

# Modélisation numérique de sillages lointains d'hydroliennes par une approche volumes finis faiblement compressible

Baptiste ELIE - IGR  
LHEEA - Ecole Centrale Nantes

baptiste.elie@ec-nantes.fr

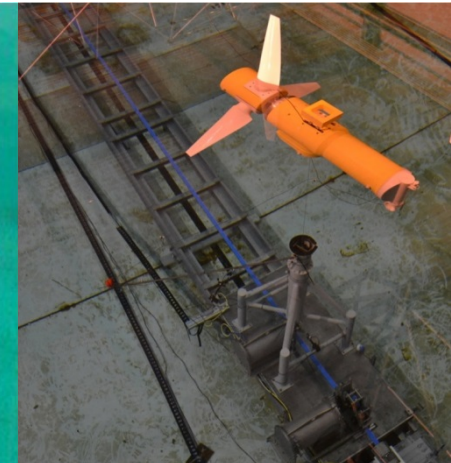
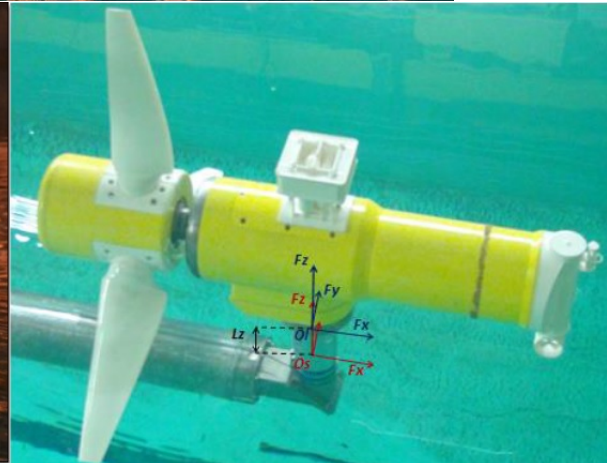
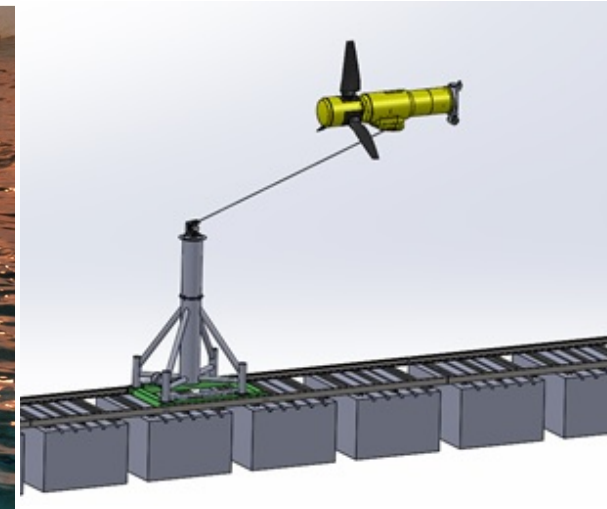


# Sommaire

- 1/ Vue globale des activités expérimentales hydroliennes au LHEEA.
- 2/ Présentation de l'outil de simulation de fermes d'hydroliennes.
- 3/ Applicabilité sur des cas industriels
- 4/ Évaluation des ressources de calcul nécessaires pour les applications visées
- 5/ Développements en cours
- 6/ Conclusions et perspectives

## • Activités expérimentales

- Essais en traction – caractérisation des perfs. d'une hydrolienne.
- Essais modèle forcé – caractérisation coef. hydrodynamiques
- Essais modèle libre – remorquage
- Essais phase d'installation



- Formulation: code **WCCH** + modèles BEM

**Weakly Compressible Cartesian Hydrodynamics**

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \otimes v) + \operatorname{grad}(p) = S + \operatorname{div} \tau \\ \tau = 2\mu D - \frac{2}{3}\mu \operatorname{div}(v)I \text{ et } D = \frac{1}{2}(\operatorname{grad}(v) + {}^t\operatorname{grad}(v)) \end{cases}$$

$\rho$  la masse volumique,  $v$  la vitesse du fluide  
 $S$  les forces volumiques,  $p$  la pression  
 $\mu$  la viscosité cinématique  
 $\bar{\tau}$  le tenseur des contraintes visqueuses  
 $\bar{D}$  le tenseur des taux de déformation.

Equation d'état de Tait (barotrope):  $P - P_0 = \frac{\rho_0 C_0^2}{\gamma} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right]$

$\rho$  :densité,  $P_0$  pression de référence  
 $\gamma$  :constante polytropique = 7  
 $\rho_0$  :densité nominale  
 $C_0$  :vitesse du son nominale.

On choisit  $C_0$  pour que  $Ma = \frac{U_{\max}}{C_0} \leq 0.1$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \operatorname{div}(\Psi_c) = \operatorname{div}(\Psi_v) + S$$

Partie hyperbolique:  
Equations d'Euler

Partie visqueuse  
+ termes sources

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v \end{pmatrix} S = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho f \end{pmatrix} \Psi_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau \end{pmatrix} \Psi_c = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v \otimes v + pI \end{pmatrix}$$

Vecteur  
variables  
conservatives

Termes  
sources

Tenseur flux  
conservatif

Tenseur flux  
visqueux

Ordre des opérateurs →

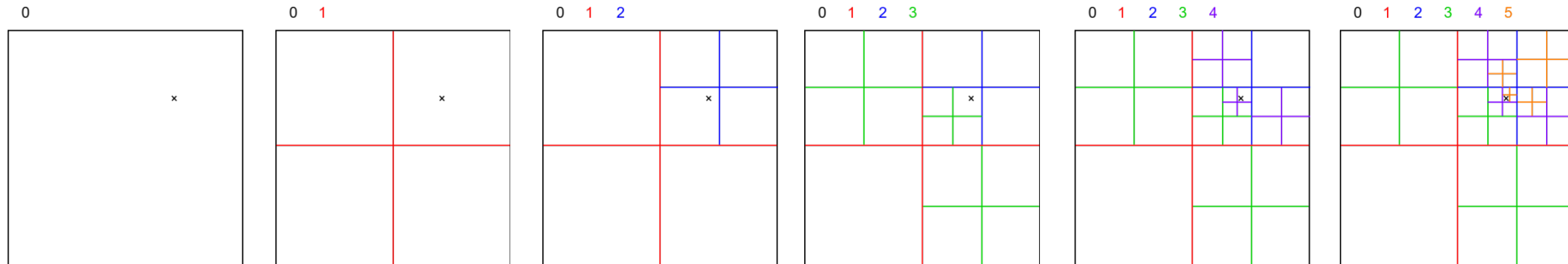
temporel: ordre 4

spatial: ordre > 3

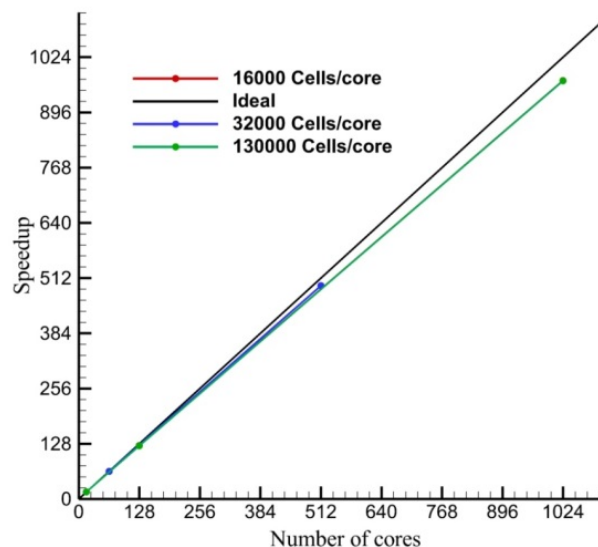
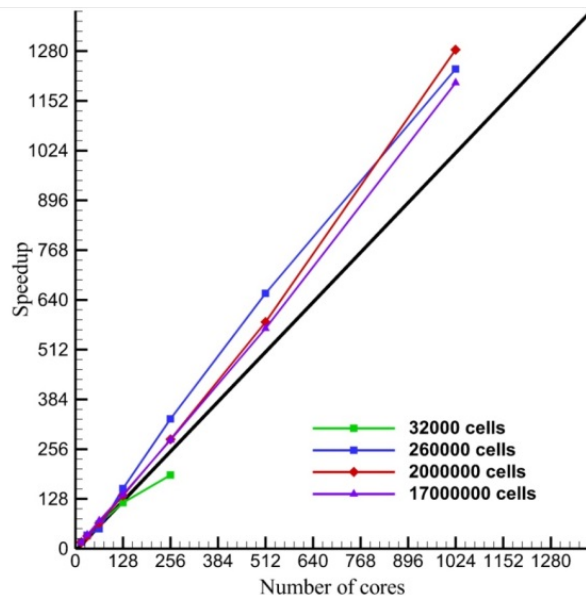


- Raffinement de maillage

- Raffinement/dé-raffinement local
- Structure hiérarchique de type « Octree »



## ■ Performances parallèles



- Scalabilité réalisée sur cas tri-dimensionnel et grille régulière.
- Scalable jusqu'à 1024 coeurs et  $130 \times 10^6$  cellules.
- Comportement majoritairement super-linéaire en scal. forte.
- Efficacité > 95% en scal. faible.

