

MODELISATION ET COMMANDE EN POUSSEE DE MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS EN PROPULSION NAVALE

Soutenance de thèse de :

Cédric GUIBERT

Directeur de thèse : M. Luc LORON

Co-encadrante : Mme Nadia AIT-AHMED

Contexte (1/2)

- > L'exploitation des mers et des océans est en plein essors.
- > Utilisation de plus en plus intensive des robots sous-marins autonomes et télé-opérés.
- > Nombreux domaines d'applications :



Militaires



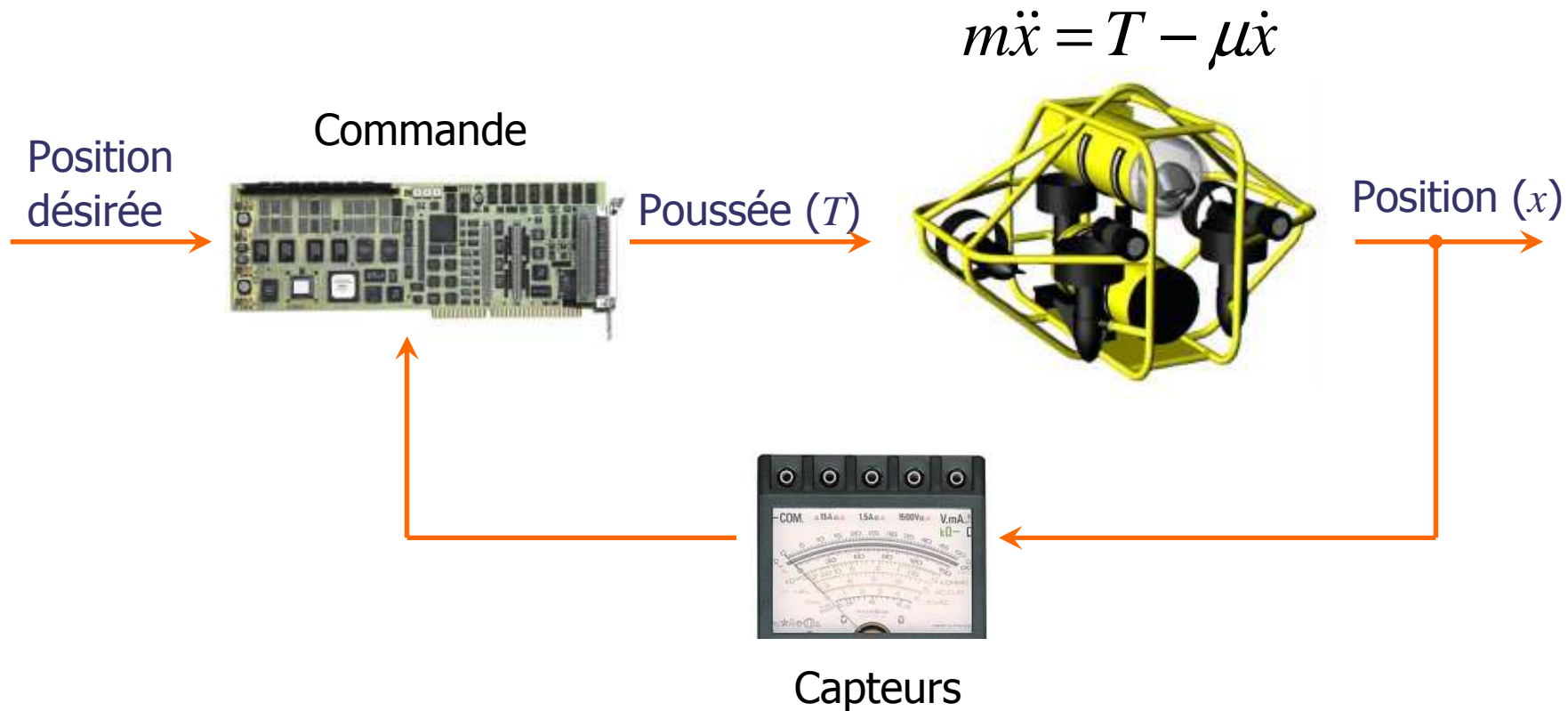
Scientifiques



Commerciaux

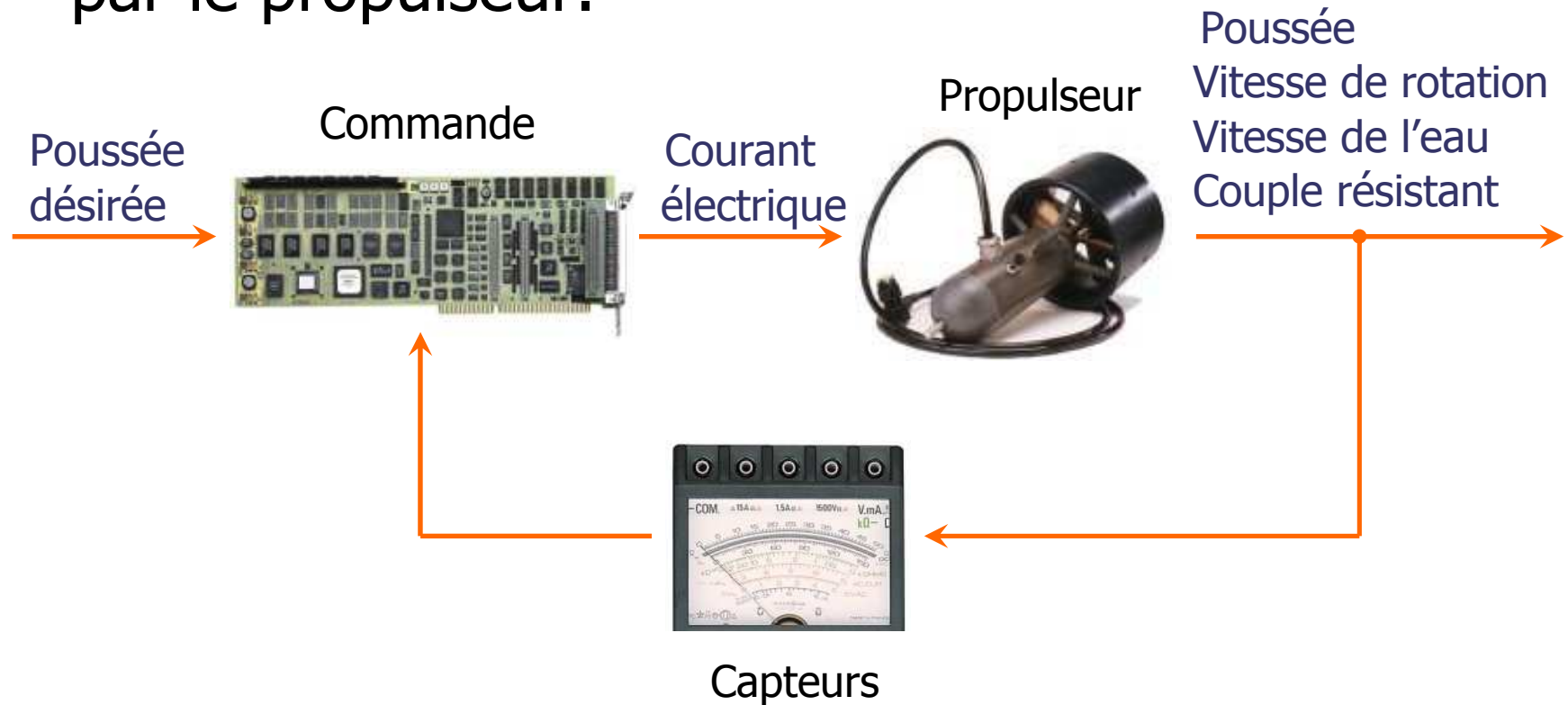
Contexte (2/2)

- > De nombreuses applications nécessitent un contrôle précis du positionnement.



Problématique

- > Améliorer le contrôle en position de véhicules sous-marins par la maîtrise de la poussée générée par le propulseur.



1/ Modélisation du propulseur

Objectifs : simulation et réalisation de commandes

- Modélisation du moteur
- Relation Hydrodynamique de Base :
 - Principe
 - Domaine de validité
- Modélisation de l'hélice
 - Régime permanent
 - Pseudo-régime permanent (K_T, K_Q)
 - Aile portante (quatre quadrants)

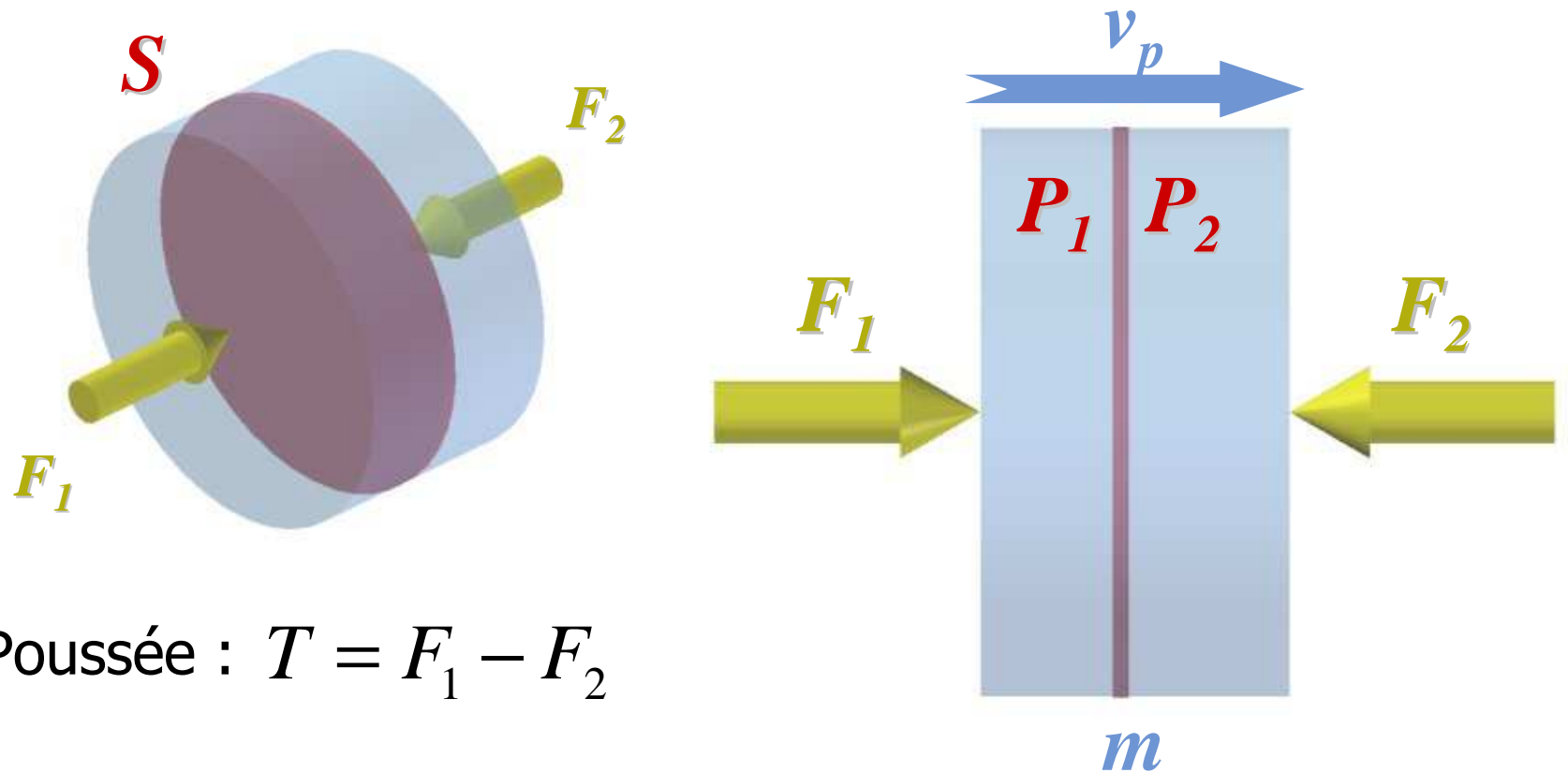
Modèle du moteur

- > Moteur électrique + commande = moteur à courant continu.
- > La constante de temps électrique est négligeable devant les autres constantes de temps.

