



EXTENSION D'UN SOLVEUR LATTICE BOLTZMANN POUR LA SIMULATION D'ÉOLIENNES

GDR EMR: SIMULATION ET OPTIMISATION POUR LES ENERGIES MARINES RENOUVELABLES

S. RULLAUD, IFPEN, 10/01/2018



- Objectif:
 - Simulation aéro-élastique d'éoliennes horizontales/verticales
- Méthode actuellement utilisée:
 - Méthodes vortex → non visqueuses
- Méthode proposée:
 - Méthode LBM
- Comparaison méthode aux volumes finis (VF) et méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) [1]
 - LBM **moins dissipative** que les VF (à ordre élevé)
 - **En dispersion**, LBM équivalent à un VF d'ordre 2 – 3
 - A erreur équivalente, LBM **plus rapide** que les VF

[1] S. Marié, D. Ricot, P. Sagaut. Comparison between lattice Boltzmann method and Navier–Stokes high order schemes for computational aeroacoustics. J. Comput. Phys., 228: 1056-1070, 2009

METHODE DE BOLTZMANN SUR RESEAU

-

LATTICE BOLTZMANN METHOD

-

LBM

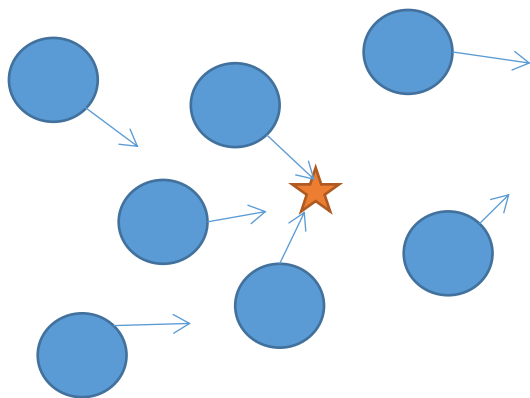
LATTICE BOLTZMANN METHOD

Equation de Boltzmann (1872):

$$\underbrace{\frac{\partial f}{\partial t} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i}}_{\text{Advection}} + \underbrace{\frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial c_i}}_{\text{Terme de force}} = \underbrace{\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{col}}_{\text{Opérateur de collision}}$$

Relaxation des particules en un temps de relaxation τ vers un état d'équilibre

Opérateur de collision



Opérateur de collision

Collision binaire
Boltzmann [1872]

Collision multi-particules
Chapman - Enskog [1920]

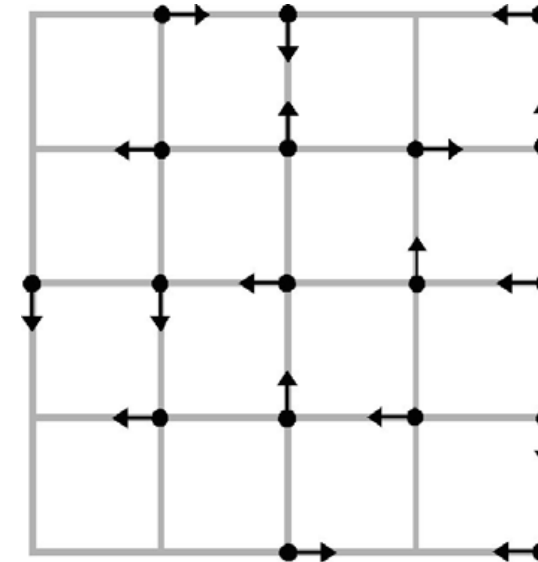
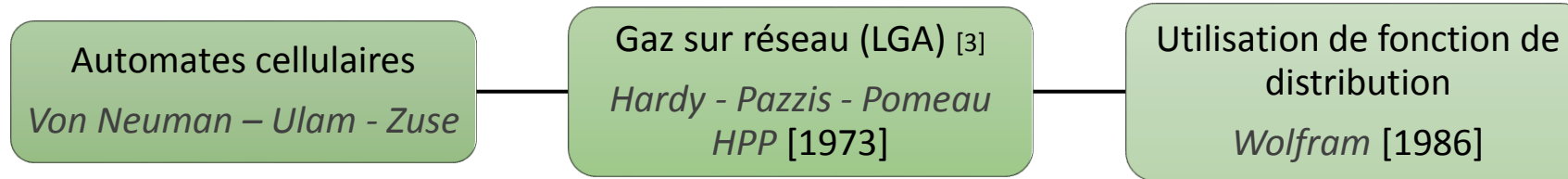
Opérateur BGK - Modèle SRT [2]
Bhatnagar - Gross - Krook [1954]

Modèle TRT

Modèle MRT

[2] P. Bhatnagar, E. Gross, M. Krook. A model for collision processes in gases. 94: 511-525, 1954