## • Modèle Actuator-Disc

➤ Efforts moyennés sur l'ensemble des éléments du support cylindrique

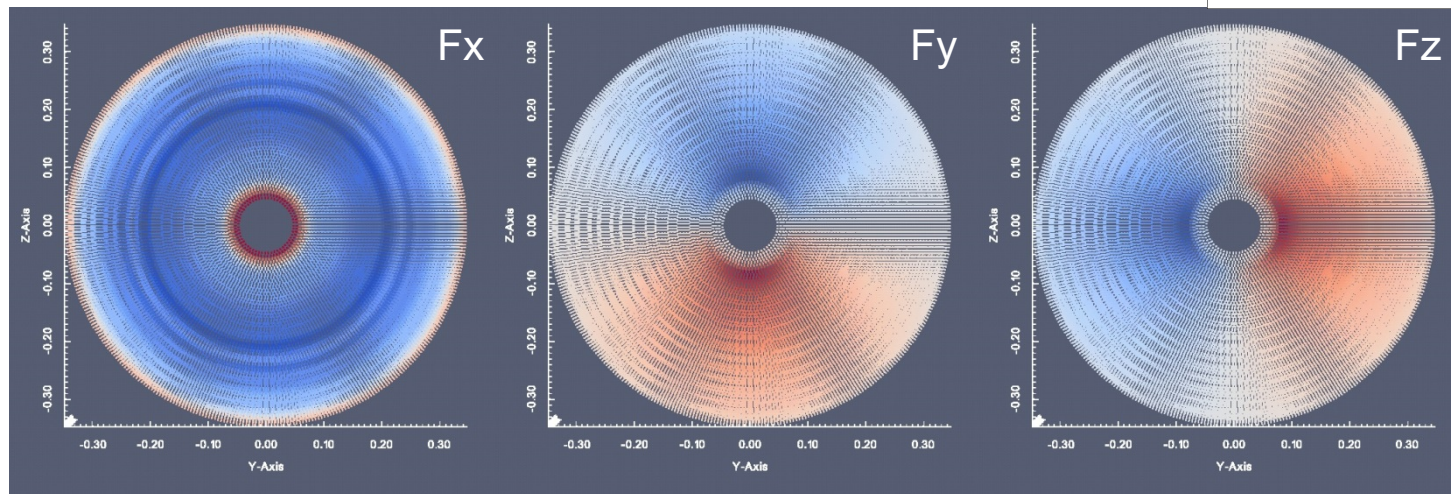
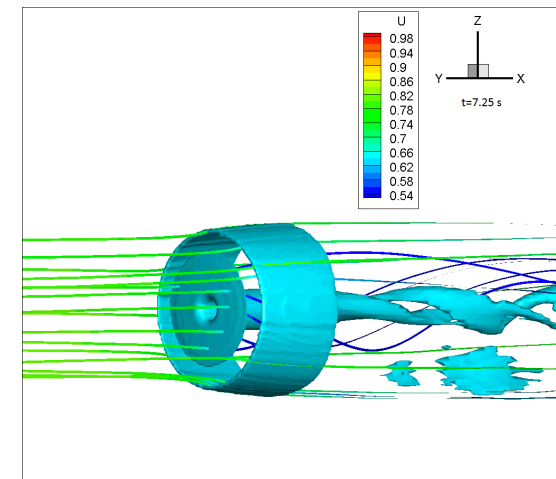
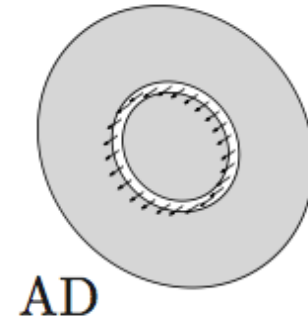
➤ Distribution radiale non-uniforme

$$\begin{aligned} F_x(i_r) &= \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \Delta r (C_L \cos(\Phi) + C_D \sin(\Phi)) p, \\ F_y(i_r) &= \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \Delta r (C_L \sin(\Phi) - C_D \cos(\Phi)) p \cos(\theta) \\ F_z(i_r) &= \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \Delta r (C_L \sin(\Phi) - C_D \cos(\Phi)) p \sin(\theta) \end{aligned}$$

$p$  : nombre de pales  
 $\Delta r$  : hauteur éléments de pale  
 $\Phi$  : angle d'incidence

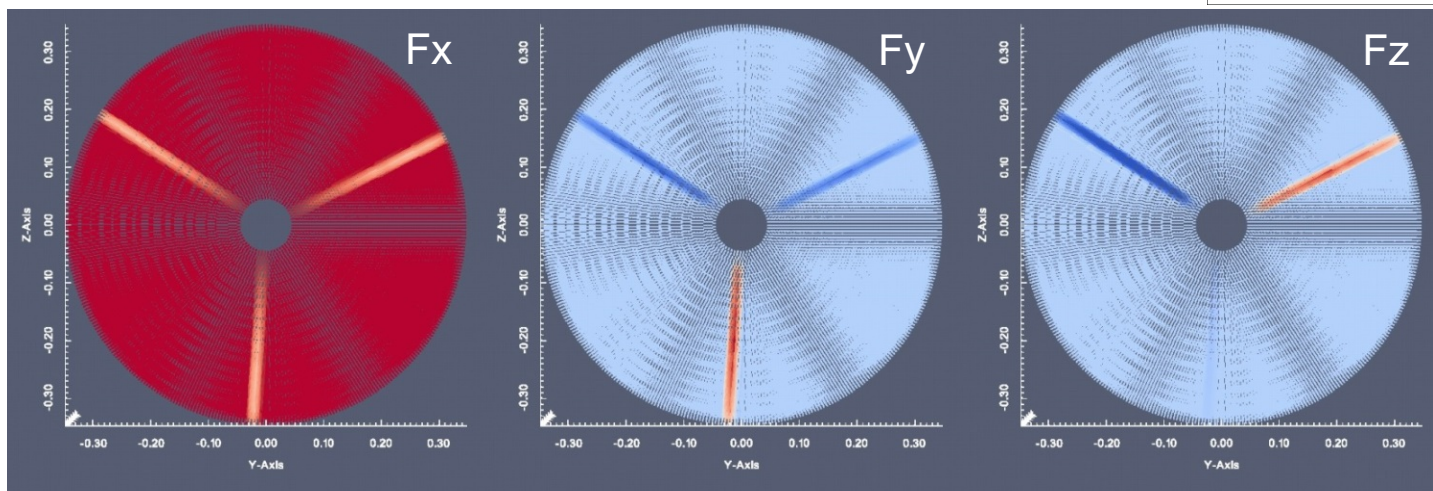
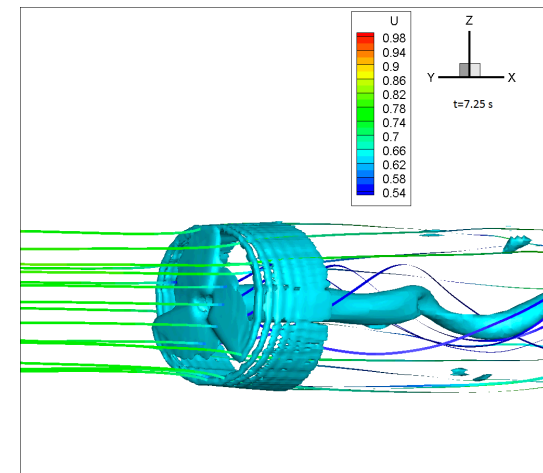
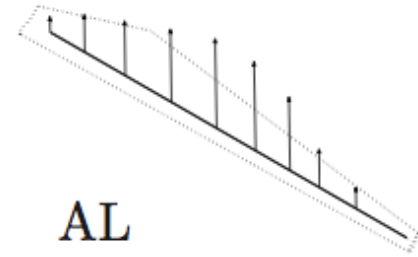
Force volumique:  $F_{x,y,z}^v(i_r) = \frac{F_{x,y,z}(i_r)}{\mathcal{V}(i_r)}$ , avec:  $\mathcal{V}(i_r) = 2\pi r(i_r) \Delta r \Delta x N_x$

$$F_{total} = \sum_{i_r=1}^{N_r} F_{total}(i_r) = \sum_{i_r=1}^{N_r} (F_{x,y,z}^v(i_r) \mathcal{V}(i_r))$$

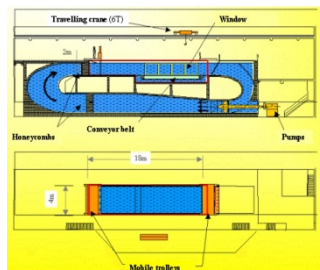


- Modèle Actuator-Line:

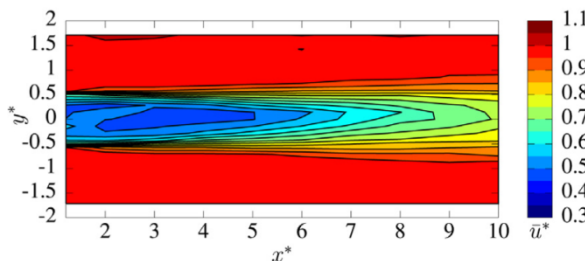
- Efforts moyennés sur les éléments du support cylindrique à proximité des lignes tournantes
- Distribution radiale et azimutale non-uniforme
- Répartition des efforts sur une bande de  $n$  éléments



