Contrôle électromagnétique d'écoulements Études expérimentale et numérique sur le forçage d'écoulements initialement au repos et en tunnel hydrodynamique

Claudio LINDQUIST

28 octobre 2005

Directeur de thèse : Jean-Paul THIBAULT





◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Application Plaque plane Profil d'aile
- Forçage
- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Plan de la présentation

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

- 1 Contexte du contrôle électromagnétique
- 2 Applications du contrôle électromagnétique
- 3 Forçage électromagnétique d'écoulements
- 4 Écoulement initialement au repos
- 5 Écoulement en tunnel hydrodynamique
- 6 Conclusions et perspectives

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Contrôle d'écoulements

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

Modifier l'écoulement afin de l'améliorer :

- intensifier le mélange, le transfert de chaleur
- atténuer le bruit, les émissions de polluants
- réduire la traînée, prévenir la séparation

Contexte

Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Contrôle d'écoulements

Modifier l'écoulement afin de l'améliorer :

- intensifier le mélange, le transfert de chaleur
- atténuer le bruit, les émissions de polluants
- réduire la traînée, prévenir la séparation



passives : sans apport externe d'énergie actives : avec apport externe d'énergie

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

Contexte

Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Contrôle d'écoulements

Modifier l'écoulement afin de l'améliorer :

- intensifier le mélange, le transfert de chaleur
- atténuer le bruit, les émissions de polluants
- réduire la traînée, prévenir la séparation



déterministes : ne connaît pas l'état de l'écoulement interactives : connaît l'état de l'écoulement à l'aide de capteurs

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

Contexte

Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Contrôle d'écoulements

Modifier l'écoulement afin de l'améliorer :

- intensifier le mélange, le transfert de chaleur
- atténuer le bruit, les émissions de polluants
- réduire la traînée, prévenir la séparation



boucle ouverte : capteur en amont de l'actionneur boucle fermée : capteurs en amont et en aval de l'actionneur

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Contrôle d'écoulements

Modifier l'écoulement afin de l'améliorer :

- intensifier le mélange, le transfert de chaleur
- atténuer le bruit, les émissions de polluants
- réduire la traînée, prévenir la séparation



boucle ouverte : capteur en amont de l'actionneur boucle fermée : capteurs en amont et en aval de l'actionneur

▲ロト ▲周ト ▲ヨト ▲ヨト 三三 - の久()

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

Conclusion

Problème étudié

Contrôle d'écoulements par forçage électromagnétique

aractéristiques du forçage EM

- Production directe de quantité de mouvement
 - sans parties mobiles, protubérances ou orifices
 - sans injection/aspiration de masse
- Forçage instationnaire
 - oscillation de forme arbitraire
 - réponse en fréquence élevée

Applications

- Hydrodynamique navale
 - prévention de la séparation, contrôle de sillage

▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

- réduction de traînée
- Recherche académique
 - contrôle de couches limites
 - génération de structures vorticitaires

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminair

Turbulente

Conclusion

Problème étudié

Contrôle d'écoulements par forçage électromagnétique

Caractéristiques du forçage EM

- Production directe de quantité de mouvement
 - sans parties mobiles, protubérances ou orifices
 - sans injection/aspiration de masse
- Forçage instationnaire
 - oscillation de forme arbitraire
 - réponse en fréquence élevée

Applications

- Hydrodynamique navale
 - prévention de la séparation, contrôle de sillage

▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

- réduction de traînée
- Recherche académique
 - contrôle de couches limites
 - génération de structures vorticitaires

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion

Problème étudié

Contrôle d'écoulements par forçage électromagnétique

Caractéristiques du forçage EM

- Production directe de quantité de mouvement
 - sans parties mobiles, protubérances ou orifices
 - sans injection/aspiration de masse
- Forçage instationnaire
 - oscillation de forme arbitraire
 - réponse en fréquence élevée

Applications

- Hydrodynamique navale
 - prévention de la séparation, contrôle de sillage

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ → □ - つへ⊙

- réduction de traînée
- Recherche académique
 - contrôle de couches limites
 - génération de structures vorticitaires

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Principe physique



J : champ de densité de courant électrique $[A/m^2]$

- B : champ d'induction magnétique [7
- ${f f}$: champ de force électromagnétique (Lorentz-Laplace) $[{f N}/{f m}^3]$