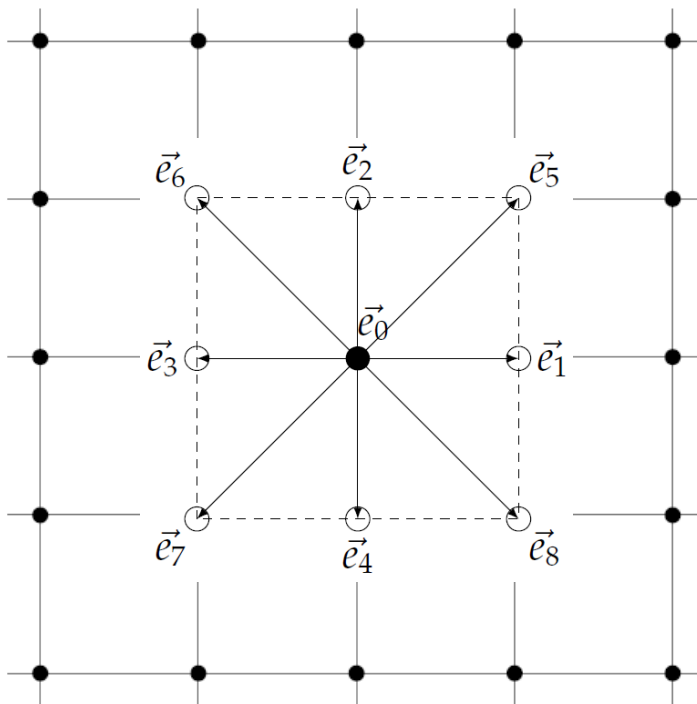
● Automates cellulaires



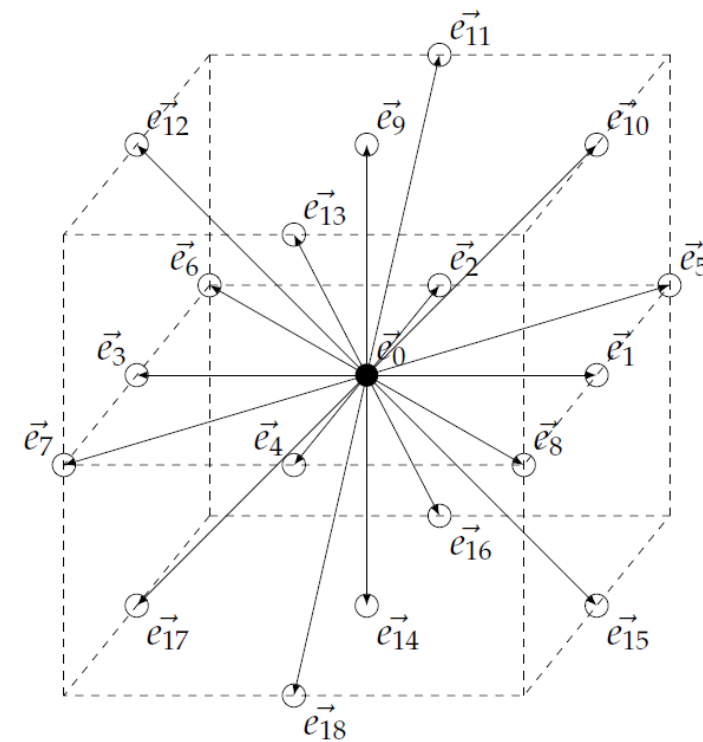
[3] J. Hardy, Y. Pomeau, O. De Pazzis. Time evolution of a two-dimensional classical lattice system. Physical Review Letters, 31 : 276, 1973.

● Méthode de Boltzmann sur réseau

Modèle D2Q9



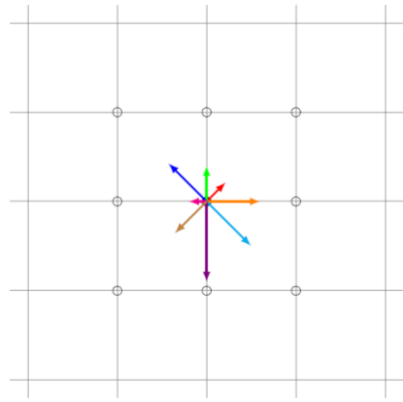
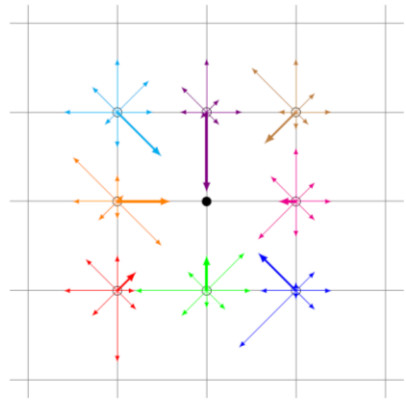
Modèle D3Q19



LATTICE-BOLTZMANN METHOD

● Equation de Boltzmann sur réseau

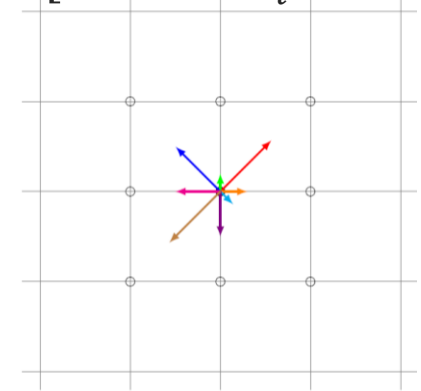
$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}, t) = -S[f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)]$$



$$\begin{cases} \rho = \sum f_i \\ j_x = \rho u_x = \sum \vec{e}_i \cdot \vec{e}_x f_i \\ j_z = \rho u_z = \sum \vec{e}_i \cdot \vec{e}_z f_i \end{cases}$$

$$f^{eq} = M^{-1} m^{eq}$$

$$-S[f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)]$$



Initialisation

Propagation

Calcul des
quantités
macroscopiquesCalcul des
fonctions de
distributions à
l'équilibre