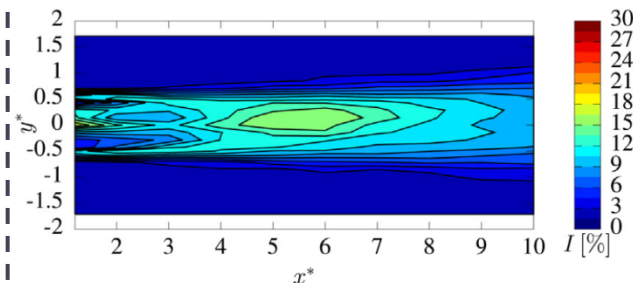
## Essais IFREMER



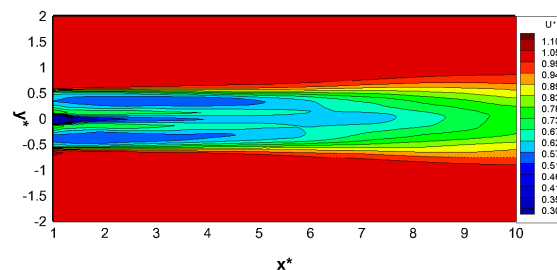
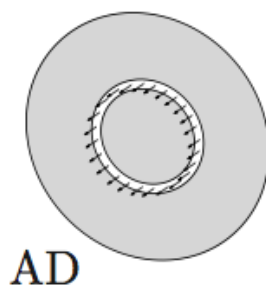
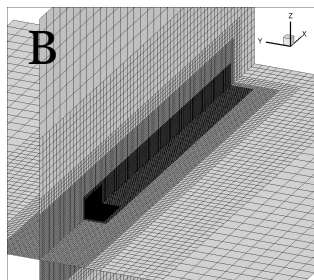
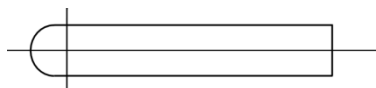
### ❖ Champs de vitesse axiale moyenne



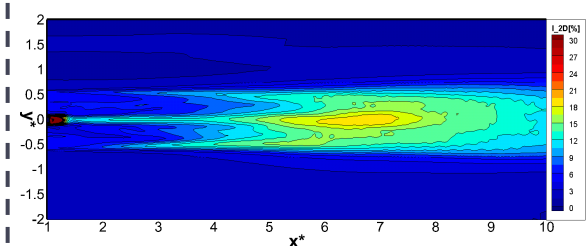
### ❖ Champs de taux d'intensité turbulente moyen



## Simulations WCCH



- Bon accord global.
- Bon résultat pour les sillages moyens à lointains à partir de  $x^*=6$ .
- Moyeu important pour  $0 < x^* < 6$



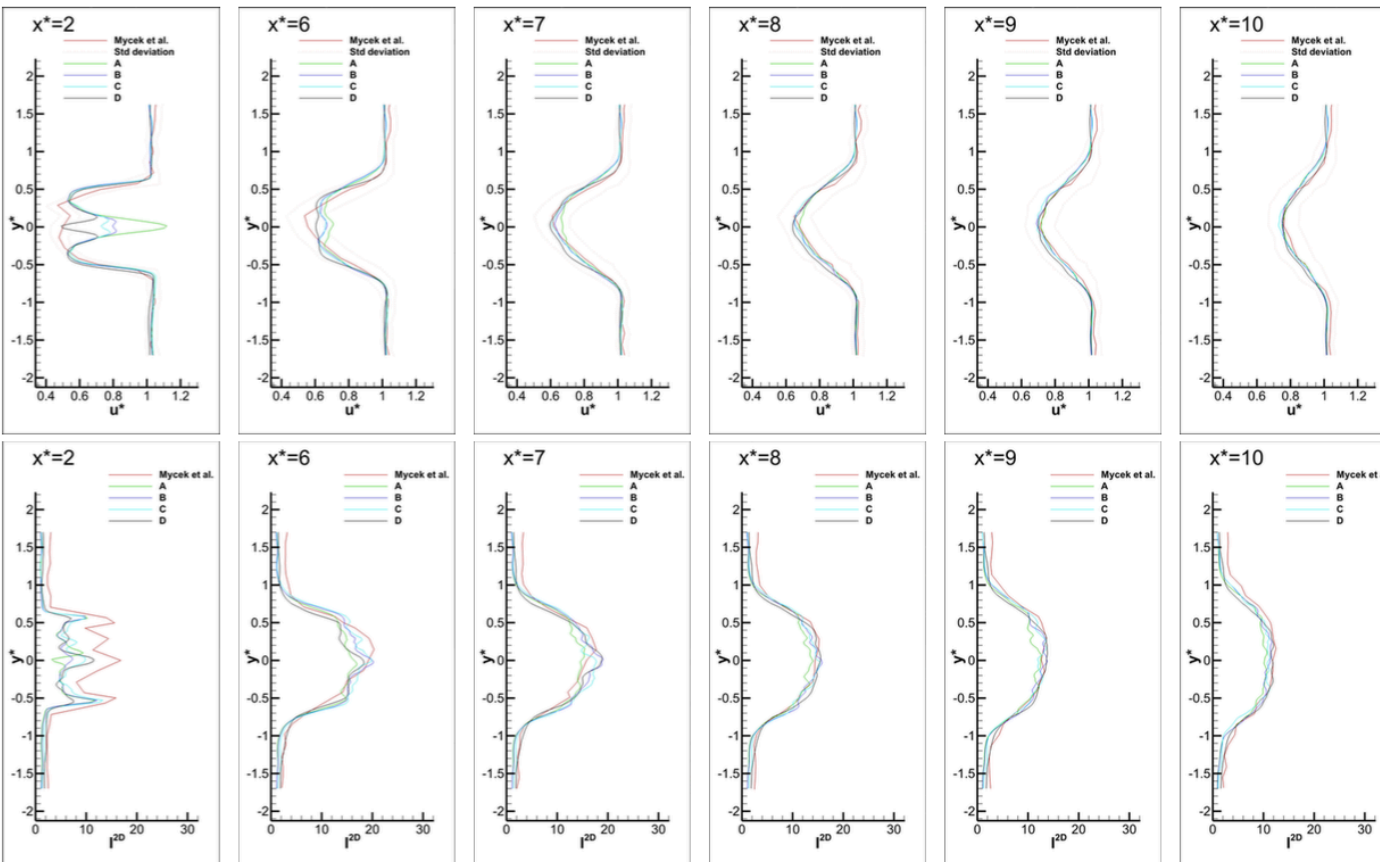
- Bon accord global.
- Pic de turbulence en  $x^* \approx 6$ .
- Bon accord dans le très proche sillage ( $1.2 < x^* < 3$ ) sur la forme du sillage.
- Sous-estimation de la turbulence en proche sillage.
- Passage d'une forme « plateau » à une forme « cloche » en  $x^*=6$ .

- ❑  $1,8 \times 10^6$  mailles cubiques fixes.
- ❑ Discrétisation AMR sur 7 niveaux concentrée autour du modèle et son sillage.



Vitesse axiale  
moyenne

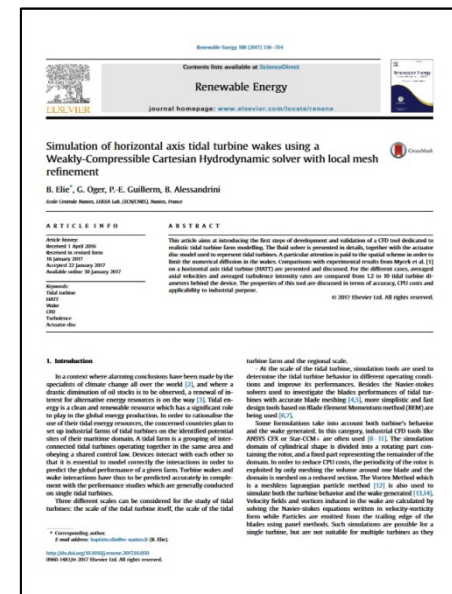
Intensité turbulente  
moyenne



## • Valorisations scientifiques

B. Elie. *Modélisation numérique de sillages lointains d'hydroliennes par une approche volumes finis faiblement compressible*. Doctoral Thesis, Ecole Centrale Nantes (ECN), 2015.

B. Elie et al. *Simulation of Horizontal Axis Tidal Turbine wakes using a Weakly-Compressible Cartesian Hydrodynamic solver with local mesh refinement*. Renewable Energy, 2017.