The diagram shows the motor model equation $\Gamma_e = K_m I_r = J_m \dot{\Omega} + f_s + f_v \Omega + Q$ enclosed in a light blue box with an orange border. Blue arrows point from descriptive labels to the corresponding terms in the equation:

- Constante de couple (points to K_m)
- Inertie mécanique (points to J_m)
- Couple hydrodynamique (points to Q)
- Couple électromagnétique (points to Γ_e)
- Courant électrique (points to I_r)
- Frottements secs et visqueux (points to f_s)
- Vitesse de rotation (points to Ω)

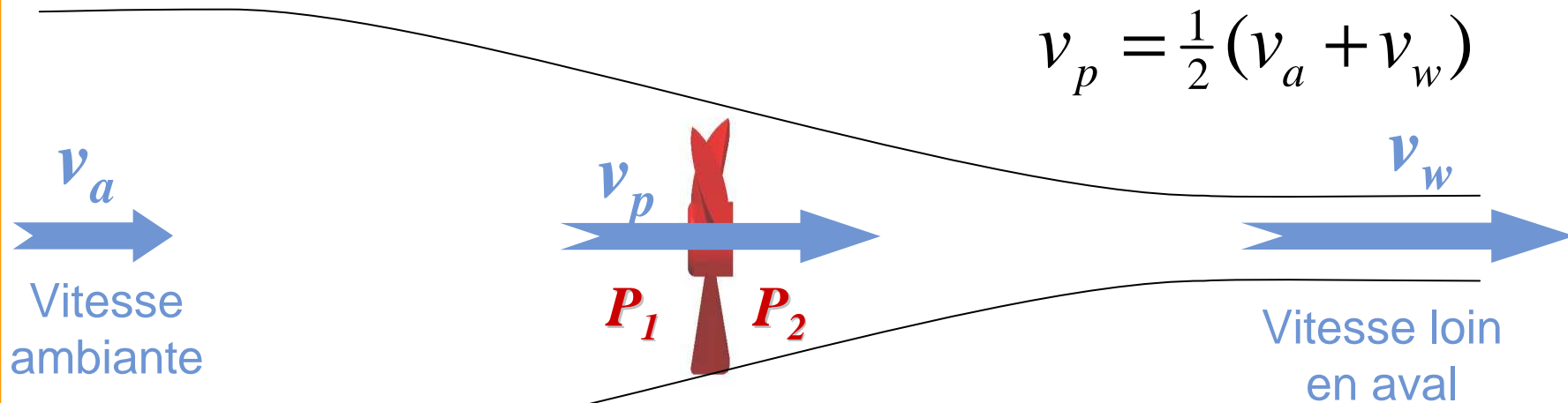
Principe fondamental de la dynamique



Poussée : $T = F_1 - F_2$

$$m\dot{v}_p = T + S(P_2 - P_1)$$

Application de la loi de Bernoulli



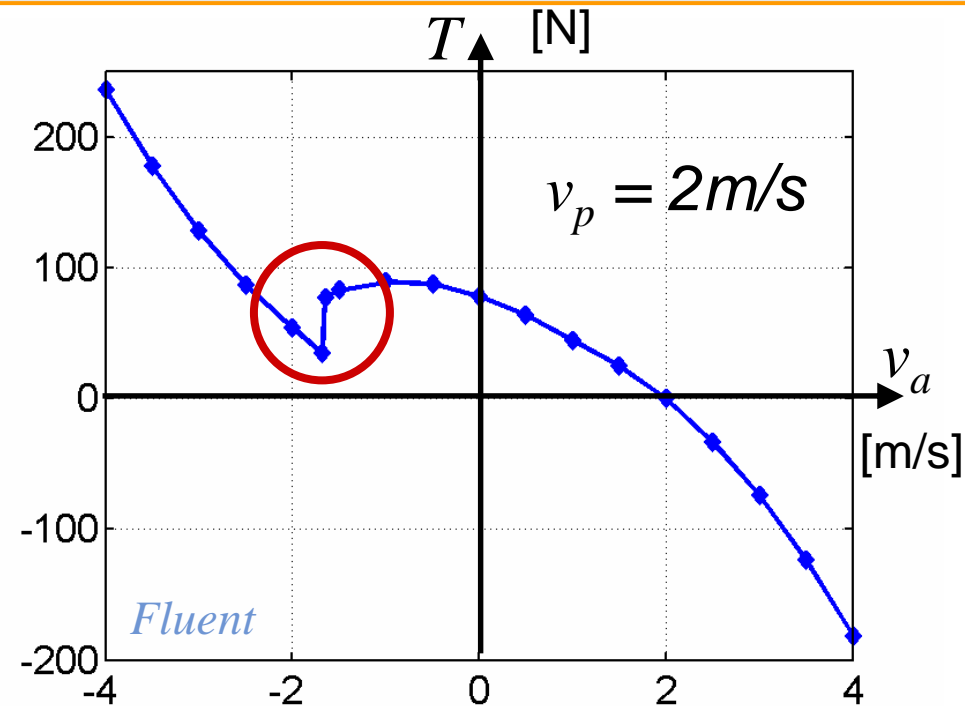
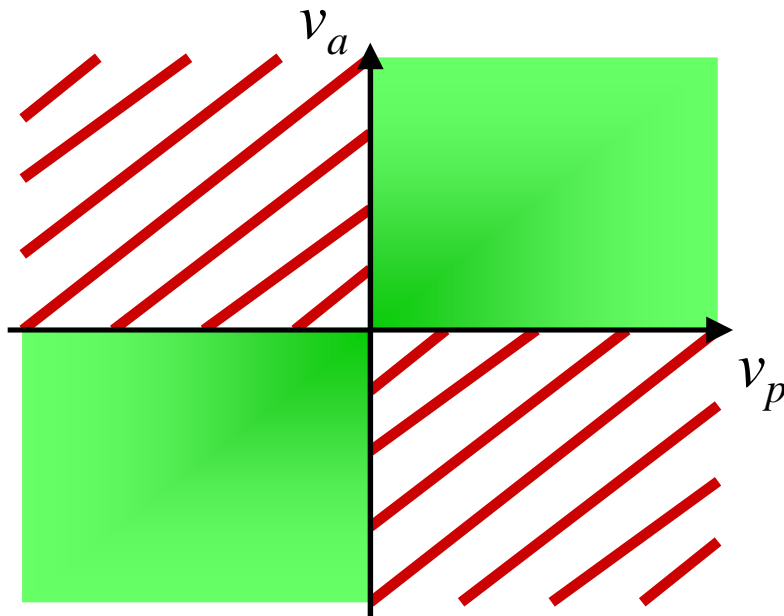
$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho (v_w^2 - v_a^2)$$

$$m \dot{v}_p = T + 2 \cdot \rho S |v_p| (v_p - v_a)$$

Coef. de masse ajoutée

Coef. de flux

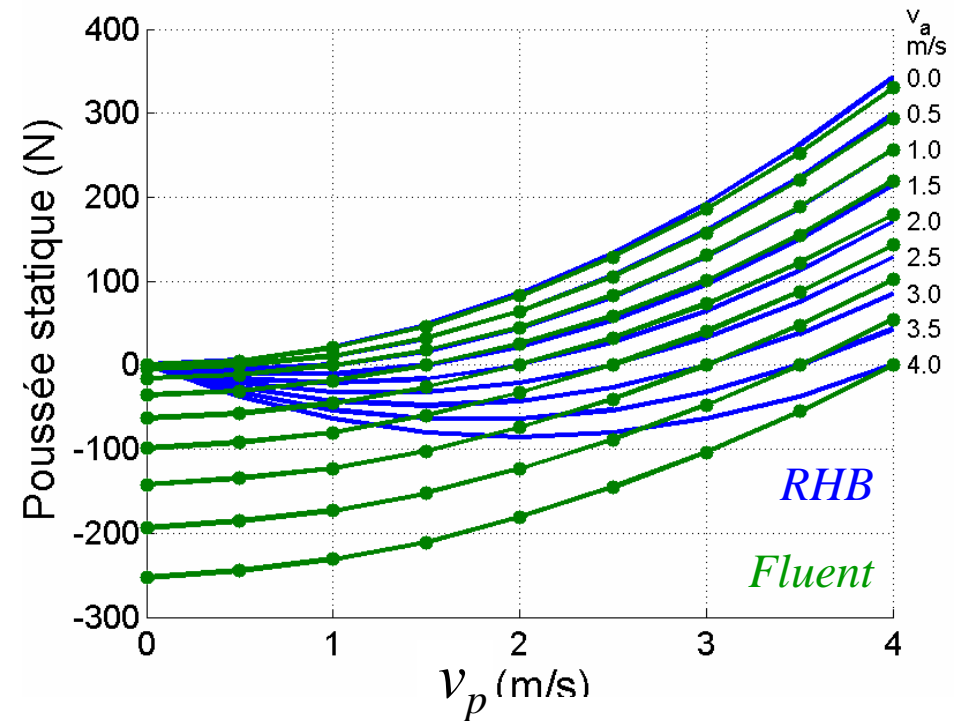
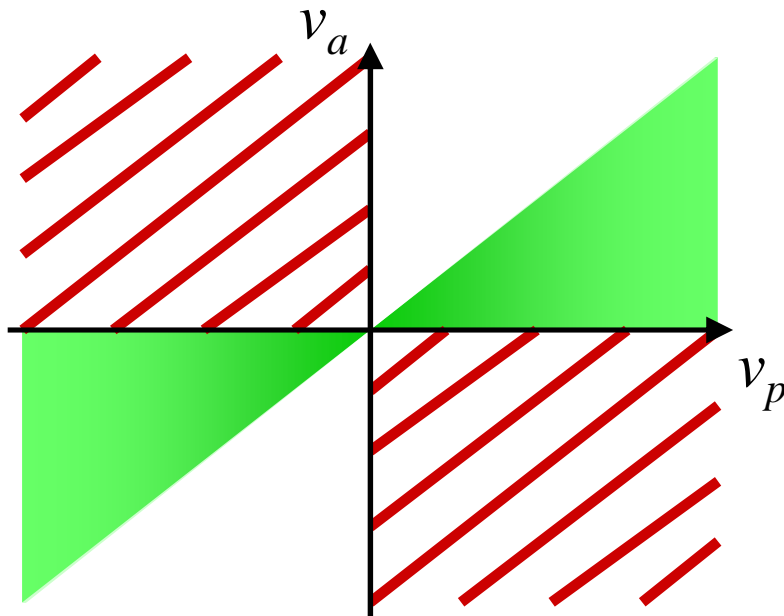
Domaines de validité (1/2)



> Hypothèse : v_p et v_a de même signe.

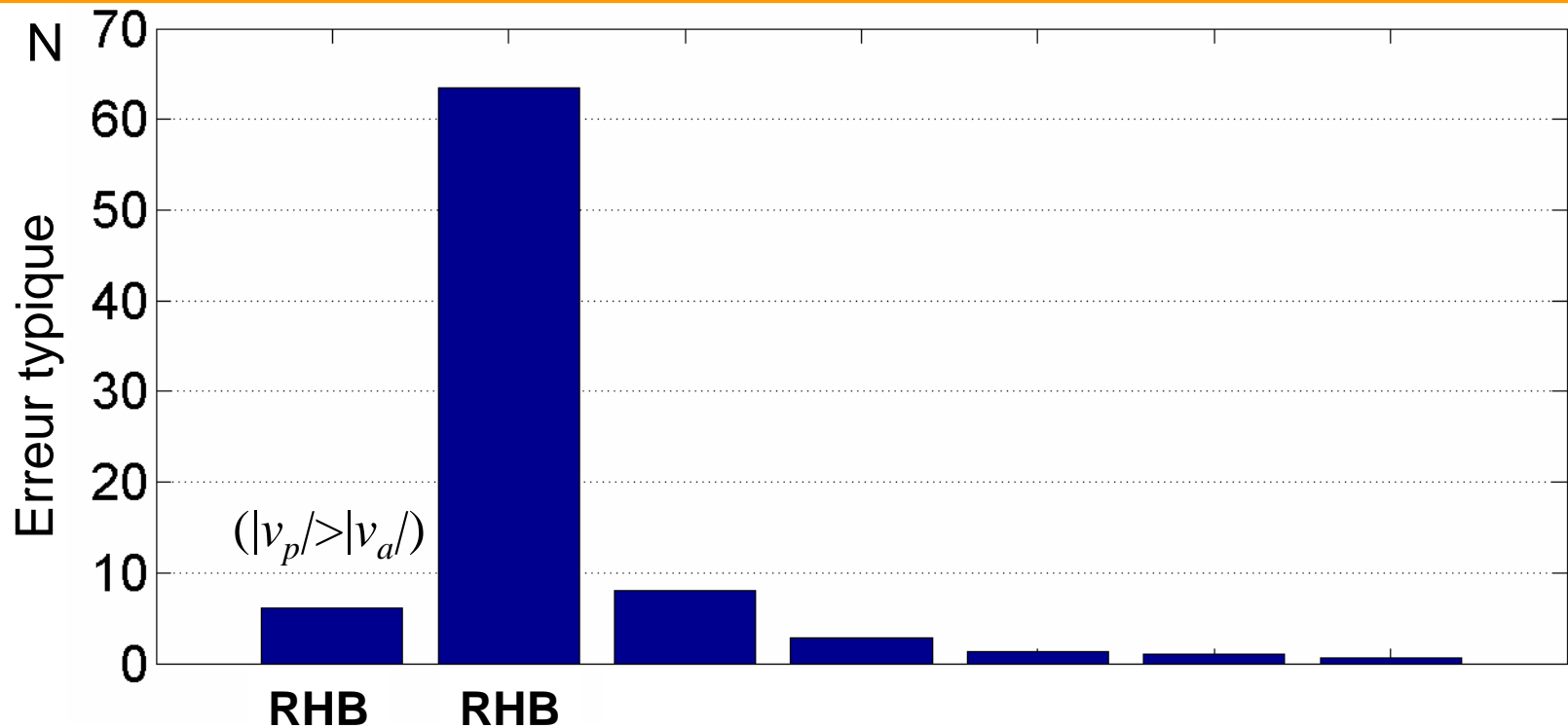
> Simulation Fluent : si v_p et v_a de signes contraires, difficile, voire impossible de modéliser.

