

numéro spécial
septembre 2016

GRANDS CHALLENGES GENCI/CINES 2015



Francis DAUMAS

Directeur du CINES

Les progrès scientifiques passent souvent aujourd'hui par la conception de modèles et leurs simulations. Une première étape consiste à valider le modèle par l'injection de données issues d'observations et l'étude de l'adéquation des résultats du modèle avec les observations. L'utilisation par la suite du modèle pour de la prévision permet à son tour d'orienter l'expérimentation et la recherche théorique, en privilégiant les cas les plus probables prévus par le modèle.

Dans de nombreux domaines ce processus nécessite des moyens de calcul exceptionnels dont la puissance permet de prendre en compte la complexité des phénomènes étudiés et la masse des données traitées.

Les retombées économiques et sociétales sont nombreuses, elles sont souvent immédiates dans les sciences appliquées associées à des projets industriels, mais le retour sur investissement peut être aussi différé pour des recherches plus fondamentales. Nombre de technologies qui inondent aujourd'hui les marchés utilisent les avancées scientifiques du siècle dernier.

Le nouveau supercalculateur OCCIGEN, résultat d'une procédure de dialogue compétitif, dont GENCI a confié la maîtrise d'œuvre au CINES, est un équipement de niveau mondial au service de la communauté scientifique. Conçu par la société Bull sur la base de processeurs Intel de dernière génération et installé dans la nouvelle salle machine équipée des technologies de refroidissement par eau « chaude », permettant d'atteindre un PUE inférieur à 1.1, il développe une puissance théorique de 2,1 Pflops, qui a été mise à disposition de « grands challenges » entre le mois de décembre 2014 et le mois de janvier 2015.

Ce numéro spécial de la gazette du CINES regroupe les résultats obtenus grâce à ce « bol d'OCCIGEN » séparant la fin de l'installation du calculateur de l'ouverture du service à l'ensemble de la communauté. Les domaines concernées par cette session de grands défis scientifiques, des simulations du climat et environnementales, aux énergies propres et aux enjeux industriels et de santé, en passant par les sciences de l'univers, montrent la diversité des applications du calcul scientifique et son rôle essentiel.

Ces grands défis ont pu être relevés grâce d'une part à l'implication des équipes de Bull et du CINES qui ont entre septembre et novembre 2014 œuvré de concert pour mettre en service ce nouveau grand équipement et d'autre part grâce à la disponibilité et la motivation des équipes de scientifiques sélectionnés. Que tous les acteurs reçoivent ici nos félicitations et nos encouragements pour les futures étapes. Au-delà de la puissance des machines haut de gamme, des infrastructures capables de les accueillir et de la performance des logiciels, la ressource la plus précieuse est l'expertise scientifique et technique, qui du chercheur à l'ingénieur et au technicien permet de traduire ces investissements en avancées majeures de la recherche nationale, contribuant ainsi à son rayonnement.

Dans les cycles d'équipements complémentaires des centres nationaux, initiés avec l'arrivée du supercalculateur JADE en 2008, OCCIGEN inaugure le deuxième cycle des machines multi-petaflopiques avec pour horizon le mythique Exaflop. Après l'ère fructueuse de JADE, dont l'installation a été la première étape d'une progression spectaculaire des moyens de calcul nationaux, souhaitons à OCCIGEN autant de succès que son prédécesseur. OCCIGENez vous ! ■



Philippe LAVOCAT

PDG de GENCI

Un nouveau souffle pour la recherche française !

En cet automne 2016, le succès du supercalculateur Occigen ne se dément pas, avec plus de 300 projets qui y calculent. Une fois encore, c'est le signe que GENCI a su répondre aux attentes des communautés scientifiques françaises en mettant à leur disposition un système capable de traiter une grande variété de thématiques mais également que les équipes du Cines leur offrent un environnement et un support de qualité.

Occigen est aujourd'hui le plus puissant supercalculateur pour la recherche académique française. Son acquisition et sa montée en puissance font écho à celle de Jade il y a huit ans, déjà pour le Cines, et qui a ouvert la voie au renforcement spectaculaire des moyens de calcul nationaux, opéré par GENCI et permis à la France de revenir parmi les meilleurs européens du calcul intensif.

Ainsi, avec près de 7 petaflop/s et plus d'un milliard d'heures de calcul actuellement disponibles chaque année sur quatre systèmes performants, aux architectures variées et complémentaires - Occigen donc au Cines mais aussi Ada et Turing à l'Idris (CNRS) et Curie au TGCC (CEA), GENCI permet aux chercheurs français de rester scientifiquement compétitifs et d'obtenir de très beaux résultats, comme en témoignent notamment les Grands Challenges présentés dans les pages qui suivent.

Réalisés chaque fois qu'un nouveau supercalculateur est installé pour en vérifier le bon fonctionnement, ces Grands Challenges donnent l'opportunité à quelques projets de recherche de disposer de larges ressources de calcul, pouvant aller jusqu'à l'intégralité de la machine, pour effectuer des simulations de très grande taille, dans l'objectif de réaliser des avancées scientifiques majeures.

Comme avec Curie puis Ada et Turing en leur temps, ce fut aussi le cas sur Occigen avec pas moins de deux premières mondiales. L'une a été réalisée dans le domaine de la climatologie : il s'agissait de simuler la circulation océanique en Atlantique Nord à l'échelle du kilomètre et en prenant en compte la complexité des côtes et des reliefs sous-marins ainsi que la variabilité des conditions atmosphériques. À la clef, un gain d'un facteur 30 dans la précision obtenue par rapport à l'état de l'art actuel en océanographie ! L'autre, dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée aux énergies renouvelables, a concerné la simulation de la tenue au vent d'une nouvelle génération d'éoliennes offshore, avec un maillage de 2,4 milliards d'éléments et une résolution de 2,5 cm (l'éolienne mesurant 30 mètres de haut). Ces éoliennes innovantes sont développées par une PME française avec le soutien d'un grand industriel (Adwen, filiale d'Areva) et d'un laboratoire de recherche (le Coria).

D'autres réalisations remarquables ont été produites à l'occasion de ces Grands Challenges, dans différents domaines dont l'aéronautique avec Airbus, qui a simulé à haute résolution les émissions sonores des moteurs d'un aéronef dans l'objectif de mieux en comprendre la physique pour les réduire au maximum. Ce projet constitue, pour Airbus, une première étape vers une utilisation plus grande des ressources de calcul ouvertes, mises à disposition, en France, par GENCI et, en Europe, par PRACE.

Ces trois exemples - ainsi que d'autres que vous découvrirez dans les pages qui suivent - mettent en lumière les formidables capacités du calcul intensif dont la puissance est un précieux soutien pour la compétitivité nationale, scientifique comme industrielle. ■

Le supercalculateur Occigen

6

- 1 Les caractéristiques d'Occigen en quelques chiffres 6
- 2 Le contexte des Grands Défis 6



7

RCView



- 1 Contexte 8
- 2 Approche retenue 8
- 3 Résultats obtenus 9
- 4 Conclusions, limites et perspectives 13
- 5 Annexe : références 14

Vertifloat

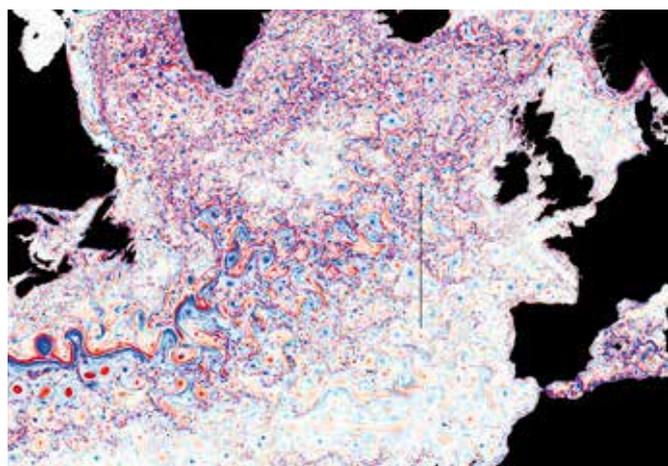
15

- 1 Contexte scientifique 16
- 2 Objectifs scientifiques 17
- 3 Description du code de calcul 18
- 4 Simulations réalisées 18
- 5 Résultats scientifiques 19
- 6 Mise en œuvre de l'application sur la machine OCCIGEN 21
- 7 Conclusions et perspectives 22
- 8 Remerciements 23
- 9 Synthèse du Grand Challenge pour dissémination 23
- 10 Bibliographie 24



25

H2O : Horizon 2020 pour l'Océanographie

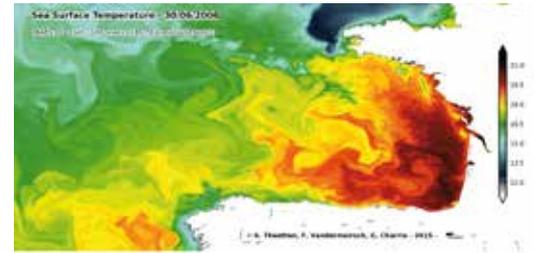


- 1 Le Contexte :
La mission Spatiale SWOT 26
- 2 H2O : Un projet scientifique associé
aux Grands Challenges GENCI 2014 27
- 3 La simulation des Grands Challenges
2014 sur OCCIGEN 27
- 4 Premiers résultats : À la découverte
d'un nouveau monde 29
- 5 Perspectives 30

Océanographie Physique Côtière

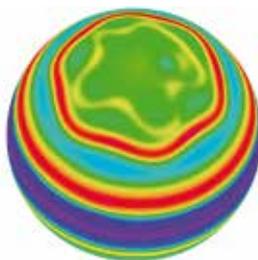
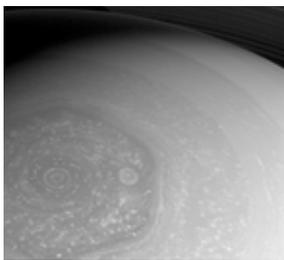
31

1	Contexte scientifique	32
2	Quel modèle numérique pour le golfe de Gascogne ?	32
3	Principaux résultats	34
4	Conclusions	36
5	Références	36



37

Saturne

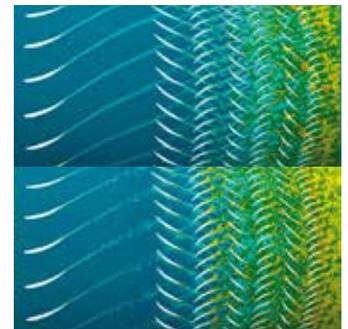


1	But scientifique et justification HPC	38
2	Code et moyens de calcul déployés pour notre grand défi	39
3	Résultats scientifiques de ce grand défi	42
4	Conclusion	45

Create

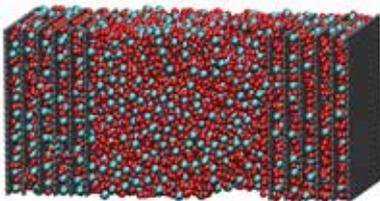
46

1	Contexte, enjeux et objectifs généraux	47
2	Codes utilisés	48
3	Résultats sur les performances des simulations	48
4	Résultats sur la physique de l'écoulement	50
5	Conclusions & perspectives	51
6	Bibliographie	51



52

Le graphène pour stocker l'électricité

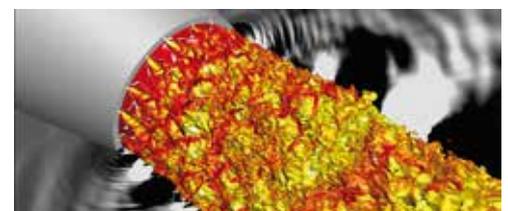


1	Retour d'expérience sur l'utilisation de la machine	53
2	Synthèse du sujet scientifique et des résultats obtenus	53

Fluidevrons

56

1	Contexte	57	4	Résultats	60
2	Cas d'Application	58	5	Perspectives	61
3	Codes de Calcul	59	6	Références	62



LE SUPERCALCULATEUR OCCIGEN

Acquis par GENCI (« Grand Equipement National de Calcul Intensif ») à l'issue d'une procédure d'appel d'offre initiée à l'automne 2013, et installé à Montpellier au deuxième semestre 2014, le supercalculateur Occigen a renouvelé les équipements de calcul intensif du CINES (« Centre

Informatique National de l'Enseignement Supérieur ») en augmentant significativement sa puissance. Le centre est désormais capable de produire un peu plus de 1 210 000 heures de calcul par jour, soit 442 millions d'heures de calcul par an avec une charge à 100 %.

Les caractéristiques d'Occigen en quelques chiffres

Occigen, cluster ATOS/Bull DLC, est un supercalculateur scalaire parallèle d'une puissance crête de **2,1 Pflop/s**, classé 26^e machine mondiale, 9^e européenne et 2^e française, au Top 500 du mois de novembre 2014.

