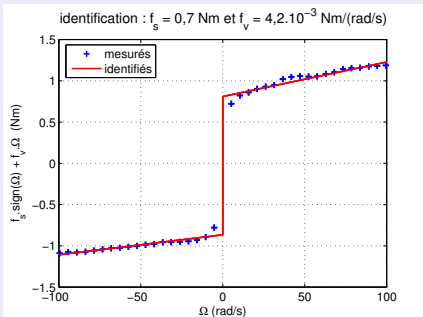
$$J_m \dot{\Omega} = Q_{em} - f_v \Omega - f_s \text{sign}(\Omega) - Q$$

- ⇒ Couple électromagnétique  $Q_{em}$  ( $= Q_{em d}$ )
- ⇒ Couple de frottement (visqueux  $f_v$  et sec  $f_s$ )
- ⇒ Couple hydrodynamique de l'hélice (couple de charge)  $Q$

# Identification des paramètres mécaniques

## Paramètres de frottement et inertie en rotation

- Essais en air en régime statique et dynamique
- ⇒ Couple hydrodynamique négligeable
- Modèle linéaire vis-à-vis des paramètres  $f_v$ ,  $f_s$  et  $J_m$
- ⇒ Identification à l'aide des moindres carrés



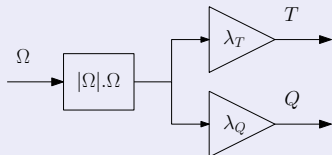
# Modèle statique d'une hélice

Performances statiques moyennes d'une hélice à vitesse d'avance nulle

Entrée en vitesse

$$T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

$$Q = \lambda_Q |\Omega| \Omega$$



⇒ Coefficients de poussée  $\lambda_T$  et de couple  $\lambda_Q$  constants

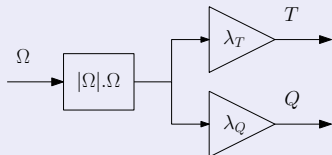
# Modèle statique d'une hélice

Performances statiques moyennes d'une hélice à vitesse d'avance nulle

Entrée en vitesse

$$T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

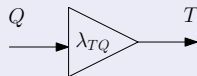
$$Q = \lambda_Q |\Omega| \Omega$$



Entrée en couple

$$T = \lambda_{TQ} Q$$

$$\lambda_{TQ} = \lambda_T / \lambda_Q$$



⇒ Coefficients de poussée  $\lambda_T$  et de couple  $\lambda_Q$  constants



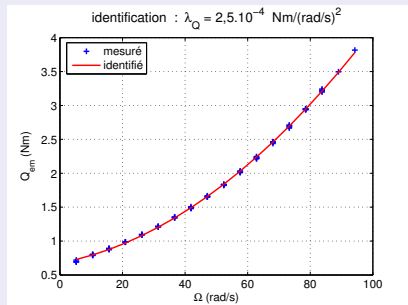
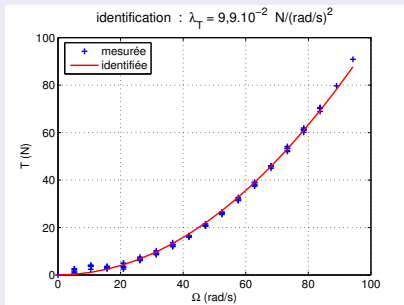
# Identification des coefficients de poussée et de couple

## Coefficients de poussée et de couple

- Essais en eau en régime statique
  - Modèles linéaires vis-à-vis des coefficients  $\lambda_T$  et  $\lambda_Q$
- ⇒ Identification à l'aide des moindres carrés

$$T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

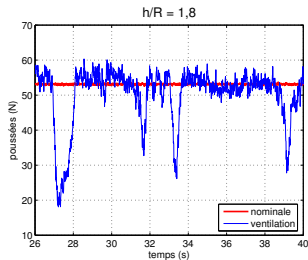
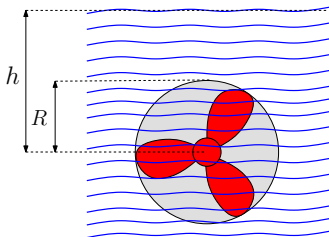
$$Q = \lambda_Q |\Omega| \Omega = Q_{em} - f_v \Omega - f_s \text{sign}(\Omega)$$



# Ventilation de l'hélice (1/2)

## Définition et origine du phénomène

- Les pales de l'hélice fonctionnent dans l'air
- ⇒ Hélice partiellement émergée : pales hors de l'eau
- ⇒ Hélice entièrement immergée à faible profondeur : aspiration d'air
- Phénomène aléatoire et turbulent causant des pertes de poussée et de couple (jusqu'à 100 % en instantané)

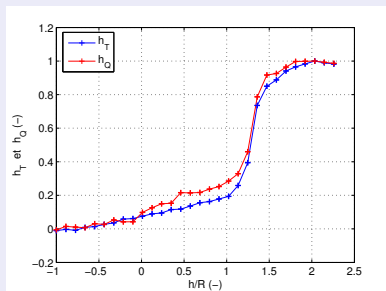


# Ventilation de l'hélice (2/2)

## Modélisation

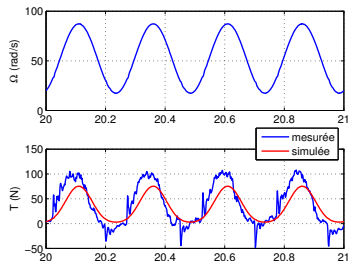
- Comportement statistique moyen constant
- ⇒ Pertes statiques moyennes modélisables à partir des coefficients de pertes de poussée  $h_T$  et de couple  $h_Q$
- Coefficients dépendant de la profondeur d'immersion  $h$  de l'arbre de l'hélice et de la vitesse de rotation  $\Omega$

$$h_T(h/R, \Omega) = \frac{T}{\lambda_T |\Omega| \Omega}$$
$$h_Q(h/R, \Omega) = \frac{Q}{\lambda_Q |\Omega| \Omega}$$