▲ロ ▶ ▲周 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ● の Q @

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Principe physique



- ${\bf J}$: champ de densité de courant électrique $[A/m^2]$
- $\textbf{B}: champ \ d'induction \ magnétique \ [T]$
- **f** : champ de force électromagnétique (Lorentz-Laplace) [N/m³]

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Principe physique



- ${\bf J}$: champ de densité de courant électrique $[A/m^2]$
- B : champ d'induction magnétique [T]
- f : champ de force électromagnétique (Lorentz-Laplace) $[{\sf N}/{\sf m}^3]$

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

Contexte Contrôle

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Turbulente

Conclusion

Actionneurs électromagnétiques



Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Turbulente

Conclusion

Actionneurs électromagnétiques



590

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Actionneurs électromagnétiques



<ロト <回ト < 注ト < 注ト

3

590

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Actionneurs électromagnétiques



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique



 $\mathbf{E} = -\nabla \phi$

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique



 $\mathbf{E}=-\nabla\phi$

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique



▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique



▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique

$$\mathbf{J} = \sigma(\underbrace{\mathbf{E}}_{\text{imposé}} + \underbrace{\mathbf{U} \times \mathbf{B}}_{\text{induit}}) \rightarrow \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi$$
$$\nabla^2 \phi = 0$$

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Équations du contrôle électromagnétique

• problème hydrodynamique

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$
$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

• problème magnétique



• problème électrique

$$\mathbf{J} = \sigma(\underbrace{\mathbf{E}}_{\text{imposé}} + \underbrace{\mathbf{U} \times \mathbf{B}}_{\text{induit}}) \rightarrow \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = -
abla \phi$$

 $abla^2 \phi = \mathbf{0}$

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Laminaire

Turbulence

Conclusion

Paramètres adimensionnels

Nombre de Reynolds

Nombre de Stuart

Nombre de Hartmann

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

$$Re = rac{UL}{
u}$$
 $St = rac{\sigma EB}{
ho U^2/L_{em}}$ $Ha^2 = rac{\sigma EB}{
ho
u U/(LL_{em})}$

Valeurs typiques

Quantité	Ordre de grandeur
σ	5 S/m
Е	$10^2 \mathrm{~a}~ 10^4 \mathrm{~V/m}$
В	$10^{-1}\mathrm{T}$
ho	$10^3\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3$
ν	$10^{-6}{ m m}^2/{ m s}$

 $\left.\begin{array}{c}
U \text{ et } L \\
E \text{ et } L_{em}
\end{array}\right\} \text{ liés à la stratégie de contrôle}$

Contexte

Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Échelles du contrôle électromagnétique

l'écoulement est modifié par $\textbf{J} \times \textbf{B}$

▲ロ ▶ ▲周 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ● の Q @

Problème

Lien entre les échelles du forçage et de l'écoulement?

- échelles de l'écoulement : U, L connues
- échelles du forçage : *E*, *L_{em}* à ajuster

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Études prospectives d'application du CEM

Deux "cas d'école" théoriques

- couche limite laminaire sur une plaque plane 2D
- écoulement autour d'un profil d'aile 2D

Simulations numériques

- écoulement laminaire, bidimensionnel et permanent
- forçage parallèle idéalisé : $f_{em}(y) = \frac{\pi}{8} J_o B_r e^{-\frac{\pi}{a}y}$



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Différentes formes de traînée

• traînée de frottement





◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

Sac

• traînée de forme (de pression)

• traînée de houle, d'onde de choc, etc.

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Différentes formes de traînée

• traînée de frottement





• traînée de forme (de pression)





• traînée de houle, d'onde de choc, etc.

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Traînée d'une plaque plane 2D



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Traînée d'une plaque plane 2D



Traînée d'une plaque plane 2D



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Écoulement autour d'un profil d'aile 2D

Effets négatifs de la séparation

- sillage instationnaire
- augmentation de la traînée de forme
- diminution de la portance





- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile
- Forçage
- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Prévention de la séparation



◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

- Simulations numériques 2D
 - nombre de Reynolds : $Re_c = \frac{U_{\infty}c}{\nu} = 10^5$
 - coefficient de qdm : $C_{\mu em} = \frac{a J_o B_o}{2 \rho U_{\infty}^2} \cdot \frac{L_{em}}{c} = 0,1$
 - angle d'incidence : $0^{\circ} \leq \alpha \leq 25^{\circ}$