Domaines de validité (2/2)



- > D'après les simulations, la relation hydrodynamique de base n'est valide que pour $|v_p| > |v_a|$.
- > MAIS : possibilité d'étendre le modèle à $|v_p| < |v_a|$.

Extension à 2 quadrants

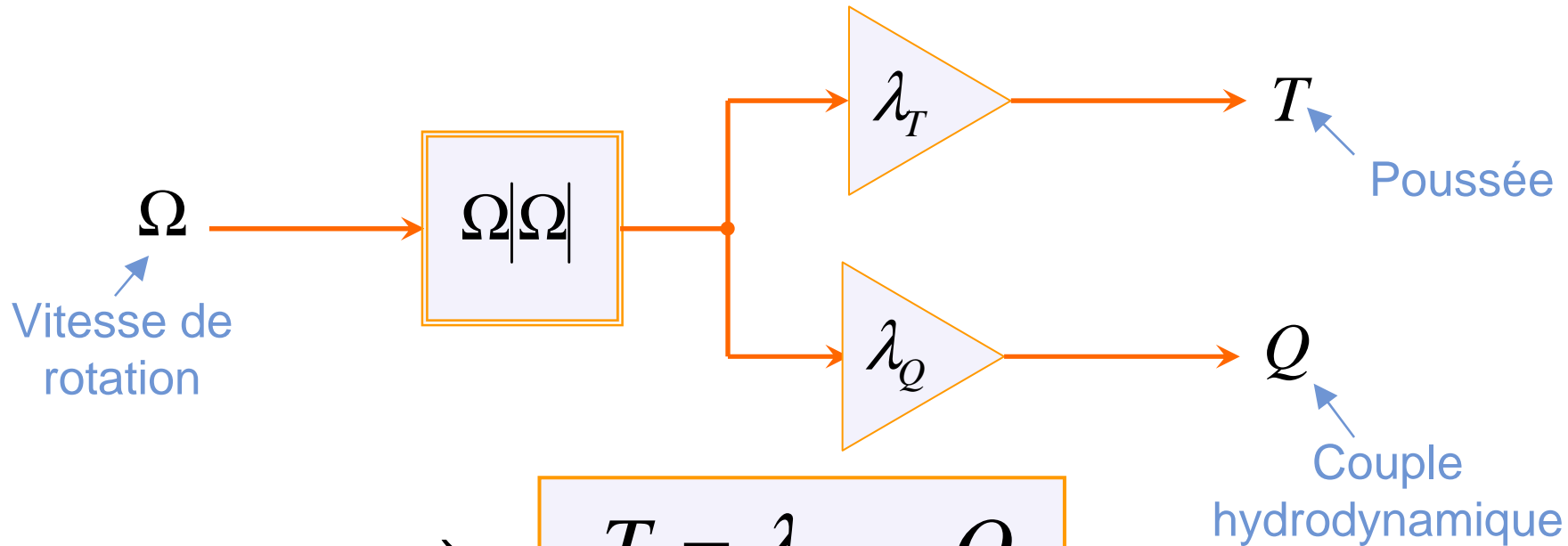


$$S(P_2 - P_1) = \mathbf{P}_n(v_p, v_a) \cdot (v_p - v_a)$$

$> n = 2 \Rightarrow$ erreur typique de 3 N

Modèle en régime permanent

[Yoerger, 1990 – Whitcomb, 1995]

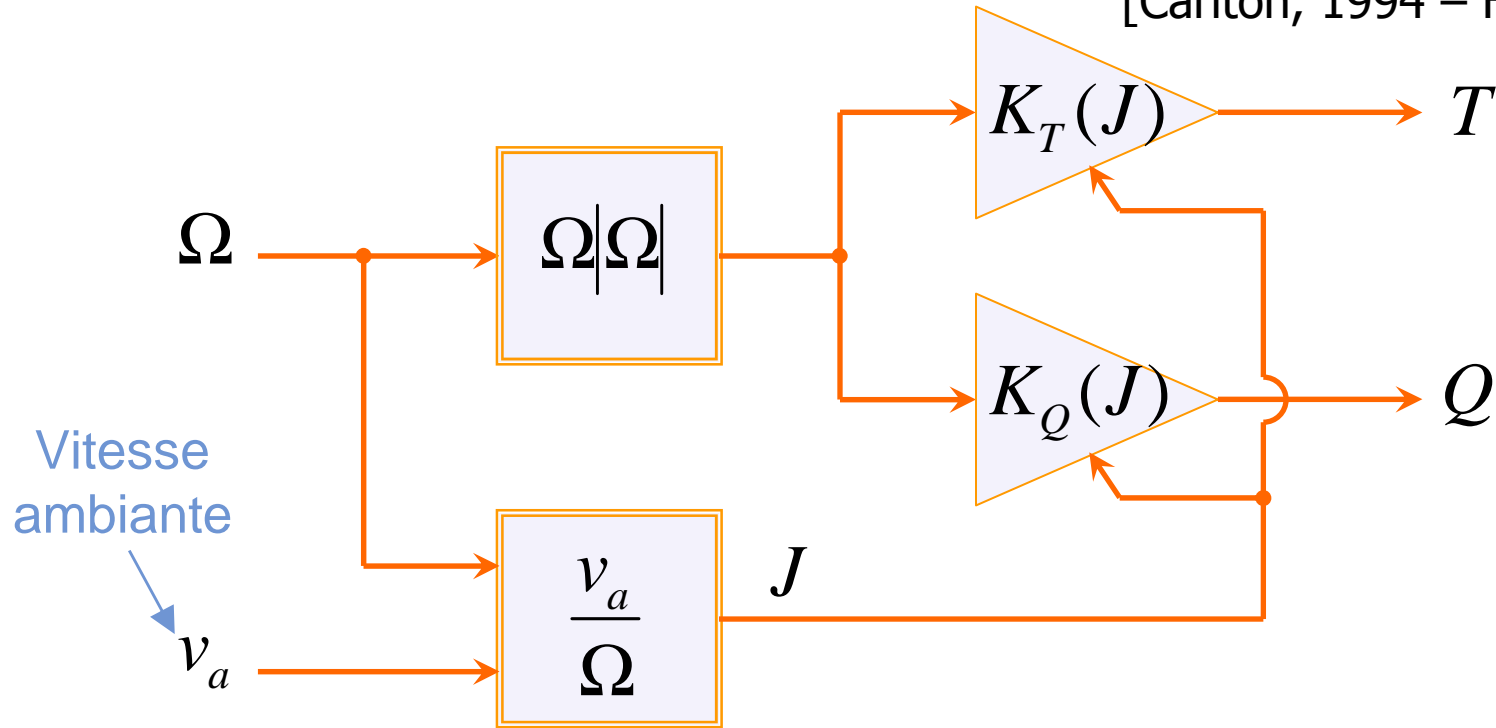


$$\Rightarrow T = \lambda_{T/Q} \cdot Q$$

- > Ne prend pas en compte la dynamique
- > Ne prend pas en compte la vitesse ambiante v_a

Modèle en régime pseudo-permanent

[Carlton, 1994 – Fossen, 2000]

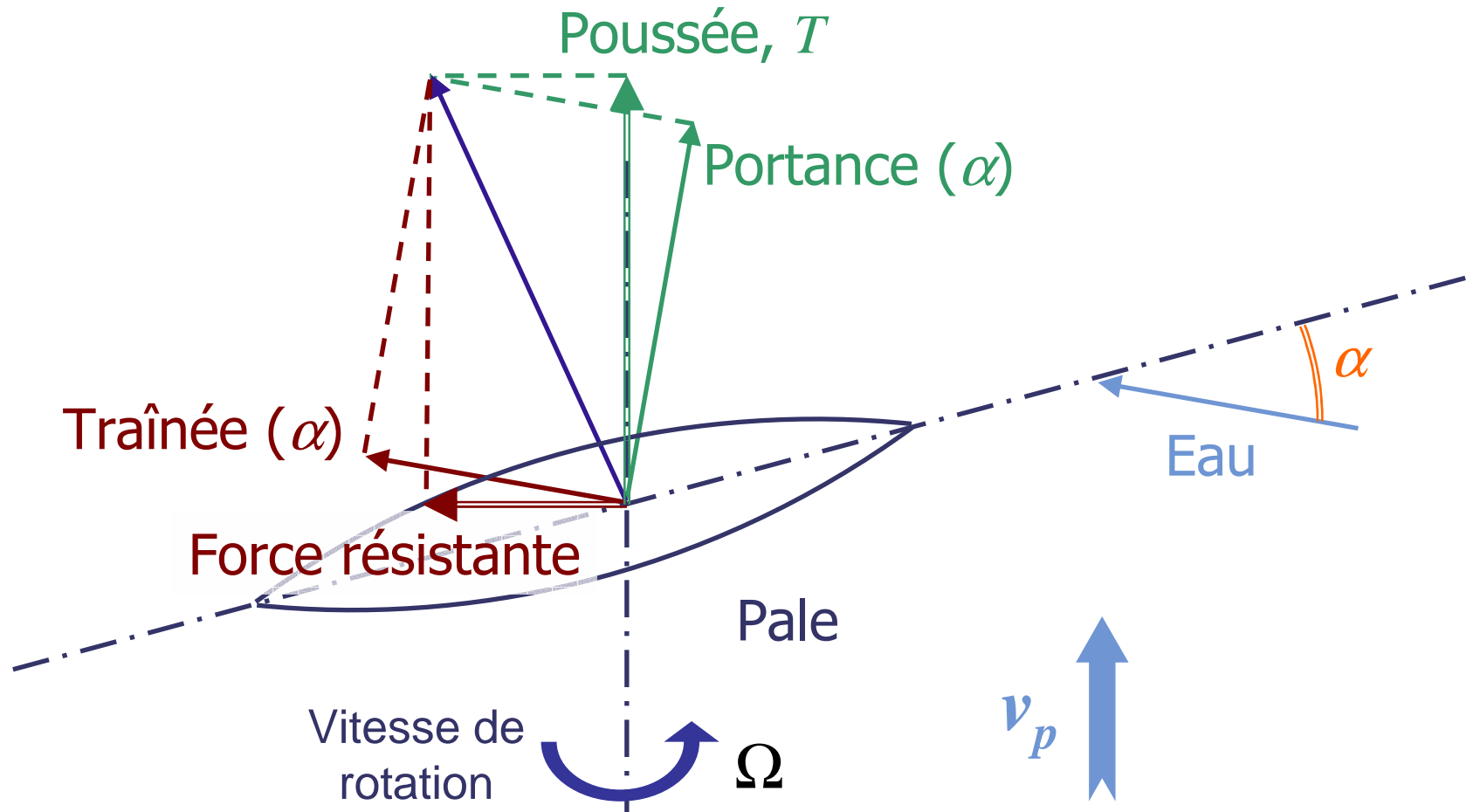


- > Ne prend pas en compte la dynamique
- > Valide uniquement pour v_p , v_a et Ω de signe donné

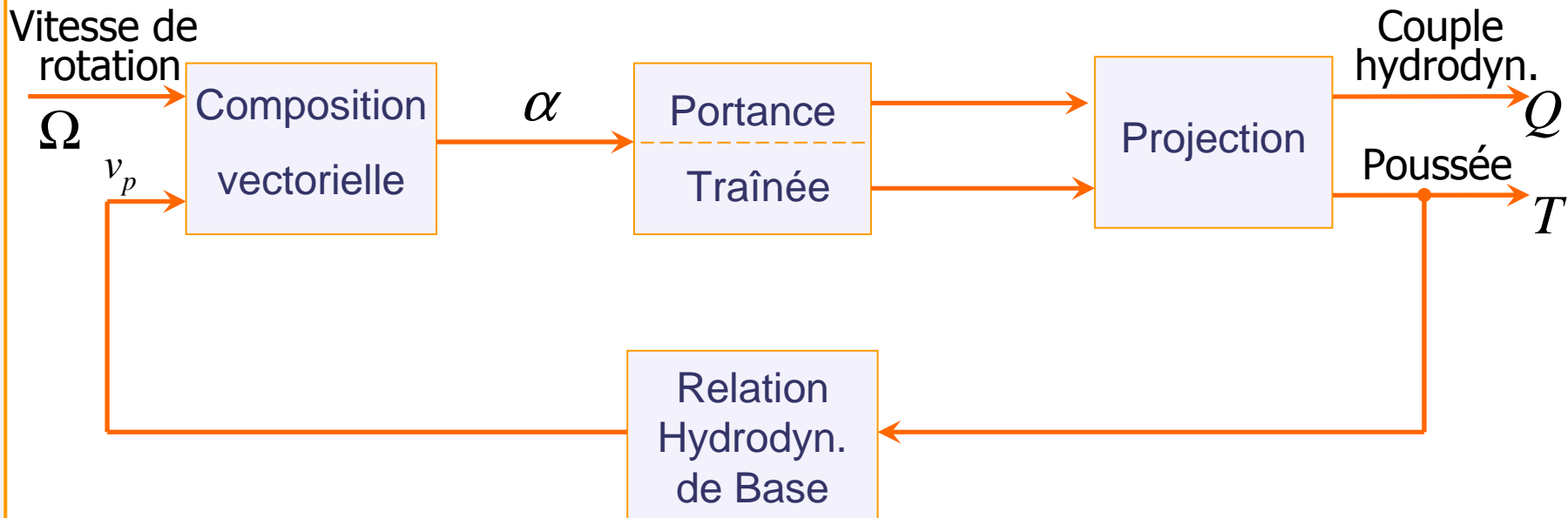
Modèle de l'aile portante (1/2)

[Healey, 1995 – Bachmayer, 2000]

- ▶ Pale d'hélice = aile d'avion
- ▶ Somme des forces ramenée à une seule pale.