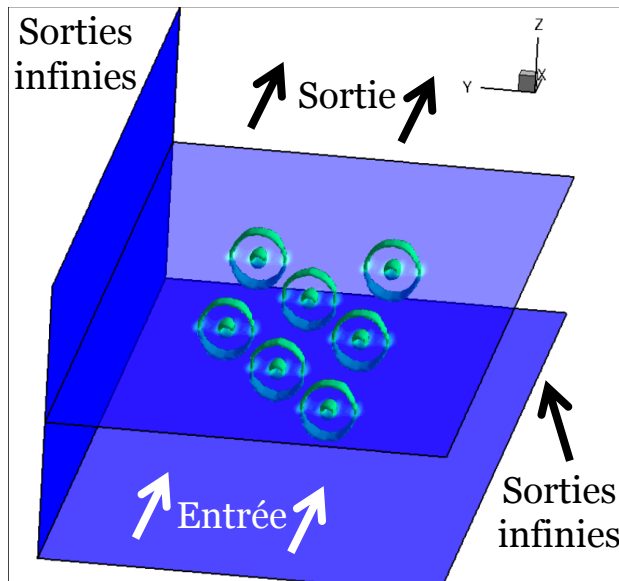
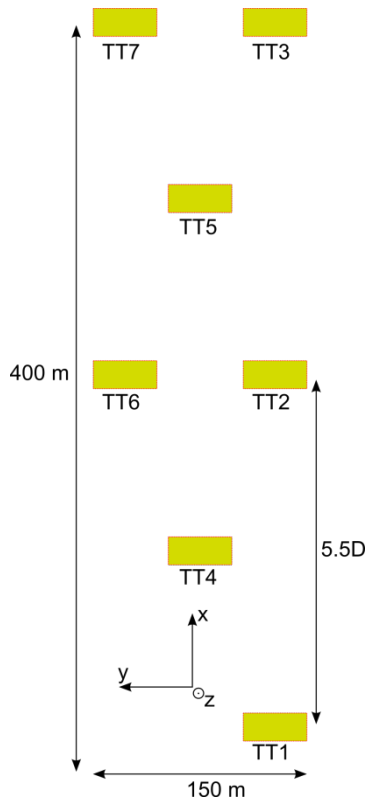


# Applicabilité sur des cas industriels

## Production énergétique dans une ferme de sept hydroliennes

### Conditions du calcul:

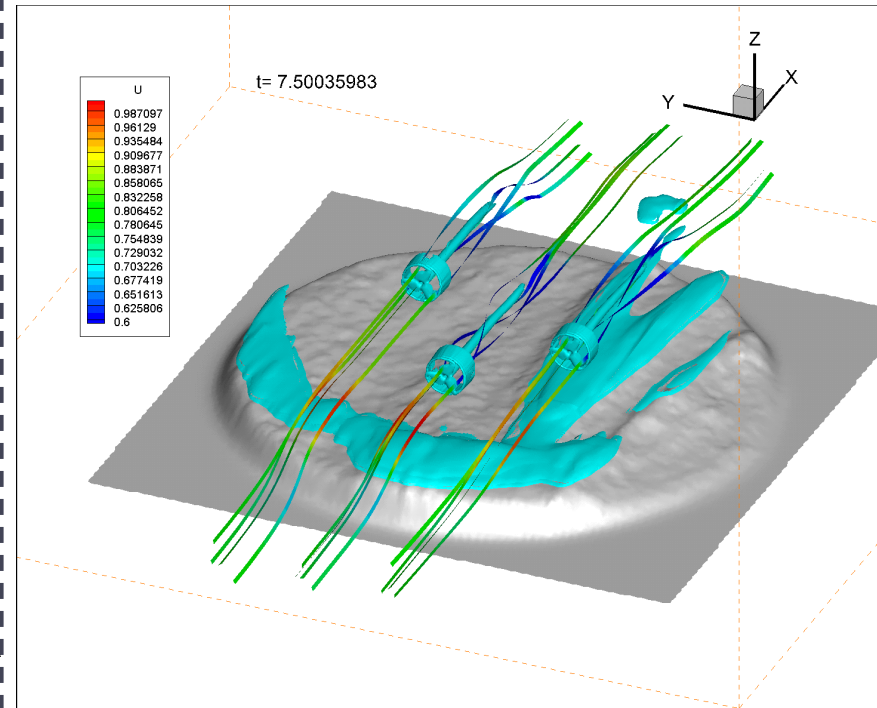
- Ferme de 7 hydroliennes.
- $D=18\text{m}$ .
- $L=400\text{m}$ ,  $l=150\text{m}$ ,  $w=100\text{m}$ .
- Mailles parallélépipédiques rectangles fixes:  $2,1 \times 10^6$  mailles.
- Entrée: courant uniforme de  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$  suivant  $\vec{x}$ .
- Autres limites: conditions de sorties infinies.



## Topographie de fond marin variable : Le cas du Raz-Blanchard

### Conditions du calcul:

- Ferme de 3 hydroliennes.
- $D=0,7\text{m}$ .
- Modèle Actuator-Line.
- Entrée: courant tri-dimensionnel turbulent de  $0.8 \text{ m/s}$  suivant  $\vec{x}$  (TurbSim).
- Autres limites: conditions de sorties infinies.
- Mailles cubiques fixes:  $5.4 \times 10^6$  mailles.
- Discrétisation AMR concentrée autour des modèles et son sillage.
- Taille de la grille autour des modèles AL:  $1.64 \times 10^{-2} \text{ m}$  soit 43 points par  $D$ .
- Taille de la grille au voisinage du fond variable:  $3.2 \times 10^{-2} \text{ m}$ .



- **Temps CPU moyen:**  $7.27 \times 10^{-5} \text{ s.coeur.nbcellules}^{-1} \cdot \Delta t^{-1}$
- **Condition des tests:** architecture bi-processeurs 10-cœurs Intel Ivy Bridge cadencés à 2,5 GHz sur la machine de calcul ANTARES basée au CRIHAN (Rouen)

## Echelle bassin

Diamètre hydrolienne = 0,7 m  
 Vitesse de rotation = 79,8 rpm  
 Longueur domaine = 7 m  
 Vitesse courant = 0,8 m/s  
 $\Delta x_{\min} = 0,011 \text{ m}$

$$Re = 5,6 \cdot 10^5$$

## Echelle réelle

Diamètre hydrolienne = 18 m  
 Vitesse de rotation = 20 rpm  
 Longueur domaine = 180 m  
 Vitesse courant = 3,5 m/s  
 $\Delta x_{\min} = 0,283 \text{ m}$

$$Re = 6,3 \cdot 10^7$$

- Vitesses de bout de pale ↗ (18 m/s)
- Il faut augmenter  $C_o$  pour conserver  $Ma \leq 0,1$
- $\Delta t$  et temps physique à simuler impactés

Scénario 1 : Hydrolienne seule			
Temps de simulation	Temps physique simulé	Nombre d'hydroliennes	Nombre de coeurs
12.45 heures	360 secondes	1	1000
Scénario 2 : Ferme pilote (10 hydroliennes sur 2 rangées)			
Temps de simulation	Temps physique simulé	Nombre d'hydroliennes	Nombre de coeurs
10 jours	720 secondes	10	1000
Scénario 3 : Ferme pleine échelle (100 hydroliennes sur 5 rangées)			
Temps de simulation	Temps physique simulé	Nombre d'hydroliennes	Nombre de coeurs
260 jours	1800 secondes	100	1000

Passage en incompressible → Scénario 2: 24,9 heures

Scénario 3: 26 jours

## 3 grands axes de développement

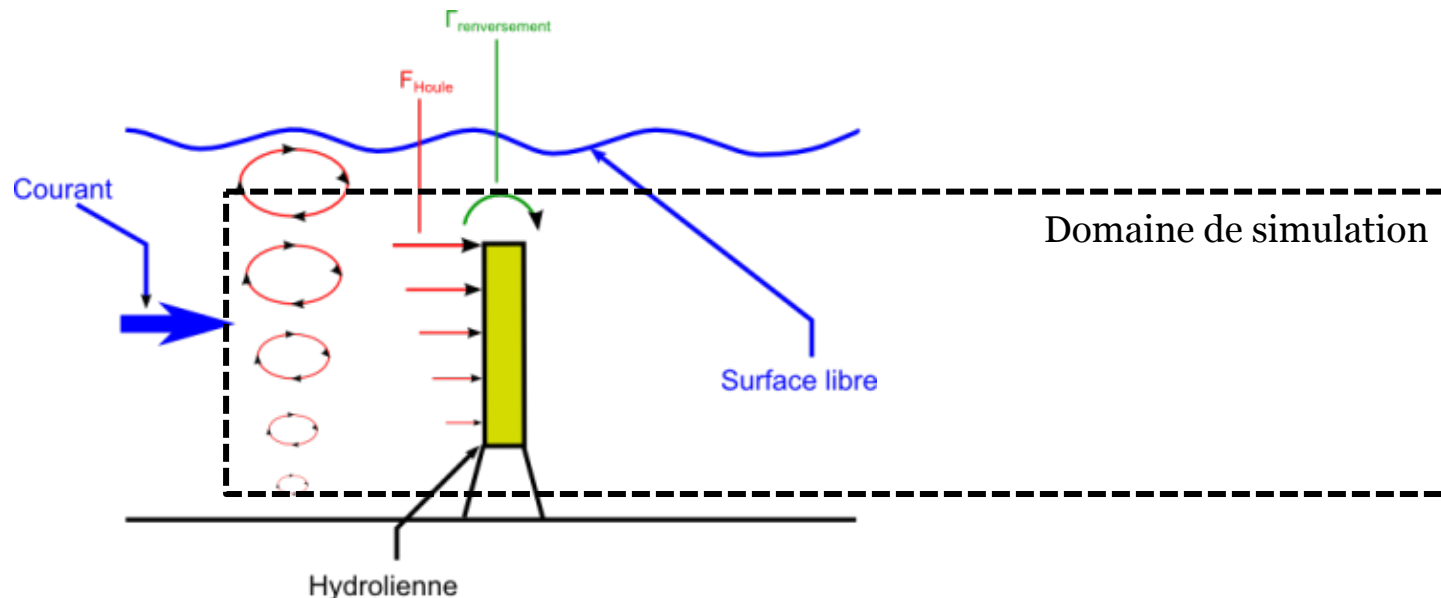
- Amélioration de la modélisation du milieu marin.
  - Amélioration de la Prise en compte de conditions de courants turbulents.
  - Prise en compte de la houle.
  - Traitement de la turbulence: validation des sillages à Reynolds élevés.
  
