

Dorothy : un code tridimensionnel pour la modélisation d'hydroliennes

Journée de rencontre des utilisateurs du Pôle de Calcul Intensif pour la Mer

P. Mycek¹, C. Carlier^{1,2}, G. Pinon², G. Germain¹, É. Rivoalen^{2,3}

17 janvier 2014

¹Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)
Boulogne-sur-Mer
{paul.mycek, clement.carlier, gregory.germain}@ifremer.fr

²Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC)
UMR 6294, CNRS – Université du Havre
gregory.pinon@univ-lehavre.fr

³Laboratoire d'Optimisation et Fiabilité en Mécanique des Structures (LOFIMS)
INSA de Rouen
elie.rivoalen@insa-rouen.fr



Plan

- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique
- 3 Validation du code
- 4 Éléments d'implémentation
- 5 Conclusion

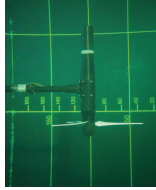
Plan

- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique
- 3 Validation du code
- 4 Éléments d'implémentation
- 5 Conclusion

Le contexte hydrolien

↘ émission CO_2 + ↘ ressources fossiles ⇒ Énergies (marines) renouvelables

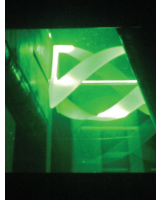
Ifremer-LOMC



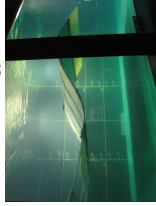
www.openhydro.com



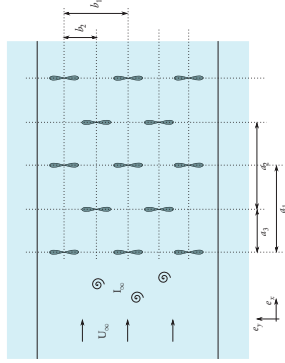
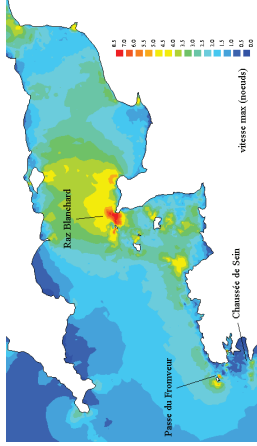
Gorlov



www.eel-energy.fr



Énergie hydrolienne = prédictibilité



Comment aborder le problème ?

Mesures *in situ* (ex : Paimpol, EMEC)

- + Échelle réelle (ou réaliste)
- + Conditions réelles
- Coût élevé (temps, argent)
- Techniques de mesures inadaptées
- Analyse et interprétation difficiles

Comment aborder le problème ?

Mesures *in situ* (ex : Paimpol, EMEC)

- + Échelle réelle (ou réaliste)
- + Conditions réelles
- Coût élevé (temps, argent)
- Techniques de mesures inadaptées
- Analyse et interprétation difficiles

Essais expérimentaux

- + Analyse et interprétation plus aisée
- + Techniques de mesures adaptées
- Difficulté de faire varier les paramètres
- Coût important (temps, argent)
- Conditions simplifiées
- Échelle réduite

Simulations numériques

- + Analyse et interprétation plus aisée
- + Facilité de faire varier les paramètres
- ± Coût (argent) moindre
- Conditions simplifiées
- Limitations des modèles
- ± Validation avec données expérimentales

Collaboration IFREMER – Université du Havre

IFREMER

(bassin d'essais de Boulogne)

Modélisation expérimentale,
énergies marines renouvelables

Université du Havre

(laboratoire LOMC)

Modélisation numérique d'écoulements
tourbillonnaires instationnaires par la
méthode vortex

Thèses co-financées

(IFREMER – Région Haute-Normandie)

- ▶ (2007–2010) F. Maganga
- ▶ (2010–2013) P. Mycek
- ▶ (2013–2016) C. Carlier

*Modélisation numérique et expérimentale du
comportement d'hydroliennes*

Outils numériques

- ▶ Disque poreux + CFD (Fluent, CFX, ...) [Sun *et al.*, 2008]
 - **sillage / performances**
 - **rotation-des-pales**
 - **domaine de calcul important** ⇒ millions de mailles

