



# 15<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

Surface libre modélisée par un plan de symétrie avec la  
Simulation des Grandes Échelles de *Code\_Saturne*

Free surface modelisation with a symmetry plane using  
the Large Eddy Simulation of *Code\_Saturne*

Clément Calvino<sup>a,b</sup>, Jean-François Filipot<sup>a</sup>, Martin Ferrand<sup>c</sup>, Sofiane  
Benhamadouche<sup>c</sup>, Cédric Flageul<sup>d</sup>

<sup>a</sup>France Énergies Marines, Brest, France

<sup>b</sup>École polytechnique, Palaiseau, France

<sup>c</sup>EDF, Chatou, France

<sup>d</sup>Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

## Résumé

Le comportement du logiciel *Code\_Saturne* est étudié en approximant une surface libre par une condition de symétrie. La turbulence est modélisée grâce à la Simulation des Grandes Échelles (LES), les résultats obtenus avec *Code\_Saturne* sont comparés avec des simulations de référence. Le comportement de la turbulence proche de la surface libre est notamment observé, un amortissement des grandeurs turbulentes selon l'axe vertical est attendu. La turbulence alors homogène et isotrope au centre de l'écoulement évolue vers la surface libre en une turbulence anisotrope et horizontale. Il est montré que *Code\_Saturne* donne de bons résultats, les comportements qualitatifs des grandeurs observées concordent avec la référence.

## Summary

The behavior of the software *Code\_Saturne* is studied while approximating a free surface by a symmetry condition. Turbulence is modelled with the Large Eddy Simulation (LES), results obtained with *Code\_Saturne* are compared with reference simulations. The behavior of turbulence near the free surface is observed, a damping effect of turbulent values along the vertical axis is expected. The homogeneous and isotropic turbulence in the center of the flow evolved near the free surface in an anisotropic and horizontal turbulence. It is showned that *Code\_Saturne* obtains good results, the qualitative characteristics of the observed quantities agree with the reference.

## 1. Introduction

Le développement des énergies marines est limité par la connaissance du milieu agressif de l'environnement dans lequel les turbines sont déployées. La turbulence des courants marins est notamment un paramètre clé dans ce contexte étant donné que les variations du courant induites par la turbulence sont de l'ordre de grandeur du courant moyen, et génèrent des chargements aléatoires et variables qui contribuent grandement à la fatigue des turbines. Cependant, d'une part les instruments de mesure actuels (e.g.: profileur de courant) ne donnent pas accès aux variations spatiales requises de la turbulence. D'autre part les outils de modélisation existants nécessitent encore d'être validés ou développés afin d'aborder la simulation d'écoulements aussi complexes.

Dans le cadre du projet THYMOTE mené par France Énergies Marines, *Code\_Saturne* est utilisé pour simuler des écoulements turbulents caractéristiques des sites à potentiel hydrolien. THYMOTE vise à améliorer la caractérisation et la compréhension des processus turbulents sur les sites d'intérêts hydrolien, dans l'optique d'apporter des réponses aux industriels dans le dimensionnement des turbines et dans leur optimisation.

*Code\_Saturne* est un logiciel libre développé par EDF R&D et utilisé dans divers domaines, le code a été initialement créé pour étudier les écoulements internes dans les centrales nucléaires et possède plusieurs modules spécifiques comme la modélisation d'écoulements atmosphériques, de la combustion de fuel, gaz ou charbon, la modélisation d'arcs électriques, de turbines et la possibilité de réaliser un couplage Euler-Lagrange pour le transport de particules. Des modèles avancés en matière de turbulence sont de plus proposés pour traiter ces écoulements complexes. Le code utilise la méthode des volumes finis en discrétisant temporellement avec un schéma multi-pas proche de l'algorithme SIMPLEC (Archambeau et al., 2004).

Pour la configuration du canal, de nombreuses simulations ont déjà été menées pour caractériser la turbulence, soit en canal fermé comme les travaux de Kim et al. (1987) avec un nombre de Reynolds de 180 et de Abe et al. (2001) avec des nombres de Reynolds de 180, 395 et 640, soit en canal ouvert comme les travaux de Handler et al. (1993) avec un nombre de Reynolds de 67, où la surface est modélisée. Les résultats obtenus par Handler et al. (1993) sont comparés aux données de Komori et al. (1993) et concordent qualitativement avec celles-ci. Il est observé que les fluctuations normales normées par l'énergie cinétique turbulente chutent vers 0 alors que les fluctu-

ations dans les deux autres directions augmentent. La turbulence perd son caractère isotrope à l’approche de la surface libre et n’est plus localisée que dans un plan horizontal.