Collision

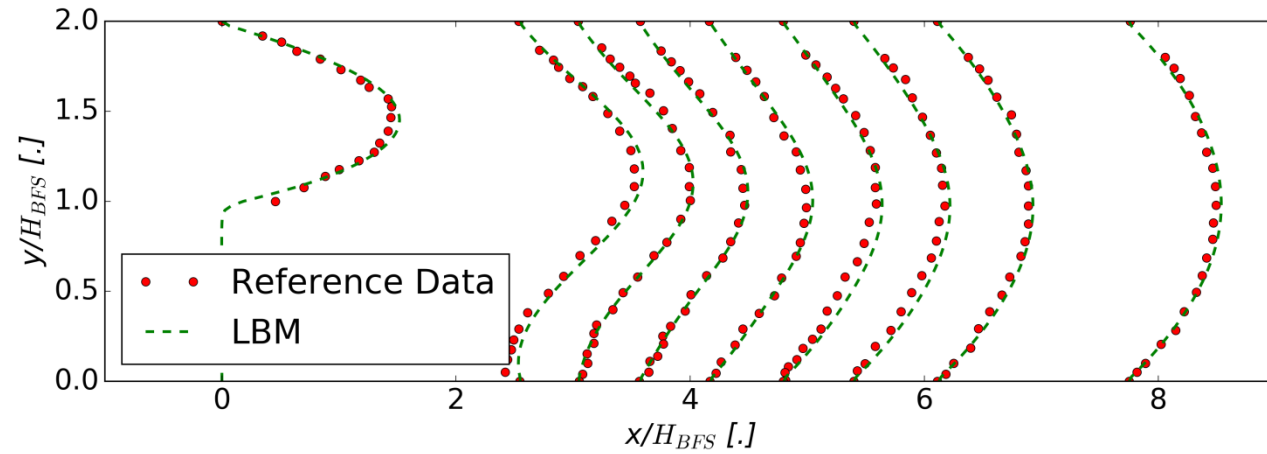
VALIDATION

Marche Descendante / Backward Facing Step

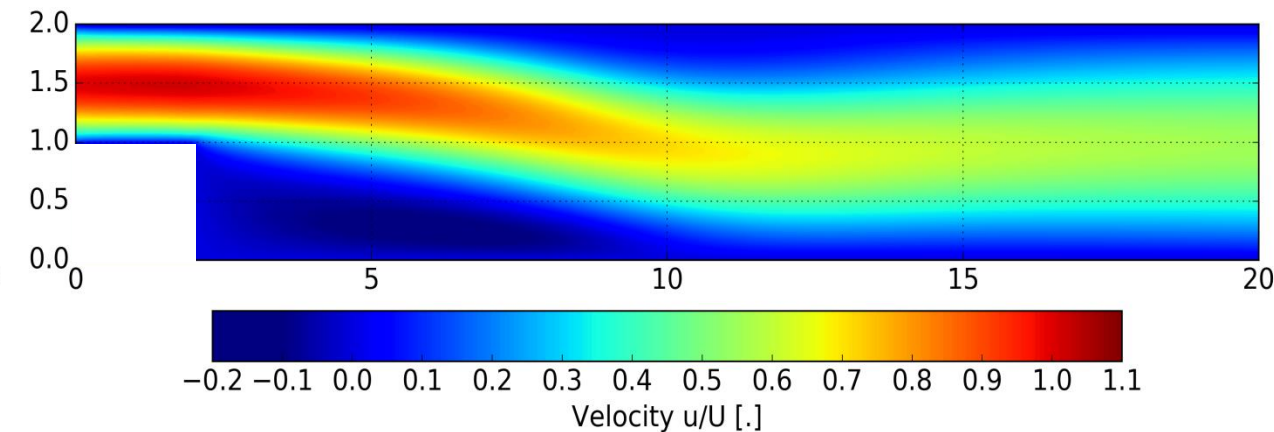
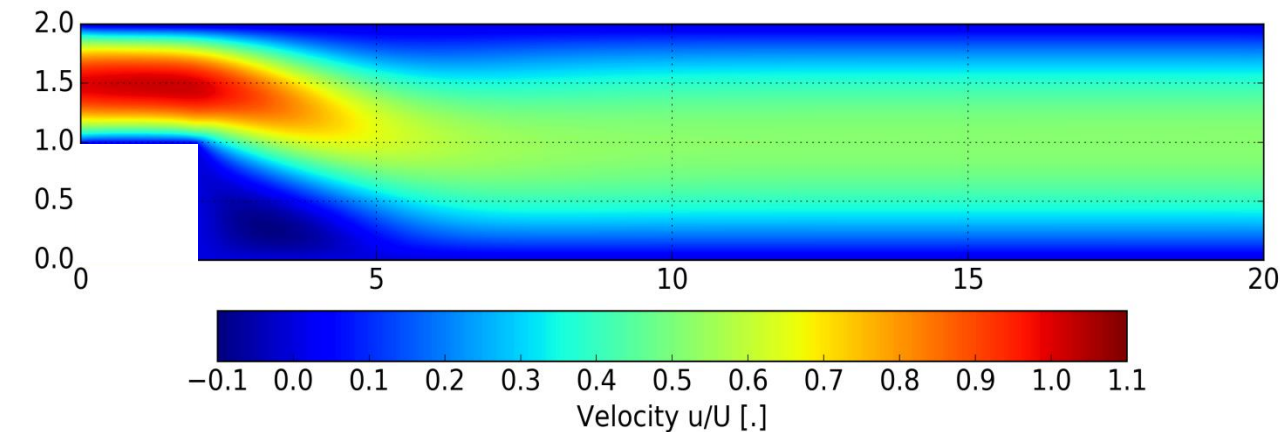
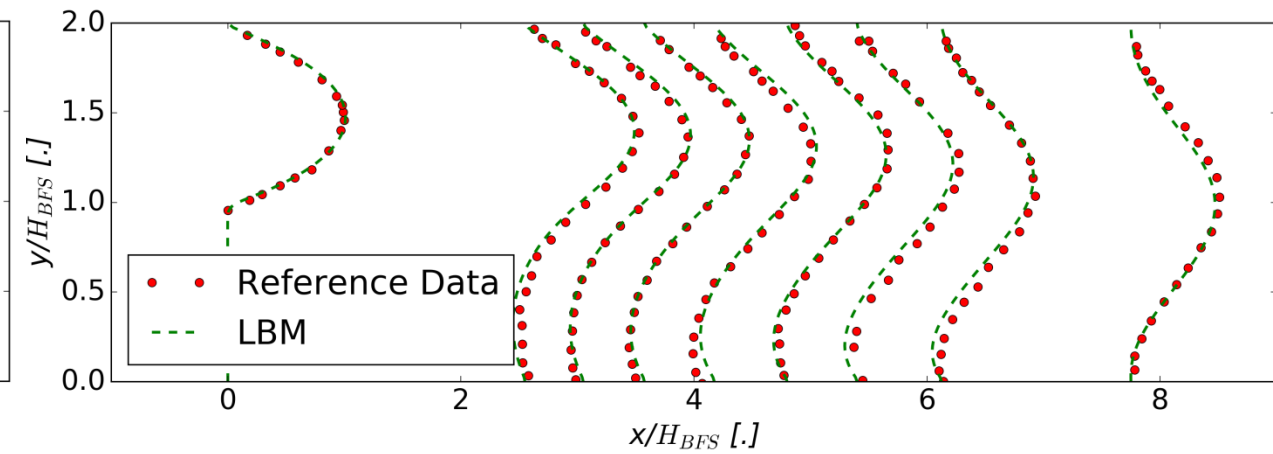
VALIDATION DU CODE LBM 2D - BENCHMARK

● Backward Facing Step [4]

Re=100



Re=389



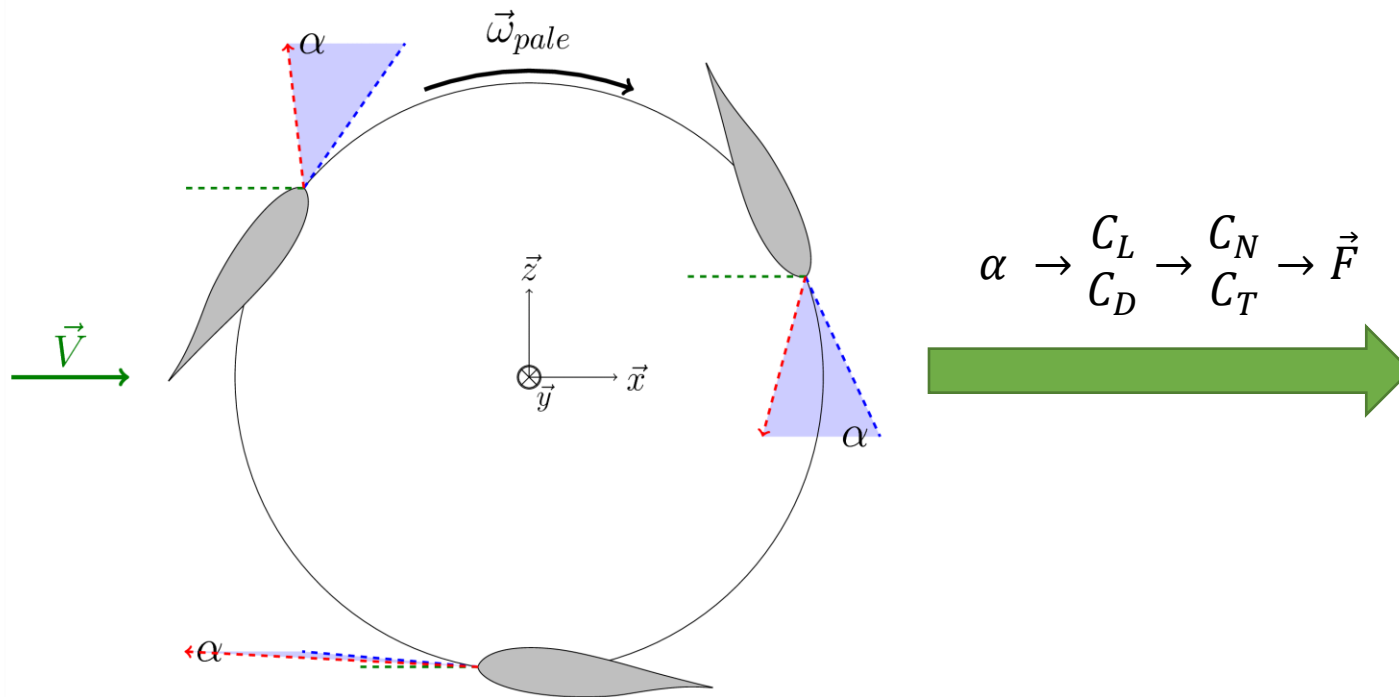
[4] B. F. Armaly, F. Durst, J. Pereira, and B. Schönung. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. Journal of fluid Mechanics, 127 :473–496, 1983.