Cet environnement exceptionnel dédié à la simulation scientifique comprend 46 baies :

- 27 baies de calcul, refroidies par un système haut rendement à eau tiède, directement sur les nœuds (technologie DLC – « Direct Liquid Cooling ») ;
- 7 baies assurant l'accès à l'ensemble du cluster (via 4 nœuds de connexion et 4 nœuds d'échange de données), son administration et la gestion de ses disques ;
- 50544 cœurs répartis sur 2106 nœuds de calcul (chacun étant constitué de 2 processeurs Intel Haswell 12 cœurs E5-2690 à 2.6 GHz) ;

- La moitié des nœuds dispose de 64 Go (2,6 Go par cœur), l'autre moitié de 128 Go (5.3 Go par cœur) de mémoire utile soit plus de 202 To au total ;
- Le réseau utilisé pour connecter les nœuds entre eux est un réseau Infiniband (IB 4x FDR) dont la topologie est en forme d'arbre (Fat Tree) à trois étages ;
- 5 Pétaoctets en ligne pour le stockage des résultats des calculs (système de fichiers parallèle Lustre) avec une bande passante maximum qui dépasse les 105 Go/s ;
- 260 Téraoctets en ligne pour le stockage des fichiers utilisateurs et des codes à exécuter (système de fichiers Panasas), avec une bande passante de 10 Go/s.

Le contexte des Grands Défis

Comme ses prédécesseurs, cette édition des Grands Défis fait suite à un appel à candidatures mené par GENCI auprès de ses partenaires et par le CINES auprès de ses utilisateurs durant l'été 2014. Ainsi, 11 projets français ou européens, académiques et industriels, issus de domaines scientifiques très variés ont été retenus : climatologie, dynamique océanique, mécanique des fluides, chimie quantique, astrophysique. L'objectif visé par cette initiative est double :

- d'une part, il s'agit de placer progressivement la machine en situation d'exploitation. Dans cette optique, après une période de quelques mois durant lesquels le bon fonctionnement du calculateur, mais également l'ensemble des éléments matériels et logiciels qui le composent, sont vérifiés et validés, différentes équipes scientifiques sont invitées à utiliser ses ressources de calcul (parfois sur l'ensemble de la configuration) en

réalisant des simulations de très grande taille, afin de vérifier les performances du calculateur dans des conditions proches de celles de la production ; ce n'est qu'à l'issue de cette phase qu'Occigen est ouvert à l'ensemble des utilisateurs.

- d'autre part, il est question de permettre à des chercheurs d'accéder à des ressources hors normes, en bénéficiant du support des équipes du centre de calcul et des experts du constructeur, mobilisés pour résoudre les problèmes éventuellement rencontrés et optimiser les logiciels de simulation. Cela a permis aux équipes sélectionnées de réaliser des avancées scientifiques majeures, voire pour certains des premières mondiales, en poussant aux limites non seulement les capacités du supercalculateur mais aussi celles des codes de simulation eux-mêmes. ■

RCVIEW

Modélisation de la qualité de l'air à haute résolution - visualisation 3D sur Paris.

Olivier OLDRINI
(MOKILI)



Ont contribué au projet :

Sylvie PERDRIEL (CAIRN Développement)

Christophe OLRVY, Maxime NIBART (ARIA Technologies)

Bertrand CIROU, Jean-Christophe PENALVA (CINES)

SOMMAIRE

1	Contexte	8	3	Résultats obtenus	9
				Premières visualisations	9
2	Approche retenue	8		Exploration des résultats	11
	Résultats à exploiter	8	4	Conclusions, limites	
	Principe de l'exploitation			et perspectives	13
	des résultats	9	5	Annexe : références	14

1 Contexte

Le projet RCView (aiR City View) est le fruit de la collaboration de 3 acteurs :

- MOKILI, TPE spécialisée dans la modélisation haute performance et le conseil en environnement,
- CAIRN Développement, TPE spécialisée dans le développement de modèles et d'interfaces, notamment web et cartographiques,
- ARIA Technologies, PME spécialisée dans la mise au point de modèles de transport-dispersion atmosphérique et la réalisation d'études en qualité de l'air.

Le projet RCView s'inscrit dans le contexte de la modélisation haute résolution mais sur domaine géant de la qualité de l'air. La modélisation haute résolution sur domaine géant s'entend sur la base de maillages de quelques mètres de résolution (typiquement 3m) pour une extension horizontale d'au moins une dizaine de kilomètres. Il s'agit donc de maillages 3D réguliers comportant plus de 400 millions de nœuds.

Cette dynamique de modélisation intensive est en marche depuis plus de sept ans autour du développement de la version parallèle de la suite logicielle MSS (Micro SWIFT SPRAY) (Moussafir et al, 2004, Tinarelli et al, 2004). Les versions scalaires des modèles de la chaîne existent depuis le début des années 90. SWIFT est un modèle météorologique de type mass consistant intégrant des formulations dites de Röckle (Moussafir et al, 2004) : il permet, à partir de mesures de terrains ou de sorties de modèles méso échelle, de produire un champ 3D simplifié de

vent et de turbulence prenant en compte l'influence des bâtiments et de la topographie. SPRAY (Anfossi et al, 1990, Tinarelli et al, 1994) est un Lagrangian Particle Dispersion Model (LPDM) qui permet de calculer les champs de concentrations de polluants ou de substances dangereuses en prenant en compte les bâtiments et la topographie. La version parallèle de MSS, dite PMSS (Oldrini et al, 2011), a permis, lors de son développement, la réalisation de calculs de dispersion accidentelle sur l'ensemble de Paris grâce à plusieurs centaines de processeurs de la machine Platine du CEA (Duchenne et al, 2011).

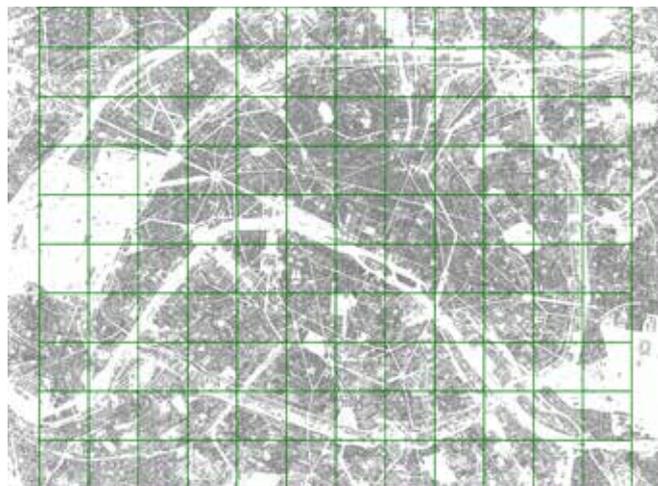
PMSS a été utilisé dans le cadre du projet AIRCITY. Ce projet visait à modéliser la qualité de l'air à haute résolution dans Paris (Moussafir et al, 2013). Le projet a été labellisé par ADVANCITY, CAP DIGITAL et SYSTEM@TIC et il a été financé par fond FEDER. Il a associé ARIA Technologies, le CEA, Airparif, et Léosphère, ainsi que MOKILI et IGN France International comme sous-traitants. Réalisé en 2012-2013, il a permis de simuler de manière réaliste la pollution liée au trafic routier du jour courant sur le lendemain grâce aux données de trafic et d'émissions fournies par Airparif.

Ce type de projet a permis de mettre l'accent sur une limitation importante de calculs 3D massifs : l'exploitation des résultats de calcul, et notamment leur visualisation. L'objectif du projet RCView est donc de permettre l'exploitation 3D de résultats de calculs massifs du modèle PMSS. ■

2 Approche retenue

Résultats à exploiter

Les calculs AIRCITY sont des calculs de météorologie et de transport dispersion des principaux polluants issus du trafic et sur l'ensemble de la ville de Paris. Le domaine de calcul couvre une superficie de 14 x 11,5 km. Il est maillé à haute résolution (3 m), avec prise en compte explicite du bâti.



Le domaine compte au total 4 675 x 3 834 X 34 points, soit un peu plus de 600 millions de nœuds.

Une partie de la parallélisation du calcul PMSS repose sur le découpage du domaine en tuiles de calcul. Ainsi, le domaine de calcul AIRCITY a été découpé entre 360 et 120 tuiles. Le découpage en 12 x 10 = 120 tuiles de calcul, de taille individuelle 390 x 390 x 35 points, a finalement été retenu.

Les champs météorologiques (vent, température, turbulence, humidité, etc.) et les champs de concentrations (NOx, particules, ...) sont stockés dans des fichiers binaires séparés. Les résultats sont sauvegardés sur base horaire. Les résultats contiennent donc chaque jour 24 échéances. Chaque échéance pèse 35 Go sur disque.

Figure 1 : Vue des 120 tuiles de calcul du domaine AIRCITY, avec en fond de carte le bâti utilisé pour réaliser les simulations.

Principe de l'exploitation des résultats

Dans le cadre d'AIRCITY, une exploitation 2D au sol des résultats avait déjà été réalisée, puis visualisée en mode Système d'Information Géographique (SIG). Outre la lenteur de production des visualisations, le caractère 2D constituait un élément extrêmement limitatif pour des calculs menés en 3D. Certains phénomènes demeurent en effet difficiles à appréhender en 2D. Sur Occigen, la visualisation 3D a été menée avec le logiciel Paraview. Paraview permet de paralléliser le rendu sur le principe du data partitionning. Les résultats sont découpés et chargés au moyen de plusieurs serveurs de rendu (pvserver). Ces pvserver réalisent chacun l'ensemble des traitements graphiques (on parle de pipeline), mais seulement sur la fraction des résultats qu'ils gèrent. Ces

différents éléments sont ensuite superposés, en fonction de leur profondeur de pixel, pour obtenir l'image finale.

Le module de lecture des résultats est donc la pièce essentielle : c'est là qu'est mené le travail de parallélisation pour découper les résultats des simulations. Un plugin pour ParaView a donc été développé, qui est donc capable de :

- Lire nativement les résultats binaires produits sur disque par PMSS,
- Répartir ces résultats sur la base d'une tuile de calcul par pvserver. ■

3 Résultats obtenus

Les visualisations présentées dans cette section sont réalisées en mode batch. Un script Python détaille l'ensemble des actions à réaliser par les 120 pvserver pour produire les vues 3D : chargement des fichiers, sélection des données, réalisation des coupes, iso-surfaces etc. Paraview est compilé en mode dit offscreen rendering avec la librairie OsMesa.

Les images ont été réalisées en chargeant les fichiers météorologiques, ainsi que les fichiers concentrations. Le bâti est généré à partir des fichiers météorologiques, et on affiche systématiquement le champ de concentration pour les NOx. Les valeurs de concentration les plus fortes sont en rouge, les plus faibles en vert. Différents niveaux de résolution des images produites ont été testés (entre 1 024 et 8 192 pixels de côté), sans influence vraiment notable sur les temps de production des images.

Premières visualisations

Ces premières vues sont obtenues à partir des calculs réalisés en 2013 dans le cadre du projet AIRCITY. Les images suivantes présentent des coupes de concentration à la première hauteur hors sol du modèle (1,5m). Elles sont produites à haute résolution (8192 x 8192 points). On compare des vues à 2 h du matin, et 8 h, soumises à un vent de nord est qui change peu entre les deux échéances.

Les images nécessitent un peu moins de 4mn sur 120 cœurs de calcul.

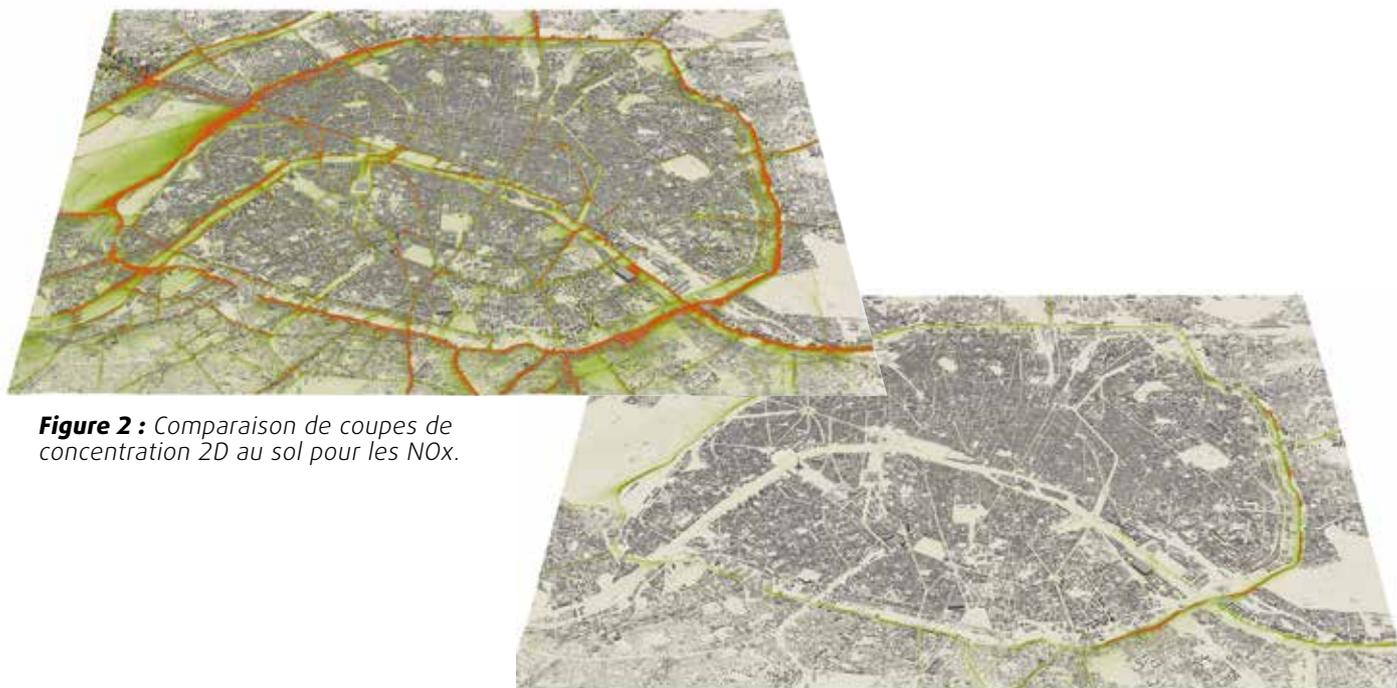


Figure 2 : Comparaison de coupes de concentration 2D au sol pour les NOx.