- Etudier l'optimisation des fermes d'hydroliennes
  - Etude de l'agencement spatial des hydroliennes au sein d'une ferme.
  - Etude du comportement d'une ferme d'hydrolienne en fonction de la stratégie de pilotage.
  
- Continuer la validation et le développement des modèles d'hydroliennes.
  - Validation sur des cas avec plusieurs hydroliennes.
  - Validations du modèle sur des cas houle/courant.
  - Etude du comportement des modèles avec des courants qui présentent un angle d'incidence non nul.



➤ **Objectif:** Être capable de prendre en compte l'influence de la houle sur les sillages.

- Développement d'une méthode de prise en compte de la houle dans WCCH  
→ 2 méthodes envisagées

- 1. Prise en compte de la cinématique de houle mono-chromatique par forçage sur les bords du domaine.
- **2. Prise en compte de la cinématique de houle par méthode SWENSE.**



## 2. Méthode SWENSE

### • a/ Description du modèle

$$\vec{u} = \vec{u}_I + \vec{u}_D$$

$$\rho_I \simeq \rho_D \longrightarrow \rho = \rho_T = \rho_D \text{ and } P_D = EOS(\rho_D)$$

Continuity equation:

$$\frac{\partial \rho_D}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_D (\vec{u}_I + \vec{u}_D)) = 0 \quad (54)$$

The incident field is assumed to be incompressible, thus  $\nabla \cdot \vec{u}_I = 0$ . The continuity equation becomes:

$$\frac{\partial \rho_D}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_D \vec{u}_D) = -\vec{u}_I \cdot \nabla (\rho_D) \quad (55)$$

Momentum equation:

$$\frac{\partial \rho_D \vec{u}_I}{\partial t} + \frac{\partial \rho_D \vec{u}_D}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho_D (\vec{u}_I + \vec{u}_D)) \otimes (\vec{u}_I + \vec{u}_D)] + \nabla P_I + \nabla P_D = \rho_D \vec{f} + \mu \vec{\Delta} (u_I + u_D) \quad (56)$$

As we consider a potential field for the incident part, the incident field satisfies the equation (the gravity terms are supposed to be contained in the incident field):

$$\frac{\partial \rho_I \vec{u}_I}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_I \vec{u}_I \otimes \vec{u}_I) + \nabla P_I - \rho_D \vec{f} - \mu \vec{\Delta} u_I = 0 \quad (57)$$

Thus we obtain:

$$\frac{\partial \rho_D \vec{u}_D}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_D \vec{u}_D \otimes \vec{u}_D) + \nabla \cdot (\rho_D \vec{u}_I \otimes \vec{u}_D) + \nabla \cdot (\rho_D \vec{u}_D \otimes \vec{u}_I) + \nabla P_D = \mu \vec{\Delta} u_D$$

### ■ Introduction of source terms

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho_D \\ \rho_D u_D \\ \rho_D v_D \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho_D u_D & \rho_D v_D \\ \rho_D u_D^2 + P_D & \rho_D u_D v_D \\ \rho_D u_D v_D & \rho_D v_D^2 + P_D \end{pmatrix} = -\nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho_D u_I & \rho_D v_I \\ 2\rho_D u_I u_D & \rho_D u_I v_D + \rho_D u_D v_I \\ \rho_D u_I v_D + \rho_D u_D v_I & 2\rho_D v_I v_D \end{pmatrix} + \mu \vec{\Delta} (u_D)$$

Additional source terms

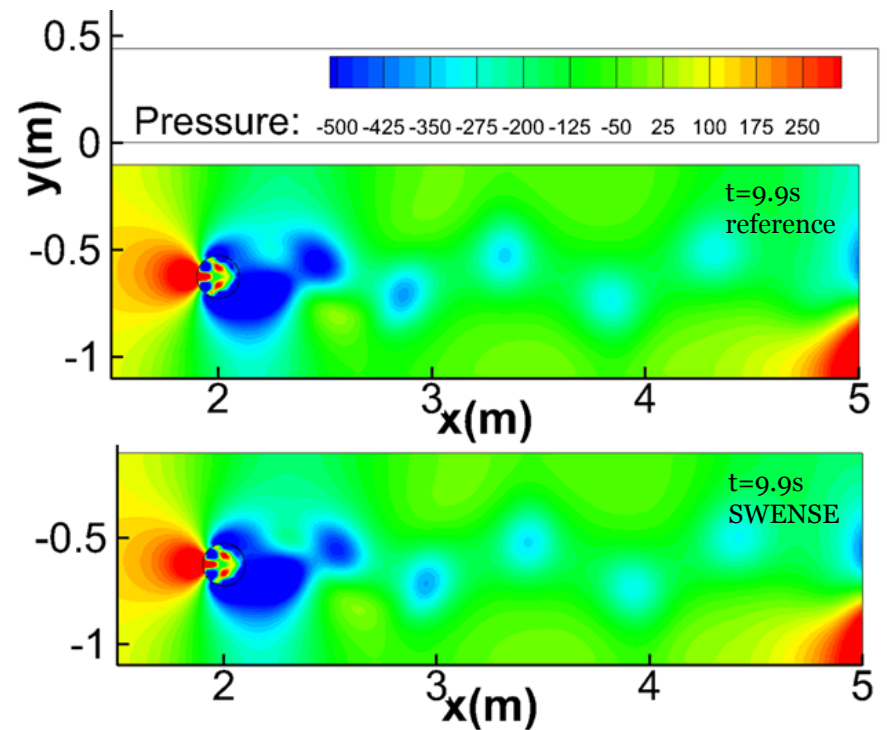
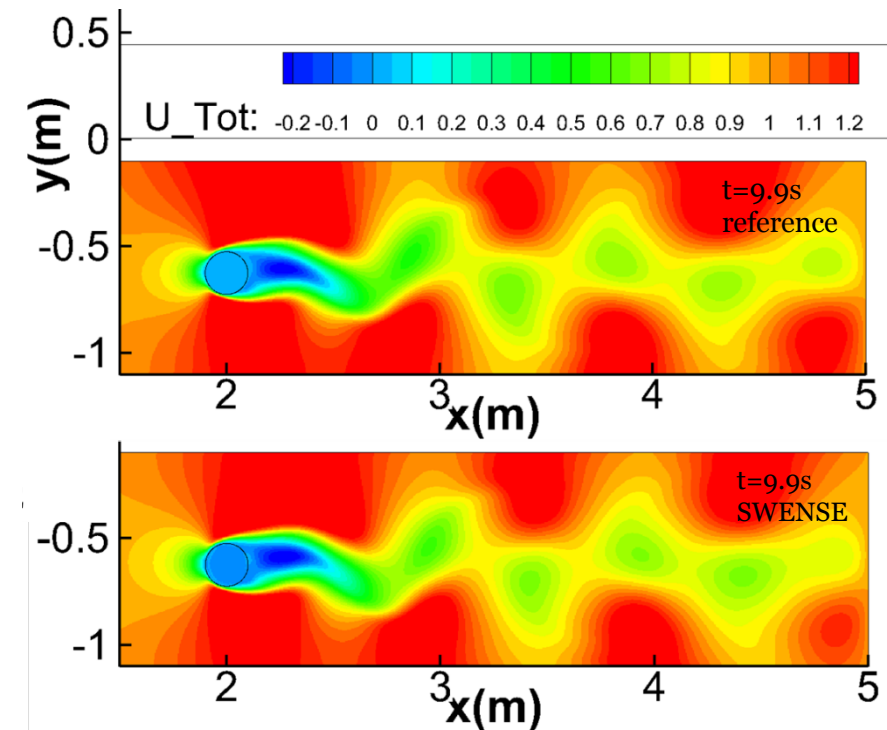
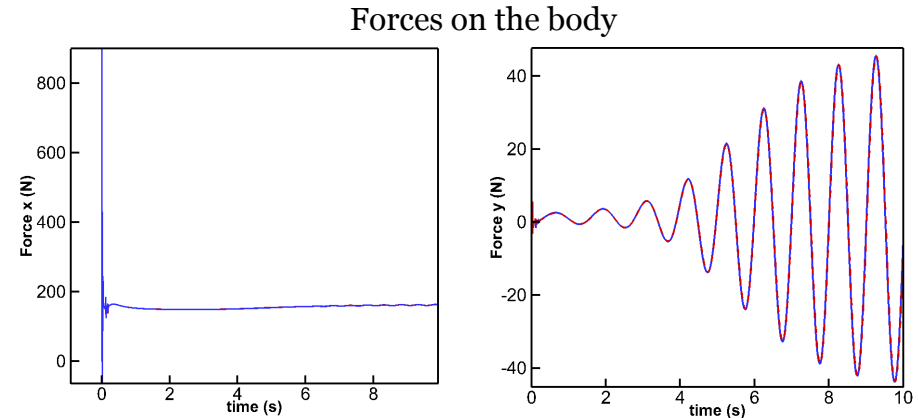
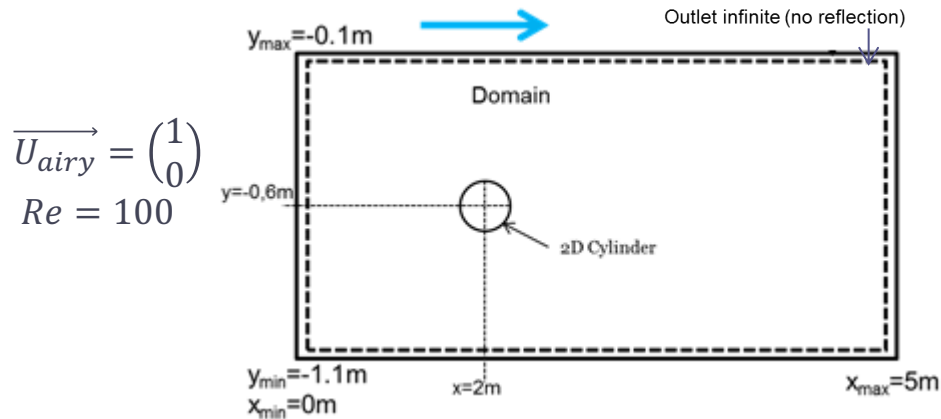
### ■ This source term is reconstructed with the WENO scheme (5<sup>th</sup> order):