APPLICATION A L'ÉOLIEN:

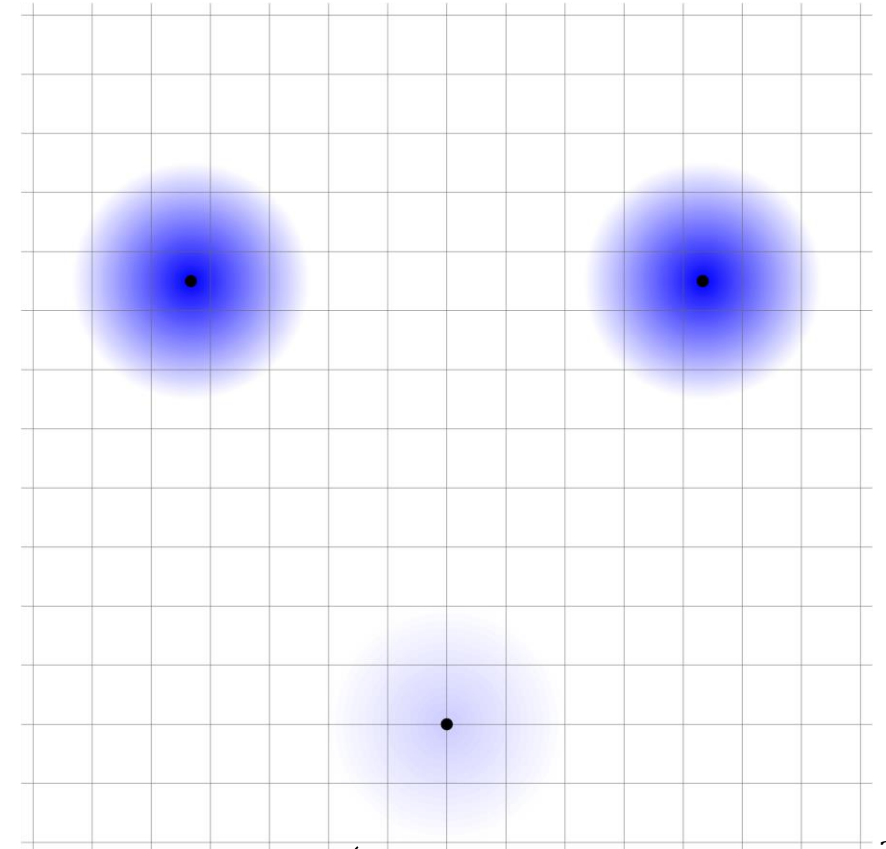
Couplage des méthodes
Lattice Boltzmann / Actuator Line

COUPLAGE LBM - ALM

● Calcul des forces, Actuator Line [5]



Répartition Gaussienne de la force



$$F_{ij,k} = F_k \times \frac{1}{\varepsilon^2 \pi} \times \exp\left(-\left(\frac{\text{distance}(\text{pale}_k - \text{noeud}_{ij})}{\varepsilon}\right)^2\right)$$

- Incorporation du terme Force dans la LBM « Méthode aux différences exactes » [6]

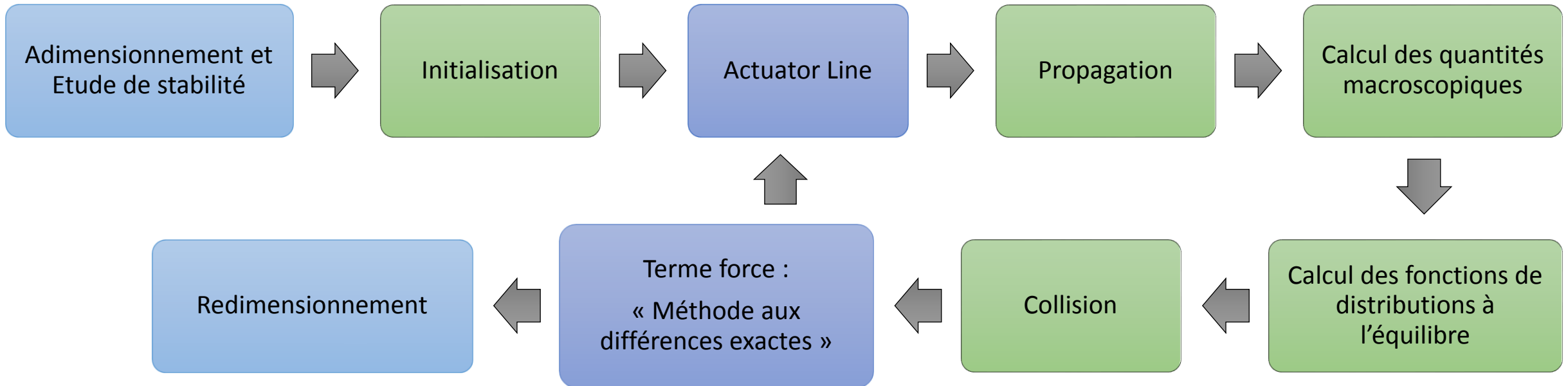
$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}, t) = -S[f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] + \Delta f_i(\vec{x}, t)$$

$$\Delta f_i(\vec{x}, t) = f_i^{eq}(\rho(\vec{x}, t), \vec{u}(\vec{x}, t) + \Delta \vec{u}(\vec{x}, t)) - f_i^{eq}(\rho(\vec{x}, t), \vec{u}(\vec{x}, t))$$

$$\Delta \vec{u}(\vec{x}, t) = \frac{\vec{F}(\vec{x}, t)}{\rho(\vec{x}, t)} \Delta t$$

=> 2 calculs de fonction de distribution pour 2 vitesses ($\vec{u}(\vec{x}, t), \Delta \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}(\vec{x}, t)$)

[6] Z. Guo, C. Zheng, and B. Shi. Discrete lattice effects on the forcing term in the lattice Boltzmann method 65, 2002.