# Essais en régime dynamique

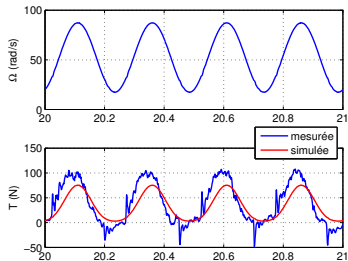
Prédiction de la poussée à vitesse de rotation sinusoidale :



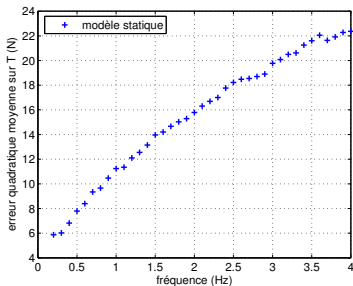
essai à  $f = 4 \text{ Hz}$

# Essais en régime dynamique

Prédiction de la poussée à vitesse de rotation sinusoidale :



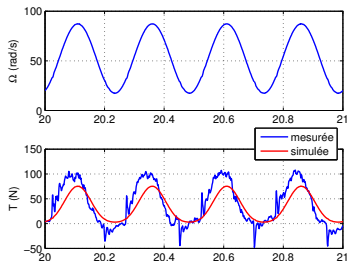
essai à  $f = 4 \text{ Hz}$



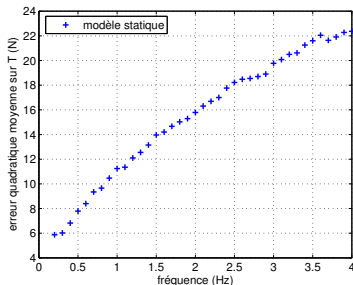
$f = 0, 1 \text{ Hz à } 4 \text{ Hz}$

# Essais en régime dynamique

Prédiction de la poussée à vitesse de rotation sinusoidale :



essai à  $f = 4 \text{ Hz}$



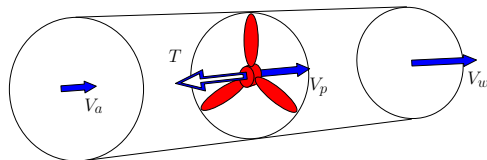
$f = 0, 1 \text{ Hz à } 4 \text{ Hz}$

- ⇒ Erreur de prédiction croissante avec la fréquence
- ⇒ Nécessite un modèle dynamique (physique ou comportemental)

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice**
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives

# Modélisation physique d'une hélice

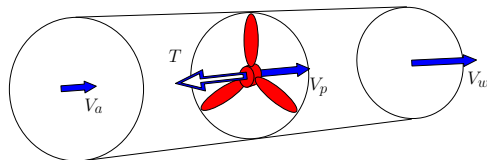
## Théorie du moment axial de Rankine (1865)





# Modélisation physique d'une hélice

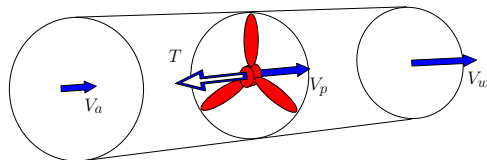
## Théorie du moment axial de Rankine (1865)



- ⇒ Mécanique des fluides parfaits incompressibles
- ⇒ Hélice remplacée par un disque actuateur (de surface  $A_0$ )
- ⇒ Lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement

# Modélisation physique d'une hélice

## Théorie du moment axial de Rankine (1865)

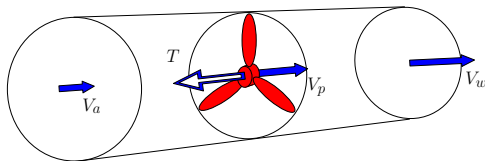


- ⇒ Mécanique des fluides parfaits incompressibles
- ⇒ Hélice remplacée par un disque actuateur (de surface  $A_0$ )
- ⇒ Lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement

$$T = 2\rho \int_{A_0} V_p (V_p - V_a) dA_0$$

# Modélisation physique d'une hélice

## Théorie du moment axial de Rankine (1865)

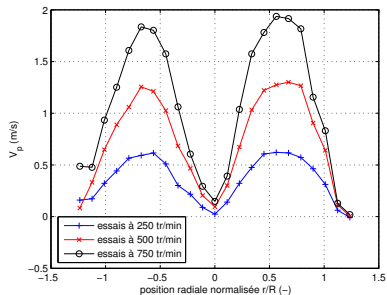


- ⇒ Mécanique des fluides parfaits incompressibles
- ⇒ Hélice remplacée par un disque actuateur (de surface  $A_0$ )
- ⇒ Lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement
- ⇒ **Extension dynamique de la théorie du moment axial**

$$T = 2\rho \int_{A_0} V_p (V_p - V_a) dA_0 + \rho \int_{A_0} l \frac{\partial V_p}{\partial t} dA_0$$

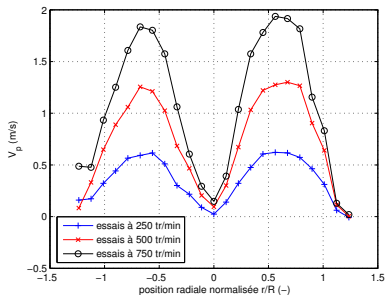
# Expérimentation en régime statique

Vitesse axiale de l'eau  $V_p$  mesurée à différentes positions radiales



# Expérimentation en régime statique

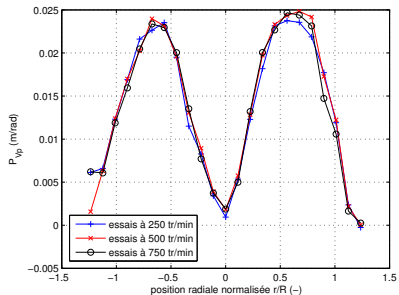
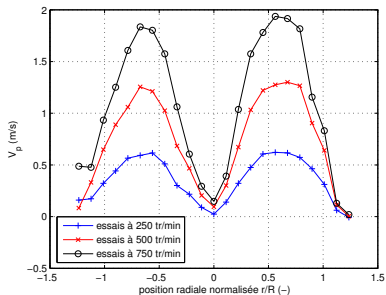
Vitesse axiale de l'eau  $V_p$  mesurée à différentes positions radiales