- Diffracted field: reconstructed at the interface between two cells
- Incident field: taken at the interface between two cells

■ Boundary condition on the body:  $\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} = \frac{\rho (\vec{v}_{corps} - \vec{u}^n)}{\Delta t} \longrightarrow \frac{\partial \rho_D \vec{u}_D}{\partial t} = \frac{\rho_D (\vec{v}_{corps} - \vec{u}_I^n - \vec{u}_D^n)}{\Delta t}$

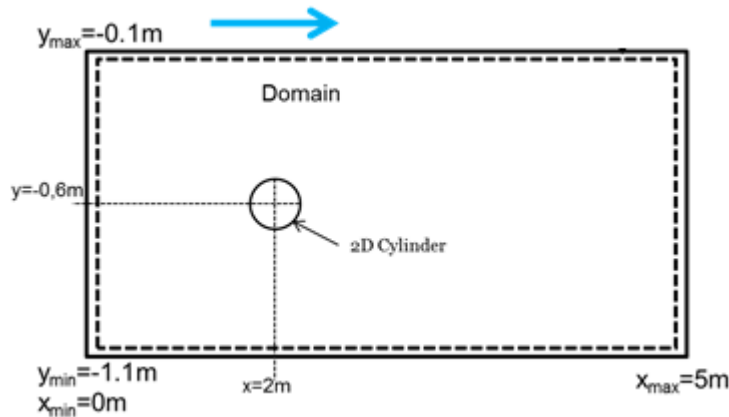
## 2. Méthode SWENSE

- b/ Test case 1: validation with current on a 2D cylinder (no waves)

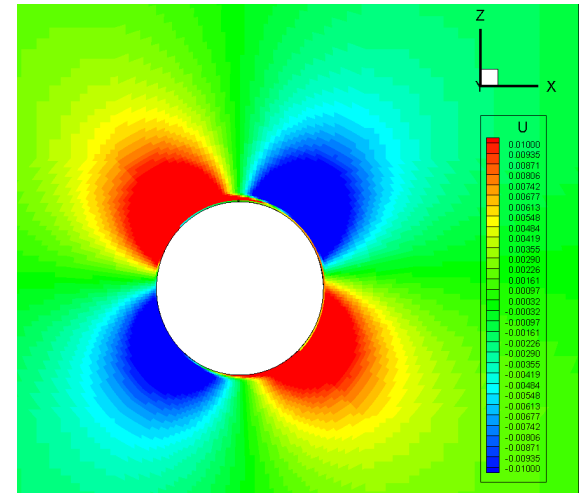


## 2. Méthode SWENSE

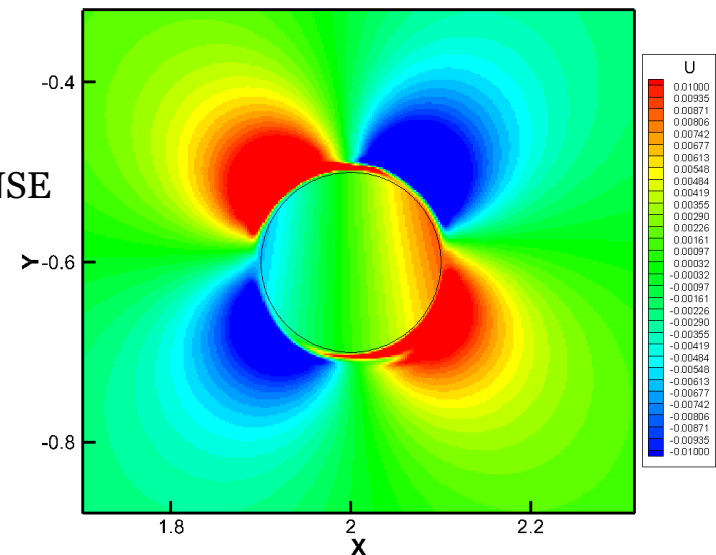
- c/ Test case 2: validation with waves on a 2D cylinder (no current)
- Airy waves :  $H = 0.05\text{m}$   $T = 1.2649\text{s}$   $\lambda = 2.4676\text{m}$   $\rightarrow$  steepness 2%
- Viscosity :  $\mu = 0.01\text{ Pa.s}$



$t=0.7\text{s}$   
WCCH SWENSE



$t=0.7\text{s}$   
ICARE SWENSE



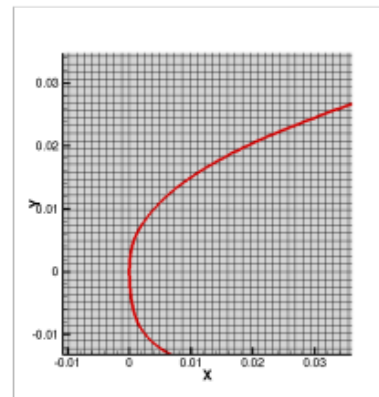
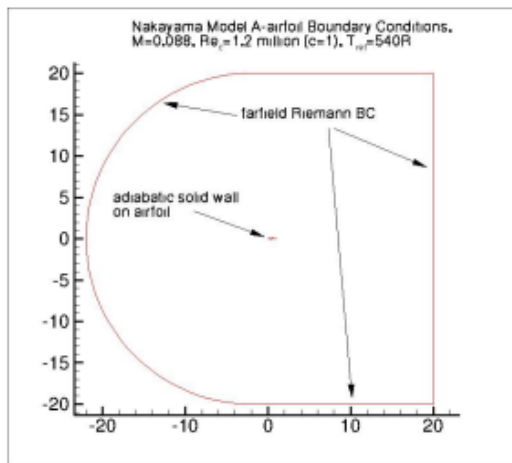
- Validation sur un cas hydrolien reste à faire !  
(voir littérature)



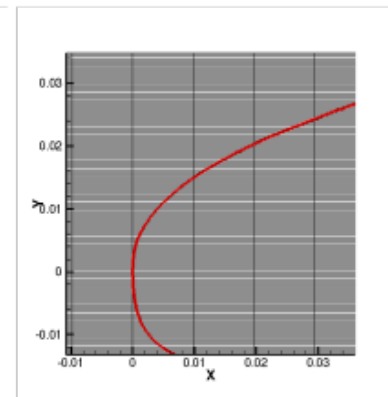
➤ **Objectif:** Traitement de la turbulence dans WCCH (en vue de la validation des sillages à Reynolds élevés). Modélisations visées hybrides RANS/LES.

- Développement modèle RANS compatible approche hybride → Modèle de Spalart Allmaras
- Validation: sillage proche sur profil asymétrique (profil de Nakayama)

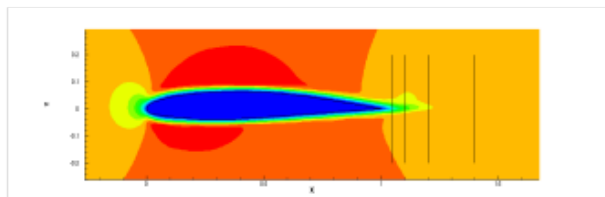
Profil de Nakayama



Résultats WCCH  $\Delta y_1 \sim 3.10^{-4}$



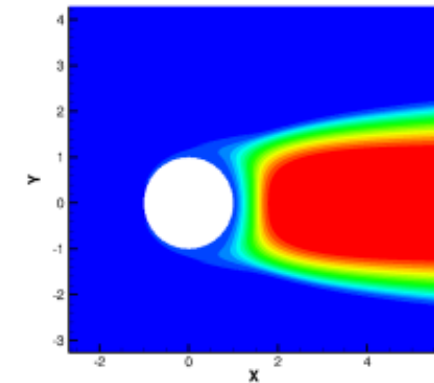
Résultats Ref  $\Delta y_1 \sim 2,5.10^{-6}$