- ▶ Méthodes BEM (Blade Element Momentum Theory) [Baltazar & Falcão, 2008]
 - **sillage / performances**
 - **tabulation C_D/C_L du profil de pale**

- ▶ Méthode Vortex + méthode intégrale (code validé)
 - **sillage + performances**
 - **naturellement instationnaire**
 - **domaine de calcul restreint (zones tourbillonnaires)**

Plan

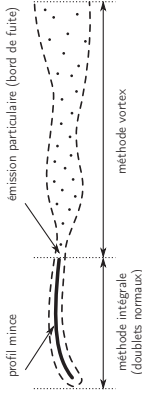
- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique**
- 3 Validation du code
- 4 Éléments d'implémentation
- 5 Conclusion

Vue générale

Méthode Vortex

- ▶ Méthode particulaire ;
- ▶ Méthode lagrangienne ;
- ▶ Pas de maillage du domaine fluide.

Méthodes (vue en coupe)



Équations de Navier-Stokes

- ▶ Fluide incompressible ;
- ▶ Formulation vitesse-tourbillon.

Particule

- ▶ Position $\vec{X}_i(t)$;
- ▶ Vitesse $\vec{U}_i(t) \equiv \vec{u}(\vec{X}_i(t), t)$;
- ▶ Poids tourbillonnaire $\vec{\Omega}_i(t)$.

Leonard, JCP, 1980.

Cottet & Koumoutsakos, 2000.

Rehbach, La Recherche Aéronautique, 1977.

Cantaloube & Huberson, La Recherche Aéronautique, 1986.

Hemon, Mémoire de thèse, 1990.

Discretisation

$$\vec{\mathbf{X}}_i = \frac{\int_{\mathcal{D}_i} \vec{x} d\vec{x}}{\int_{\mathcal{D}_i} d\vec{x}}, \quad \vec{\Omega}_i = \int_{\mathcal{D}_i} \vec{\omega}(\vec{x}) dv(\vec{x}) \simeq \vec{\omega}(\vec{\mathbf{X}}_i) V_i$$

Description lagrangienne :

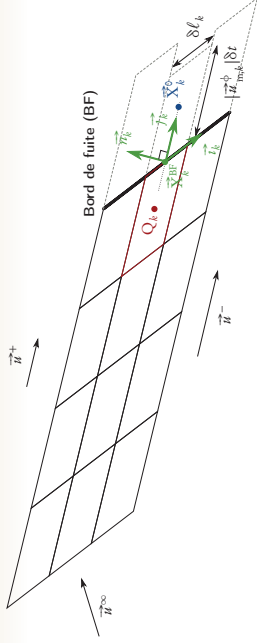
$$\begin{cases} \frac{d\vec{\mathbf{X}}_i}{dt} = \vec{U}_i^\psi + \vec{U}_i^\phi + \vec{u}^\infty & \text{(Décomposition de Helmholtz)} \\ \frac{d\vec{\Omega}_i}{dt} = \underbrace{(\vec{\Omega}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{U}_i}_{\text{Déformation}} + \underbrace{\left\{ \vec{\nabla} \cdot [(\nu + \nu_T)(\vec{\nabla} \otimes \vec{\omega})] \right\}_i}_{\text{Diffusion turbulente (LES - Mansour)}} V_i \end{cases}$$

Évaluation du champ de vitesse :

$$\vec{u}^\psi(\mathbf{M}) = \sum_{j=1}^N \vec{\mathbf{K}}_\epsilon(\vec{\mathbf{X}}(\mathbf{M}) - \vec{\mathbf{X}}_j) \wedge \vec{\Omega}_j, \quad \vec{\mathbf{K}}_\epsilon(\vec{x}) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\vec{x}}{(|\vec{x}|^2 + \epsilon^2)^{3/2}}$$

$$\vec{u}^\phi(\mathbf{M}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{N_f} \mu_j \sum_{k=0}^3 \int_{\overline{\mathbf{MP}}^k} \frac{\overline{\mathbf{MP}}}{|\overline{\mathbf{MP}}|^3} \wedge d\vec{\ell}(\mathbf{P}), \quad \text{glissement} \Rightarrow A\mu = b \Rightarrow \mu_j$$