$$P_{V_p}(r, \Omega) = \frac{V_p(r, \Omega)}{\Omega}$$

# Expérimentation en régime statique

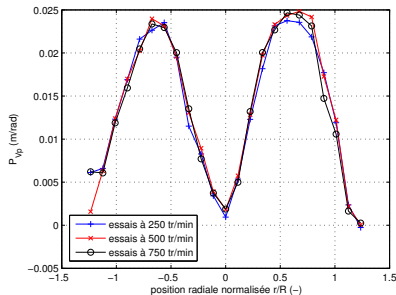
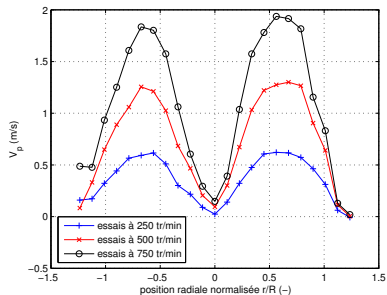
Vitesse axiale de l'eau  $V_p$  mesurée à différentes positions radiales



$$P_{V_p}(r, \Omega) = \frac{V_p(r, \Omega)}{\Omega}$$

# Expérimentation en régime statique

Vitesse axiale de l'eau  $V_p$  mesurée à différentes positions radiales



$$P_{V_p}(r, \Omega) = \frac{V_p(r, \Omega)}{\Omega}$$

⇒ Profil  $P_{V_p}$  de la vitesse axiale de l'eau indépendant de la vitesse de rotation  $\Omega$  en régime statique

# Simplification du modèle dynamique

$$T = 2\rho \int_{A_0} V_p (V_p - V_a) dA_0 + \rho \int_{A_0} l \frac{\partial V_p}{\partial t} dA_0$$

## Hypothèses de modélisation dynamique

- Vitesse d'avance nulle
- Déformation du profil  $P_{V_p}$  faible en dynamique
- Comportement à  $0,7R$  caractéristique du comportement global



# Simplification du modèle dynamique

$$T = 2\rho \int_{A_0} V_p (V_p - V_a) dA_0 + \rho \int_{A_0} l \frac{\partial V_p}{\partial t} dA_0$$

## Hypothèses de modélisation dynamique

- Vitesse d'avance nulle
- Déformation du profil  $P_{V_p}$  faible en dynamique
- Comportement à  $0,7R$  caractéristique du comportement global

Avec  $V_p^*$  la vitesse à  $0,7R$ , le modèle dynamique de la poussée devient :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t}$$

# Simplification du modèle dynamique

$$T = 2\rho \int_{A_0} V_p (V_p - V_a) dA_0 + \rho \int_{A_0} l \frac{\partial V_p}{\partial t} dA_0$$

## Hypothèses de modélisation dynamique

- Vitesse d'avance nulle
- Déformation du profil  $P_{V_p}$  faible en dynamique
- Comportement à  $0,7R$  caractéristique du comportement global

Avec  $V_p^*$  la vitesse à  $0,7R$ , le modèle dynamique de la poussée devient :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t}$$

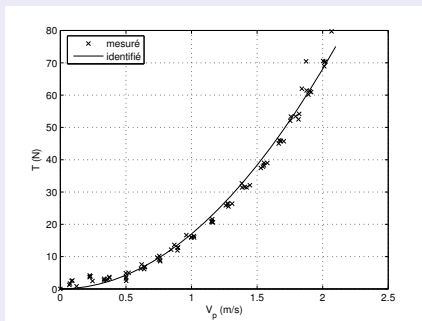
⇒ Modèle similaire proposé dans la littérature mais obtenu par transposition des résultats de la mécanique du solide

# Identification en régime statique

## Constante de poussée hydrodynamique

- Essais en eau en régime statique
  - Modèle linéaire par rapport au paramètre  $a_T$
- ⇒ Identification à l'aide des moindres carrés

$$T = a_T |V_p^*| V_p^*$$



# Identification en régime dynamique

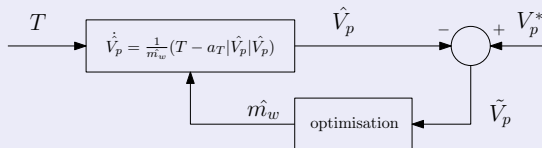
- Modèle linéaire vis-à-vis du paramètre  $m_w$  mais estimateur des moindres carrés biaisé (dérivée numérique de la vitesse bruitée)
- ⇒ Identification par une méthode de prédiction de l'erreur

## Identification en régime dynamique

- Modèle linéaire vis-à-vis du paramètre  $m_w$  mais estimateur des moindres carrés biaisé (dérivée numérique de la vitesse bruitée)
- ⇒ Identification par une méthode de prédiction de l'erreur

### Procédure d'identification

- Tests à vitesse de rotation variant sinusoidalement
- ⇒ Mesures de la vitesse axiale de l'eau et de la poussée
- Prédiction de la vitesse axiale de l'eau
  - Minimisation de l'erreur quadratique de prédiction de la vitesse axiale
- ⇒ Méthode *Quasi-Newton* de type *BFGS*