Modèle de l'aile portante (2/2)



- > Modèle valide en régime dynamique
- > Performances limitées par la RHB :
 - Relation partiellement empirique
 - Limite l'exactitude du modèle à 2 quadrants

2/ Commande en poussée

Objectif : contrôler la poussée d'un propulseur **sans utiliser de capteur de force de poussée**.

- Commandes issues de la littérature : FF, FBV, MBV.
- Commandes originales :
 - MBV modifiée
 - Commandes par estimation de la poussée
- Etude en simulation des lois de commandes

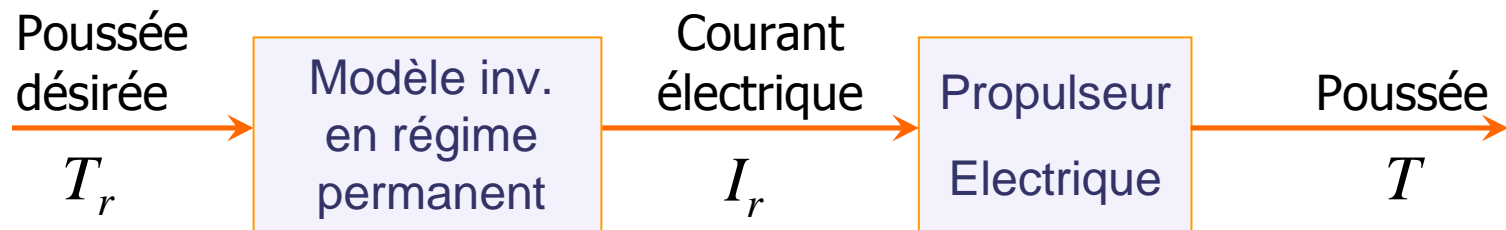
Commande FF

Fixed-Feedforward control = commande en boucle ouverte
[Whitcomb & Yoerger, 1999]

> Hypothèses :

- Régime permanent : $T = \lambda_{T/Q} \cdot Q$
- Pas de frottements : $\Gamma_e = K_m I_r = Q$

$$T = (K_m \cdot \lambda_{T/Q}) I_r$$



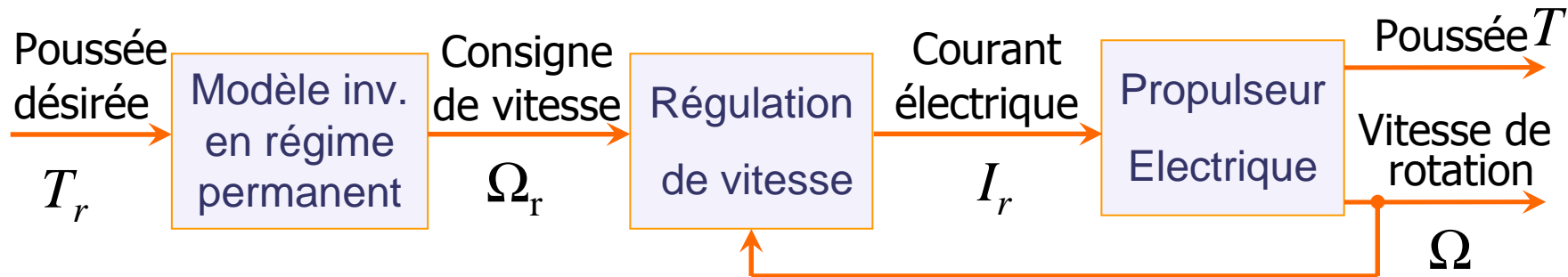
> Peu précise en dynamique

> Mauvaise robustesse

Commande FBV

Feedback Velocity control = commande par régulation de vitesse
[Whitcomb & Yoerger, 1999]

> FF + boucle de régulation en vitesse



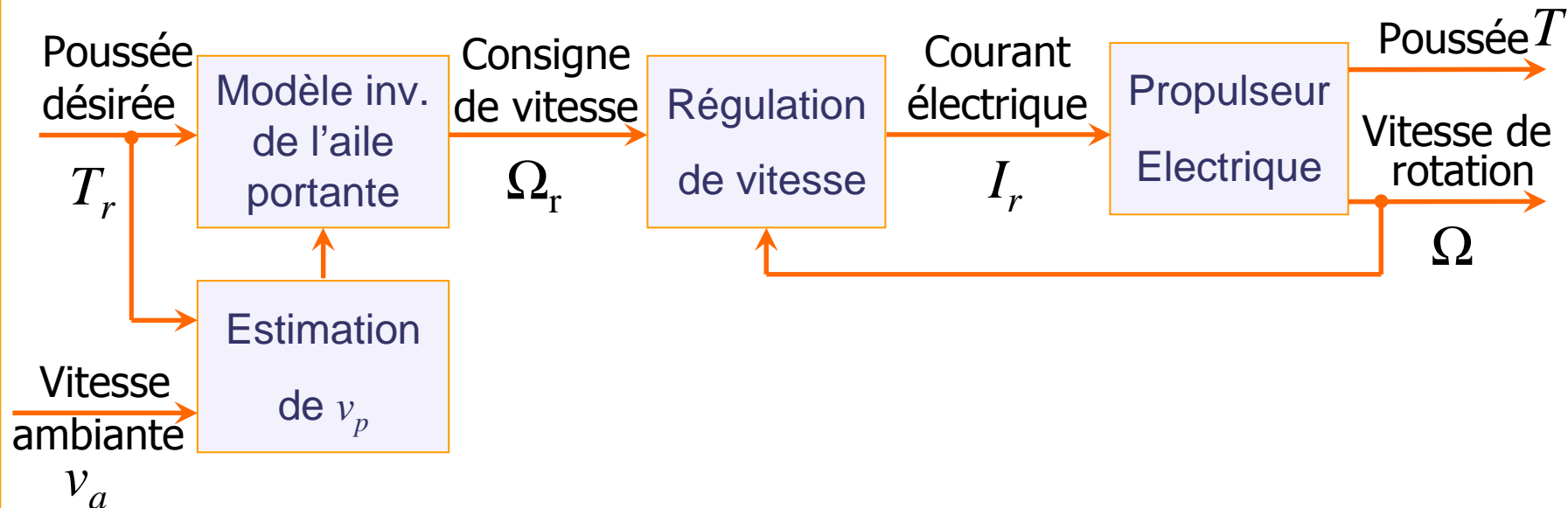
> Peu précis en dynamique

> Meilleure robustesse électromécanique

Commande MBV (1/2)

Model Based Velocity control
[Whitcomb & Yoerger, 1999]

> FBV + modèle inverse de l'aile portante



> Estimation de v_p par la Relation Hydrodyn. de Base

Commande MBV (2/2)

Model Based Velocity control
[Whitcomb & Yoerger, 1999]

> Avantages :

- + Prise en compte de la dynamique
- + Bonne robustesse électromécanique

> Inconvénients :

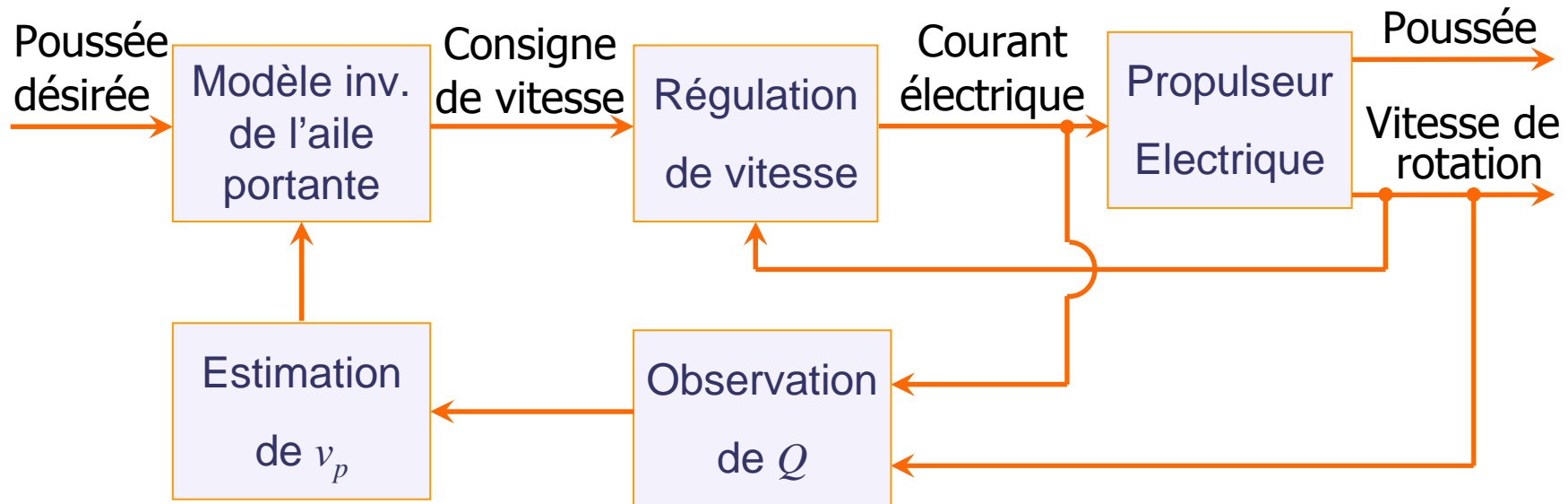
- Faible robustesse hydrodynamique
- v_p déterminée à partir de la consigne de poussée
- Forte dépendance à la Relation Hydrodyn. de Base

> Améliorations proposées :

- Estimer v_p qu'à partir des grandeurs mesurées
- Utiliser le modèle de l'aile portante plutôt que la RHB

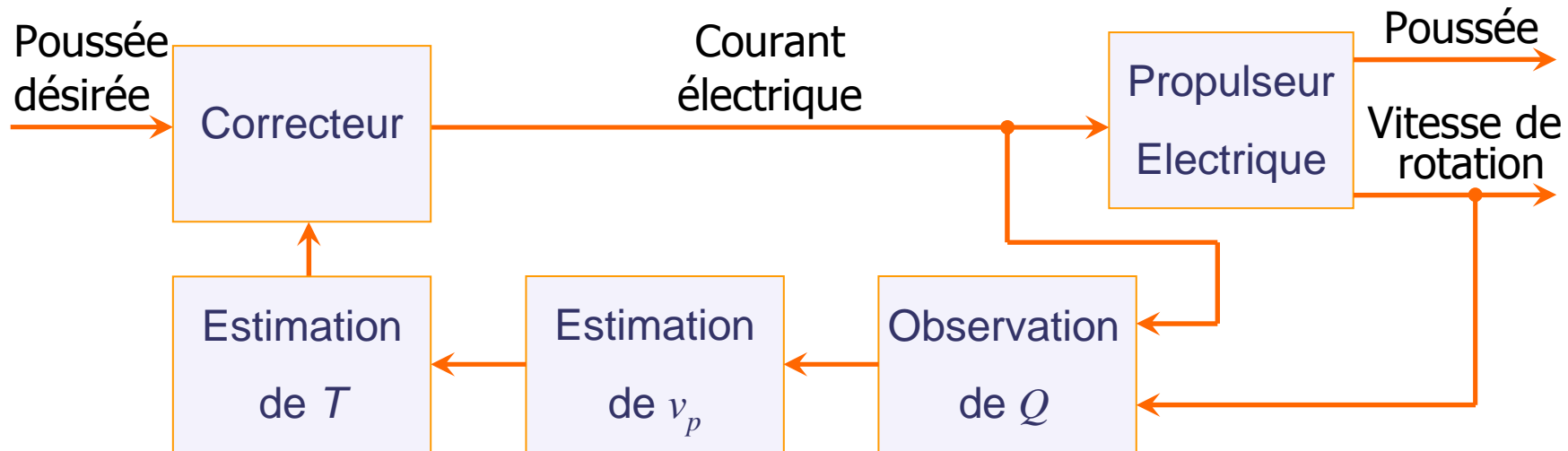
Commande MBV modifiée

- > Nouveau principe d'estimation de v_p :
 - Observation de Q grâce au modèle du moteur
 - Estimation de v_p à partir du modèle 4 quadrants et de Q



- > Idée : étendre le principe à l'estimation de T

Commandes par estimation de T



- > Estimation de la poussée à partir de la valeur estimée de v_p et du modèle de l'aile portante.
- > Possibilité d'utiliser n'importe quel correcteur.