L'émission particulaire



Particules émises :

$$\vec{X}_k^0 = \vec{X}_k^{\text{BF}} + \frac{\delta t}{2} |\vec{u}_{m,k}^\phi| \vec{J}_k,$$

$$\vec{\Omega}_k^0 = \int_{\mathcal{G}'_k} \vec{\Upsilon}_k d\sigma = \int_{\mathcal{G}'_k} \vec{n}_k \wedge (\vec{\nabla} \mu)_k d\sigma,$$

$$V_k^0 = |\vec{u}_{m,k}^\phi| \delta t \times \delta l \times \varepsilon$$

Schéma numérique

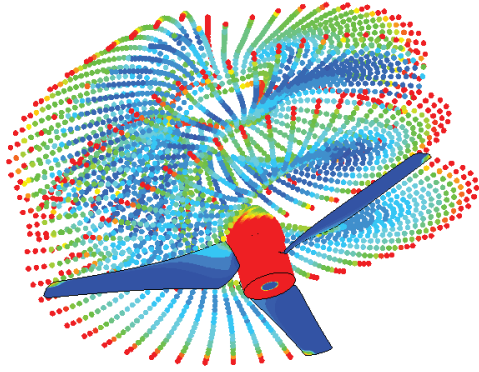
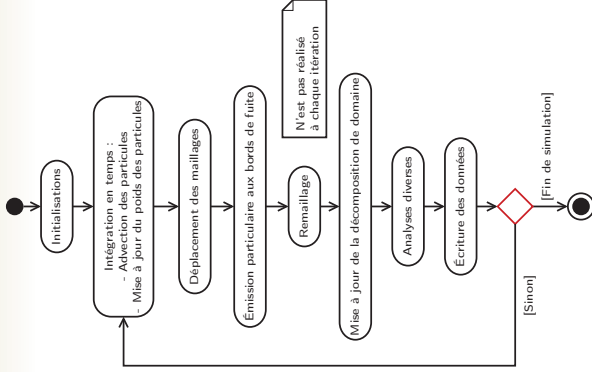


Schéma numérique

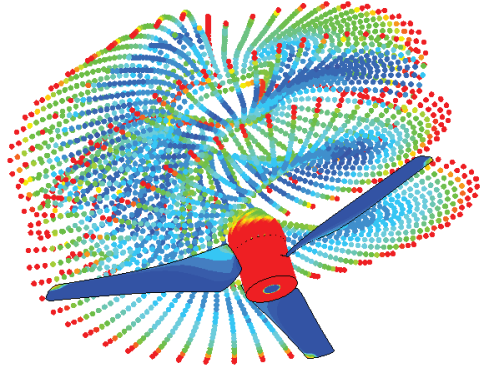
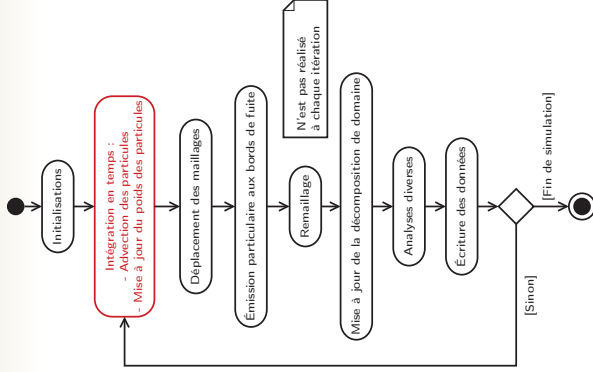