VALIDATION DU COUPLAGE

Lattice Boltzmann Method – Actuator Line Method

Cas « Strickland »

Cas « IMST »

● Cas « Strickland »

- Cas expérimental : Nguyen, Strickland [7]
- Comparaison : Méthode vortex [8]

- Nombre de Reynolds : $Re=4.10^4$
- Fluide : Eau
- Diamètre : 1,22m

- **Efforts sur pales**
- Différents TSR et nombre de pales

$$TSR = \frac{R \times \omega}{u}$$

● Cas « IMST »

- Cas expérimental: Brochier, Fraunié et al. [9]
- Comparaison : LES [10]

- Nombre de Reynolds : $Re=1.10^4$
- Fluide : Eau
- Diamètre : 0,12m

- **Etude du sillage**
- Différentes sections

[7] T. V. Nguyen. *A Vortex Model of the Darrieus Turbine*. PhD thesis, Texas Tech University, 1978.

[8] F. Blondel. *Benchmarking activities (code to code comparison) on the rigid 1HS 3-Bladed VAWT*. Tech. Rep. To be published.

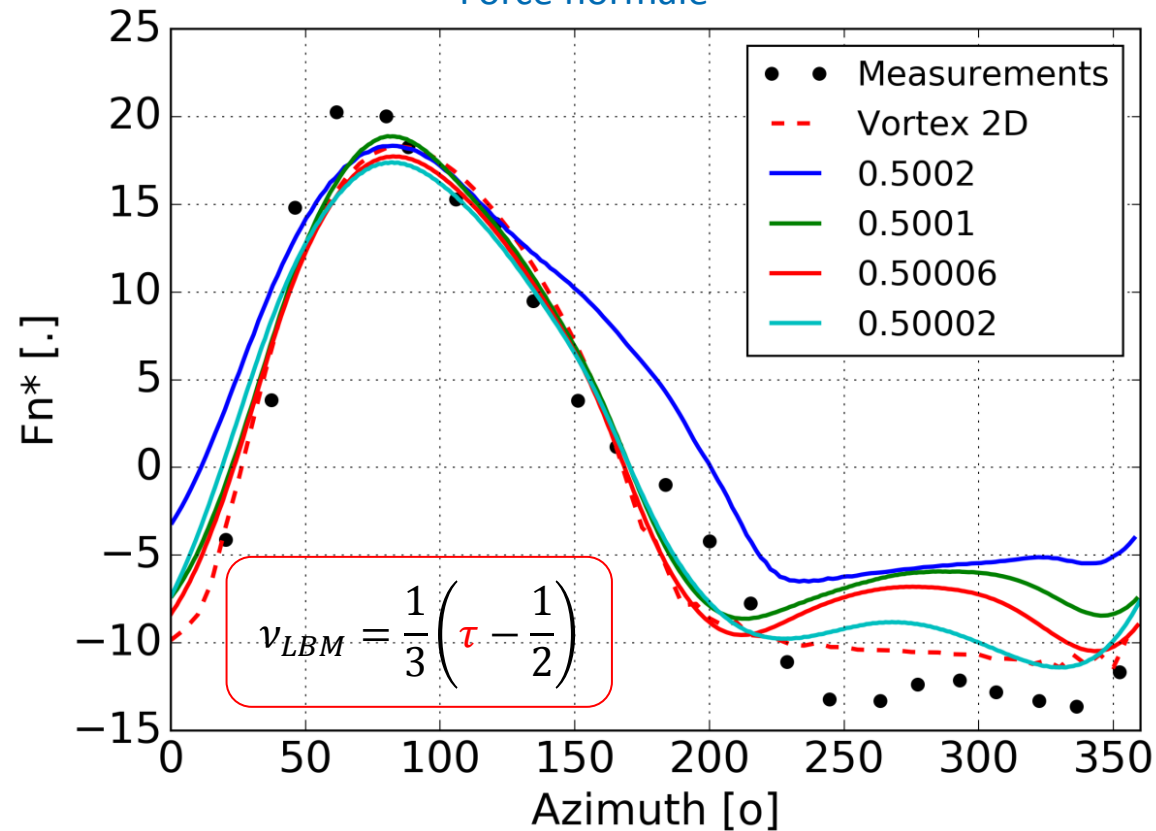
[9] P. Fraunie, C. Beguier, I. Paraschivoiu, and G. Brochier. Water channel experiments of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades. *Journal of Propulsion and Power*, 1986.

[10] S. Shamsoddin and F. Porté-Agel. Large eddy simulation of vertical axis wind turbine wakes. *Energies*, 2014.