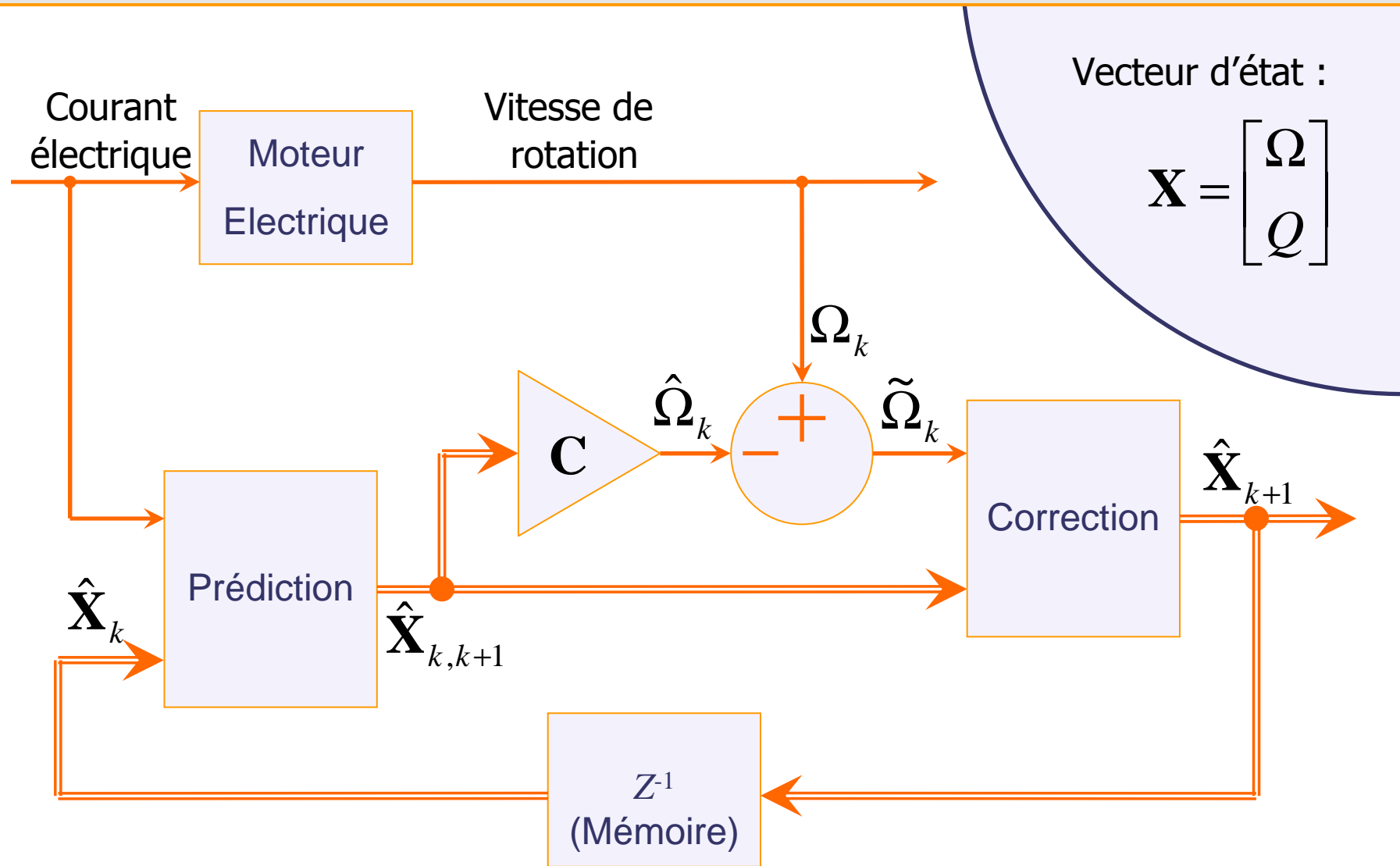
Observation du couple

- > Basée sur le modèle électromécanique du moteur
- > On suppose que le couple varie très lentement :

$$\dot{Q} = 0$$

- > Plusieurs méthodes d'observations :
 - Observateur de Luenberger & placement de pôles
(Performances moyennes)
 - Filtre de Kalman Etendu Stationnaire
(Bon compromis performances / coûts en calculs)
 - Filtrage Particulaire
(Coûts en calculs important)

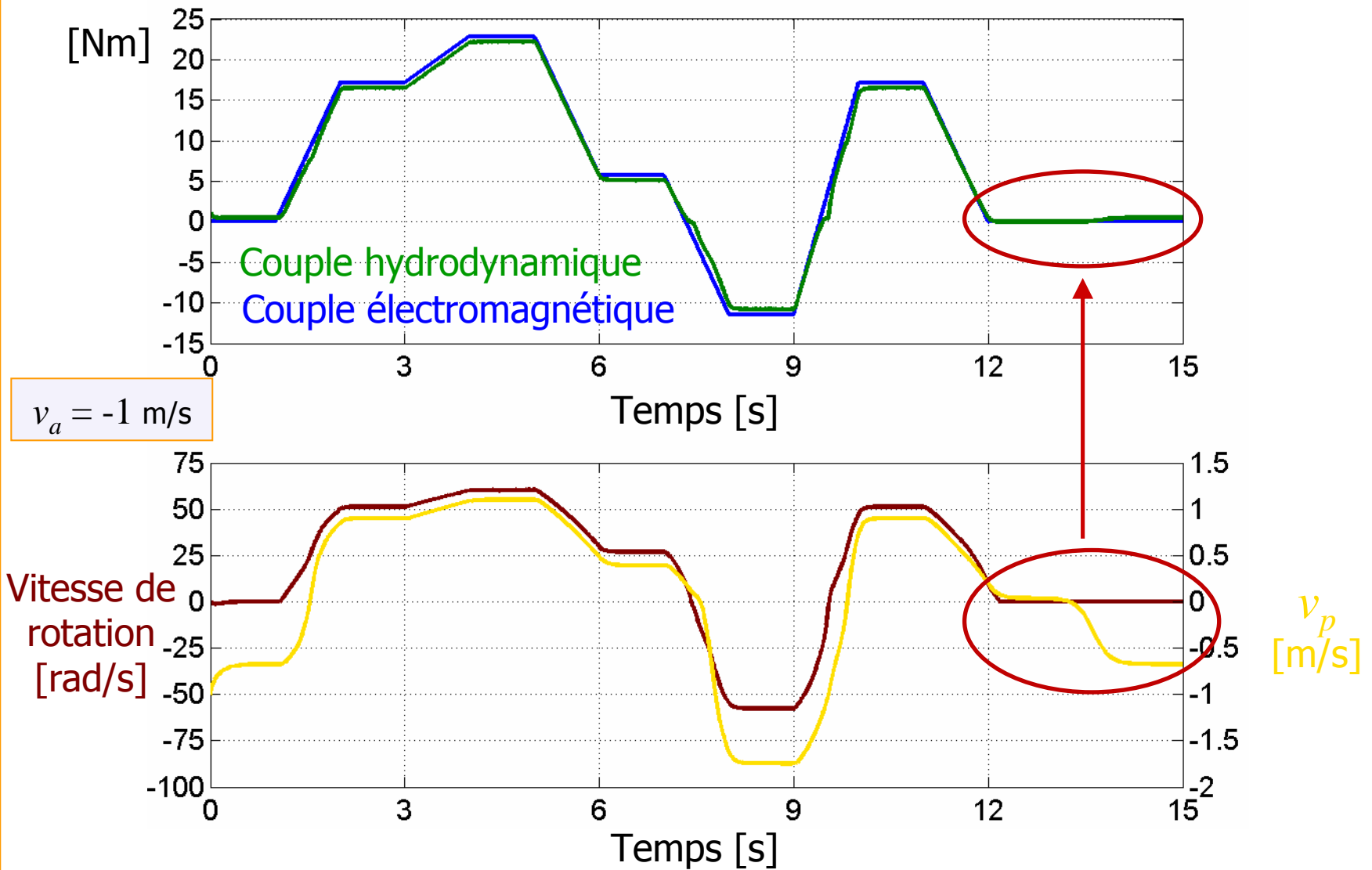
Filtre de Kalman : principe



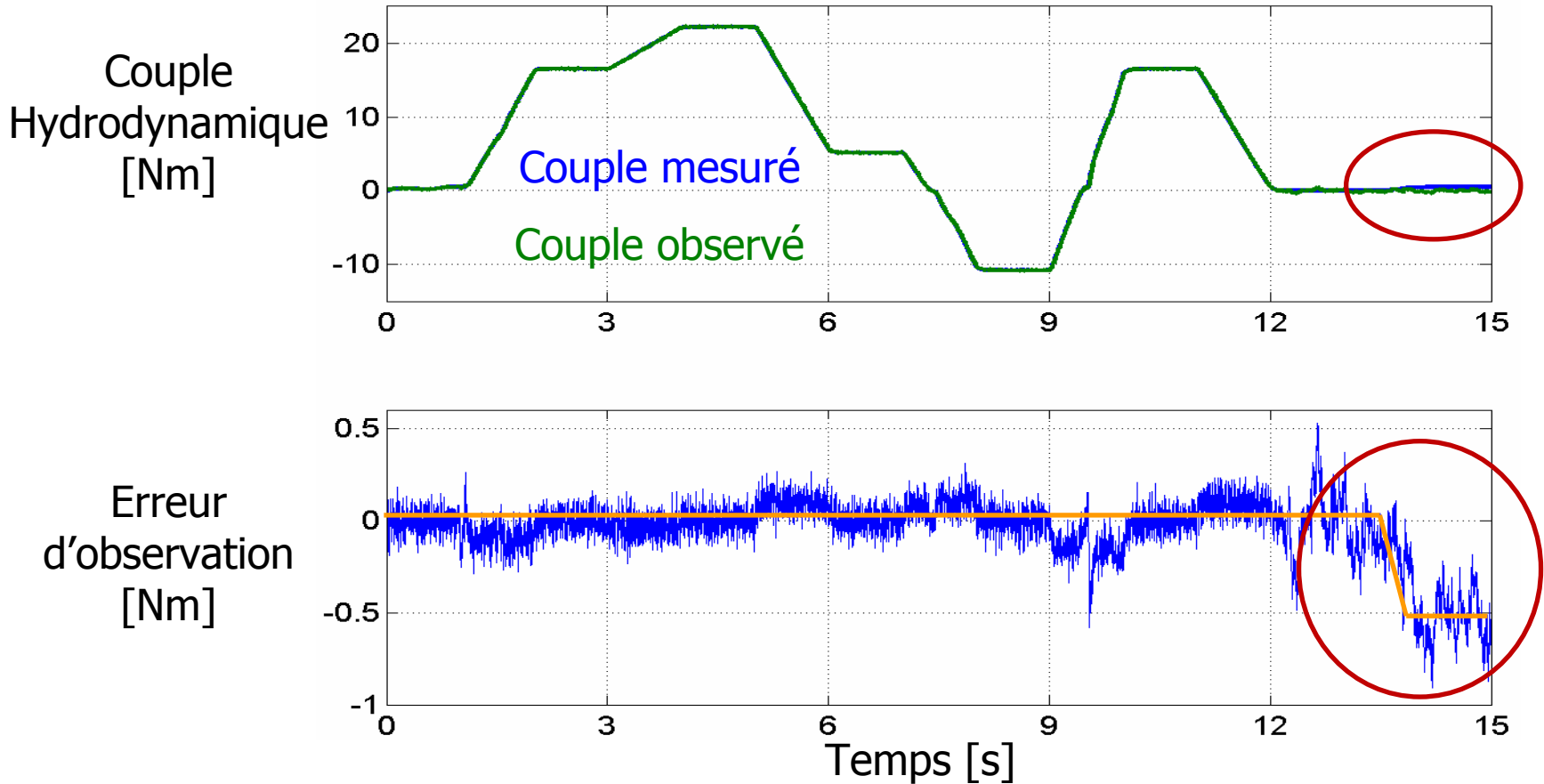
Filtre de Kalman : réglage

- > Correction basée sur un modèle stochastique :
 - Filtre optimal si les bruits sont blancs et gaussiens
 - Nécessité de connaître la variance des bruits :
 - Simple à obtenir pour la mesure
 - Difficile à obtenir pour les variables d'état
- > La variance de Q n'a pas de réalité physique :
 - Paramètre de réglage de la dynamique du filtre
 - Détermination empirique