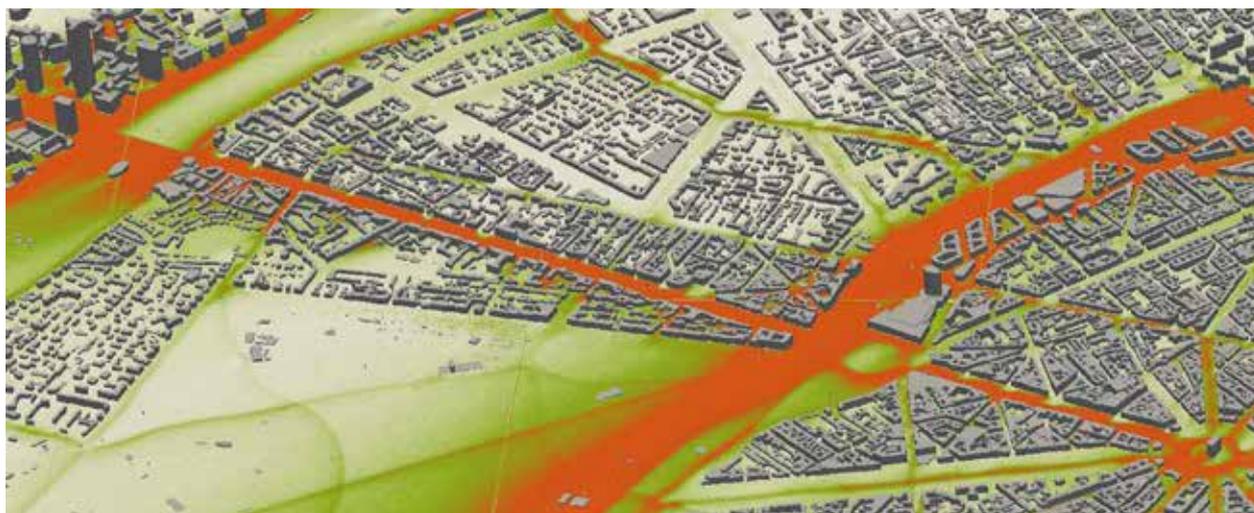


Figure 3 : Zoom à 8 h sur l'axe reliant la place de l'Étoile à La Défense.

L'impact de l'augmentation du trafic entre les deux échéances horaires est bien visible. La figure de gauche présente elle un zoom à 8 h sur l'axe reliant la place de l'Étoile au quartier de La Défense et passant par la porte Maillot. Le trafic matinal en direction de La Défense est intense. On peut aussi remarquer que le tunnel au niveau du métro Pont de Neuilly n'est pas pris en compte.

Afin d'obtenir une bonne compréhension 3D des panaches de NOx issus des axes routiers, deux iso-surfaces de concentration sont calculées et affichées. La transparence de l'iso-surface de plus faible concentration est activée afin de permettre la visualisation de l'iso-surface de plus forte concentration. Les images suivantes sont réalisées en résolution 4096 x 4096 car la résolution de 8 192 pixels conduisait à un problème mémoire.

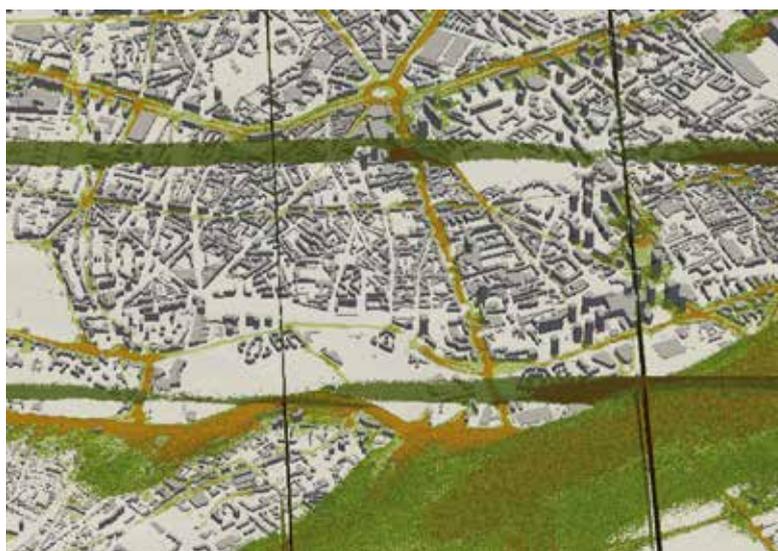


Figure 4 : Affichage de deux iso-surfaces de concentration, vue générale du domaine et agrandissement sur le 13^e arrondissement.

Des artefacts sont immédiatement visibles au niveau des frontières de tuiles. Si leur présence était indétectable sur une coupe au sol, l'affichage 3D les révèle immédiatement. Ils sont dus à des contraintes trop faibles sur le transfert des particules entre les tuiles.

Ce problème était resté jusqu'ici invisible : des calculs en 3D nécessitent une exploitation en 3D en phase de vérification. Une exploration de ce type était, jusqu'à la réalisation de ce Grand Défi sur la machine Occigen, impossible. ■

Exploration des résultats

De nouveaux calculs AIRCITY, présentés dans la suite de ce document, ont été réalisés en utilisant une paramétrisation plus fine des échanges, entre les tuiles, des particules du modèle lagrangien SPRAY.

Les figures suivantes présentent trois échéances pour les iso-surfaces de concentration. La résolution est toujours de 4096 x 4096 pixels avec un temps de production par image situé entre 4 et 5 mn.

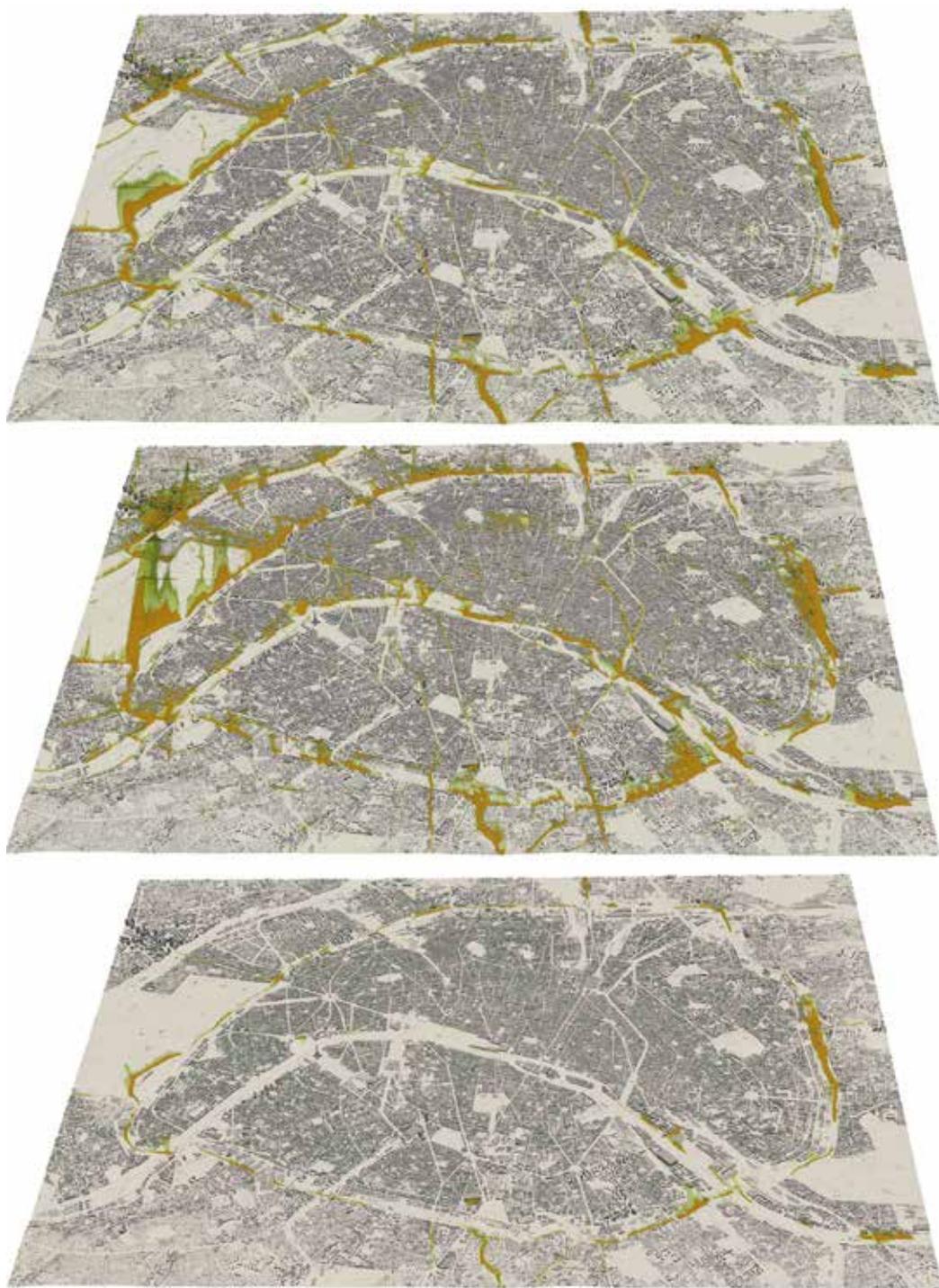


Figure 5 : Iso-surfaces de concentrations à 2, 8 et 14 h (respectivement de bas en haut).

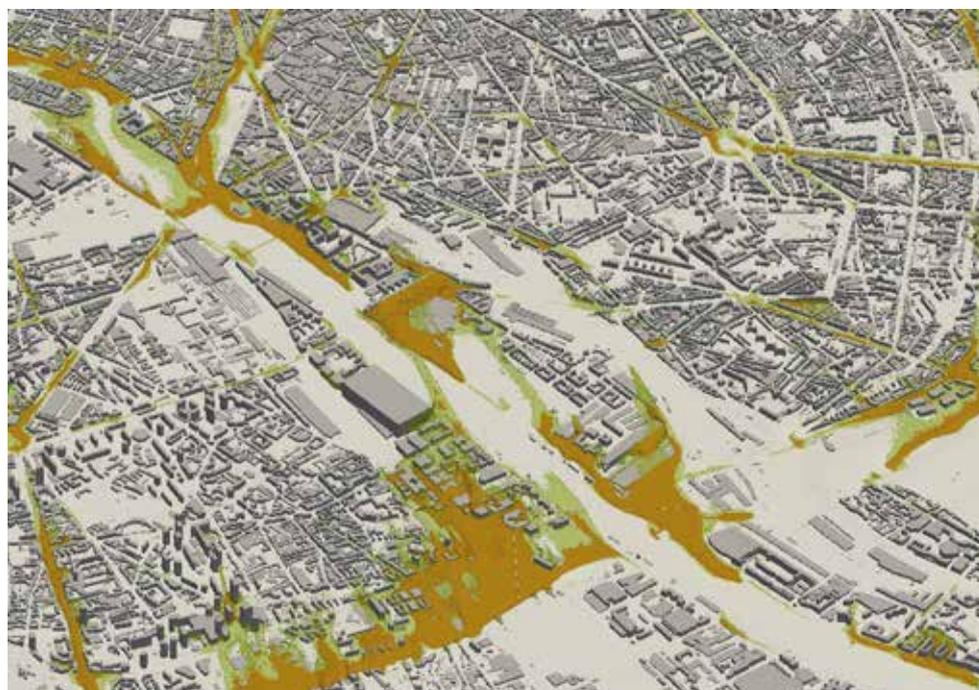
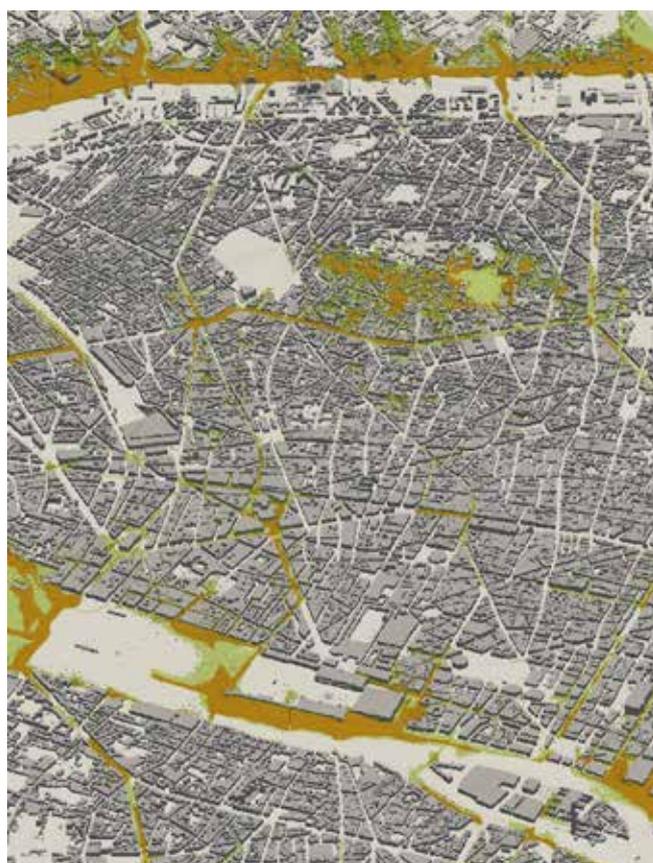
La journée modélisée est plus récente (31/10/14), et le vent est cette fois de direction sud sud-est. On voit que les artefacts de bordure de tuiles ont disparu. Il est intéressant de noter certains détails, mis en évidence sur les agrandissements ci-dessous.