Schéma numérique

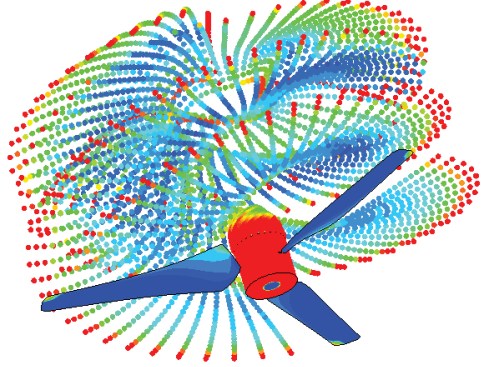
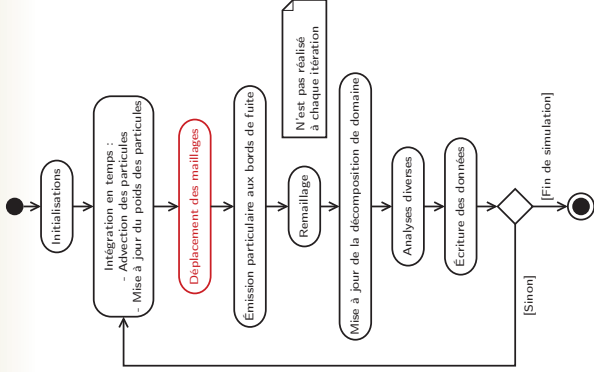


Schéma numérique

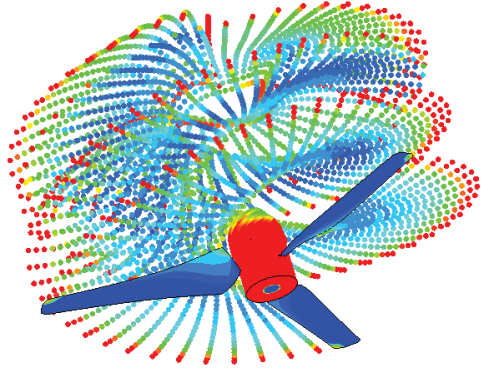
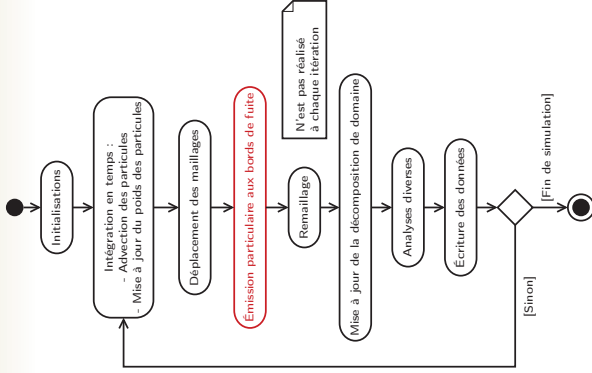


Schéma numérique

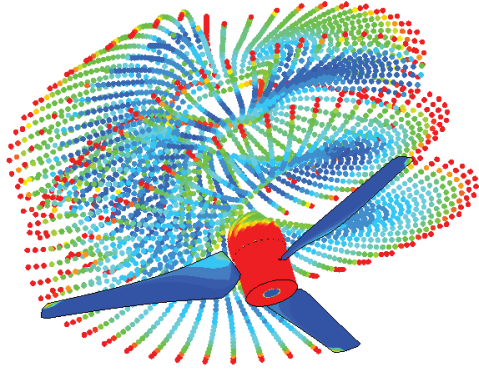
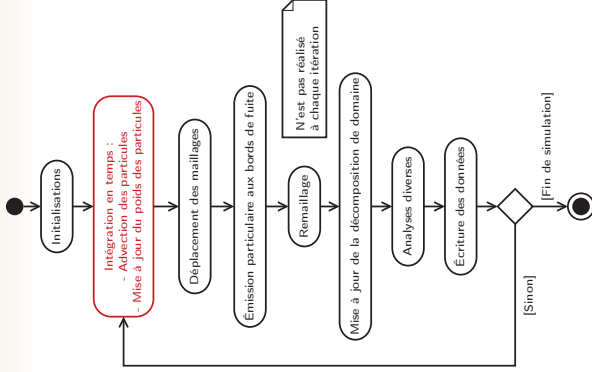