Conditions de test (simulation)

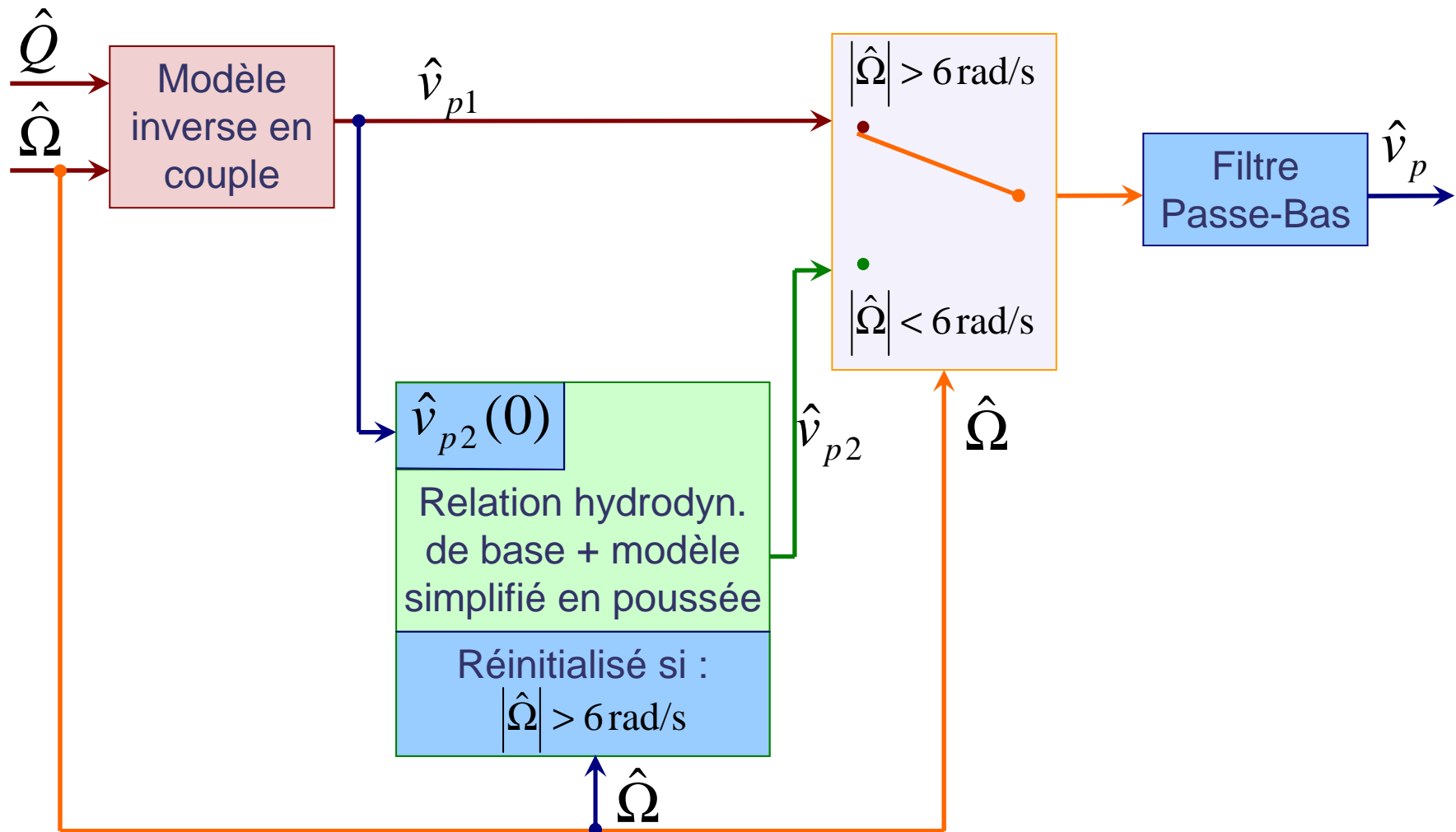


Filtre de Kalman : résultats



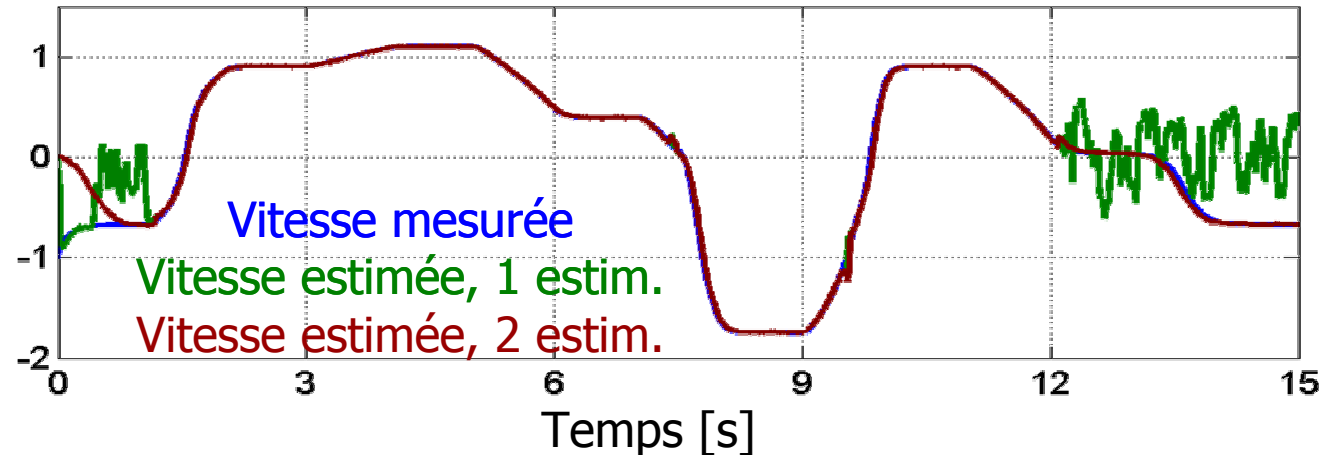
> Problèmes d'observabilité à vitesse nulle

Estimation de v_p (1/2)

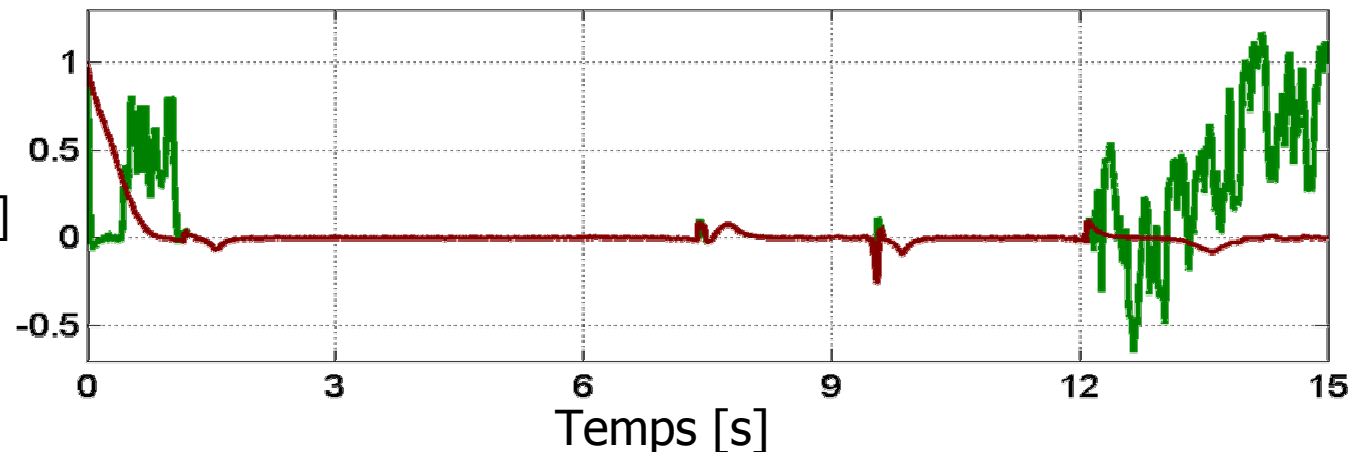


Estimation de v_p (2/2)

Vitesse de l'eau à
travers l'hélice
[m/s]



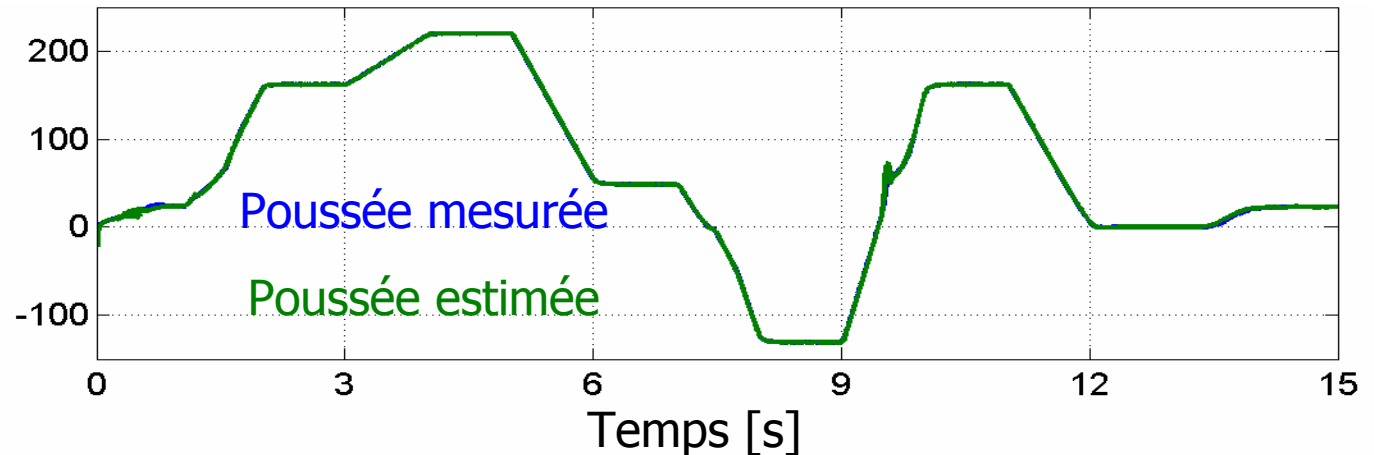
Erreur
d'estimation [m/s]



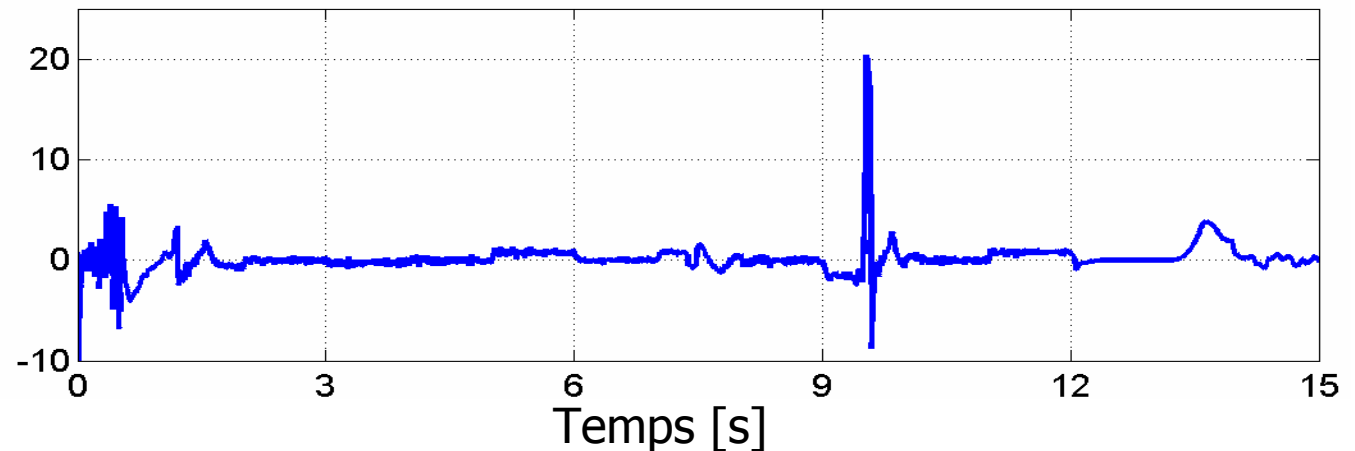
> Le second estimateur améliore les performances

Estimation de la poussée

Poussée [N]



Erreur
d'estimation [N]



> Suffisamment performante pour être exploitée

Choix du correcteur

- > Correcteur de type PI : $I_r = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \cdot (T_r - \hat{T})$
 - Robuste
 - Seulement deux paramètres à régler, K_P et K_I

- > Non-linéarités : réglage empirique de K_P et K_I
 - Méthode traditionnelles inefficaces
 - Méthodes d'optimisations globales peu satisfaisantes