On voit, au niveau du Louvre, le panache de NOx issu du quai des tuileries être rabattu par le vent et piégé par la face sud du musée. Un phénomène similaire est visible pour le Boulevard de Clichy, où la pollution est cette fois piégée par le relief de la Butte Montmartre.

Sur la droite, les panaches du quai de Bercy viennent s'accumuler sur la façade du bâtiment du Trésor Public. L'influence du périurbain au sud est également particulièrement visible sur cette même image.

Au delà de ces exemples, c'est l'ensemble des échéances horaires qui a pu être ainsi analysé sur les journées simulées. ■

Figure 6 : Visualisation des panaches de NOx à 8 h le 31/10/2014 sous la forme d'iso-surface de concentration, agrandissement sur le Louvre et la Butte Montmartre (image de droite) et le 13^e arrondissement et Bercy (image de gauche).



4 Conclusions, limites et perspectives

Les travaux réalisés lors de ce Grand Défi sont donc une première mondiale pour des applications en qualité de l'air : on visualise en 3D un domaine de plus d'une dizaine de kilomètres de côté maillé à 3m, donc comportant environ 600 millions de nœuds.

Il faut souligner le caractère exceptionnel de ces visualisations :

- Elles permettent en effet d'explorer les résultats en full 3D : coupes verticales, horizontales ou arbitraires, iso-contours surfaciques, etc. Ces visualisations ont d'ailleurs permis de détecter des artefacts dans certains calculs menés antérieurement mais non analysés en 3D à ce jour,

- Techniquement la visualisation est obtenue en utilisant en parallèle plus d'une centaine de serveurs de rendu. Ceux-ci sont affectés chacun à une tuile de calcul, et ils fonctionnent de concert pour permettre d'explorer en 3D les résultats de simulation de la qualité de l'air à Paris.

Dans le cadre de ce Grand Défi, des visualisations en mode interactif ont également été réalisées : il s'agit non pas de produire en mode batch des images, mais bien d'interagir en temps réel avec les données. L'interface graphique de Paraview, connectée à 120 serveurs de rendu, et transférée par fenêtre X sous ssh au poste distant, a permis de manipuler les simulations sur Paris. Cependant, les temps de rafraîchissement de la fenêtre graphique étaient de l'ordre de 10 à 20s, ce qui rend l'exploration fastidieuse.

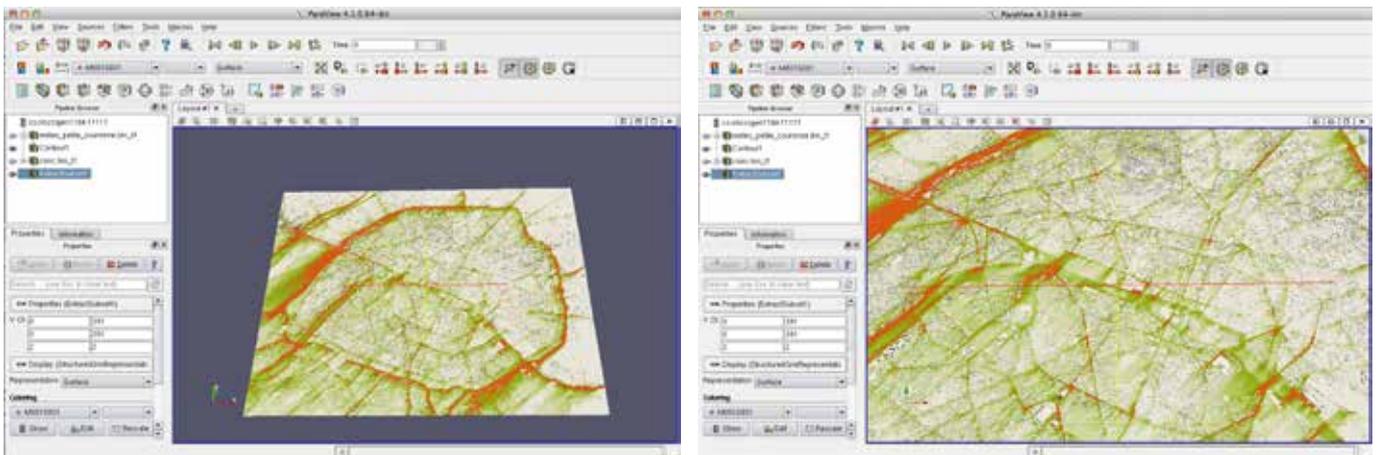


Figure 7 : Vue de la concentration et du bâti en mode interactif pour le domaine AIRCITY.

Nous finirons ce document en mentionnant également les tentatives menées pour réaliser des vues de type volume rendering. Cela consiste à colorer chaque cellule d'un maillage 3D en fonction de la variable visualiser, ici la concentration. Sont ensuite appliquées des règles de transparence en fonction de l'intensité de la concentration et qui permettent ainsi de voir les valeurs à l'intérieur du volume. Le volume rendering est particulièrement couteux en ressource CPU. Il ne nous a pas été possible de réussir à produire ce type de visualisations, en dépit de tentatives pour alléger le coût calculatoire (opacité plus forte, sous extraction d'un volume de données plus petit, etc.) : les calculs n'ont pas convergé ou ont produit des erreurs, ce qui est probablement dû à une relative instabilité de ce type de visualisations.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien des équipes du CINES, et en particulier la patience, la disponibilité et l'expertise de Bertrand Cirou et Jean-Christophe Penalva. ■

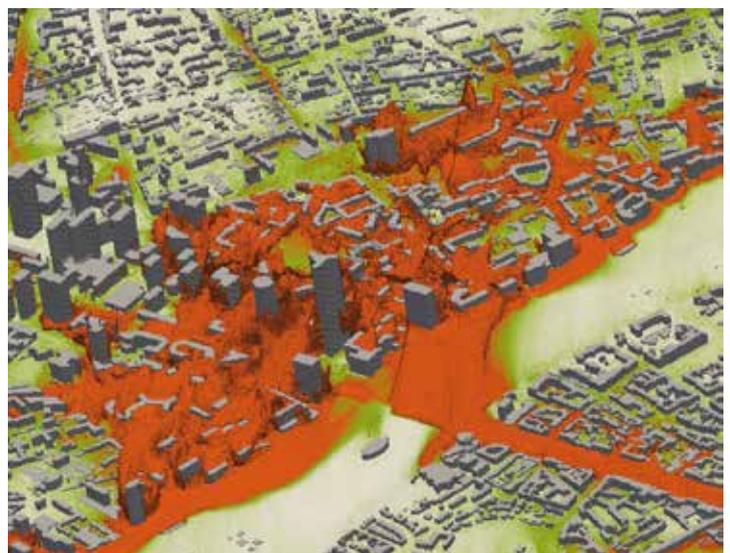


Figure 8 : Agrandissement sur la zone de La Défense, visualisation des panaches de NOx sous la forme d'une iso-surface de concentration, et trace au sol de la pollution.

5 Annexe : références

- **Anfossi D., F. Desiato, G. Tinarelli, G. Brusasca, E. Ferrero, D. Sacchetti** (1998) "TRANSALP 1989 experimental campaign Part II : Simulation of a tracer experiment with Lagrangian particle models". *Atmospheric Environment*, 32, 1157-1166
- **Duchenne C., P. Armand, O. Oldrini, C Olry and J. Moussafir** (2011), "Application of PMSS, the parallel version of MSS, to the micro-meteorological flow field and deleterious dispersion inside an extended simulation domain covering the whole Paris area", *14th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Harmo'14, Kos (Greece), Oct. 2-6, 2011*
- **Moussafir J., C. Olry, M. Nibart, A. Albergel, P. Armand, C. Duchenne, F. Mahe, L. Thobois and O. Oldrini**, 2013 : Aircity, a very High-resolution 3D Atmospheric Dispersion Modeling System for Paris. *15th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*
- **Moussafir J., Oldrini O., Tinarelli G, Sontowski J, Dougherty C.**, 2004 : A new operational approach to deal with dispersion around obstacles : the MSS (Micro-Swift-Spray) software suite. *Proc. 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, vol. 2, 114-118*
- **Oldrini O., C. Olry, J. Moussafir, P. Armand and C. Duchenne**, 2011 : Development of PMSS, the Parallel Version of Micro SWIFT SPRAY. *Proc. 14th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 443-447*
- **Tinarelli G., Mortarini L., Castelli S.T., Carlino G., Moussafir J., Olry C., Armand P., Anfossi D.**, 2013 : Review and validation of MicroSpray, a lagrangian particle model of turbulent dispersion, *Journal of Geophysical Research*, 200, 311-327.
- **Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F. and Trombetti F.**, 1994 : Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the lee of a schematic two-dimensional hill. *Journal of Applied Meteorology*, 33, N. 6, 744-756

VERTIFLOAT

Simulation LES hautement résolue d'un étage d'éolienne à axe vertical.

Ghislain LARTIGUE
(CORIA)



Ont contribué au projet :

Vincent MOUREAU (CORIA)

Nicolas PARNEIX, Frédéric SILVERT (*Nénuphar Wind*)

Paul DEGLAIRE, Félix BARNAUD (*Areva Wind*)

Mathieu CLOIREC, Gérard GIL (*CINES*)

SOMMAIRE

1	Contexte scientifique	16	7	Conclusions et perspectives	22
2	Objectifs scientifiques	17	8	Remerciements	23
3	Description du code de calcul	18	9	Synthèse du Grand Challenge pour dissémination	23
4	Simulations réalisées	18	10	Bibliographie	24
5	Résultats scientifiques	19			
6	Mise en œuvre de l'application sur la machine OCCIGEN	21			
	Environnements et outils	21			
	Stabilité des environnements matériels et logiciels	21			
	Performances et passage à l'échelle	22			

1 Contexte scientifique

La société Nénuphar Wind [1] développe depuis plusieurs années la prochaine génération d'éolienne offshore. Ce secteur d'activité fait explicitement partie des 34 plans industriels présentés par le gouvernement [2] : la BPI, Areva Wind et d'autres acteurs du secteur ont investi 15M€ dans cette société en avril 2014 afin de soutenir son activité [3]. Cet investissement intervient dans le cadre du programme des investissements d'avenir



Fig. 1 : Concept d'éolienne offshore de Nénuphar Wind.

D'un point de vue technique, cette nouvelle génération d'éolienne offshore est fondamentalement différente des génératrices actuelles puisque leur axe de rotation n'est plus horizontal mais vertical [4] comme le montre la figure 1. Parmi les avantages de cette technologie on peut citer les points suivants : indépendance à la direction du vent, charges moindres sur le mât et le flotteur, maintenance plus aisée, meilleur rendement en conditions de houle, faible encombrement, faible niveau de bruit, ...

À contrario, cette technologie étant encore relativement jeune, plusieurs problèmes freinent encore son développement et notamment leur comportement lorsque la vitesse des pales devient du même ordre de grandeur que la vitesse du vent incident. En effet, l'orientation des pales par rapport au vent change continuellement lors d'une rotation et la pale se retrouve par moment avec un angle d'attaque très élevé, ce qui peut provoquer un décrochage, et induire une fluctuation importante des charges sur les structures. Un des enjeux pour le développement de cette technologie est donc de mieux comprendre et de maîtriser ce phénomène de décrochage dynamique.