# Vérification du modèle dynamique direct

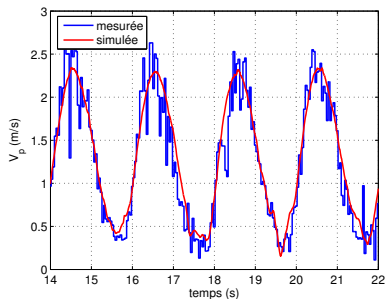
Prédiction de la vitesse axiale de l'eau à partir de la poussée mesurée :

$$\hat{V}_p = \frac{1}{m_w} \int_{t_0}^t \left( T - a_T |\hat{V}_p| \hat{V}_p \right) dt + \hat{V}_{p0}$$

# Vérification du modèle dynamique direct

Prédiction de la vitesse axiale de l'eau à partir de la poussée mesurée :

$$\hat{V}_p = \frac{1}{m_w} \int_{t_0}^t \left( T - a_T |\hat{V}_p| \hat{V}_p \right) dt + \hat{V}_{p0}$$

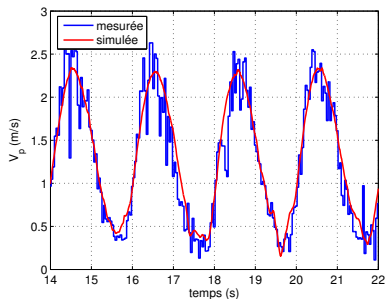


Régime dynamique faible ou quasi-statique ( $f = 0,5 \text{ Hz}$ )

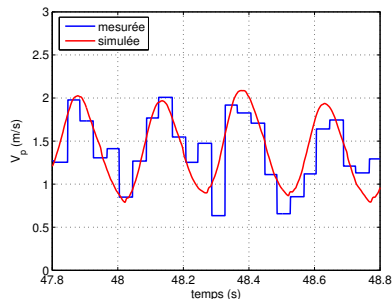
# Vérification du modèle dynamique direct

Prédiction de la vitesse axiale de l'eau à partir de la poussée mesurée :

$$\hat{V}_p = \frac{1}{m_w} \int_{t_0}^t \left( T - a_T |\hat{V}_p| \hat{V}_p \right) dt + \hat{V}_{p0}$$



Régime dynamique faible ou quasi-statique ( $f = 0,5 \text{ Hz}$ )



Régime dynamique fort ( $f = 4 \text{ Hz}$ )



# Vérification du modèle dynamique inverse

Prédiction de la poussée à partir des modèles dynamique et statique :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t} \quad \text{ou} \quad T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

# Vérification du modèle dynamique inverse

Prédiction de la poussée à partir des modèles dynamique et statique :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t} \quad \text{ou} \quad T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

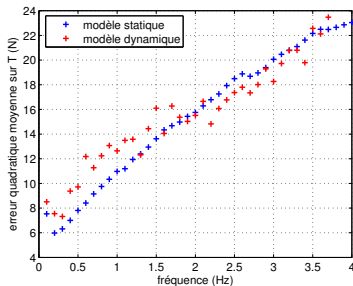
Tests à vitesse de rotation  
sinusoïdale oscillant à une fréquence  
allant de 0.1 *Hz* à 4 *Hz*

# Vérification du modèle dynamique inverse

Prédiction de la poussée à partir des modèles dynamique et statique :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t} \quad \text{ou} \quad T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

Tests à vitesse de rotation  
sinusoïdale oscillant à une fréquence  
allant de 0.1 Hz à 4 Hz

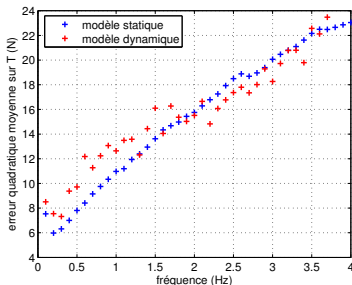


# Vérification du modèle dynamique inverse

Prédiction de la poussée à partir des modèles dynamique et statique :

$$T = a_T |V_p^*| V_p^* + m_w \frac{\partial V_p^*}{\partial t} \quad \text{ou} \quad T = \lambda_T |\Omega| \Omega$$

Tests à vitesse de rotation  
sinusoïdale oscillant à une fréquence  
allant de 0.1 Hz à 4 Hz

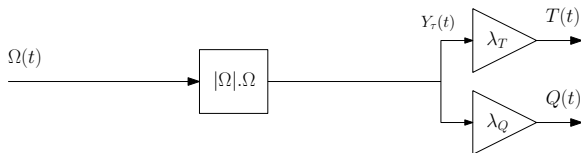


- Erreur de prédiction équivalente à celle du modèle statique
- ⇒ Performances du modèle certainement sous-évaluées
- ⇒ Modèle dynamique de la poussée trop simplifié ?

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice**
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives

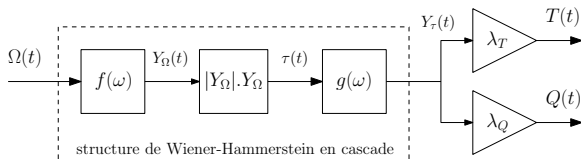
# Modélisation comportementale d'une hélice

Extension dynamique du modèle statique  $\lambda_T/\lambda_Q$  d'une hélice :



# Modélisation comportementale d'une hélice

Extension dynamique du modèle statique  $\lambda_T/\lambda_Q$  d'une hélice :



## Structure en cascade de Wiener-Hammerstein

- Mise en cascade de trois éléments :
  - ⇒ Un élément non-linéaire statique
  - ⇒ Deux fonctions de transfert linéaires en amont et en aval

# Caractéristiques des fonctions de transfert

Fonctions de transfert et leur inverse choisies stables et propres :

- ⇒ Pôles et zéros à partie réelle strictement négative
- ⇒ Même nombre de pôles et de zéros (degré relatif nul)



# Caractéristiques des fonctions de transfert

Fonctions de transfert et leur inverse choisies stables et propres :

- ⇒ Pôles et zéros à partie réelle strictement négative
- ⇒ Même nombre de pôles et de zéros (degré relatif nul)

Equivalence des modèles statique et dynamique à basse fréquence :

$$F(0)^2 G(0) = 1$$

# Caractéristiques des fonctions de transfert

Fonctions de transfert et leur inverse choisies stables et propres :