- > Variantes testées :
 - Correcteur IP (= PI avec filtre de consigne)
 - Correcteur Passe-Bas (= correcteur P filtré)

Performances

	BF + PI	MBV	MBV - M	PI
Suivi de consigne	★★★★★	★★★★★	★★★	★★★★
Robustesse elec. & méca.	★★★★★	★★★★	★★★	★★★
Robustesse RHB	★★★★★	★	★★★★★	★★★★
Robustesse aile portante	★★★★★	★	★	★
Sensibilité aux bruits	★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★

3/ Banc d'essais

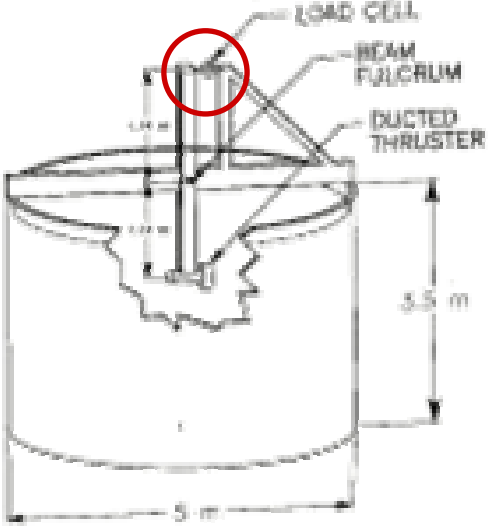
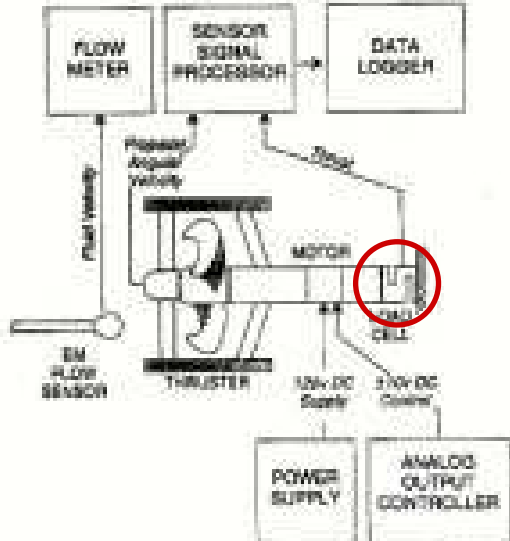
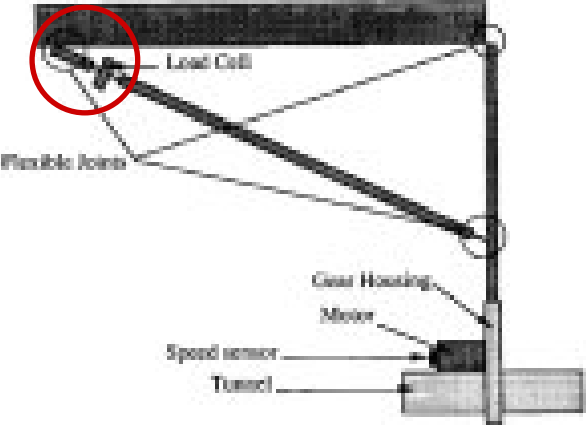
Objectifs : confronter les simulations aux essais expérimentaux et améliorer le modèle hydrodynamique.

- Présentation
- Réalisation et mise en oeuvre
 - Principe
 - Choix des composants
 - Difficultés rencontrées
- Premiers résultats d'exploitation

Cahier des charges

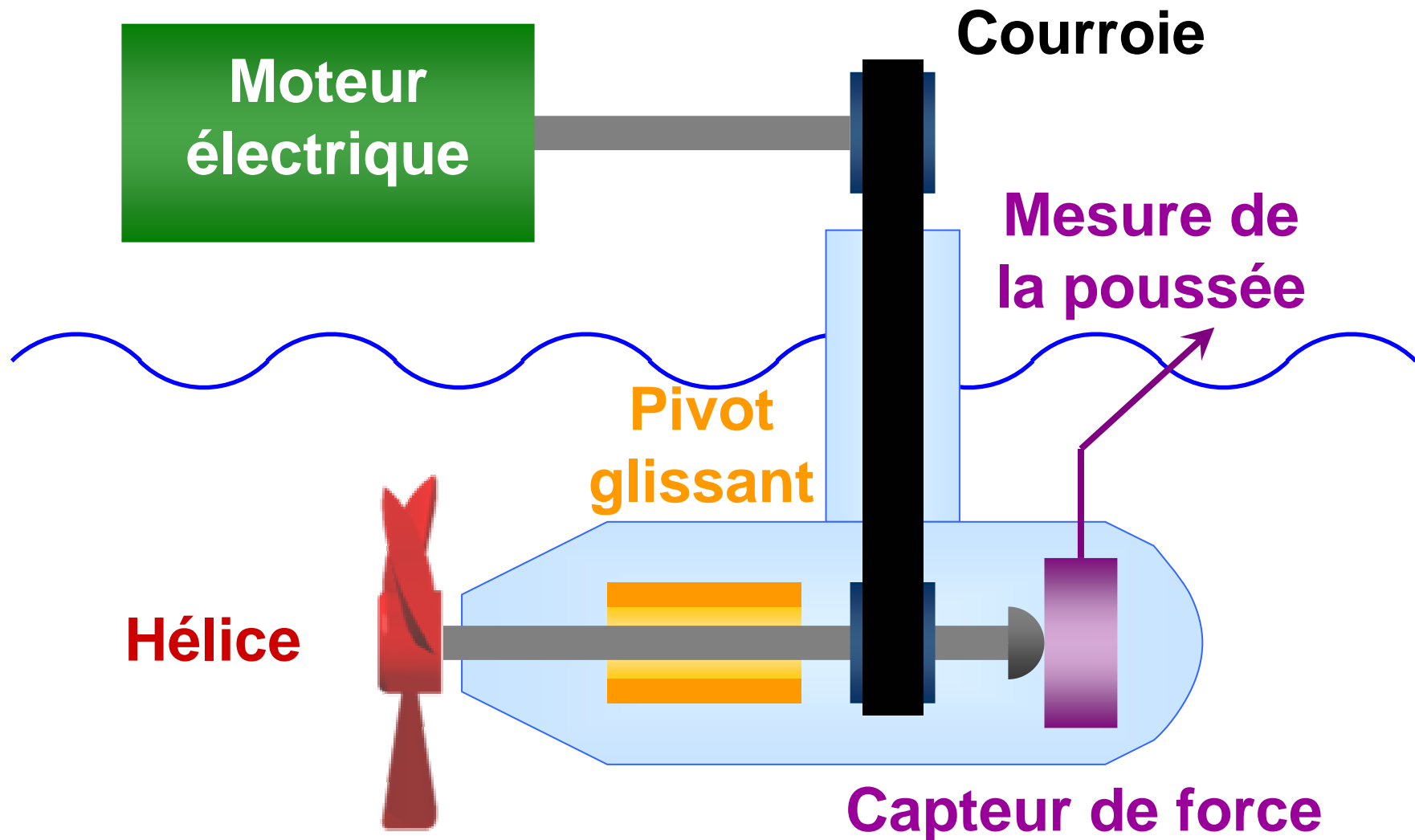
- > Doit permettre la mesure de la poussée.
- > Propulseur d'une puissance d'environ 2 kW.
- > Hélice symétrique carénée.
- > Surveiller la résonance de la structure.
- > Moteur interchangeable \Rightarrow position émergée.

Etat de l'Art



Bancs d'essais public décrits dans la littérature.

Principe retenu



Structure porteuse



La motorisation

- > Moteur synchrone : rendement, compacité...
- > Surdimensionnement : 28 Nm, 1500 tr/min.
- > Indice de protection IP67 : étanche à l'immersion.
- > Variateur commandé en vitesse et en couple.

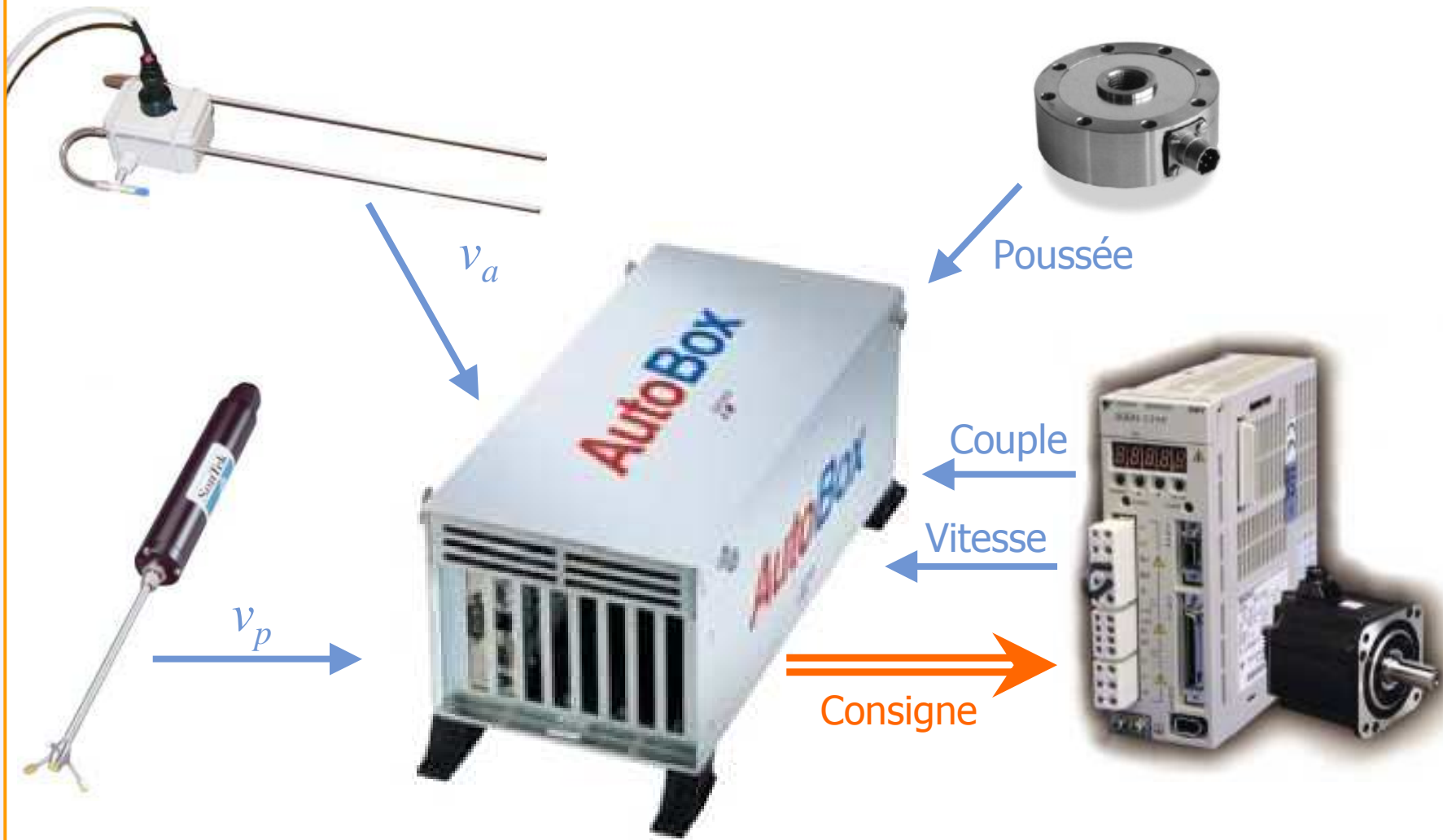


Les capteurs

- > Mesure de la vitesse de l'eau en sortie de l'hélice par vélocimètre à ultrason.
- > Mesure de la vitesse ambiante par tube de Pitot.
- > Capteur de force : 500 N max, 1%, IP68.