Le CORIA [5] est un laboratoire de recherche dont une équipe s'est spécialisée dans la simulation numérique haute résolution et haute performance des écoulements à faible nombre de Mach. Cette équipe développe le code YALES2 dédié à la résolution des équations de Navier-Stokes à faible nombre de Mach sur des machines massivement parallèles. C'est dans ce cadre que les trois partenaires Nénuphar Wind, Areva Wind et le CORIA ont obtenu un projet Grand Challenge sur la machine OCCIGEN pour contribuer à l'étude du décrochage dynamique sur les éoliennes à axe vertical. ■

2 Objectifs scientifiques

Un des enjeux du projet est d'effectuer des simulations aux grandes échelles hautement résolues d'un prototype d'éolienne à axe vertical de la société Nénuphar Wind en prenant en compte les effets de sillage d'une pale sur l'autre. En outre, la compréhension du phénomène de décrochage dynamique pour les faibles Tip Speed Ratio (TSR), qui compare la norme de la vitesse maximale en extrémité de pale à la norme de la vitesse du vent incident, est au cœur de la problématique industrielle de Nénuphar Wind.

La géométrie choisie pour cette étude est celle du prototype VERTIFLOAT 1H représentée sur la figure 2. Ce prototype de 600 kW et de 30 mètres de hauteur est installé à Fos-sur-Mer et constitue un des trois étages de la turbine complète de 2 MW (projet VertiWind [6]). La CAO du prototype a été fournie par la société Nénuphar Wind au CORIA pour être nettoyée et pour réaliser le maillage. Cette géométrie et le maillage associé, présentés sur la figure 3, comportent un moyeu central, 3 bras et 3 pales.



Fig. 2 : Prototype VERTIFLOAT 1H de Nénuphar Wind installé à Fos-sur-Mer.

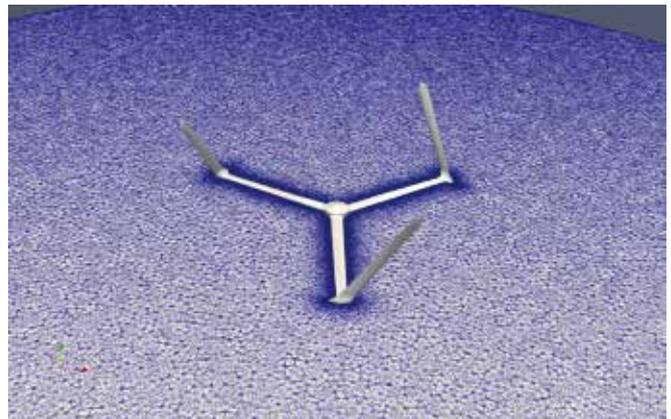
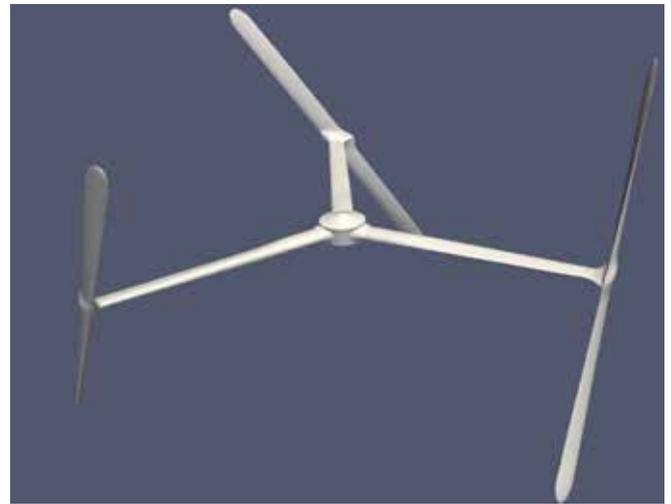


Figure 3 : géométrie du prototype VERTIFLOAT 1H et maillage non-structuré de tétraèdres.

L'objectif du projet est de comparer les performances de l'éolienne à trois points de fonctionnement définis par des valeurs de TSR 1.5, 2.5 et 3.5 à vitesse de rotation de l'éolienne constante. La première valeur correspond à une rotation lente de l'éolienne par rapport au vent incident et la dernière valeur à une rotation rapide. Le phénomène de décrochage dynamique est plus susceptible d'arriver pour les faibles valeurs de TSR inférieures à 2.0. Le nombre de Reynolds maximal basé sur la corde et sur la vitesse incidente maximale vue par la pale est de 2 millions à TSR 1.5 et 1.5 million à TSR 3.5.

Un autre objectif du projet est d'obtenir des simulations avec les meilleures performances possibles. Une attention particulière a donc été portée à l'optimisation du code afin de bénéficier au mieux de la nouvelle architecture Haswell d'Intel. ■

3 Description du code de calcul

Le code utilisé pour réaliser ce grand challenge est le code YALES2 du CORIA [8]. Ce code est développé depuis 2009 par V. Moureau et depuis 2012 par V. Moureau et G. Lartigue dans le cadre du GIS Success [9]. Ce GIS réunit 8 organismes de recherche (CORIA, CERFACS, EM2C, IMFT, LEGI, I3M, LMA et IFP-En) et a pour but de promouvoir le super-calcul en CFD. YALES2 a déjà été porté sur toutes les architectures récentes (BlueGene/Q « Turing » de l’IDRIS, Intel Sandy Bridge E5-2680 « Curie » du TGCC, ARM Cortex-A15 du BSC-CNS, ...) et montre une excellente scalabilité jusqu’à 65’536 processeurs.

Pour ce grand challenge, le solveur bas-Mach à densité constante sera utilisé. Ce solveur a déjà été modifié récemment pour prendre en compte les équations de Navier-Stokes dans un référentiel tournant. Ce solveur résout à chaque itération une équation de Poisson, ce qui revient à résoudre un système linéaire de très grande taille. Un des points forts de YALES2 est de résoudre ce système avec des méthodes numériques extrêmement efficaces (recyclage des résidus, préconditionnement par

déflation, adaptation du critère de convergence sur le maillage grossier, ... [10]). L’autre apport de YALES2 réside dans ses schémas numériques du 4^e ordre en espace et en temps qui permettent de produire des LES de très bonne qualité avec un minimum d’effet numérique sur les structures tourbillonnaires.

Un des atouts majeur de YALES2 est qu’il a été très fortement optimisé en 2014 grâce à une collaboration étroite avec l’Exascale Lab INTEL/GENCI/CEA/UVSQ. YALES2 est écrit avec une approche MPI-1 et supporte le multithreading (déjà validé sur la BG/Q de l’IDRIS). Les bibliothèques extérieures nécessaires à l’utilisation de YALES2 sont : hdf5 (version 1.8.x), parmetis (version 4.x), fftw (version 3.3.x) ainsi que lapack (version 3.x) pour certains modèles de LES.

Concernant le post-traitement et la visualisation, le logiciel Paraview a été utilisé. Même si les maillages et solutions à traiter sont de grande taille, YALES2 stocke ces données sous forme partitionnée afin de réaliser des traitements sur des ensembles de taille réduite. ■

4 Simulations réalisées

Afin de caractériser au mieux le décrochage dynamique, l’étude paramétrique menée porte sur trois paramètres : le TSR, la résolution du maillage et le modèle de paroi.

Le nombre de Reynolds maximal basé sur la corde des pales est supérieur au million et à ces valeurs de nombre de Reynolds, la modélisation de la paroi est critique. Deux modèles de paroi ont donc été testés : adhérence et glissement avec loi de paroi (loi logarithmique). Seul ce dernier modèle a donné satisfaction et les résultats présentés ont été obtenus avec le modèle de loi de paroi.

Une étude en raffinement de maillage a également été effectuée afin de garantir une indépendance des résultats au maillage. Des études précédentes [7] ont montré que pour résoudre correctement ce type d’écoulement, des maillages contenant au minimum 10 milliards de tétraèdres étaient nécessaires. Dans le cas présent, une

étude préliminaire avec des maillages de 38 millions de tétraèdres avait été menée avant le Grand Challenge. Dans ce projet, deux résolutions plus importantes ont été étudiées afin d’estimer la résolution en paroi nécessaire à la prédiction des coefficients aérodynamiques : 304 millions et 2.4 milliards d’éléments. Pour ces deux résolutions, les éléments du maillage à la surface de la pale ont une taille de 5 et 2.5 centimètres respectivement. Ces dimensions sont à comparer à la corde de pale qui mesure deux mètres et la hauteur de l’éolienne de 30 mètres.

L’ensemble des simulations et le nombre de rotations de l’éolienne sont résumés dans la Table 1. Il faut noter que seules les simulations sur le maillage à 304 millions d’éléments sont convergées. Ce temps de convergence dépend du TSR. Les simulations avec loi de paroi ont été obtenues en poursuivant les simulations avec adhérence, ce qui explique la convergence plus rapide. ■

Cas	TSR	Maillage	Nombre de cœurs	Modèle de paroi	Nombre de rotations de l’éolienne
#1	3.5	304M	2048	No slip	15
#2	3.5	304M	2048	Law-of-the-wall	4
#3	3.5	2.4B	8192	Law-of-the-wall	0.5
#4	2.5	304M	2048	No slip	10
#5	2.5	304M	2048	Law-of-the-wall	2.7
#6	1.5	304M	2048	No slip	8
#7	1.5	304M	2048	Law-of-the-wall	1.8

Table 1 : résumé des simulations réalisées.

5 Résultats scientifiques

Dans cette section, seuls les résultats avec le modèle de loi de paroi sont présentés.

Afin de mettre en évidence la différence de comportement de l'éolienne à différents TSR, une visualisation des tourbillons générés par l'éolienne sont représentés sur la Figure 4. Ces visualisations sont obtenues à partir d'iso-surfaces de critère Q [11,12], qui est le second invariant du tenseur des déformations et qui est positif dans le cœur des tourbillons et négatif dans les couches de cisaillement. Ce critère permet de visualiser les plus petits tourbillons de l'écoulement. Dans cette figure, la valeur de l'iso-surface de critère Q est adaptée afin de bien illustrer la formation des tourbillons au voisinage des pales.

Cette figure montre que les tourbillons sont générés principalement dans trois zones : la tête et le pied de pale et la jonction entre les pales et les bras. À cause de l'inclinaison des pales, le tourbillon de la jonction pale/bras se positionne au dessus des bras. La cohérence des tourbillons qui peut être liées à la longueur du cœur tourbillonnaire est plus importante à TSR élevé mais la distance inter tourbillons diminue lorsque la vitesse relative de l'éolienne augmente (TSR élevé).

Le phénomène de décrochage dynamique intervient lorsque l'angle d'incidence des pales varie fortement et il se traduit par un décollement massif de l'écoulement

autour de pale, ce qui provoque un lâcher important de tourbillons. Ce phénomène s'observe très bien à TSR 1.5 où de nombreux tourbillons sont générés par la pale en tête dont l'angle d'incidence est très élevé. Ce phénomène s'observe de manière faible à TSR 2.5 et est absent des simulations à TSR 3.5.

Concernant le sillage généré par l'éolienne, on peut observer que le contenu spectral de la turbulence varie fortement en fonction du TSR. À TSR élevé, on retrouve les tourbillons à forte cohérence générés par la pale la plus en amont qui ont été ensuite interagis avec les pales en aval. À faible TSR, le sillage principalement est composé des tourbillons à faible cohérence générés par le décrochage. Enfin, on notera que l'expansion du sillage dépend également fortement du TSR.

À fin de montrer le gain obtenu par l'augmentation de la résolution du maillage, les mêmes iso-surface de critère Q sont représentées sur la Figure 5 pour le maillage à 2.4 milliards d'éléments. Cette simulation n'est pas convergée par faute de temps humain et de disponibilité de la machine mais elle permet déjà d'illustrer le plus grand nombre de tourbillons résolus dans le sillage des pales.

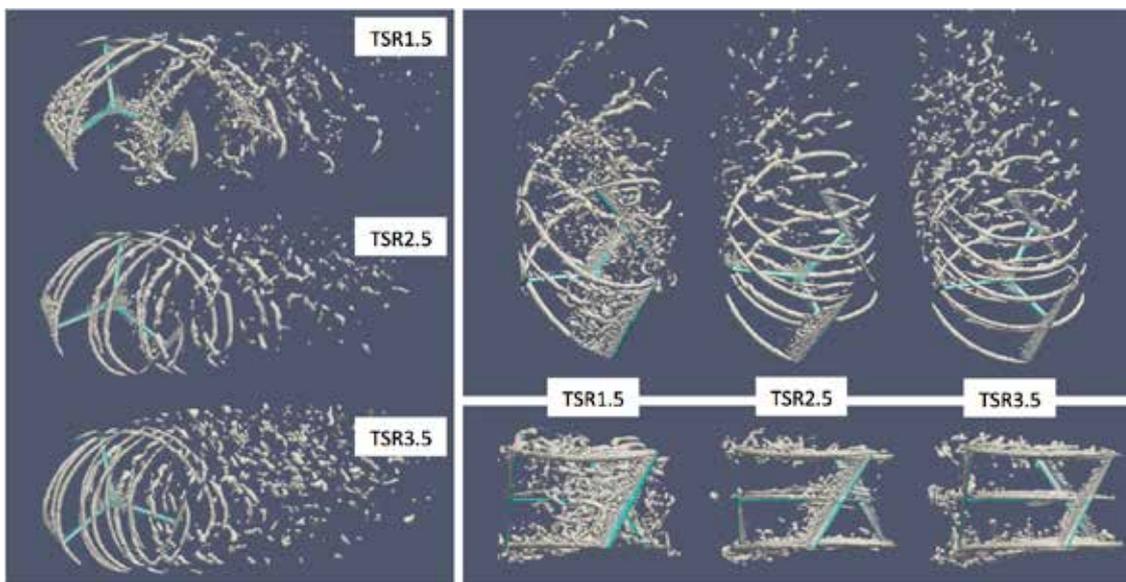


Figure 4 : iso-surfaces de critère Q pour représenter les tourbillons créés par l'éolienne à différents TSR. Vues de haut (gauche), en perspective (haut-droite) et de face (bas-droite). Le maillage comporte 304 millions de tétraèdres et une loi de paroi avec glissement est utilisée à la paroi.