Schéma numérique

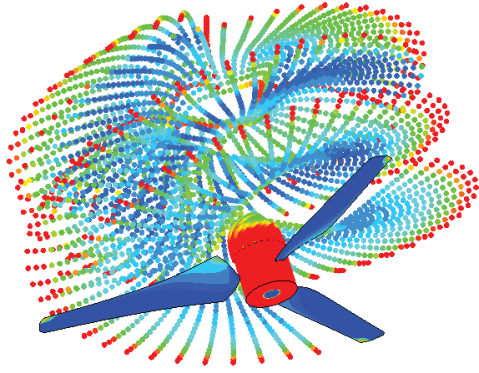
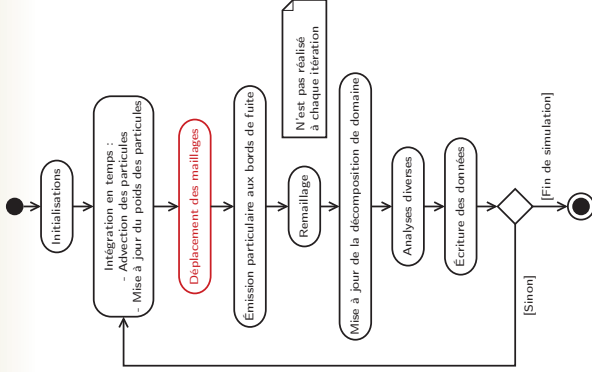
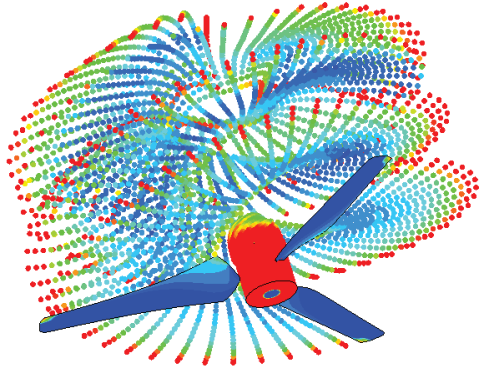
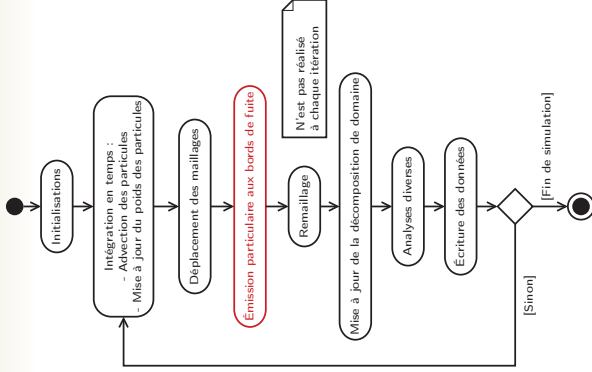


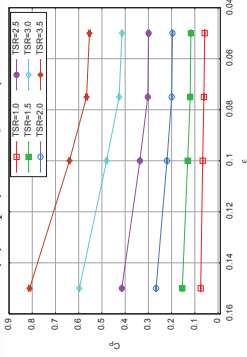
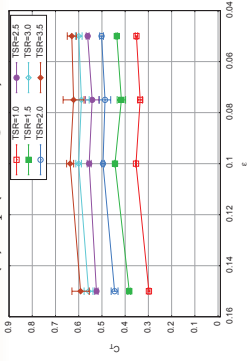
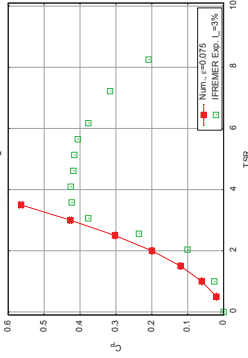
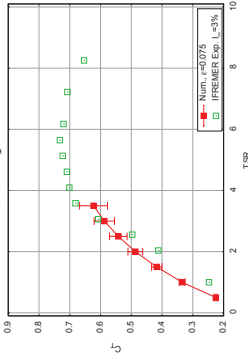
Schéma numérique