Pour comparer les résultats obtenus avec *Code\_Saturne*, le cas d’un canal fermé avec un nombre de Reynolds de 640 est simulé et comparé avec la référence (Abe et al., 2001). Cela permet de valider le paramétrage utilisé. La surface libre est ensuite modélisée par une condition de symétrie et les résultats sont comparés avec le cas du canal fermé en prenant comme point de comparaison le milieu du canal fermé. L’effet de la surface libre sur une turbulence homogène et isotrope est ainsi étudié, et cela permet de comparer qualitativement les résultats obtenus grâce à *Code\_Saturne* avec ceux de Handler et al. (1993) qui présente ces résultats de la même manière.

## 2. Simulation des Grandes Échelles

Les équations de Navier-Stokes sont résolues en trois dimensions en utilisant le modèle de Simulation des Grandes Échelles de Smagorinsky classique. Les équations sont adimensionnées par la mi-hauteur du canal  $\delta$  et par la vitesse de cisaillement à la paroi  $u_p$  définies ci-dessous.

$$\tau_p \equiv \nu \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} \qquad u_p \equiv \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} \qquad (2.0.1)$$

Un terme source de quantité de mouvement  $\underline{S}_u$  constant est rajouté aux équations de Navier-Stokes. Il est calculé de manière à compenser les frottements aux parois et assurer un bilan d’énergie nul sur l’ensemble du domaine une fois la turbulence pleinement développée. Les équations résolues par le code sont les suivantes :

$$\begin{cases} \nabla u = 0 & (2.0.2) \\ \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \nabla (\underline{u} \otimes \underline{u}) = \nabla \left( \frac{1}{Re_p} \underline{\nabla} \underline{u} \right) - \nabla \left( \frac{1}{Re_p} \frac{\nu_t}{\nu} \underline{\nabla} \underline{u} \right) - [\nabla p - \underline{S}_u] & (2.0.3) \end{cases}$$

Le nombre de Reynolds imposé pour l’écoulement est de  $Re_p \equiv \frac{u_p \delta}{\nu} = 640$ , le terme de viscosité turbulente  $\nu_t$  correspond à un coefficient de sous-maille et le modèle de Smagorinsky utilisé le définit de la manière suivante :

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \langle S \rangle_{ij} \langle S \rangle_{ij}} \qquad (2.0.4)$$

Avec  $C_s$  la constante de Smagorinsky prise égale à  $C_s = 0.065$  et  $\Delta$  la largeur du filtre, qui correspond à la dimension de la maille. La constante de Smagorinsky est de plus ajustée en proche paroi grâce au modèle de Van Driest pour amortir la viscosité turbulente, de manière à retrouver un comportement asymptotique physique en proche paroi.

Les équations sont résolues sur un maillage de  $202 \times 115 \times 202$  dans les directions respectives  $x$ ,  $y$  et  $z$  pour un domaine de dimensions  $(4\pi\delta, 2\delta, 2\pi\delta)$ . La simulation LES de Handler et al. (1993) prise en référence utilise un maillage de  $64 \times 65 \times 48$  pour  $(8\pi\delta, 2\delta, 3\pi\delta)$ .

Les centres des mailles  $y_i$  obtenues suivent la répartition suivante :

$$y_j = \cos \theta_i \quad \text{avec} \quad \theta_i = \frac{i \pi}{115}, \quad i \in [0, 115] \quad (2.0.5)$$

Les résolutions d'un tel maillage sont donc les suivantes, exprimées en distance adimensionnée à la paroi par  $\nu/u_p$  et comparées avec la référence (Handler et al., 1993) entre parenthèses, ce qui correspond à des valeurs classiques de résolutions pour de la LES :

$$\Delta x^+ = 40 \text{ (39)} \quad \Delta z^+ = 20 \text{ (13)} \quad (2.0.6)$$

$$\Delta y^+ = 0.24 \text{ (n.r.)} \quad \text{à la paroi} \quad \Delta y^+ = 17.5 \text{ (n.r.)} \quad \text{au centre} \quad (2.0.7)$$