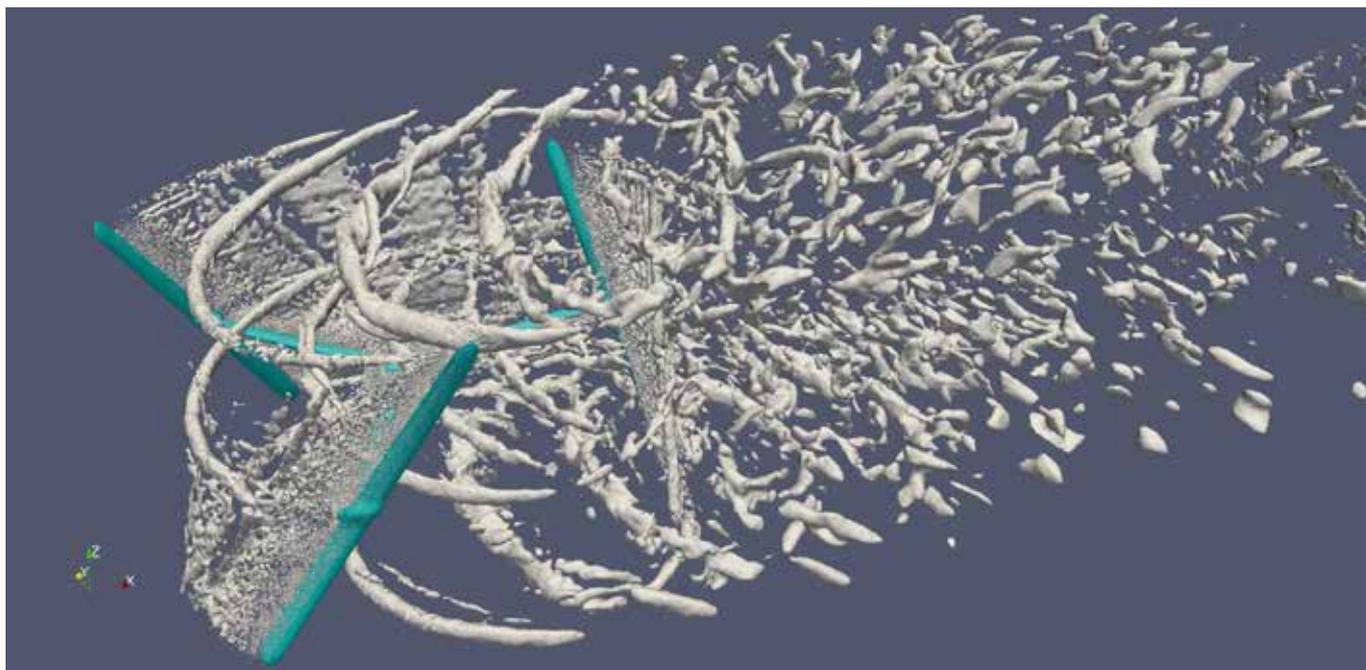


Figure 5 : iso-surfaces de critère Q pour représenter les tourbillons créés par l'éolienne à TSR 3.5 sur le maillage le fin, qui comporte 2.4 milliards de tétraèdres. Cette simulation n'est pas convergée.

Afin de mieux visualiser la formation et l'évolution du sillage, des champs instantanés de vorticité axiale à différentes hauteurs de l'éolienne sont représentés sur la Figure 6. Tout comme la Figure 4, cette figure illustre le phénomène de décrochage dynamique qui intervient à TSR 1.5. La turbulence générée par ce décrochage est

transportée par le vent et forme des zones de turbulence intense qui alternent avec des zones plus calmes. On peut également noter à bas TSR la présence de sillages à doubles couches et de plus larges épaisseurs caractéristiques du décrochage.

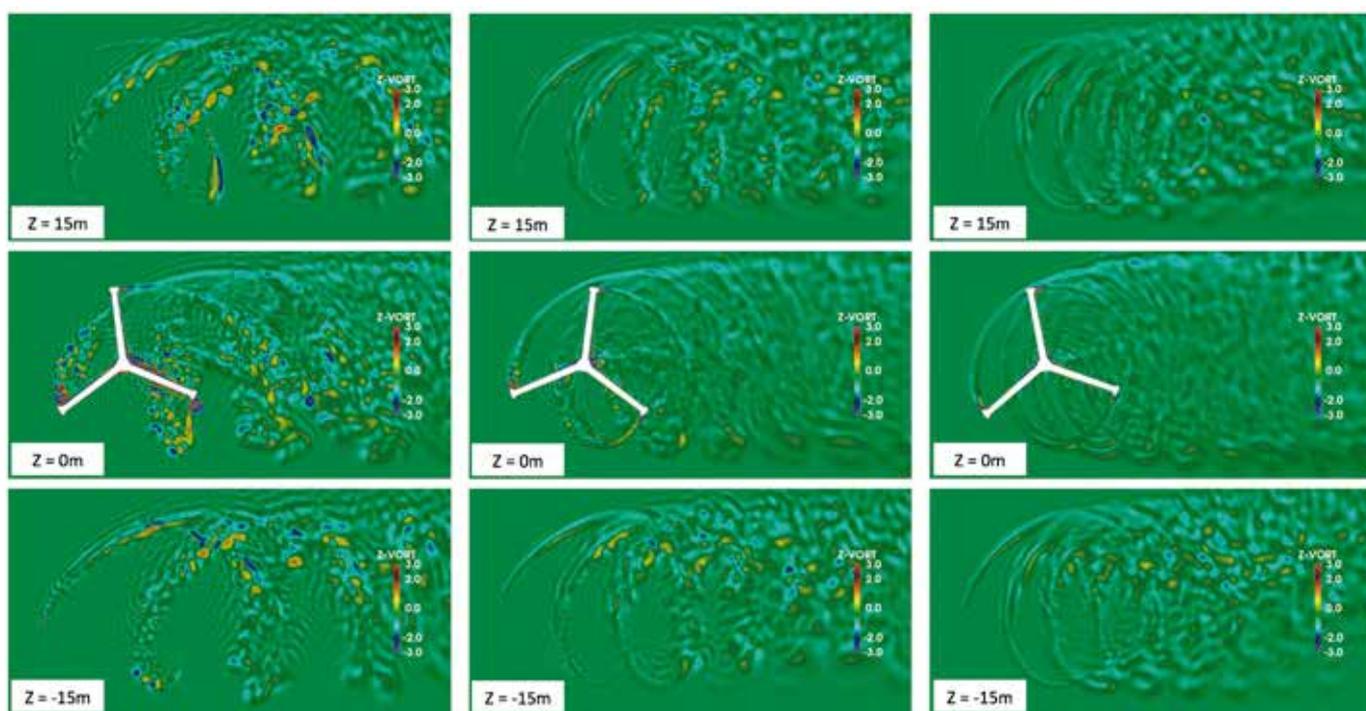


Figure 6 : comparaison de champs de vorticité axiale au sommet de pale (haut), dans le plan médian (milieu) et au pied de pale (bas) pour les trois valeurs de TSR : 1.5 (gauche), 2.5 (centre) et 3.5 (droite). Maillage 304 millions d'éléments.

A TSR élevé, le sillage est plus homogène et la composante axiale de la vorticité est la plus importante en tête et en pied de pale. Dans le plan médian, le tourbillon de la jonction pale/bras ne génère pas des niveaux de vorticité comparables à la tête et au pied.

La Figure 6 montre également la déviation et le taux d'élargissement du sillage en aval de l'éolienne. Le taux d'élargissement semble plus important à TSR élevé mais la déviation globale semble être similaire entre les différents TSR.

Enfin, pour illustrer la résolution de la paroi, la distance à la paroi du premier nœud fluide adimensionnée par la distance de frottement, généralement appelée y^+ ,

est tracée à TSR 1.5 sur la Figure 7. Il est important de noter que sur le maillage à 304 millions d'éléments, y^+ prend des valeurs maximales de 5000, ce qui est très élevé et qui suppose que la loi de paroi est valide sur une gamme de valeurs de y^+ très large. Pour le maillage à 2.4 milliards d'éléments, cette valeur est divisée par deux, c'est-à-dire autour de 2500, ce qui reste important. Ces valeurs démontrent l'importance de la modélisation de la paroi à ces nombres de Reynolds  lev s. Cette figure montre également que le champ de y^+ est très hétérogène à l'extrados de la pale la plus en amont du vent. Cette hétérogénéité provient du décrochage de la pale qui génère de fortes zones de recirculations à l'extrados de la pale. ■

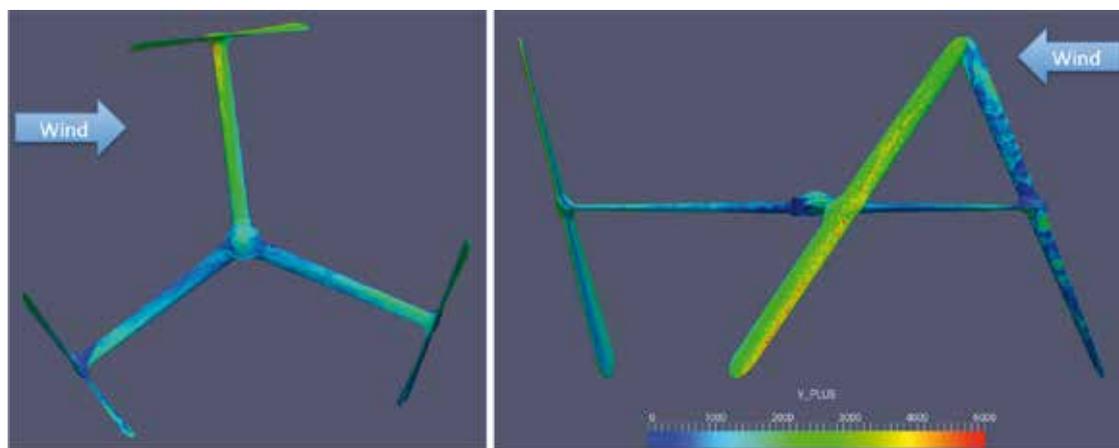


Figure 7 : champ de distance à la paroi adimensionnée par la longueur de frottement (y^+)   TSR 1.5 et avec le maillage à 304 millions d'éléments.

6 Mise en œuvre de l'application sur la machine OCCIGEN

Environnements et outils

L'environnement logiciel de la machine basé sur Slurm et sur des modules pour gérer les différentes bibliothèques et compilateur est semblable à d'autres machines GENCI comme Curie. La prise en main de l'environnement fut donc rapide. En termes de compilateurs et bibliothèques externes, tous les

 l ments nécessaires à la compilation de YALES2 étaient présents à l'ouverture de la machine.

La seule difficulté mineure fut l'adaptation des fichiers batch pour l'application mais des fichiers d'exemples ont été fournis par le personnel du support.

Stabilité des environnements matériels et logiciels

La machine a montré une bonne stabilité pendant l'ensemble du Grand Challenge. Le seul problème rencontré, qui a empêché de tourner pendant plusieurs semaines, était lié à un problème dans les optimisations des communications collectives.

Sur les simulations de grande taille, ces optimisations provoquaient le blocage de l'application. En désactivant ces optimisations avec l'aide du personnel du support, les performances de l'application étaient les mêmes et le blocage avait disparu.

Performances et passage à l'échelle

Les performances de YALES2 sur OCCIGEN sont très bonnes à condition d'utiliser 23 cœurs sur les 24 présents sur chaque nœud. Ce point peut sans doute s'expliquer par les ressources nécessaires pour faire fonctionner le noyau, ce qui empêche d'utiliser tous les cœurs. Tous les résultats présentés dans cette section ont été obtenus en utilisant 23 cœurs par nœud.

La figure 8 montre le résultat d'un des benchmarks standard de YALES2 (écoulement isotherme dans le brûleur Preccinsta avec 14 millions de tétraèdres). Les valeurs de temps réduit sont données pour différentes machines. Par rapport à la machine Curie, les processeurs Intel Xeon Haswell d'OCCIGEN sont 30 % plus rapides. La différence entre OCCIGEN et la station de travail avec les mêmes processeurs s'explique par le surcoût du parallélisme dans la résolution de l'équation de Poisson.