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Prévention de la séparation



Simulations numériques 2D

- nombre de Reynolds : $Re_c = \frac{U_{\infty}c}{\nu} = 10^5$
- coefficient de qdm : $C_{\mu em} = \frac{a J_o B_o}{2 \rho U_{\infty}^2} \cdot \frac{L_{em}}{c} = 0,1$
- angle d'incidence : $0^{\circ} \leq \alpha \leq 25^{\circ}$














Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Bref état de l'art

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

Sac

- Système de contrôle complet : réseau d'actionneurs
- Objectif principal : réduction de traînée

ravaux expérimentaux

- géométrie complexe
- écoulement turbulent

ravaux numériques

- écoulement turbulent
- actionneurs jointifs
- champ de force idéalisé

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Bref état de l'art

- Système de contrôle complet : réseau d'actionneurs
- Objectif principal : réduction de traînée

Travaux expérimentaux

- géométrie complexe
- écoulement turbulent

Travaux numériques

- écoulement turbulent
- actionneurs jointifs
- champ de force idéalisé

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Bref état de l'art

- Système de contrôle complet : réseau d'actionneurs
- Objectif principal : réduction de traînée

Travaux expérimentaux

- géométrie complexe
- écoulement turbulent

Travaux numériques

- écoulement turbulent
- actionneurs jointifs
- champ de force idéalisé



Weier et al. (2003)

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Présente étude

Approche combinée expérimentale et numérique Dédiée aux actionneurs et aux effets du forçage sur l'écoulement Principales caractéristiques

- écoulement simple et bien maîtrisé
- régime laminaire
- forçage d'un seul actionneur
- champ de force réaliste

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application: Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- **Tunnel** Laminaire Turbulente
- Conclusion

Configuration des écoulements étudiés

Écoulement initialement au repos

- simulations et expériences
- forçage normal et parallèle



Écoulement en tunnel

- simulations et expériences
- écoulement laminaire et "turbulent"
- forçage normal et parallèle



(日) (四) (日) (日) (日)

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Application: Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Forçage électromagnétique d'écoulements

• Actionneurs électromagnétiques étudiés



• Calcul du champ de force électromagnétique





(日) (四) (日) (日) (日)

Sac

• Méthodologie numérique et expérimentale

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Géométrie des actionneurs étudiés



Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Modélisation des champs électromagnétiques



 $\mathbf{J} = \frac{J_o}{2\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{j=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$ $\mathbf{B} = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{j=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations
- Aquarium
- Tunnel
- Turbulente
- Conclusion

Modélisation des champs électromagnétiques





 $\mathbf{J} = \frac{J_o}{2\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{i=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$ $\mathbf{B} = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{i=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Modélisation des champs électromagnétiques



$\mathbf{J} = \frac{J_o}{2\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{j=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$ $\mathbf{B} = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=\{0,1\}} \sum_{j=\{0,1\}} (-1)^{i+j} \beta(S_i, T_j, R)$

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Modélisation des champs électromagnétiques



◆□ → ◆◎ → ◆○ → ◆○ → ○□

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Modélisation des champs électromagnétiques



- magnétisation rigide, uniforme et perpendiculaire
- distribution uniforme de charges électriques
- courant induit $\sigma(\mathbf{U} \times \mathbf{B})$ négligé
- J = distribution primaire de densité de courant électrique

Champ de force électromagnétique



(日) (四) (日) (日) (日)

590

Champ de force

- Applications Plaque plane Profil d'aile
- Forçage
- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Plan de la présentation Champ de force électromagnétique Contexte Costide Controle EM Applications Preque plans Prefit d'alle Forcage Actioneurs Champs EM Simulations Techniques

<ロト < 回 > < 回 > < 回 > < 三 > 三 三

990

Aquarium

Laminaire

Turbulente

Conclusion



Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Objectifs

- approche complémentaire aux expériences
- validation des modèles analytiques

vantages

- champ de vitesse 3D
- flexibilité et faible coût

Écoulement

- laminaire
- instationnaire
- tridimensionnel

Code numérique

• Fluent

Modélisation de l'écoulement

• volumes finis

Forçage électromagnétique

• indépendant de l'écoulement

(日) (四) (日) (日) (日)