Le domaine est défini périodique dans les directions  $x$  et  $z$  de l'écoulement, la paroi inférieure est une paroi lisse sans glissement et la paroi supérieure est soit une paroi lisse sans glissement soit une condition de symétrie selon la simulation effectuée. La condition de symétrie permet d'approximer raisonnablement les conditions aux limites d'une surface libre en imposant :

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_z}{\partial y} = 0 \quad u_y = 0 \quad (2.0.8)$$

Les conditions aux limites d'une surface libre se décomposent en conditions cinématiques (les particules de fluide ne peuvent se déplacer au-delà de la surface libre) et dynamiques (bilan de forces au niveau de la surface libre), elles se simplifient en effet pour donner les conditions 2.0.8 en considérant la géométrie plane de la surface libre et en négligeant la viscosité cinématique de l'air devant celle de l'eau.

Le pas de temps a été fixé à  $\Delta t = 0.001$ , ce choix découle d'une étude préliminaire visant à maintenir un nombre de Courant inférieur à 1. A pos-

teriori ce choix est validé car ce nombre atteint un maximum de 0.6 sur l'ensemble de la simulation.

La turbulence a été développée pendant 100000 itérations en ajoutant un terme de rotation sur les premières itérations pour coupler les vitesses. Les données ont été récupérées sur 100000 autres itérations en réalisant une moyenne temporelle et spatiale dans les deux directions homogènes  $x$  et  $z$ . Les calculs ont été effectués avec un ordinateur BlueGene/Q en parallélisant sur 64 nœuds de 16 cœurs.

### 3. Validation du cas de référence

Ce premier cas correspond à un écoulement entre deux plaques lisses et parallèles pour un nombre de Reynolds de 640, les résultats sont comparés à ceux de la DNS de Abe et al. (2001) qui fait office de référence.

*Vitesse moyenne.* Les vitesses moyennes sont tracées sur la Figure 1. Les résultats obtenus avec *Code\_Saturne* se rapproche très bien de ceux de la référence en très proche paroi et au centre de l'écoulement. Cependant le profil logarithmique qui se développe à partir de  $y^+ > 20$  est éloigné de la référence de 7% environ avant de reconverger vers celle-ci au niveau du centre de l'écoulement. Cet écart serait peut-être causé par un domaine de simulation trop étroit dans la direction  $x$  qui empêcherait une décorrélation totale des vitesses sur l'ensemble du domaine.

*Composantes de l'énergie cinétique turbulente.* Les composantes de l'énergie cinétique turbulente normalisées par l'énergie cinétique turbulente apparaissent sur la Figure 2. Ces grandeurs rendent compte du développement de la turbulence dans l'écoulement. L'allure globale des courbes est bien retrouvée avec *Code\_Saturne*, ainsi que la position des pics, mais l'amplitude s'écarte légèrement de la référence notamment pour la direction  $x$ .

### 4. Résultats sur la surface libre

Le comportement de *Code\_Saturne* est maintenant étudié en observant l'impact sur la turbulence de la modélisation de la surface libre par une condition de symétrie. Une simulation similaire à celle présentée dans la section 3 est effectuée en remplaçant la paroi supérieure par un plan de symétrie. La simulation de la section 3 est prise comme référence en observant en parallèle les résultats de Handler et al. (1993).

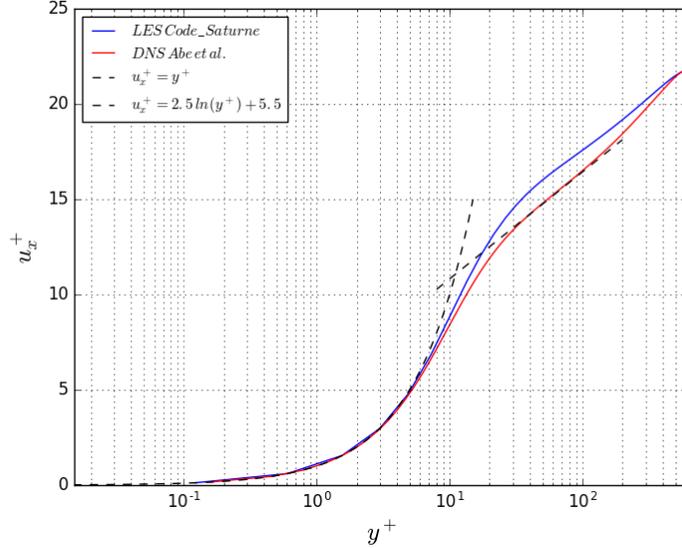


Figure 1: Comparaison des profils verticaux de la vitesse moyenne entre les résultats de la LES obtenus avec *Code\_Saturne*, les résultats de la DNS de Abe et al. (2001) et les profils théoriques issus de la littérature (pointillés noirs).