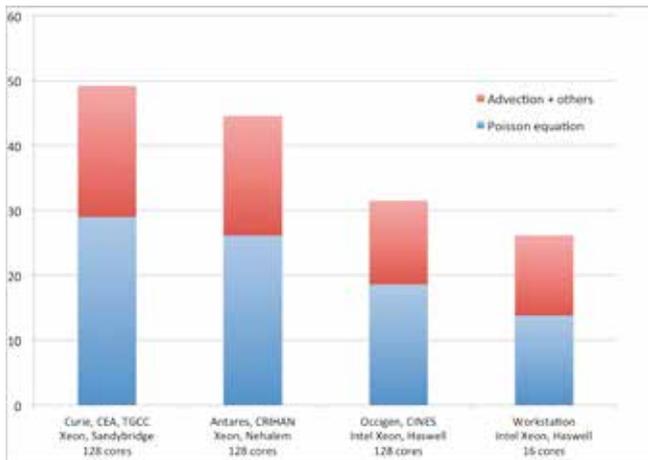


Figure 8 : temps réduit (micro-secondes par volume de contrôle et par pas de temps) pour le benchmark Preccinsta avec 14 millions de tétraèdres sur différentes machines.

Un test de scalabilité obtenu à TSR 3.5 et avec adhérence à la paroi est présenté sur la Figure 9. Il faut noter que toutes les simulations de production réalisées sont représentées sur cette courbe. La scalabilité faible de l'application est très bonne, ce qui a permis de réaliser l'ensemble des simulations présentées. ■

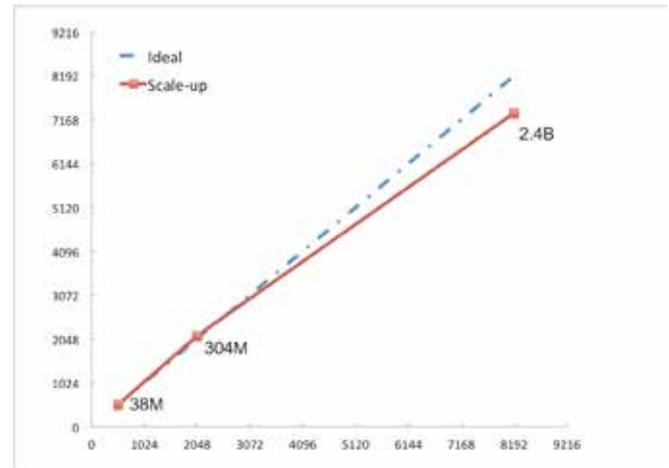


Figure 9 : mesure de scale-up sur les simulations de production pour trois maillages différents.

7 Conclusions et perspectives

L'objectif principal du projet Grand Challenge, qui était de contribuer à l'étude du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical, a été atteint et les résultats obtenus montrent déjà le potentiel de la simulation aux grandes échelles pour ce type d'écoulement. Malgré les difficultés rencontrées en termes de maillage et de résolution de la couche limite, les résultats numériques permettent de retrouver l'apparition de décrochage dynamique massif pour des TSR inférieurs à 2.0.

Cette première étude doit encore être enrichie en convergeant les simulations à 2.4 milliards d'éléments à TSR 1.5 et 3.5. La convergence en maillage est un point important à démontrer afin d'augmenter le niveau de confiance des résultats numériques, qui sont très difficiles à valider expérimentalement. Toutes les données accumulées doivent également être comparées aux prédictions des outils métier d'AREVA WIND et NUNEPHAR pour participer à la calibration de ces outils. ■

8 Remerciements

Le CORIA souhaite remercier chaleureusement les équipes du CINES pour la mise à disposition de la machine et leur support. Les sociétés NENUPHAR et AREVA WIND

sont également remerciées pour la mise à disposition de la géométrie et des conditions opératoires. ■

9 Synthèse du Grand Challenge pour dissémination

Dans le but d'améliorer la robustesse et la maintenance des éoliennes installées en mer, la société Nenuphar soutenue entre autres par BPI France, AREVA et EDF-EN développe un concept novateur d'éolienne flottante à axe vertical. Contrairement aux éoliennes à axe horizontal, ce type d'éolienne est capable de capter le vent dans toutes les directions en étant peu sensible à la houle. Toutefois, ces éoliennes à axe vertical présentent un phénomène aérodynamique particulier appelé décrochage dynamique, qui intervient lorsque la vitesse des pales se rapproche de la vitesse de vent incident. Dans ces conditions, l'angle d'incidence des pales varie fortement au cours de la rotation de la turbine et l'écoulement autour de la pale se décolle massivement. Lorsque le TSR (Tip Speed Ratio), qui est le ratio de ces deux vitesses, est inférieur à 2.0, le décrochage dynamique devient important et induit des fluctuations qui peuvent être importantes pour le dimensionnement des structures de la turbine.

Dans le cadre du Grand Challenge mené sur la machine OCCIGEN du CINES, des simulations aux grandes échelles (LES) d'un prototype d'éolienne à axe vertical ont été

réalisées afin de prédire et de comprendre le phénomène de décrochage dynamique. Le code de calcul utilisé est le logiciel YALES2 développé par le laboratoire CORIA (CNRS UMR 6612, INSA et Université de Rouen) et distribué au sein du Groupement d'Intérêt Scientifique SUCCESS (<http://success.coria-cfd.fr>). Ce logiciel résout les équations de Navier-Stokes à faible nombre de Mach dans des géométries complexes sur les machines massivement parallèles.

Cette étude a montré que le décrochage dynamique avait une forte influence sur le sillage généré par l'éolienne, ce qui peut être important pour l'installation des éoliennes au sein de fermes. L'impact du décrochage dynamique sur les performances de l'éolienne est en cours d'analyse. Enfin, l'importance de la résolution pariétale et de la modélisation de la couche limite au niveau des pales sur la prédiction du décrochage dynamique a également été mise en lumière. ■



10 Bibliographie

- [1] <http://www.nenuphar-wind.com/fr>
- [2] <http://www.redressement-productif.gouv.fr/files/la-nouvelle-france-industrielle.pdf>
- [3] <http://www.bpifrance.fr/Vivez-Bpifrance/Actualites/Energies-marines-renouvelables-la-societe-Nenuphar-leve-15-millions-d-euros>
- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Éolienne>
- [5] <http://www.coria-cfd.fr>
- [6] <http://www.polemermediterranee.com/Ressources-energetiques-et-minieres-marines/Energies-marines-renouvelables/VERTIWIND>
- [7] Duchaine, F., Maheu, N., Moureau, V., Balarac, G. & Moreau, S. (2013) Large-eddy simulation and conjugate heat transfer around a low-mach turbine blade. *J. Turbomach.*, 136 (5), 1-11.
- [8] <http://www.coria-cfd.fr/index.php/YALES2>
- [9] http://success.coria-cfd.fr/index.php/Main_Page
- [10] Malandain, M., Maheu, N. & Moureau, V. (2013) Optimization of the deflated conjugate gradient algorithm for the solving of elliptic equations on massively parallel machines. *J. Comp. Physics*, 238, 32-47
- [11] J. C. R. Hunt, A. A. Wray, and P. Moin. (1988) Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. In *Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases*, 2, 193-208.
- [12] Y. Dubief and F. Delcayre. (2000) On coherent-vortex identification in turbulence. *Journal of Turbulence*, (1).



Lola Guedot

Hakim Larabi

Benjamin Farcy

Lancelot Boulet

Yann Dufresne

Nicolas Legrand

Thomas Roger

Pierre Benard

Ghislain Lartigue

Vincent Moureau

Adrien Jean

H2O : HORIZON 2020

POUR L'OCÉANOGRAPHIE

**Modélisation des Écoulements Océaniques
Multi-échelles du Laboratoire de Glaciologie
et Géophysique de l'Environnement.**

Bernard
BARNIER
(LGGE)



Ont contribué au projet :

Jean-Marc MOLINES, Pierre BRASSEUR, Pierre Antoine BOUTTIER,
Jean-Michel BRANKART, Emmanuel COSME, Thierry PENDUFF,
Julien LE SOMMER, Jacques VERRON (MEOM, LGGE)

Nicole AUDIFFREN (CINES)

SOMMAIRE

1	Le Contexte : La mission Spatiale SWOT 26	3	La simulation des Grands Challenges 2014 sur OCCIGEN 27
2	H2O : Un projet scientifique associé aux Grands Challenges GENCI 2014 ... 27	4	Premiers résultats : À la découverte d'un nouveau monde 29
		5	Perspectives 30

1 Le Contexte : La mission Spatiale SWOT

L'altimètre à large fauchée de la mission spatiale SWOT qui sera menée conjointement par le CNES et la NASA, et au développement de laquelle le gouvernement français a attribué 170 M€ en mars 2011 au titre du volet Espace du « Programme d'Investissements d'Avenir » est susceptible de mener à des avancées majeures dans notre compréhension des interactions d'échelles dans la circulation océanique (les courants) et de leur rôle sur le fonctionnement du système climatique.

En effet, cet instrument mesurera à partir de 2020 sur l'océan global les dénivellations de la surface océanique localement induites par des structures dynamiques d'échelle kilométrique (Fig. 1). Intégrées à d'autres observations (température de surface, salinité de surface, couleur de l'eau, profils verticaux de température, salinité et oxygène collectés in-situ par des flotteurs profileurs et gliders autonomes, etc.) et à des simulations numériques haute résolution, les mesures réalisées par cette mission pourraient révolutionner l'océanographie à petite comme à grande échelle (turbulence et mélange, échanges verticaux, biogéochimie et cycle du carbone, applications opérationnelles, sciences du climat).

Afin de préparer au mieux le déroulement et l'exploitation de cette mission, il est important de pouvoir anticiper la nature et les caractéristiques physiques du signal qui sera mesuré. La simulation de l'océan par des modèles numériques de très haute résolution apparaît comme une approche particulièrement pertinente pour progresser dans ce domaine, et pour préparer la synthèse et l'interprétation des données SWOT qui représentent un défi formidable pour notre communauté. En effet, si la résolution des observations spatiales fera un véritable bond en avant avec cette mission, celle des observations in-situ (par exemple le réseau de flotteurs

profileurs Argo) n'aura probablement que faiblement changé (l'évolution actuelle s'orientant plutôt vers une extension du spectre de variables observées – i.e. variables biogéochimiques – que vers l'accroissement la densité d'observations). Ainsi l'écart d'échantillonnage entre les observations de surface (obtenues par satellite) et les observations en sub-surface/profondeur (obtenues par l'in-situ) augmentera, rendant le problème de leur cohérence plus aigu. ■

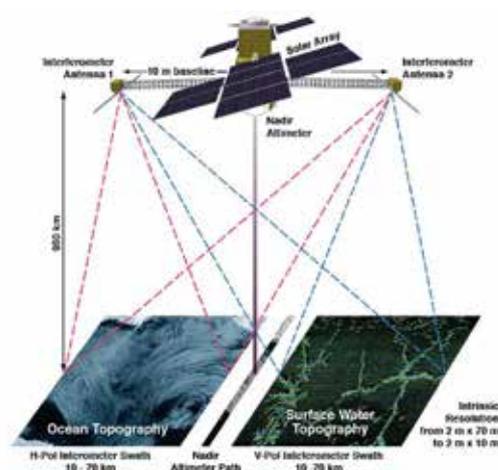


Figure 1 : (avec la courtoisie CNES). Schéma de fonctionnement de SWOT (La mission SWOT embarquera un nouveau capteur, l'instrument KaRIN (Ka-band Radar Interferometer), un altimètre radar interféromètre en bande Ka. L'altimétrie interférométrique permettra de fournir sur des fauchées larges de plusieurs dizaines de kilomètre une image bidimensionnelle de la dénivellation de surface de l'océan avec une résolution horizontale de l'ordre du kilomètre sur l'océan.

2 H2O : Un projet scientifique associé aux Grands Challenges GENCI 2014

Notre projet « H2O : HORIZON 2020 pour l'Océanographie » a pour objectif premier de réaliser une simulation de la circulation océanique de l'Atlantique Nord de laquelle on pourra extraire une « vision » de la dénivellation de la surface libre de l'océan telle que l'observera la mission spatiale SWOT à l'horizon 2020. Cette « vision SWOT » de l'océan étant cohérente avec la solution du modèle à pleine résolution spatiale (3D) et temporelle, on pourra alors réaliser les principaux objectifs scientifiques listés ci-après :

- une première caractérisation du contenu physique des mesures SWOT (observabilité ondes/courants) ;
- une première exploration de la capacité du modèle numérique NEMO à simuler les écoulements à l'échelle kilométrique et à générer de jeux d'observation synthétique en vue d'expériences d'assimilation de données de type SWOT ;
- une première évaluation de la complémentarité entre observations satellite de surface à très haute résolution et les observations in-situ (gliders, Argo) d'échantillonnage considérablement plus faible ;

- une étude des flux verticaux associés aux écoulements de très fine échelle ;
- une première étude des interactions d'échelles impliquant, dans un contexte réaliste (par opposition à un modèle idéalisé simplifié), des processus d'échelle kilométrique jusqu'à la circulation générale d'un bassin océanique.