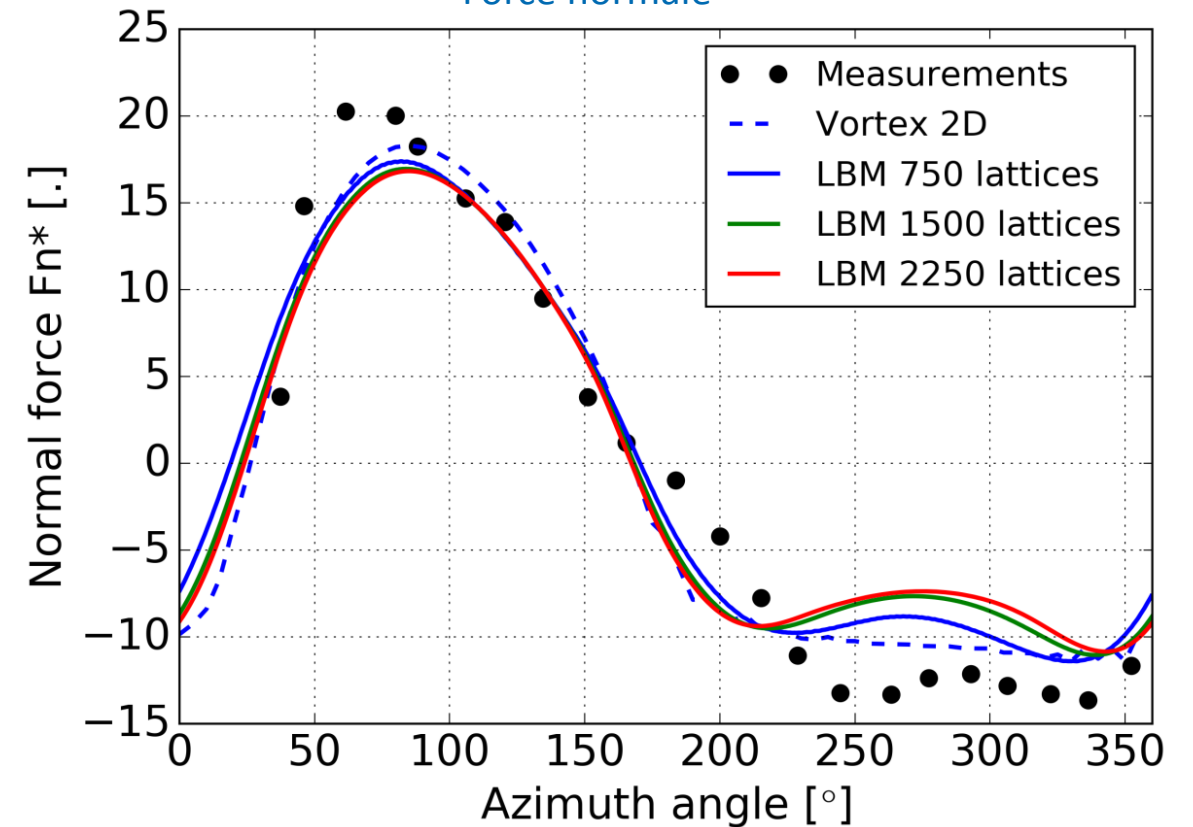
VALIDATION DU COUPLAGE LBM – ALM

- Cas « Strickland »
- Etude paramétrique

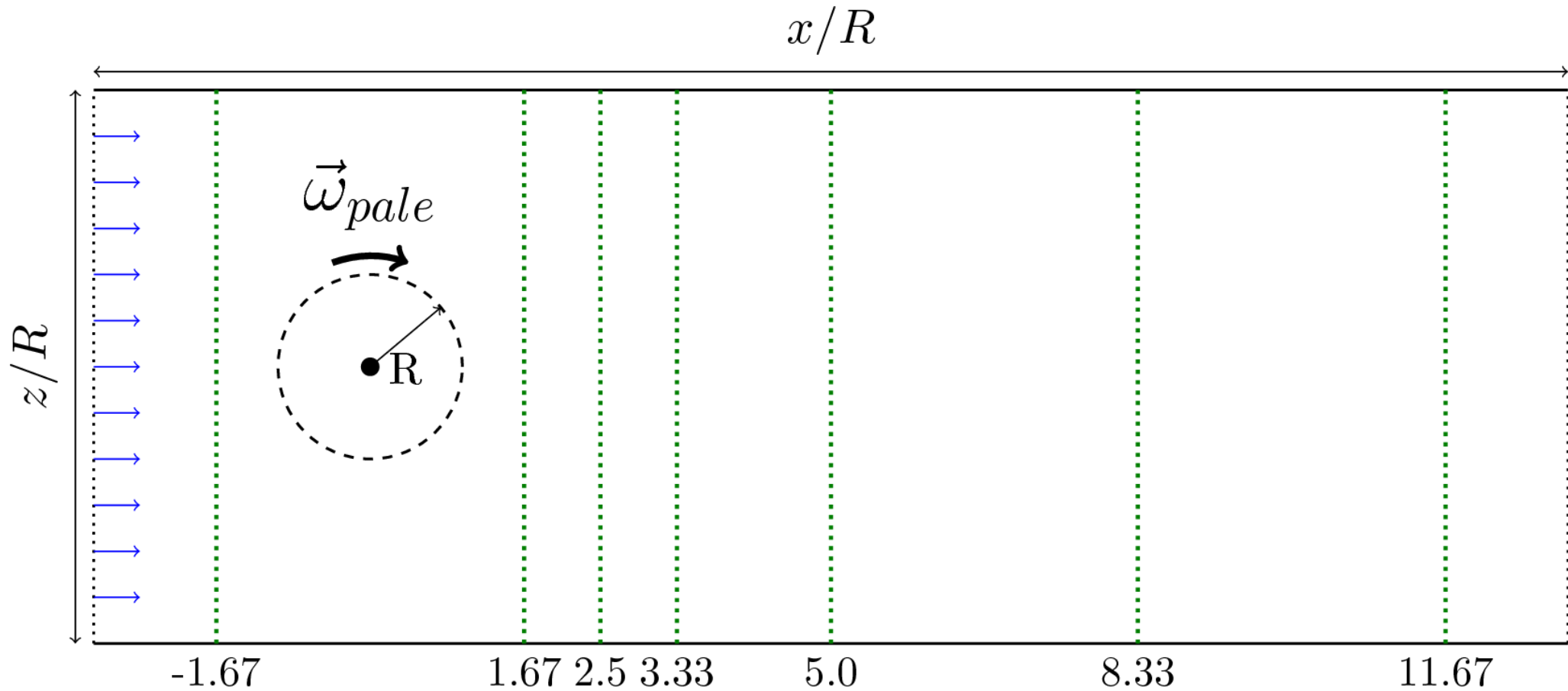
Influence du temps de relaxation
Force normale