Pour obtenir une comparaison pertinente des grandeurs d'intérêt les domaines observés n'ont pas la même taille selon la simulation. Pour le cas sans condition de symétrie la zone d'intérêt est comprise entre  $y/\delta = -1$  (le fond du canal) et  $y/\delta = 0$  (le centre de l'écoulement) et pour le cas avec la condition de symétrie elle est comprise entre  $y/\delta = -1$  (le fond du canal) et  $y/\delta = 1$  (la surface de l'écoulement). Une homothétie est effectuée sur le premier domaine pour permettre la comparaison. De plus pour rendre compte de ce rapport d'échelle le nombre de Reynolds est divisé par deux dans le cas de la simulation avec la condition de symétrie.

*Vitesse moyenne.* Les profils des vitesses moyennes sont comparés sur la Figure 3. Le comportement relatif des simulations effectuées avec *Code\_Saturne* va dans le sens des résultats attendus, une vitesse moyenne inférieure est bien retrouvée avec la surface libre.

*Composantes de l'énergie cinétique turbulente.* Les composantes de l'énergie cinétique turbulente normalisées par cette dernière sont représentées sur la Figure 4. Au niveau de la surface libre le comportement relatif observé

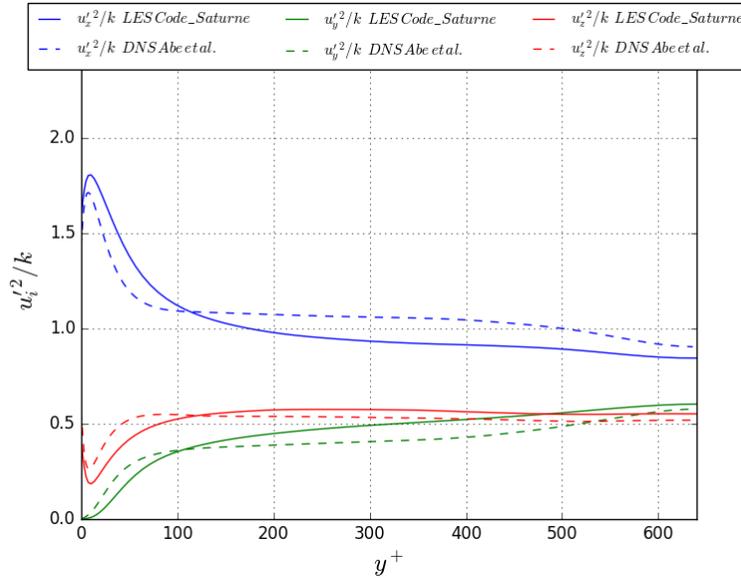


Figure 2: Comparaison des profils verticaux des composantes de l'énergie cinétique turbulente normalisées par l'énergie cinétique turbulente entre les résultats de la LES obtenus avec *Code\_Saturne* et les résultats de la DNS de Abe et al. (2001).

correspond très bien aux résultats de Handler et al. (1993). Notamment la composante selon  $y$  tend vers 0 alors qu'elles augmentent dans les autres directions, la turbulence n'est donc plus isotrope et un amortissement des grandeurs turbulentes est bien observé selon l'axe vertical.

## 5. Discussion et perspectives

Les résultats obtenus sont très satisfaisant pour une analyse qualitative, ils pourraient être améliorés en agrandissant le domaine d'étude selon la direction  $x$  notamment. Cela permettrait de mieux simuler les structures turbulentes allongées dans la direction de l'écoulement et peut-être de se rapprocher quantitativement des résultats des références.

Au niveau du plan de symétrie la turbulence se concentre sur des plans à  $y$  constant, ce qui correspond bien aux attentes théoriques.

Une condition de symétrie reste cependant une première approximation simple d'une surface libre, plusieurs phénomènes ne sont pas pris en compte comme la déformation de la surface libre ou la propagation des vagues qui ont une influence sur la turbulence. Il serait aussi utile de pouvoir comparer les

résultats des simulations à des mesures en bassin, cela n'a pas été fait ici car il n'a pas été trouvé d'essais en bassin présentant les mêmes caractéristiques d'écoulement.