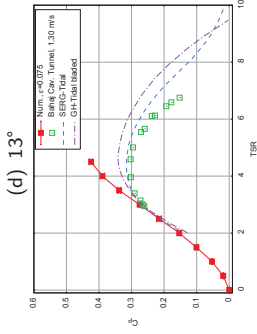
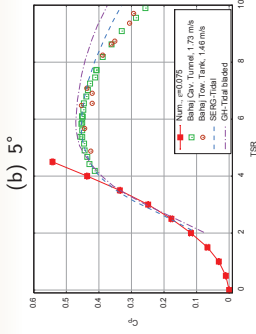
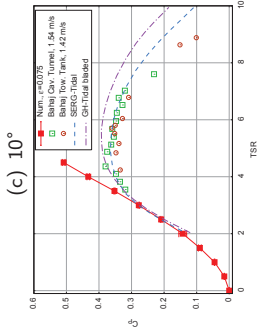
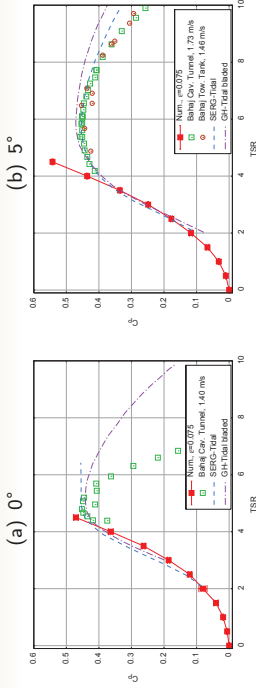
Plan

- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique
- 3 Validation du code**
- 4 Éléments d'implémentation
- 5 Conclusion

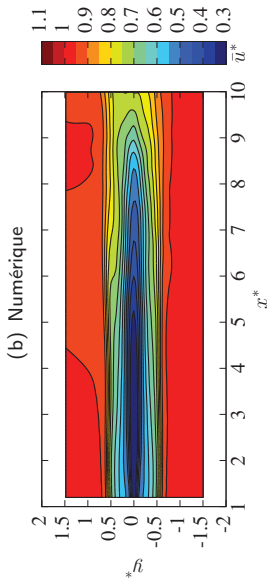
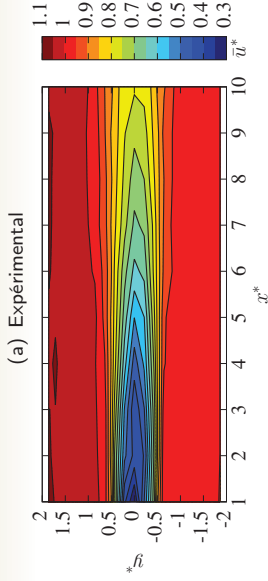
Validation des performances

(a) C_p (convergence)(b) C_T (convergence)(c) C_p (d) C_T 

Validation des performances (BBMC)



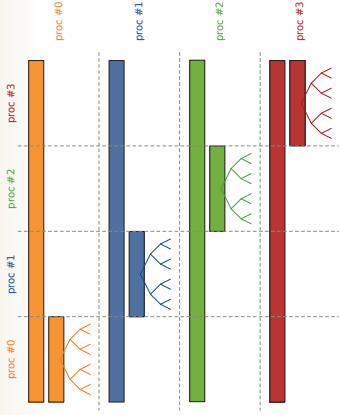
Évolution du sillage



Plan

- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique
- 3 Validation du code
- 4 Éléments d'implémentation**
- 5 Conclusion

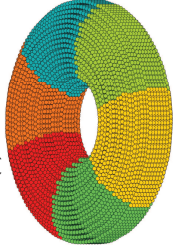
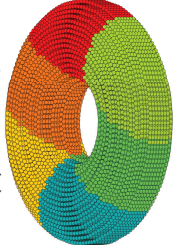
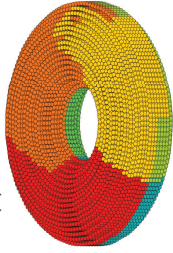
Parallélisation