- ⇒ Pôles et zéros à partie réelle strictement négative
- ⇒ Même nombre de pôles et de zéros (degré relatif nul)

Equivalence des modèles statique et dynamique à basse fréquence :

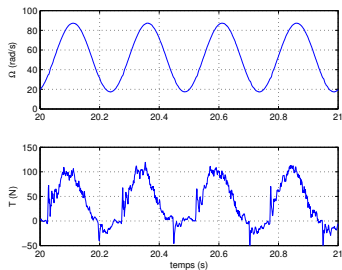
$$F(0)^2 G(0) = 1$$

## Difficultés liées à l'identification

- Modèle non linéaire par rapport aux paramètres à identifier
- Approximation du comportement dynamique de l'hélice
- ⇒ Existence d'une solution optimale peu probable

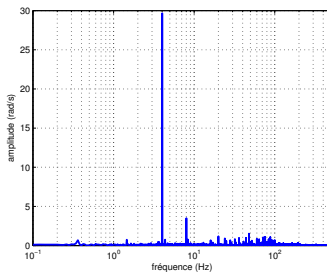
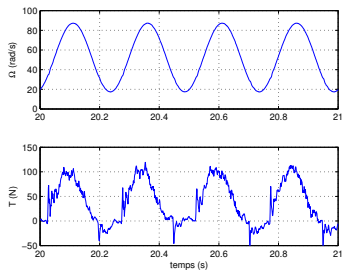
# Réponse harmonique du propulseur

Mesure de la poussée en régime harmonique ( $f = 4 \text{ Hz}$ )



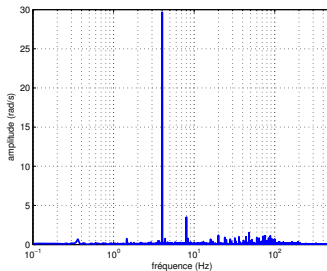
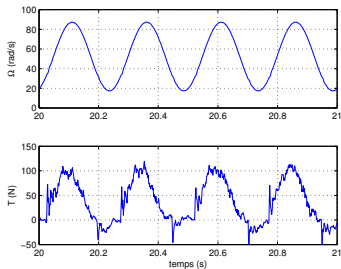
# Réponse harmonique du propulseur

Mesure de la poussée en régime harmonique ( $f = 4 \text{ Hz}$ )



# Réponse harmonique du propulseur

Mesure de la poussée en régime harmonique ( $f = 4 \text{ Hz}$ )



⇒ Poussée mesurée dominée par son fondamental et sa moyenne

## Réponse harmonique du modèle

Série de Fourier de la réponse du modèle à vitesse de rotation positive

$$\hat{T}_0 = \lambda_T \left( \Omega_0^2 + G(0) \frac{F(\omega)^2 \Omega_1^2}{2} \right)$$

$$\hat{T}_1 = \lambda_T G(\omega) F(0) F(\omega) 2\Omega_0 \Omega_1$$

$$\hat{\phi}_1 = \phi_f(\omega) + \phi_g(\omega)$$

$$\hat{T}_2 = \lambda_T G(2\omega) F(\omega)^2 \frac{\Omega_1}{2}$$

$$\hat{\phi}_2 = 2\phi_f(\omega) + \phi_g(2\omega)$$

# Réponse harmonique du modèle

Série de Fourier de la réponse du modèle à vitesse de rotation positive

$$\hat{T}_0 = \lambda_T \left( \Omega_0^2 + G(0) \frac{F(\omega)^2 \Omega_1^2}{2} \right)$$

$$\hat{T}_1 = \lambda_T G(\omega) F(0) F(\omega) 2\Omega_0 \Omega_1$$

$$\hat{\phi}_1 = \phi_f(\omega) + \phi_g(\omega)$$

$$\hat{T}_2 = \lambda_T G(2\omega) F(\omega)^2 \frac{\Omega_1}{2}$$

$$\hat{\phi}_2 = 2\phi_f(\omega) + \phi_g(2\omega)$$

- Seulement deux harmoniques

# Réponse harmonique du modèle

Série de Fourier de la réponse du modèle à vitesse de rotation positive

$$\hat{T}_0 = \lambda_T \left( \Omega_0^2 + G(0) \frac{F(\omega)^2 \Omega_1^2}{2} \right)$$

$$\hat{T}_1 = \lambda_T G(\omega) F(0) F(\omega) 2\Omega_0 \Omega_1$$

$$\hat{\phi}_1 = \phi_f(\omega) + \phi_g(\omega)$$

$$\hat{T}_2 = \lambda_T G(2\omega) F(\omega)^2 \frac{\Omega_1}{2}$$

$$\hat{\phi}_2 = 2\phi_f(\omega) + \phi_g(2\omega)$$

- Seulement deux harmoniques
  - Contribution faible du second harmonique
- ⇒ Poussée calculée dominée par son fondamental et sa moyenne



# Identification du modèle comportemental

## Méthode harmonique

- Vitesse de rotation variant sinusoidalement :  $\Omega(t) = \Omega_0 + \Omega_1 \sin(\omega t)$
  - Réponses harmoniques de l'hélice et de son modèle :
- ⇒ Mesure (hélice) ou calcul analytique (modèle)
- Simplification par une approximation au premier harmonique
  - Fonction objectif :
- $$\|T_0(\omega) - \hat{T}_0(\omega)\|^2 + \|T_1(\omega) - \hat{T}_1(\omega)\|^2 + \gamma \|\phi_1(\omega) - \hat{\phi}_1(\omega)\|^2$$
- Minimisation de la fonction objectif
- ⇒ Méthode *Quasi-Newton* de type *BFGS*