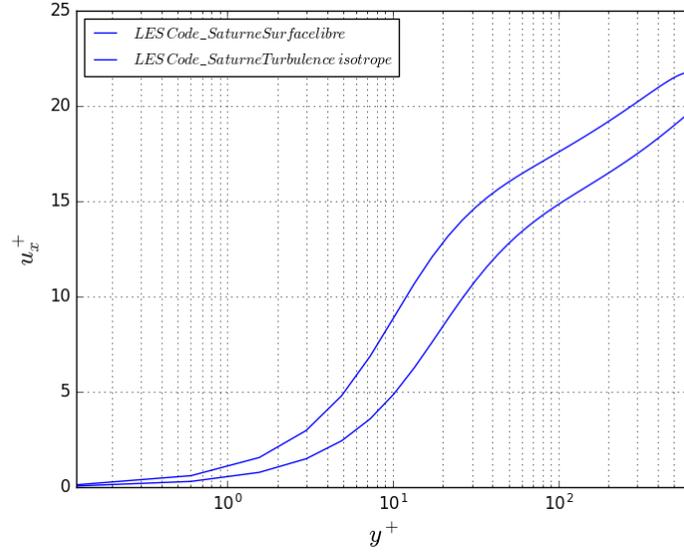


Figure 3: Comparaison des profils verticaux de la vitesse moyenne entre les résultats de la LES obtenus avec *Code\_Saturne*.

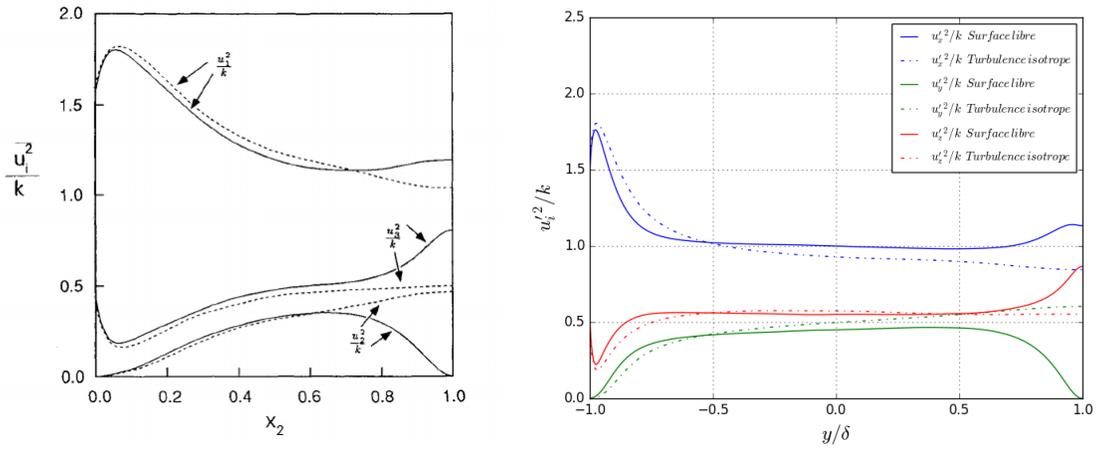


Figure 4: Profils verticaux des composantes de l'énergie cinétique turbulente normalisées par l'énergie cinétique turbulente obtenus par Handler et al. (1993) à gauche (simulation à surface libre en trait plein et simulation en canal fermé en pointillés) et obtenus avec *Code\_Saturne* à droite.

## 6. Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-IEED-0006-11.

## 7. Références

H Abe, H Kawamura, and Y Matsuo. Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow with respect to the reynolds number dependence. *Journal of fluids Engineering*, 123(2):382–393, 2001.

Frédéric Archambeau, Namane Méchitoua, and Marc Sakiz. Code saturne: A finite volume code for the computation of turbulent incompressible flows-industrial applications. *International Journal on Finite Volumes*, 1(1):http-www, 2004.

RA Handler, TF Swean, RI Leighton, and JD Swearingen. Length scales and the energy balance for turbulence near a free surface. *AIAA journal*, 31(11):1998–2007, 1993.

J Kim, P Moin, and R Moser. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low reynolds number. *Journal of fluid mechanics*, 177:133–166, 1987.

Satoru Komori, Ryuichi Nagaosa, and Yasuhiro Murakami. Turbulence structure and mass transfer across a sheared air–water interface in wind-driven turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 249:161–183, 1993.