- calcul préalable
- modèles analytiques

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Objectifs

- approche complémentaire aux expériences
- validation des modèles analytiques

Avantages

- champ de vitesse 3D
- flexibilité et faible coût

Écoulement

- laminaire
- instationnaire
- tridimensionnel

Code numérique

• Fluent

Modélisation de l'écoulement

volumes finis

Forçage électromagnétique

• indépendant de l'écoulement

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

- calcul préalable
- modèles analytiques

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Objectifs

- approche complémentaire aux expériences
- validation des modèles analytiques

Avantages

- champ de vitesse 3D
- flexibilité et faible coût

Écoulement

- laminaire
- instationnaire
- tridimensionnel

Code numérique

• Fluent

Modélisation de l'écoulement

volumes finis

Forçage électromagnétique

• indépendant de l'écoulement

◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

- calcul préalable
- modèles analytiques

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Objectifs

- approche complémentaire aux expériences
- validation des modèles analytiques

Avantages

- champ de vitesse 3D
- flexibilité et faible coût

Écoulement

- laminaire
- instationnaire
- tridimensionnel

Code numérique

• Fluent

Modélisation de l'écoulement

volumes finis

Forçage électromagnétique

• indépendant de l'écoulement

- calcul préalable
- modèles analytiques

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Objectifs

- approche complémentaire aux expériences
- validation des modèles analytiques

Avantages

- champ de vitesse 3D
- flexibilité et faible coût

Écoulement

- laminaire
- instationnaire
- tridimensionnel

Code numérique

• Fluent

Modélisation de l'écoulement

volumes finis

Forçage électromagnétique

• indépendant de l'écoulement

- calcul préalable
- modèles analytiques

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Application Plaque plane Profil d'aile
- Forçage
- Actionneurs Champs EN
- Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Techniques expérimentales

Visualisation d'écoulements

- observer l'écoulement
- préparer les mesures PIV
- valider les simulations

Technique

- injection de colorant
- solution de fluorescéine
- même salinité et densité



Vélocimétrie par imagerie de particules (PIV)

◆□ → ◆◎ → ◆○ → ◆○ → ○□

590



Vontage expérimental

Conclusion

Techniques Aquarium

Vélocimétrie par imagerie de particules (PIV)



Montage expérimental



◆□ ▶ ◆圖 ▶ ◆ 圖 ▶ ◆ 圖 ▶

-

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM

Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion



・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

æ

590

Aquarium

Laminaire

Conclusion



990

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Turbulente
- Conclusion



Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

Conclusion



590



Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Techniques

Aquarium

Tunnel

Conclusion





<ロト < 回 > < 回 > < 回 > < 三 > 三 三

590



Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Techniques

Aquarium

Tunnel

Turbulente

Conclusion





<ロト < 回 > < 回 > < 回 > < 三 > 三 三

990

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Écoulement initialement au repos

Avantages

- écoulement "simple"
- expériences bien contrôlées
- simulations laminaires
- très faible confinement

Objectifs

- mettre en évidence l'effet du forçage
- valider les modèles analytiques
- proposer des échelles du forçage et de l'écoulement généré



isosurface ω ($t = 10 \, s$)

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Installation expérimentale



Eau salée

- 1 kg eau de mer = 965 g eau + 35 g sel $(S_a = 35)$
- propriétés : $\rho=1025\,{\rm kg/m^3}$, $\nu=10^{-6}\,{\rm m^2/s}$, $\sigma=5\,{\rm S/m}$
Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion





Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion





Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium



Laminaire

Conclusion







Configurations du forçage électromagnétique



Aquarium Tunnel

- Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Configurations du forçage électromagnétique



Techniques Aquarium

Tunnel

- Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Contexte Contrôle

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

- Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Configurations du forçage électromagnétique



(日) (四) (日) (日) (日)

590

Contexte Contrôle

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

- Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Configurations du forçage électromagnétique



(日) (四) (日) (日) (日)

Sac

Configurations du forçage électromagnétique



Configurations du forçage électromagnétique



Configurations du forçage électromagnétique



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Rappel

- calcul du champ de force indépendant de l'écoulement
- échelles du forçage et de l'écoulement indépendantes

Détermination objective :

- échelles propres au forçage
- échelles de l'écoulement qui en résulte

Grandeurs basées sur les champs 3D : résultats numériques

▲ロ ▶ ▲周 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ● の Q @

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Échelles du forçage électromagnétique

Volume électromagnétique

 V_{em} contient 99% de la puissance propulsive totale

$$P_{prop} = \int\limits_{V} |p_{prop}| \, dartheta$$
 où $p_{prop} = \mathbf{f}_{em} \cdot \mathbf{U}$