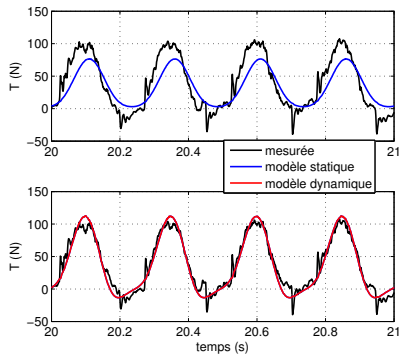
# Identification du modèle comportemental

## Méthode harmonique

- Vitesse de rotation variant sinusoidalement :  $\Omega(t) = \Omega_0 + \Omega_1 \sin(\omega t)$
  - Réponses harmoniques de l'hélice et de son modèle :
- ⇒ Mesure (hélice) ou calcul analytique (modèle)
- Simplification par une approximation au premier harmonique
  - Fonction objectif :
- $$\|T_0(\omega) - \hat{T}_0(\omega)\|^2 + \|T_1(\omega) - \hat{T}_1(\omega)\|^2 + \gamma \|\phi_1(\omega) - \hat{\phi}_1(\omega)\|^2$$
- Minimisation de la fonction objectif
- ⇒ Méthode *Quasi-Newton* de type *BFGS*
- ⇒ Bons résultats avec 1 pôle (et 1 zéro) pour  $f(\omega)$  et 2 pôles (et 2 zéros) pour  $g(\omega)$

# Résultat de l'identification

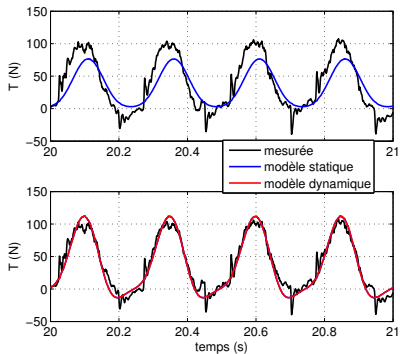
Essais à vitesse de rotation sinusoidale :



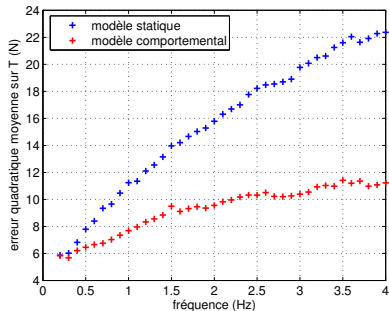
$$f = 4 \text{ Hz}$$

# Résultat de l'identification

Essais à vitesse de rotation sinusoidale :



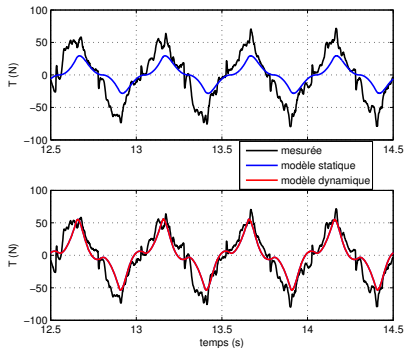
$$f = 4 \text{ Hz}$$



$$f = 0,1 \text{ Hz à } 4 \text{ Hz}$$

# Résultat de l'identification

Essai à vitesse de rotation triangulaire de moyenne nulle oscillant à 2 Hz



⇒ Amélioration notable de la prédiction de la poussée

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée**
- 6 Conclusions et perspectives

# Commandes en poussée

Commande en poussée d'un propulseur naval sans mesure de la poussée

## Performances attendues

- Précision importante en régime dynamique à basse vitesse d'avance
  - Compensation ou rejet des perturbations en conditions dégradées
- ⇒ Ventilation de l'hélice (immersion insuffisante)

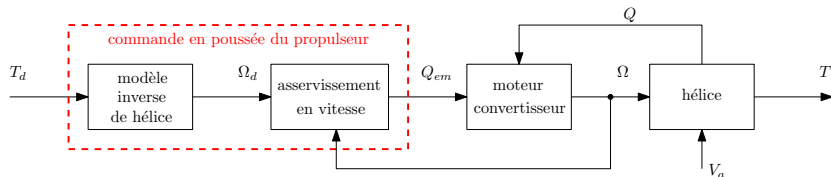
## Commandes étudiées

- 2 commandes par retour de sortie (la vitesse de rotation)
- ⇒ avec ou sans boucle de vitesse
- 1 commande par retour d'état reconstruit (observation du couple)
- ⇒ La commande en poussée doit calculer le couple électromagnétique qui permet d'assurer que la poussée réelle tend vers la poussée désirée

# Commandes avec boucle de vitesse

Principe :

⇒ Asservir la vitesse de rotation de l'hélice pour contrôler la poussée



- Calcul de la vitesse de rotation de référence à partir de la poussée de référence

⇒ Inversion du modèle statique ou dynamique de l'hélice

⇒ Commande statique ou dynamique en vitesse

- Asservissement de la vitesse de rotation

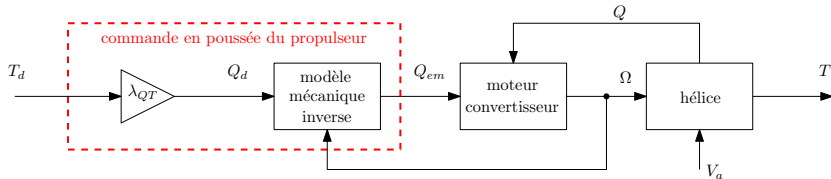
⇒ Régulateur IP (placement de pôles)



# Commande en couple

Principe :

⇒ Asservir le couple hydrodynamique pour contrôler la poussée



- Calcul du couple hydrodynamique de référence à partir de la poussée de référence