(a) Ordre de Hilbert

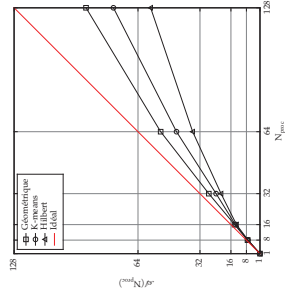
(b) Géométrique

(c) K-means

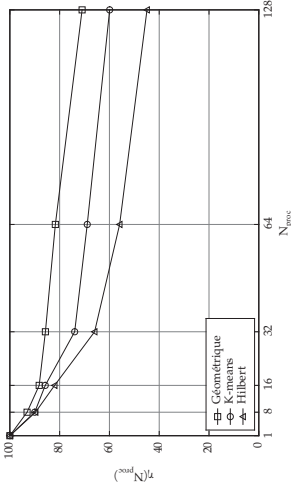


Accélération et efficacité parallèle

(a) Accélération



(b) Efficacité



$$\mathcal{A}(N_{\text{proc}}) = \frac{T(1)}{T(N_{\text{proc}})}, \quad \eta(N_{\text{proc}}) = 100 \frac{\mathcal{A}(N_{\text{proc}})}{N_{\text{proc}}}$$

Plan

- 1 Introduction
- 2 Modèle numérique
- 3 Validation du code
- 4 Éléments d'implémentation
- 5 Conclusion**

Ce que l'on sait faire

"Sillage d'une hydrolienne"
U. du Havre (LOMC) / IFREMER

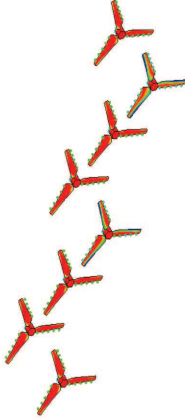


Modélisation du comportement d'une hydrolienne (performances et sillage) :

- ▶ Performances convergées et validées ($TSR \leq 3$)
- ▶ Sillage à améliorer

Ce que l'on tend à savoir faire

"Sillage d'hydroliennes"
U. du Havre (LOMIC) / IPREMER



Plusieurs (huit) hydroliennes en interaction (performances et sillage) :

- ▶ Temps CPU / efficacité parallèle
- ▶ Sillage à améliorer

Conclusions et perspectives

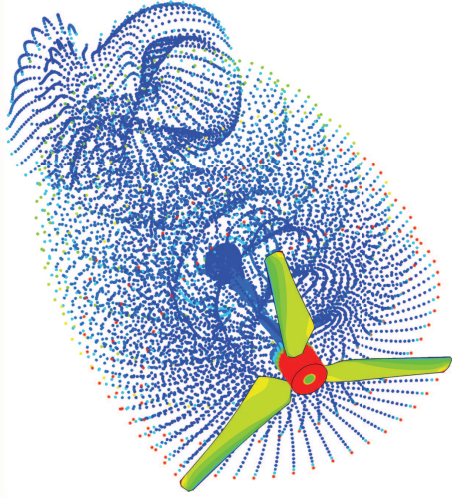
Conclusions

- ▶ Validation du code existant ;
 - ▶ Développements algorithmiques (performances, flexibilité) ;
 - ▶ Prise en compte de plusieurs hydroliennes ;
 - ▶ Identification des verrous importants et pistes de solution ;
- ⇒ **Code prometteur pour modéliser une ferme d'hydroliennes.**

Perspectives

- ▶ Prise en compte du décollement de la couche limite (C. Carlier) :
 - estimation de la ligne de décollement
 - ou bien résolution de la couche limite sur les pales ;
- ▶ Amélioration du modèle de turbulence :
 - modèle de Smagorinsky vs. modèle de Mansour ?
 - modèle dynamique ?
- ▶ Prise en compte de la houle ;
- ▶ Prise en compte de la turbulence ambiante [Rasmussen et al., 2010] .

Merci pour votre attention !



Questions ?