(日) (四) (日) (日) (日)

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Turbulente

Conclusion

Échelles du forçage électromagnétique

Volume électromagnétique

Normal

 V_{em} contient 99% de la puissance propulsive totale

$$P_{prop} = \int\limits_{V} |p_{prop}| \, dartheta$$
 où $p_{prop} = \mathbf{f}_{em} \cdot \mathbf{U}$

Parallèle

(a)

3

Sac

t=0.0 s

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Échelles du forçage électromagnétique

Volume électromagnétique

V_{em} contient 99% de la puissance propulsive totale

$$P_{prop} = \int\limits_{V} |p_{prop}| \ dartheta$$
 où $p_{prop} = \mathbf{f}_{em} \cdot \mathbf{U}$

Normal

Parallèle

t [s]



▲御を▲前を▲前を 前 シスの

I=0,1A

I=0,2A

I=0,4A

I=0.8A

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

. . .

Échelles du forçage électromagnétique

• Accélération électromagnétique

$$g_{em} = rac{1}{
ho V_{em}} \int\limits_{V_{em}} |f_{prop}| \; dartheta$$
 où $f_{prop} = \mathbf{f}_{em} \cdot rac{\mathbf{U}}{U}$

Écoulement uniformément accéléré dans V_{em}

• Vitesse électromagnétique

$$U_{em} = \sqrt{2\ell_{em}g_{em}}$$

• Temps électromagnétique

$$t_{em} = \sqrt{\frac{2\ell_{em}}{g_{em}}}$$

où
$$\ell_{em} = \sqrt[3]{V_{em}}$$

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Vue d'ensemble de l'écoulement généré



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Aquarium

Tunne

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Échelle caractéristique de l'écoulement

Volume d'action V_{act} : 99% de l'énergie cinétique

$$E_c = \frac{\rho}{2} \int\limits_V U^2 \, d\vartheta$$

Normal

Parallèle

◆□▶ ◆□▶ ◆三▶ ◆三▶ ○ ● ●

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

.....

Conclusion

Échelle caractéristique de l'écoulement

Volume d'action V_{act} : 99% de l'énergie cinétique

$$E_c = rac{
ho}{2} \int\limits_V U^2 \ dartheta$$



 $I = 0,4 \, A$

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Échelle caractéristique de l'écoulement

Volume d'action V_{act} : 99% de l'énergie cinétique









Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Vitesse (normale) d'aspiration

axe central

Au dessus de l'actionneur normal :

- écoulement aspiré vers la paroi
- champ de force et écoulement opposés

◆□ → ◆◎ → ◆○ → ◆○ → ○□

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Vitesse (normale) d'aspiration



Au dessus de l'actionneur normal :

- écoulement aspiré vers la paroi
- champ de force et écoulement opposés

Sar

Profil de vitesse normale sur l'axe central



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Vitesse (normale) d'aspiration

axe central

Au dessus de l'actionneur normal :

- écoulement aspiré vers la paroi
- champ de force et écoulement opposés

Profil de vitesse normale sur l'axe central



Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

Conclusion

Jets pariétaux



590

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire Turbulente

Conclusion

Jets pariétaux



Contexte Contrôle

Applications Plaque plane

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion

Structures tourbillonnaires

$$I = 0,2 \, A$$



numérique

expérimental

590

Contexte Contrôle

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

Conclusion

Structures tourbillonnaires

$$I = 0,2 \, A$$



numérique

expérimental



40 / 58

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

- Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Aspects énergétiques



990

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunne
- Laminaire
- lurbulente
- Conclusion

Aspects énergétiques



◆□ > ◆□ > ◆豆 > ◆豆 > ・豆 ・ �� ◇ ◇ ◇



Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage Actionneurs Champs EM

Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

.