⇒ Relation entre le couple et la poussée

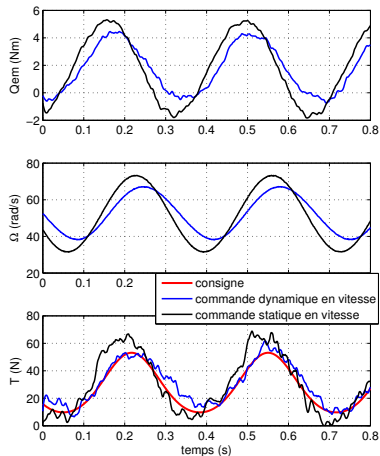
- Commande du couple hydrodynamique

⇒ Pas de boucle fermée sur le couple hydrodynamique

⇒ Inversion du modèle mécanique du moteur

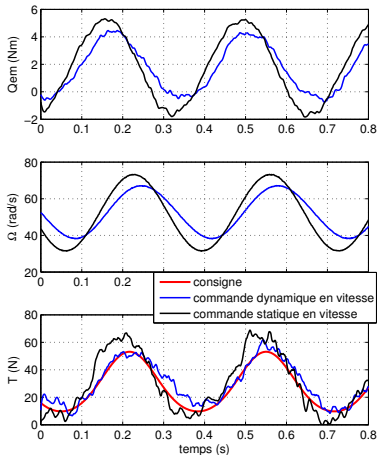
# Comparaisons des performances dynamiques

Consigne de poussée périodique oscillant à 3 Hz



# Comparaisons des performances dynamiques

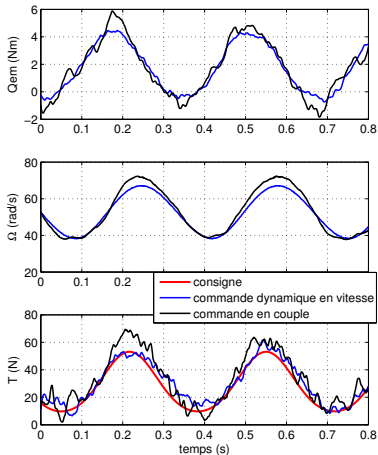
Consigne de poussée périodique oscillant à 3 Hz



- Commande dynamique en vitesse plus performante
  - ⇒ Plus grande précision
  - ⇒ Sollicitation moins importante du moteur

# Comparaisons des performances dynamiques

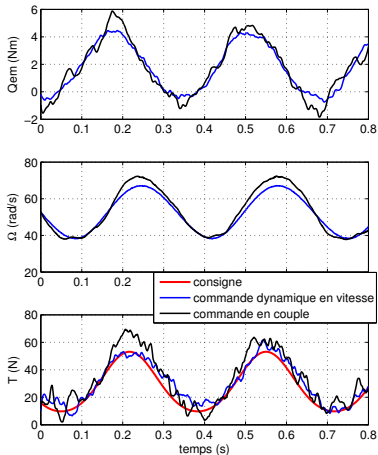
Consigne de poussée périodique oscillant à 3 Hz



- Commande dynamique en vitesse plus performante
  - ⇒ Plus grande précision
  - ⇒ Sollicitation moins importante du moteur

# Comparaisons des performances dynamiques

Consigne de poussée périodique oscillant à 3 Hz

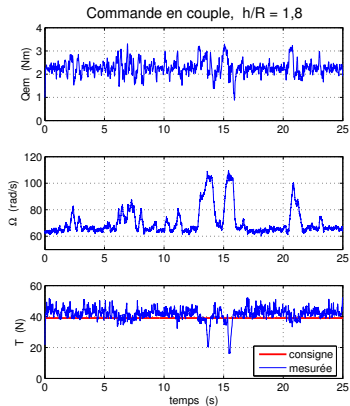
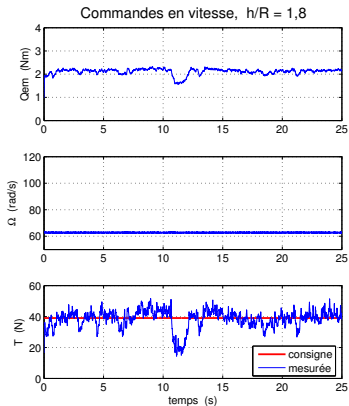


- Commande dynamique en vitesse plus performante
  - ⇒ Plus grande précision
  - ⇒ Sollicitation moins importante du moteur
- Commande en couple
  - ⇒ Léger problème de robustesse

# Comparaisons des performances en ventilation

- Consigne de poussée constante et hélice faiblement immergée

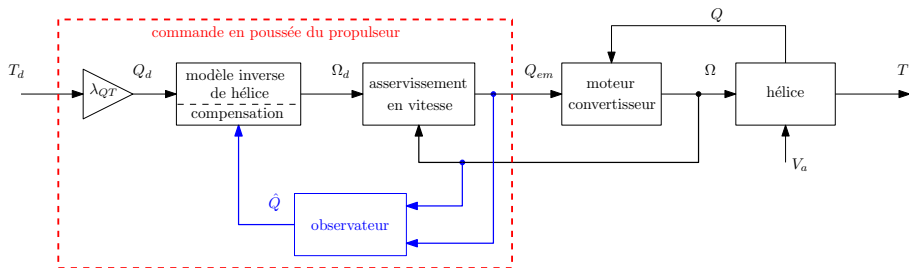
⇒ ventilation



⇒ Meilleure compensation des pertes de poussée avec la commande en couple

# Commande avec observation du couple hydrodynamique

- La commande s'appuie sur :
  - ⇒ Une boucle de vitesse pour gagner en robustesse vis-à-vis des paramètres mécaniques
  - ⇒ Un observateur de couple hydrodynamique
  - ⇒ Une boucle sur le couple hydrodynamique qui s'appuie sur le modèle dynamique comportemental de l'hélice



# Observation du couple hydrodynamique

## Observateur de Luenberger



- Modèle d'état étendu du propulseur :
  - ⇒ Modèle mécanique non linéaire
  - ⇒ Couple hydrodynamique supposé constant  $\dot{Q} = 0$
- Observabilité vérifiée partout
- Linéarisation par injection de sortie (compensation des frottements secs)
- Réglage de la dynamique par placement de pôles