Influence du maillage
Force normale

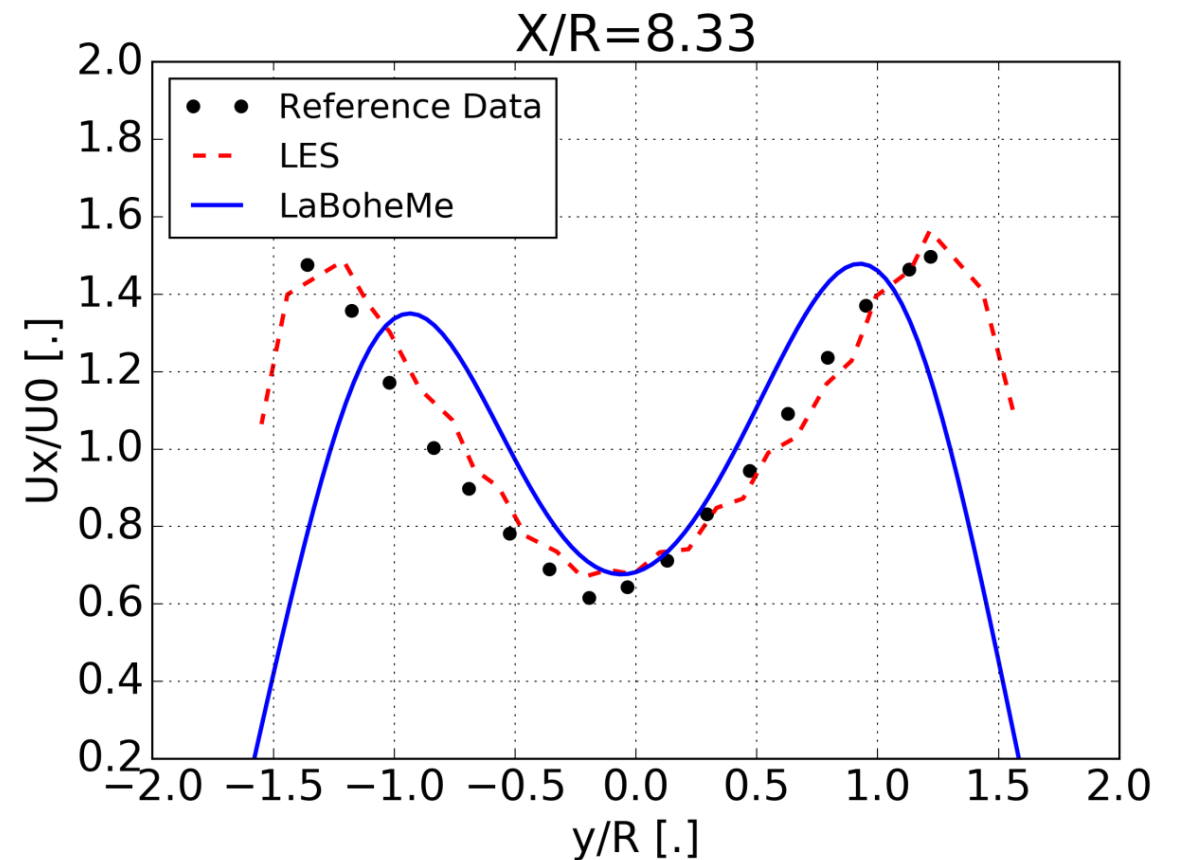
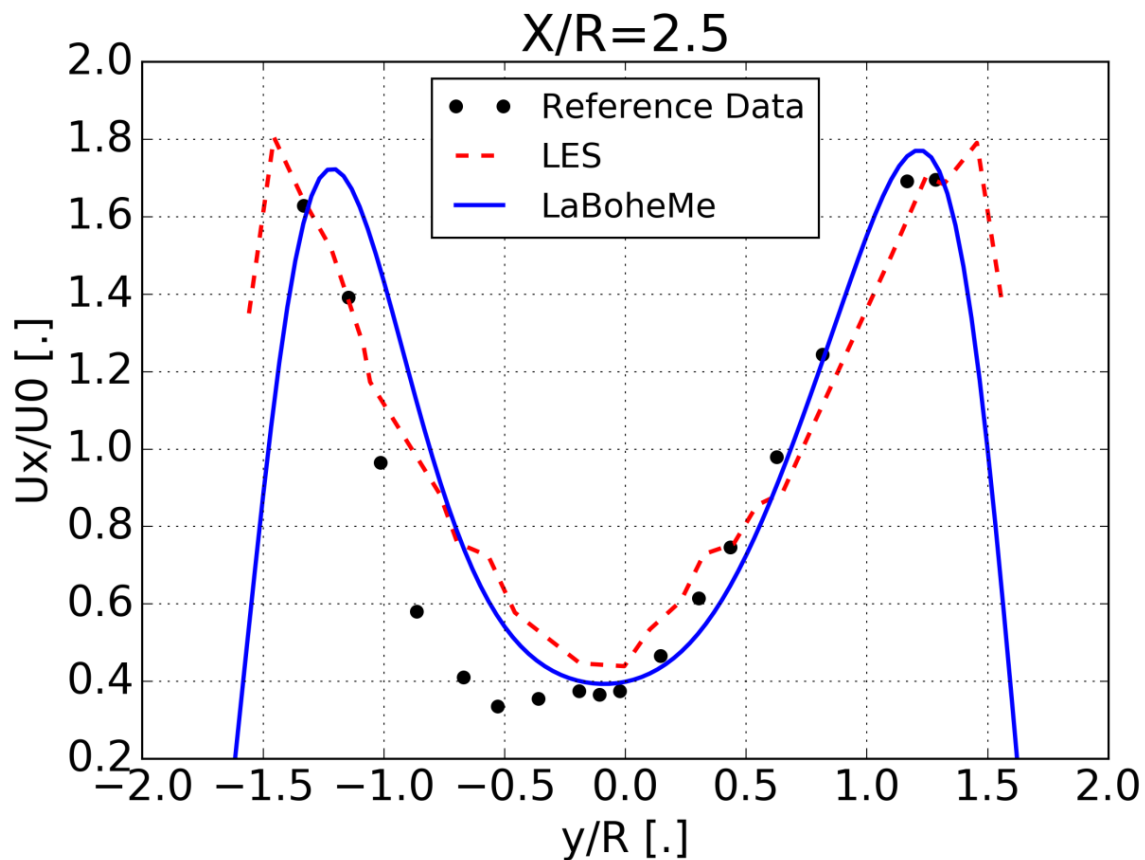


● Cas « IMST »



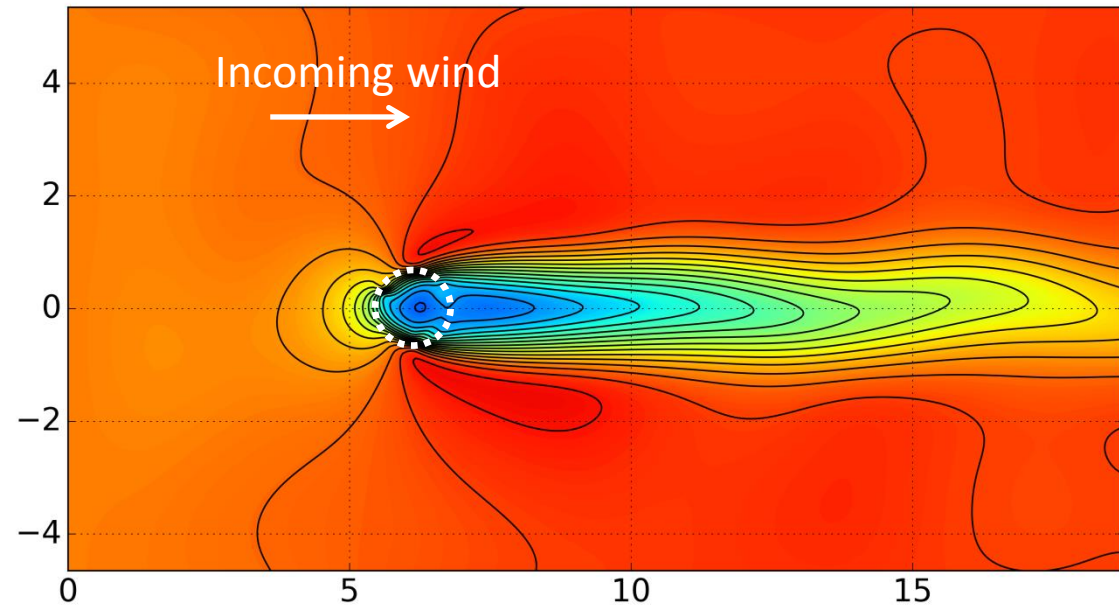
● Cas « IMST »