Actionneur normal modifié



Volume électromagnétique, (= , (= , (= ,) = ,) o o

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Conclusion

Actionneur normal modifié



 $I = 0,4 \, A$

Volume électromagnétique, 🚌 📭

590

Aquarium

Actionneur normal modifié



4

900

42 / 58

Contexte Contrôle Contrôle EM

Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Laminaire

Turbulente

Conclusion

Actionneur normal modifié



(日)

590

Contrôle Contrôle EM Applications

Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire Turbulente

Conclusion

Actionneur normal modifié



(a)

3

590


-0.1

-0.1

-0.1

-0.05

-0.05

-0.05

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Conclusion

Bilan

Écoulement initialement au repos

- bonne concordance numérique expérimental
- validation du modèle analytique des forces
- détermination des échelles du forçage et de l'écoulement

▲ロ ▶ ▲周 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ● の Q @

• outil pour l'optimisation des actionneurs

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

- Laminaire Turbulente
- Conclusion

Écoulement en tunnel hydrodynamique

- plus proche du domaine applicatif
- forçage paramétré par le nombre de Stuart

Inconvénients

- expériences plus complexes
- confinement non négligeable
- limitation de la technique PIV

Objectifs

- étudier l'effet du forçage sur l'écoulement moyen
- comparer les échelles du forçage et de l'écoulement externe
- forçage d'une CL laminaire et "turbulente synthétique"

Contexte Contrôle Contrôle EM

Application: Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Laminaire Turbulente

Conclusion

Tunnel hydrodynamique



 $\label{eq:Veine} \mbox{Veine}: 0.1 \times 0.1 \times 1.7 \, \mbox{m} \quad \mbox{$U_{max} = 1.6 m/s$}$

◆□▶ ◆檀▶ ◆国▶ ◆国▶ → 国

990

- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

- Laminaire Turbulente
- Conclusion

Simulation numérique en canal



- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium

Tunne

- Laminaire
- Conclusion

Forçage d'une couche limite laminaire

Normal axial



Normal transversal



Sac

Modification de la traînée

Forçage normal axial et transversal



Laminaire

Modification de la traînée

Forçage parallèle axial



◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ◆□▶ ●□

Sac

Conclusion

Modification de la traînée

Forçage parallèle axial



Définitions

• Force de traînée : $F_D = \frac{2}{\rho U_{\infty}^2} \left(\int_A \tau_w dA - \int_V \mathbf{f}_{em} d\vartheta \right)$

▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□▶ ▲□ ● ● ●

• Coefficient de traînée : $C_D = \frac{2F_D}{\rho U_\infty^2 A}$

Laminaire

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire
- Turbulente
- Conclusion

Approche analytique d'une couche limite turbulente

- couche limite turbulente : écoulement complexe
- couche limite "turbulente synthétique" : contrôlée



- 日本 - 4 日本 - 4 日本 - 日本

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel

Turbulente

Conclusion

Approche analytique d'une couche limite turbulente

- couche limite turbulente : écoulement complexe
- couche limite "turbulente synthétique" : contrôlée



- 日本 - 4 日本 - 4 日本 - 日本

Sac

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

```
Conclusion
```

Approche analytique d'une couche limite turbulente

- couche limite turbulente : écoulement complexe
- couche limite "turbulente synthétique" : contrôlée



Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Couche limite turbulente synthétique



590

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations Techniques

Aquarium

- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Couche limite turbulente synthétique



- Contexte Contrôle Contrôle EM
- Application Plaque plane Profil d'aile

Forçage

- Actionneurs Champs EM Simulations Techniques
- Aquarium
- Tunnel Laminaire Turbulente
- Conclusion

Conclusions et Perspectives

- proposition d'un ensemble de critères objectifs
- validation des modèles analytiques (calcul des forces)
- mise à disposition des installations expérimentales
- validation de l'approche croisée expérimentale \times numérique
- Perspectives
 - optimisation géométrique des actionneurs
 - poursuite de l'étude en CL turbulente (DNS en cours)

▲ロ ▶ ▲周 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ● の Q @

- mise en réseau des actionneurs
- confection d'une nouvelle veine d'essais

Contexte Contrôle Contrôle EM

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EM Simulations

Aquarium

Tunnel Laminaire

Turbulente

Conclusion

Merci!

▲□▶ ▲□▶ ▲ 三▶ ▲ 三▶ 三三 - のへぐ

Contexte

Applications Plaque plane Profil d'aile

Forçage

Actionneurs Champs EN Simulations

Techniques

Aquarium

Tunne

Laminaire

Conclusion

◆□▶ ◆□▶ ◆ □▶ ◆ □▶ ● □ ● ● ● ●

Pulsé

Vem tunne

Forçage pulsé



▲□▶ ▲圖▶ ▲≣▶ ▲≣▶ = 差 = のへで

Pulsé

Vem tunne

Forçage pulsé



56 / 58



Pulsé

Vem tunnel

Échelles du forçage électromagnétique