Niveau de raffinement

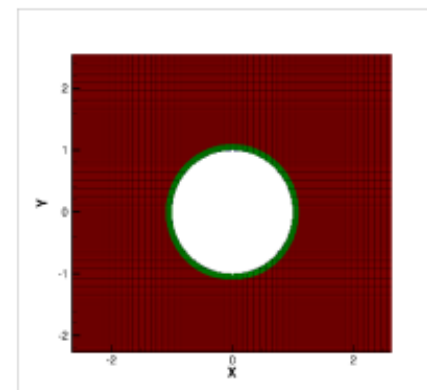
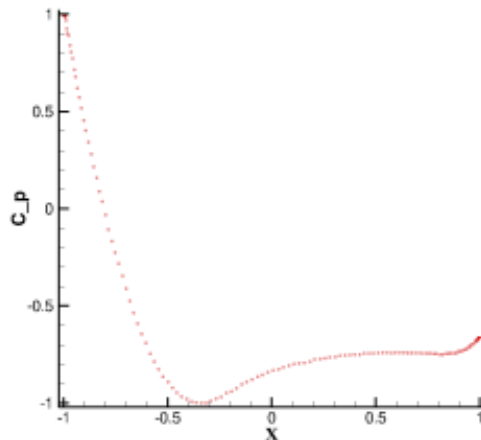
	<u>Fx</u>	<u>Fy</u>
<u>Level 11</u>	0,03	0,05
<u>Level 12</u>	0,04	0,045
<u>Level 13</u>	0,06	0,04
<u>Level 14</u>	0,08	0,032
<u>Ref</u>	0,1	0,02

- Validation: Ecoulement autour d'un cylindre à  $Re=1,4*10^5$  et  $10^6$



<u>Re</u>	$1,4*10^5$	$10^6$
<u>Maillage</u>	$5*10^5$	$7*10^5$
<u>Cd</u>	0,9	0,41
<u>Ref</u>	0,87	0,40
<u>Theta_sep</u>	$78^\circ$	$99^\circ$
<u>Ref</u>	$78^\circ$	$99^\circ$

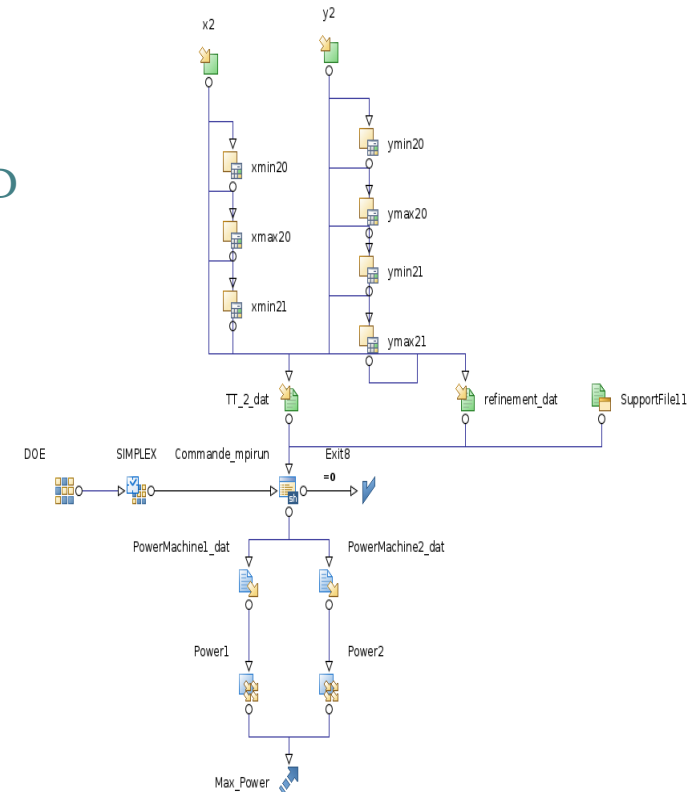
En cours : test de la version Hybride  
Detached Eddy Simulation (DES-SA)



- Objectifs:
- Mise en place d'une boucle d'optimisation pour accueillir WCCH.
  - Déterminer l'influence des  $\neq$  critères d'optim spatiaux.

• Travail réalisé:

- Intégration du solver WCCH au sein de la plateforme d'optimisation multi-objectifs modeFRONTIER
- Mise en place d'une boucle d'optimisation sur WCCH 2D
- Intégration à un environnement HPC -> WCCH 3D
- Mono-objectif / multi-objectif
- Travail sur les algorithmes d'optimisation: (génétique, SIMPLEX, ...)

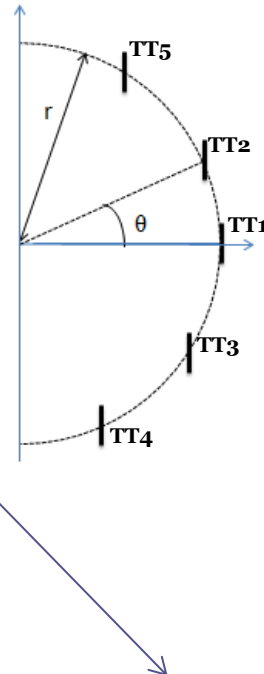
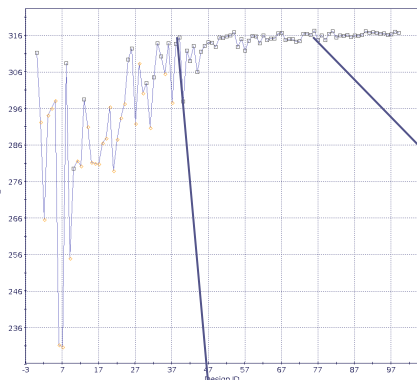


## Exemples de résultats:

### Config. en arc de cercle / config. en flèche (5 hydroliennes).

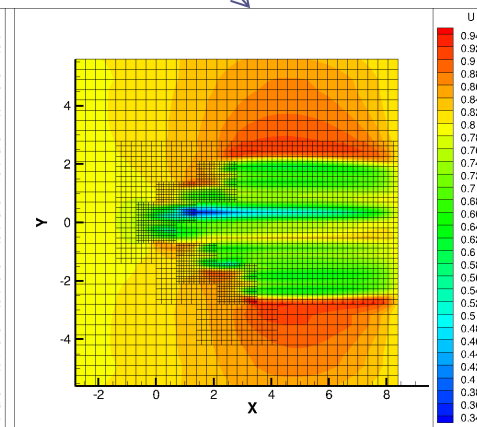
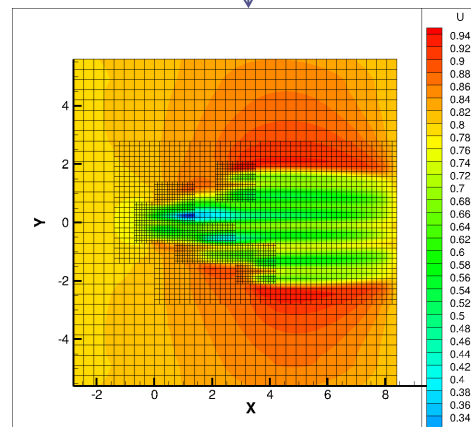
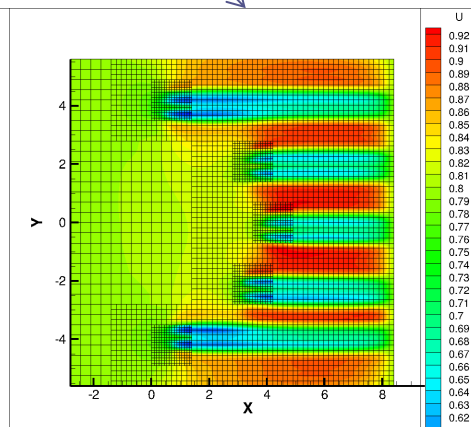
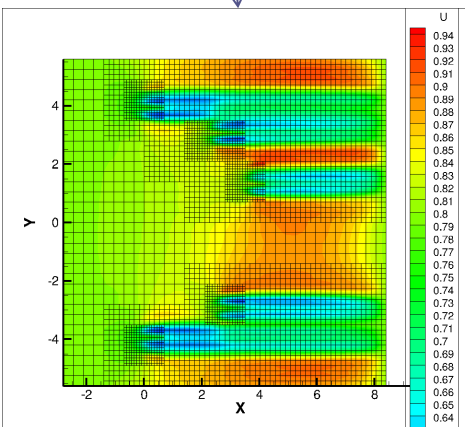
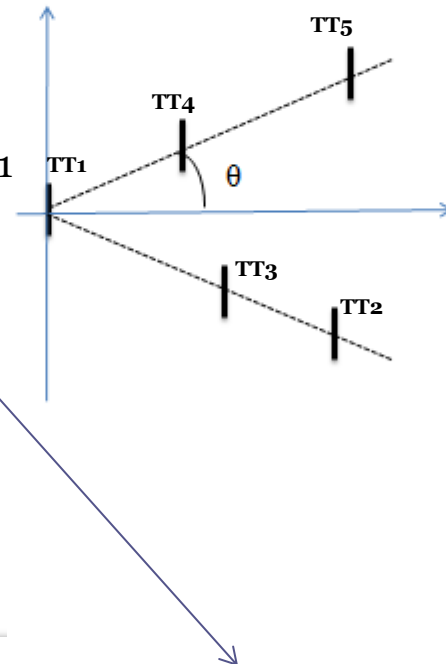
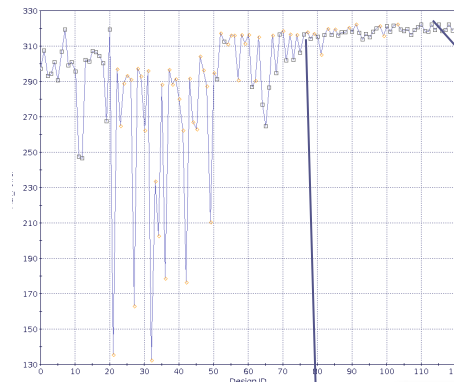
#### Paramètres d'entrée :

- $r$ , rayon du cercle
- $\Theta_i$ , angles entre chaque machine et l'axe x.