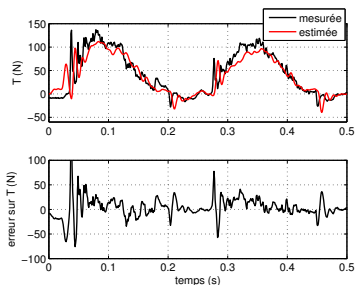
# Validation de l'observateur

- Couple hydrodynamique non mesuré
- ⇒ Comparaison de la poussée estimée :  $\hat{T} = \lambda_{TQ} \hat{Q}$

# Validation de l'observateur

- Couple hydrodynamique non mesuré

⇒ Comparaison de la poussée estimée :  $\hat{T} = \lambda_{TQ}\hat{Q}$

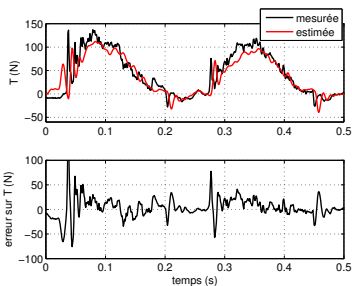


⇒ Bonnes performances  
dynamiques (4 Hz)

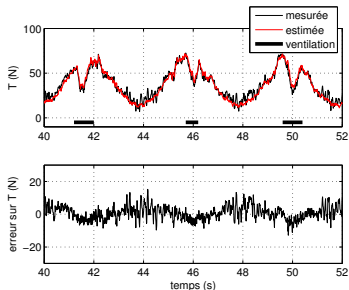
# Validation de l'observateur

- Couple hydrodynamique non mesuré

⇒ Comparaison de la poussée estimée :  $\hat{T} = \lambda_{TQ} \hat{Q}$

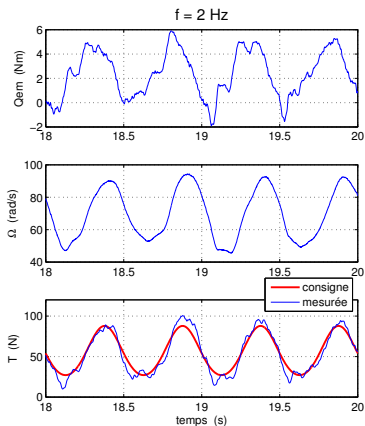


⇒ Bonnes performances dynamiques (4 Hz)



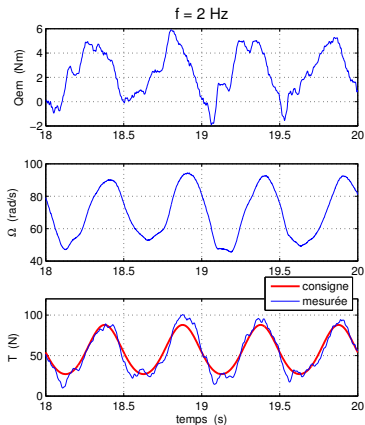
⇒ Ventilation bien prise en compte

# Performances de la commande proposée

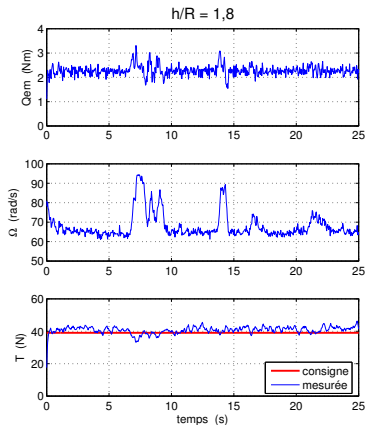


⇒ Bonnes performances  
dynamiques

# Performances de la commande proposée



⇒ Bonnes performances dynamiques



⇒ Excellente compensation des pertes de poussée

- 1 Introduction
- 2 Modèle quasi-statique d'un propulseur
- 3 Modélisation physique d'une hélice
- 4 Modélisation comportementale d'une hélice
- 5 Commande en poussée
- 6 Conclusions et perspectives**

# Conclusions (1/2)

- Problème pluridisciplinaire
  - ⇒ Hydrodynamique, Electromécanique, Automatique
- Travail exploratoire
  - ⇒ Thème récent et peu abordé dans la littérature
  - ⇒ Peu d'informations sur le comportement dynamique des hélices
- Lien permanent entre la théorie et l'expérimentation
  - ⇒ Modélisations physique et comportementale de l'hélice
  - ⇒ Identification des modèles existants et originaux
  - ⇒ Validation des lois de commande

## Conclusions (2/2)

- Approche personnelle
  - ⇒ Modélisation dynamique comportementale d'une hélice pour contourner les difficultés liées à la modélisation physique
  - ⇒ Méthode d'identification harmonique rapide et efficace
  
- Commande originale pour les opérations à vitesse d'avance nulle
  - ⇒ Performances dynamiques importantes (grâce au modèle comportemental)
  - ⇒ Compensation des pertes de poussée



# Perspectives (1/2)

- D'une manière générale :
  - ⇒ Extension des travaux de modélisation et de commande au fonctionnement à vitesse d'avance non nulle
  - ⇒ Essais en bassin de traction (ECN)
  - ⇒ Simulation numérique d'un propulseur
- Concernant la modélisation :
  - ⇒ Approfondir la modélisation physique de l'hélice et la validation expérimentale du modèle dynamique physique
  - ⇒ Vérifier l'adaptabilité de la structure du modèle comportemental proposée pour des hélices différentes (nombre de pales, diamètre, ...)
  - ⇒ Rapprocher les résultats de la modélisation physique et comportementale de l'hélice

## Perspectives (2/2)

- Concernant la commande :
  - ⇒ Evaluation de la robustesse des lois proposées (paramètres influents)
- Etude des effets de la houle sur les performances dynamiques des propulseurs et de leur commande
  - ⇒ Essais en bassin de houle (ECN)
  - ⇒ Simulation numérique

Merci de votre attention