● Sections 2,5 et 8,33 pour TSR = 3,85



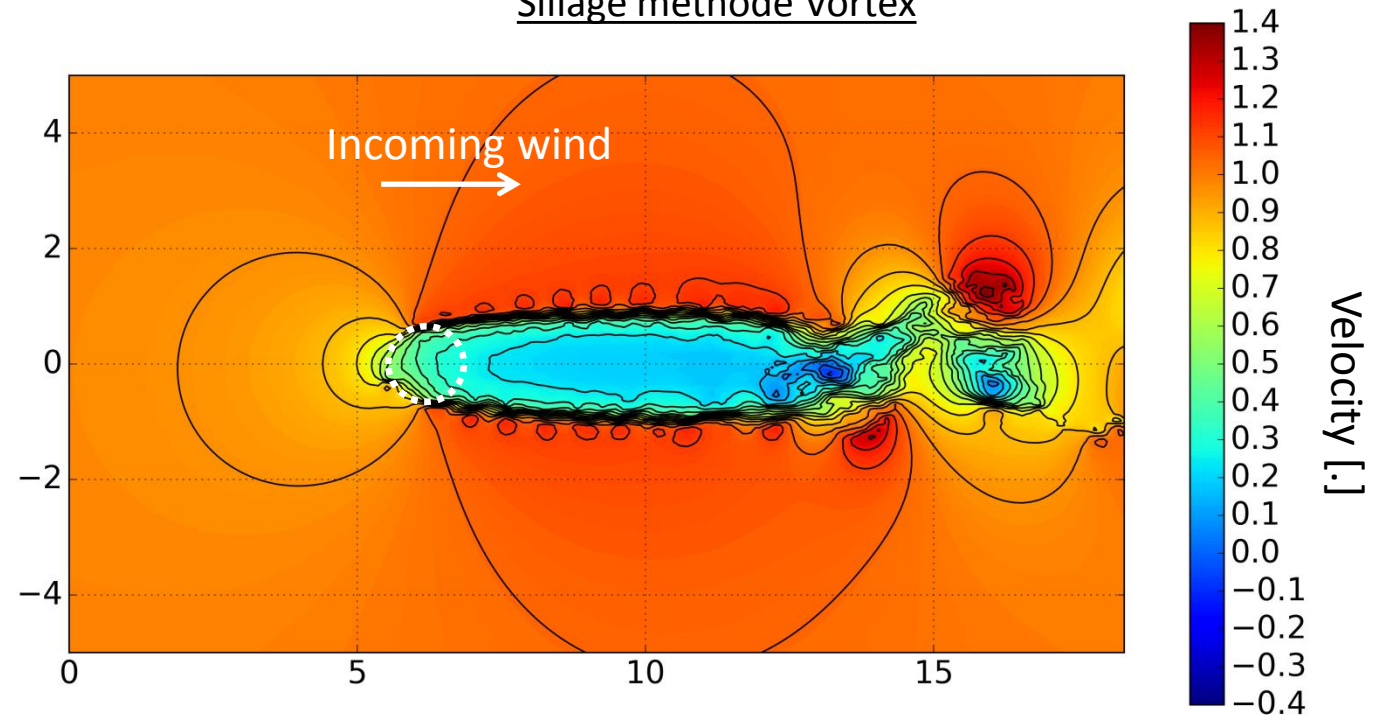
● Comparaison des sillages *LaBoheMe* / méthode vortex

Sillage méthode LBM



Wave recovery

Sillage méthode Vortex



Visualisation des structures tourbillonnaires

● *Méthode de Boltzmann sur réseau*

- Avantages: Simplicité des équations, méthode peu diffusive
- Inconvénients: Stabilité pose d'importantes conditions sur le modèle, étude complémentaire du raffinement spatial et temporel, travailler les cas instationnaires

● *Méthode de la ligne actuatrice*

- Avantages: Algorithme simple
- Inconvénients: Détermination de la polaire d'une aile, choix de la Gaussienne utilisée

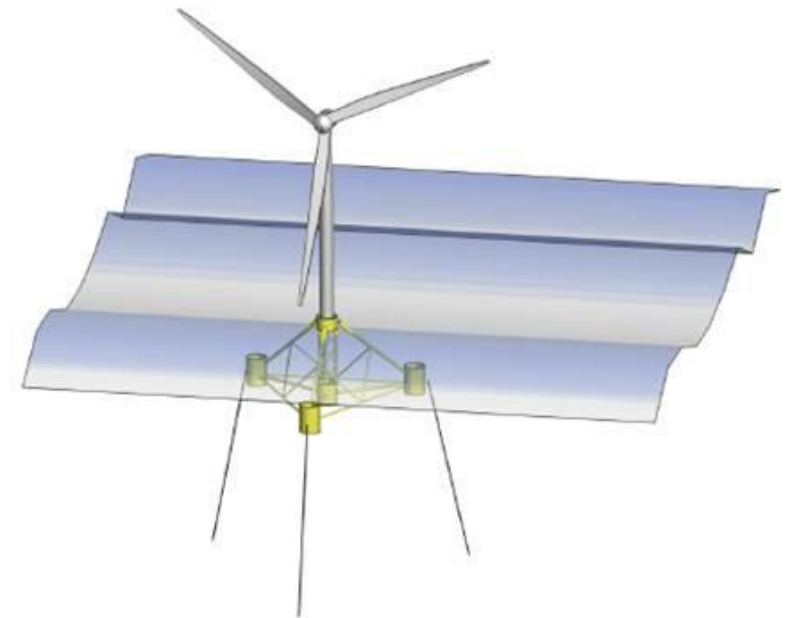
● *Couplage*

- Avantages: Résultats encourageants
- Inconvénients: Méthode de calcul des vitesses moyennes peut être améliorée

- Passage en 3D
- Implémentation du décrochage dynamique
- Ajout de raffinement local
- Implémentation de la turbulence (Smagorinsky)
- Frontières immergées (hub, tour)

- Couplage DeepLines Wind™

DeepLines Wind™
Offshore Wind Turbines FEA Software



Innovater les énergies

Retrouvez-nous sur :

 www.ifpenergiesnouvelles.fr

 @IFPENinnovation