#### Paramètres d'entrée :

- $\Theta$ , angle entre l'axe x et les machines
- $R_i$ , distance entre la machine 1 fixée à (0,0) et la machine i



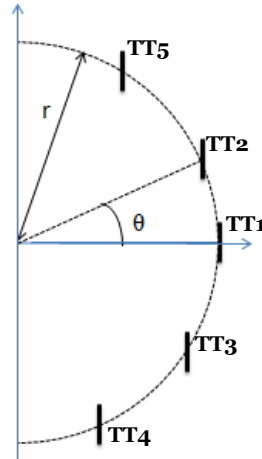
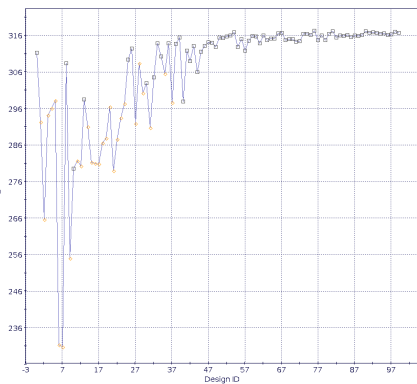


## Exemples de résultats:

### Config. en arc de cercle / config. en flèche (5 hydroliennes).

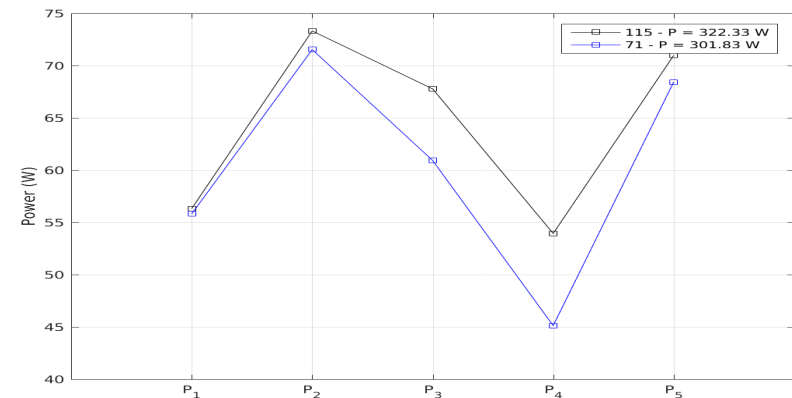
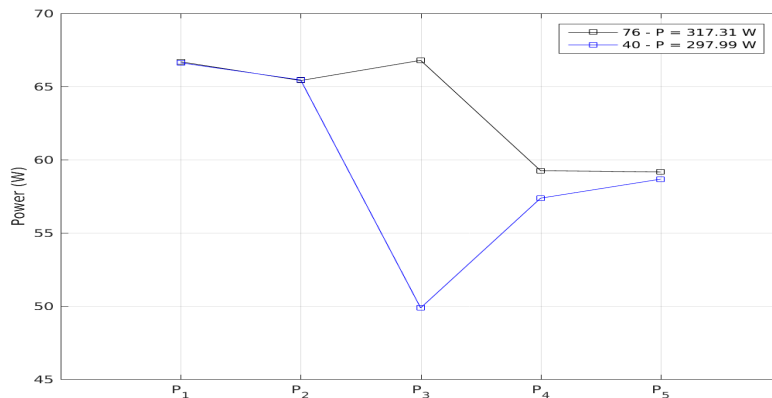
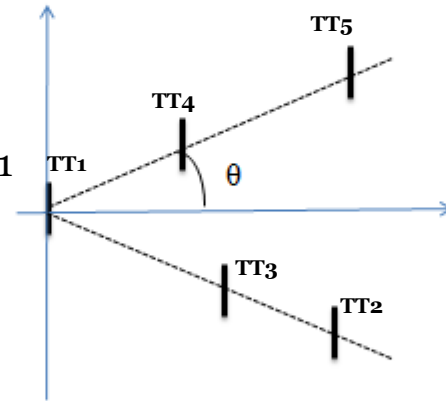
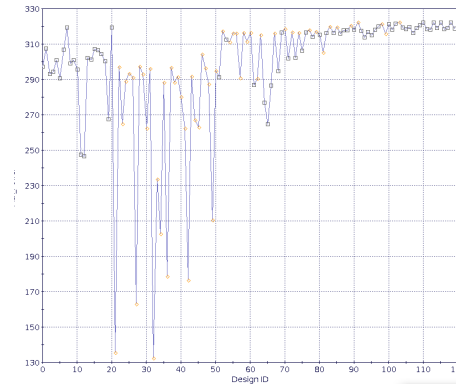
#### Paramètres d'entrée :

- $r$ , rayon du cercle
- $\Theta_i$ , angles entre chaque machine et l'axe x.



#### Paramètres d'entrée :

- $\Theta$ , angle entre l'axe x et les machines
- $R_i$ , distance entre la machine 1 fixée à (0,0) et la machine  $i$



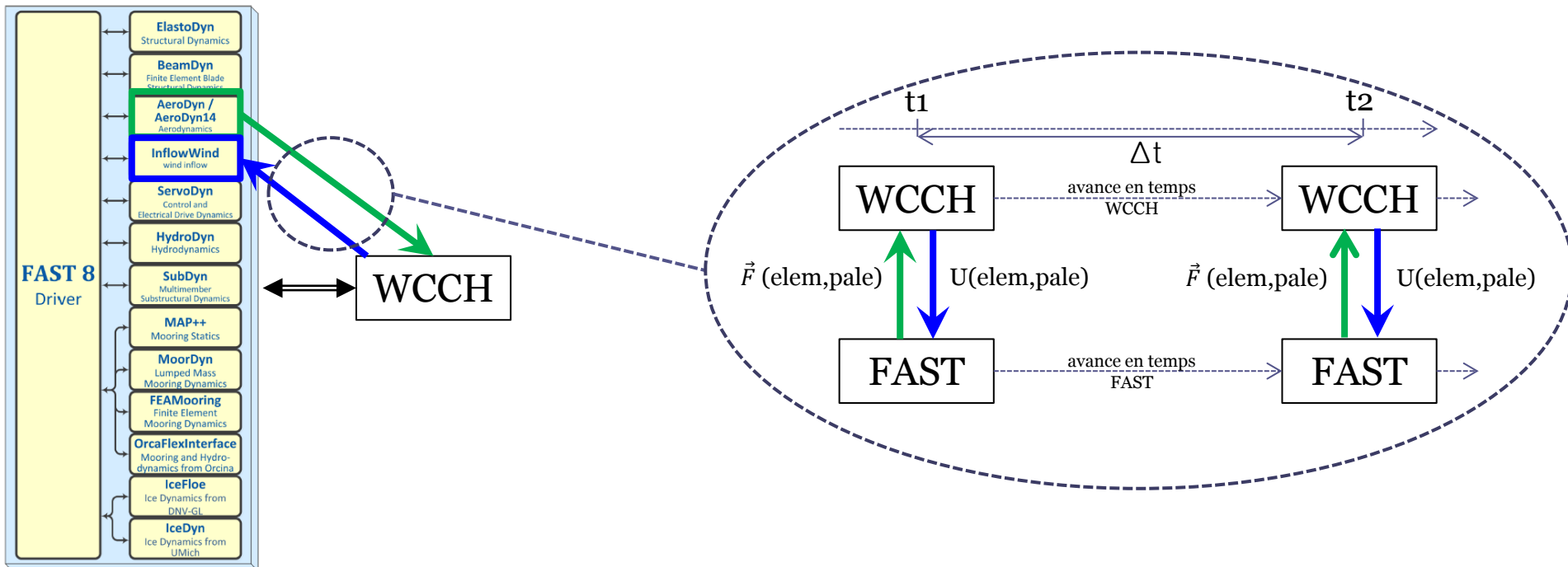
➤ **Objectif:** - Déterminer l'influence des  $\neq$  critères d'optim de controle  
(test de stratégies de régulation: derating, ...)

• Différentes options:

1. Couplage WCCH/Modèle BEM maison + modèle linéarisé (Pt+Elec).
2. Couplage WCCH/FAST paramétré pour une hydrolienne donnée + .dll de contrôle.

➤ **OPTION 2: Travail en cours: couplage fort FAST/WCCH (interface MPI)**

- Evaluation et comparaison des  $t_{CPU}$  FAST et WCCH pour choix du schéma de couplage (CSS ou CPS)
- Mise en place d'une première version CPS:



## ❖ Solveur CFD + modèles d'hydroliennes BEM.

### ▪ Avantages:

- ➔ Bonne prise en compte de l'environnement: houle, courant, bathymétrie.
- ➔ Bonne prise en compte de la physique des hydroliennes.
- ➔ Bonnes perfs. parallèles du solveur CFD donc temps de calculs mini.

## ✓ Outil validé/expé sur config 1 hydrolienne

- ➔ Prédiction de la production énergétique sur configurations de fermes sans interactions de sillages.

## ❖ Travail en cours et perspectives d'évolution

- ➔ Prise en compte de bathymétries complexes réelles: validation en cours !
- ➔ Prise en compte des effets de la houle: validation en cours !
- ➔ Prise en compte de courant turbulents: à améliorer.
- ➔ Approche multi-hydrolienne avec interaction de sillages: en cours de développement.