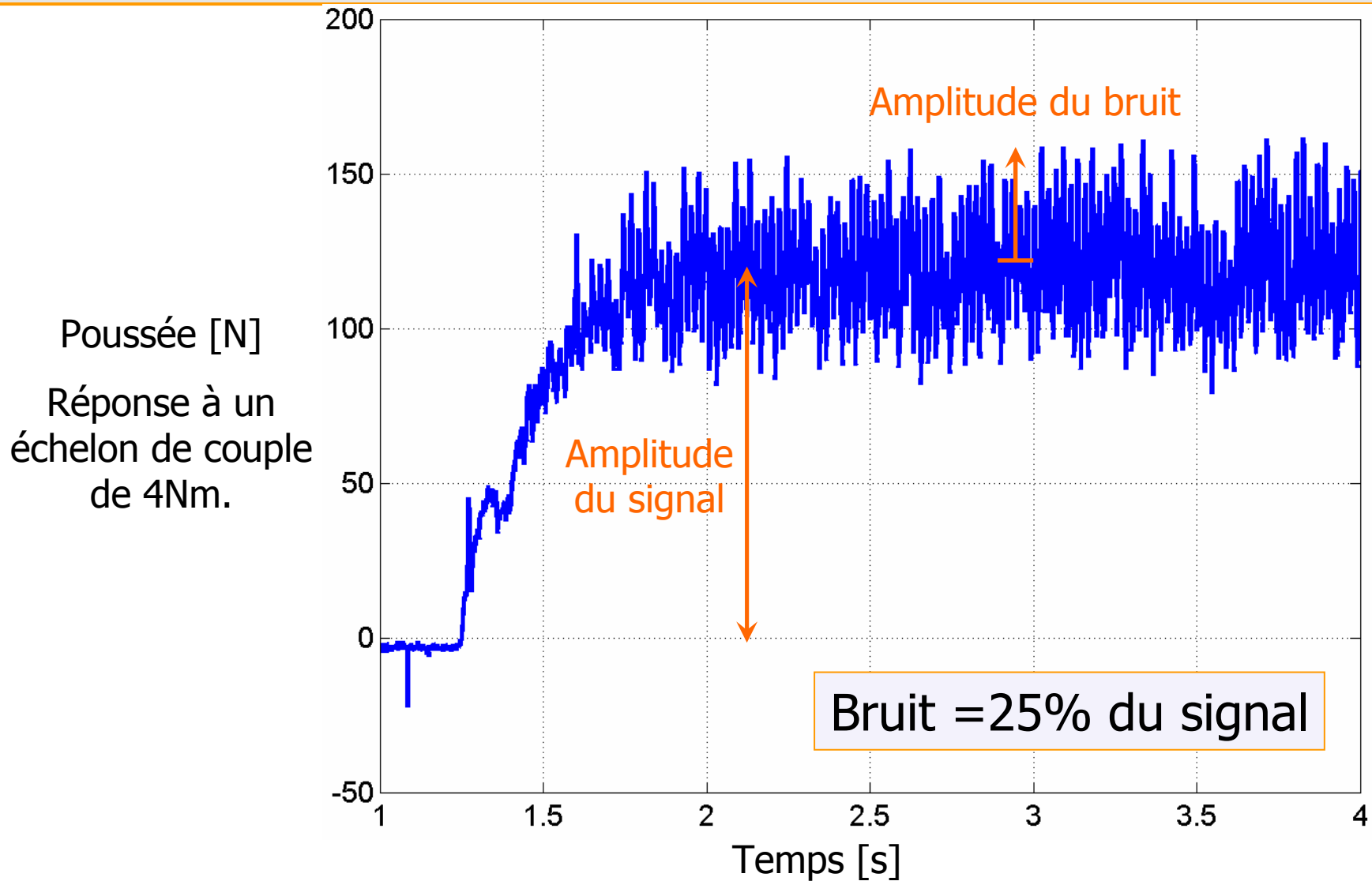
Le système de commande



Diversité des difficultés rencontrées

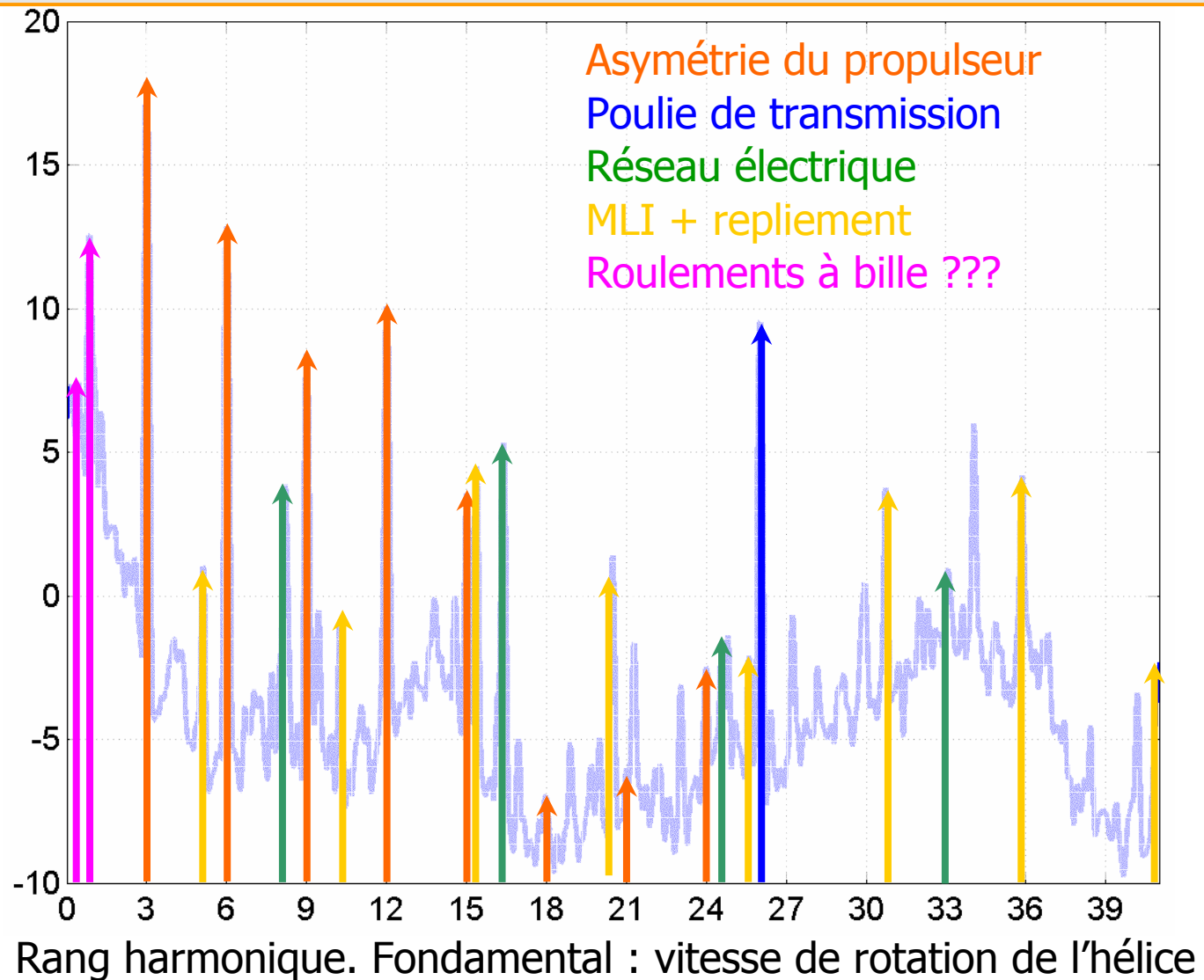
- > Compatibilité Electro-Magnétique (CEM)
- > Etanchéité du bassin et de l'axe d'hélice
- > Tolérances d'usinages
- > Accouplement moteur – poulie crantée
- > Perturbations de la mesure de poussée

Perturbations de la mesure (1/2)



Perturbations de la mesure (2/2)

Application de la transformée de Fourier à la poussée.



- > Filtrer les hautes fréquences :
 - Filtre passe bas, 100 Hz, 4^{ème} ordre.
 - Filtre réjecteur 8 kHz.

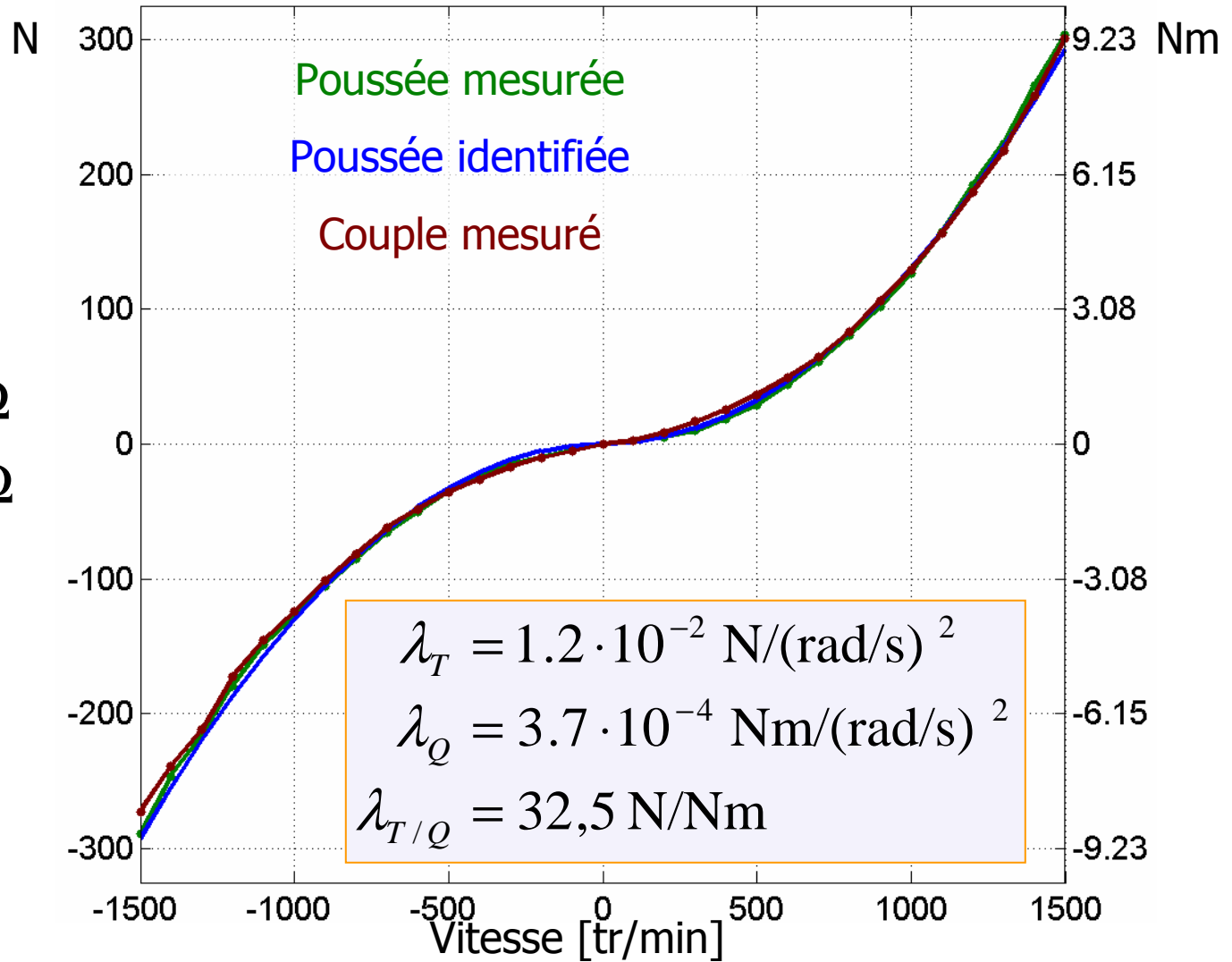
- > Alimentation du capteur par une batterie.

- > Moyenner la mesure sur 1 tour ou 1/3 de tour.

- > Changer le principe de mesure : mesurer la force qu'applique le chariot sur la structure.

Identification en régime permanent

$$\begin{cases} T = \lambda_T \cdot |\Omega| \Omega \\ Q = \lambda_Q \cdot |\Omega| \Omega \\ T = \lambda_{T/Q} \cdot Q \end{cases}$$



- 1/** Modélisation du propulseur
- 2/** Commande en poussée
- 3/** Banc d'essais
- 4/** Conclusions et perspectives

Synthèse (1/2)

> Pluridisciplinaire :

- Electrotechnique, électronique, informatique, automatique, mécanique, hydrodynamique...

> Travail exploratoire :

- Thème récent et peu abordé dans la littérature
- Choix de modèles et de lois de commande
- Validation par simulation

> Développement de commandes originales

- Problèmes de robustesse sur les commandes actuelles
⇒ Réalisation de commandes par observation du couple hydrodynamique : performances plus homogènes

- > Réalisation d'un banc d'essais original :
 - Nécessite des compétences variées
 - Problèmes d'architecture mécanique
 - Difficultés instrumentales

- > Aspect très formateur de la thèse :
 - Découverte de nouvelles disciplines
 - Mise en œuvre des connaissances
 - Prises d'initiatives

Perspectives (1/2)

- > Lancement d'une seconde thèse sur la commande en poussée
 - Thèse codirigée par M. Jean-François HETET du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECN.
 - Chevauchement des deux thèses

- > Approfondissement de la modélisation
 - Amélioration du modèle dynamique
 - Prise en compte des courants marins, de la houle...
 - Identification en temps réel des paramètres hydrodyn.

Perspectives (2/2)

- > Perfectionnement des nouvelles lois de commande
 - Amélioration de l'estimation de v_p et de la poussée
 - Augmentation de la robustesse
 - Utilisation de commandes non-linéaires

- > Achèvement du banc d'essais
 - Identification du modèle du propulseur
 - Confrontation des simulations aux essais expérimentaux