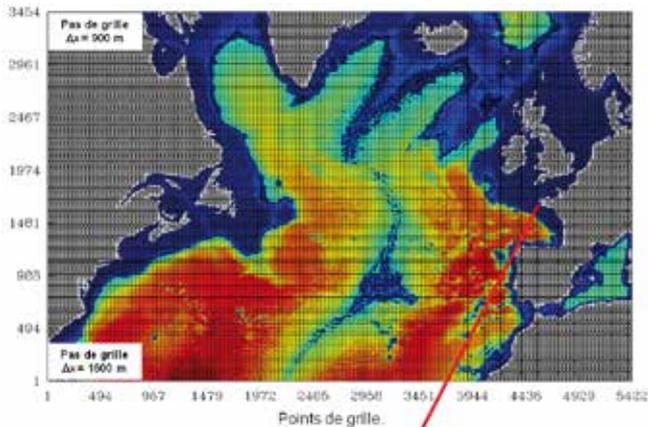
Les structures dynamiques de circulation les plus fines que SWOT observera avec un rapport signal sur bruit élevé sont de 10 km et au delà. La simulation résout donc explicitement ces échelles ce qui nécessite une résolution de grille de l'ordre du kilomètre. Par ailleurs, il a été également nécessaire d'atteindre une résolution verticale très élevée (de l'ordre du mètre dans les couches supérieures de l'océan) pour représenter la finesse des écoulements à sous-mésoéchelle associés à cette dynamique. Une telle simulation se situe donc clairement à la frontière des simulations réalisables sur les moyens de calcul HPC actuels. Nous avons donc saisi l'opportunité d'un Grand Défi pour réaliser une telle « première » en termes de simulation numérique de l'océan et explorer les possibilités d'exploitation de telles ressources à plus long terme. ■

3 La simulation des Grands Challenges 2014 sur OCCIGEN

Une configuration de modèle réaliste (trait de côte, bathymétrie, stratification, conditions de surface atmosphériques,...) du bassin Atlantique Nord à une résolution kilométrique (1/60°), intitulée NATL60, a été spécialement développée pour ce Grand Défi sur la base du code communautaire de circulation océanique NEMO. À noter qu'une résolution verticale de 300 niveaux (1 m en surface, 30 m au fond des plaines abyssales et 50 m dans les plus profondes fosses océaniques) est utilisée pour une bonne représentation des gradients verticaux induits par les structures de fine échelle qui apparaissent à cette résolution. Nous avons réalisé une simulation longue de 5 ans (2004 à 2008), durée d'intégration nécessaire pour que les interactions d'échelles entre les processus résolus permettent la construction de la

circulation générale à l'échelle du bassin. Cette simulation a été initialisée et contrôlée aux frontières du domaine par les réanalyses océaniques globales GLORYS réalisée par le centre d'océanographie opérationnelle MERCATOR-Océan (<http://www.mercator-ocean.fr/fre/science/GLORYS>).

Sur le plan numérique, la simulation NATL60 utilise une grille de calcul de 5422'3454'300 points (5.6 milliards de points de grille) et représente un saut d'un facteur 30 par rapport aux plus grosses simulations actuellement réalisées en océanographie. Pour l'intégration sur OCCIGEN, nous avons décomposé cette grille en 13000 sous-domaines associés à autant de tâches MPI (Fig. 2).



a) Relief topographique du bassin Atlantique Nord en décomposition de domaine.



b) Zoom de la grille dans la région du Cap Finistère

Figure 2. : a) Découpage de la grille de calcul en 13000 sous domaines. Chaque "boite" représente un sous domaine dont la taille est de $41'29'300$ points de grille. La résolution de la grille de calcul varie de 1600 m au sud du domaine à 900 m au nord. 300 niveaux de discrétisation sont utilisés sur la verticale. Les domaines intégralement sur terre ne sont pas utilisés. b) Détails de la grille horizontale sur la région bretonne, avec une résolution locale de 1.2 km.

Pour la sauvegarde des données de simulations pendant l'intégration du modèle nous avons utilisé le serveur d'I/O XIOS (<http://forge.ipsl.jussieu.fr/ioserver/>) intégré à NEMO ce qui permet un recouvrement des opérations d'écriture des résultats (en parallèle) par le calcul proprement dit. Nous avons utilisé 296 instances du serveur XIOS, ce qui porte le nombre de cœurs de calcul utilisés pour cette simulation à 13296, soit 554 nœuds d'OCCIGEN. Parvenir à cette configuration dont l'efficacité de parallélisation est de 90 % a demandé un grand nombre de tests de scalabilité (Fig. 3 et Fig. 4). La simulation a été en permanence en machine pendant plus de 2 mois, le nombre d'heures CPU nécessaire à la réalisation ce défi dépassant les 17 millions d'heures. La base de données des résultats obtenus correspond à environ 87 Tera-Octets, auxquels il faut ajouter 100 Tera-Octets de fichiers de reprise (dont seulement 1/10 seront archivés sur le moyen terme).

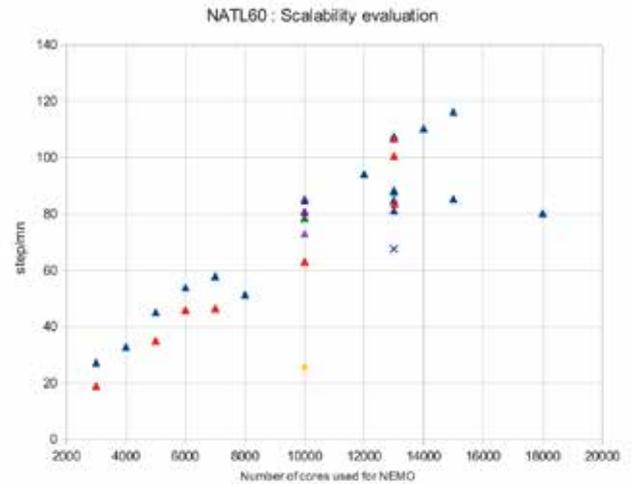


Figure 3. : Résultats des études de Scalabilité. Ces études ont été réalisées pour optimiser la décomposition de domaines et la gestion des I/O avec XIOS. Pour un nombre de cœurs donnés pour NEMO, les différents points correspondent à des scénarios différents pour les serveurs XIOS (placement et nombre). On remarque que pour 13000 cœurs (configuration retenue pour le grand défi) la sensibilité aux choix XIOS est importante (variation ente 65 et 105 pas de temps par minute).

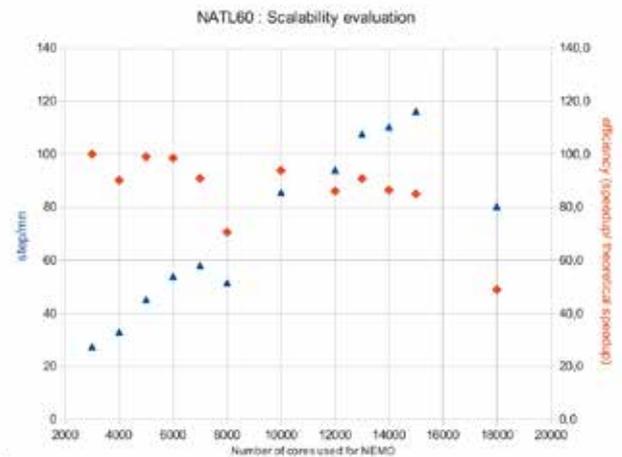


Figure 4. : Efficacité de la parallélisation. Les triangles bleus montrent la performance (steps/mn) en fonction du nombre de cœurs utilisés pour NEMO dans le cas où l'on a le meilleur comportement de XIOS. Les diamants rouges montrent l'efficacité (%) correspondante. Pour le choix retenu de 13 000 cœurs pour NEMO et 296 cœurs pour XIOS, l'efficacité est de 90%.

À ces chiffres, donnant une indication sur la taille exceptionnelle de ce Grand Défi, il convient d'ajouter un important temps humain, réparti entre l'ingénieur ayant mis en place et produit cette simulation, les ingénieurs du CINES et de BULL fortement mis à contribution pour trouver en urgence des solutions aux différents problèmes techniques rencontrés et les chercheurs de l'équipe Grenobloise suivant au jour le jour l'avancée des calculs.

La réalisation d'un grand défi peut être comparée à une course au large. Comme le navigateur qui pilote son

prototype à grande vitesse à travers l'Océan Atlantique en ne dormant que d'un œil car il doit continuellement veiller à la bonne marche de son navire au travers des aléas liés aux humeurs du temps, l'ingénieur du grand défi est en veille permanente, pilotant sa simulation au travers des aléas liés aux humeurs des machines et relançant ses jobs de jour comme de nuit pour optimiser les ressources qui lui sont imparties. Mais si la traversée de l'Atlantique Nord se fait maintenant en une semaine, la simulation en aura duré huit. ■

4 Premiers résultats : À la découverte d'un nouveau monde

De nombreuses simulations des fines échelles de la circulation océanique ont déjà été réalisées avec des configurations idéalisées, révélant certaines caractéristiques de la turbulence océanique fortement influencée par la rotation terrestre (structures cohérentes de mésoéchelle, filaments de vorticité, etc..).

La simulation NATL60 est la première réalisée avec une telle résolution à l'échelle d'un bassin océanique dans un contexte réaliste prenant en compte la complexité des côtes et des reliefs sous-marins et la grande variabilité des conditions atmosphériques de surface et fait apparaître un « nouvel océan », très différent de la vision laminaire véhiculée par les modèles de climat.

Un premier résultat (Fig. 5) est la mise en évidence d'une extraordinaire hétérogénéité des échelles spatiales des structures de circulation, d'une très forte saisonnalité et d'une omniprésence de structures de mésoéchelle et de sous-mésoéchelle dans le bassin. On remarque que les plus petites structures (sous méso-échelle) sont très présentes en fin d'hiver et sont dissipées pendant l'été. Ceci suggère que ces structures de circulation de sous méso-échelles sont engendrées par des processus saisonniers et locaux, tels que la convection hivernale qui approfondit la couche de mélange de surface favorisant des instabilités génératrice de petites structures ou l'intensification des grands courants de bord sous l'action des vents.

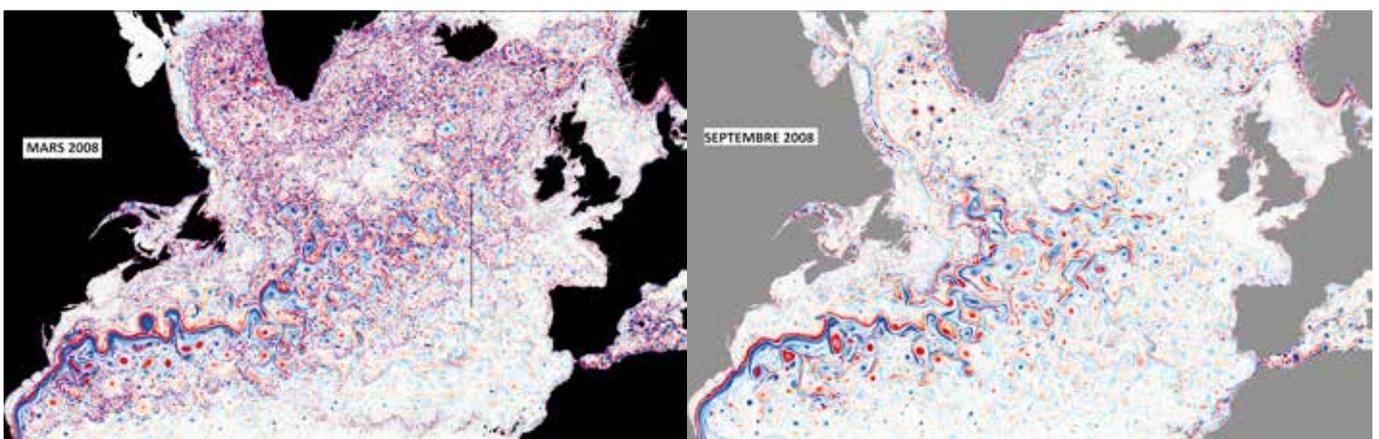


Figure 5. : Vue instantanée de la vorticité relative (rotationnel des vitesses horizontale normalisé par la vorticité planétaire) de la couche de surface de la simulation NATL60 en fin d'hiver (en mars 2008, figure du haut) et en fin d'été, septembre 2008, figure du bas). Cette quantité peut être approximée par le Laplacien de la dénivellation de la surface libre de l'océan, variable qui sera mesurée par SWOT avec une résolution kilométrique, comparable à la résolution du présent modèle. Le trait noir indique la localisation de la section verticale de vitesse instantanée présentée dans la figure 7.

Un second résultat (Fig. 6) est la grande hétérogénéité du champ de vitesse dans la profondeur de l'océan, la présence de forts cisaillements verticaux, de courants intensifiés au fond et l'omniprésence d'ondes internes, ceci révélant une grande diversité de réponses à la contrainte bathymétrique.

Enfin, un résultat particulièrement important est la grande instationnarité des structures de circulations, tant en latitude/longitude qu'en profondeur, révélant le challenge que représente la mise en cohérence des observations spatiales de surface avec celles à l'échantillonnage spatio-temporel bien plus lâche faites en profondeur avec les moyens d'observation in-situ.

L'application à cette simulation du simulateur d'observation SWOT (simulateur prenant en compte toute une gamme d'erreurs d'observations développée par le Jet Propulsion Laboratory - JPL - de la NASA) a permis de produire des données de dénivellation de surface comparables à celles que la mission spatiale produira (Fig. 7), permettant aux équipes de recherche de travailler sur les méthodes d'inversion et d'assimilation de données. ■

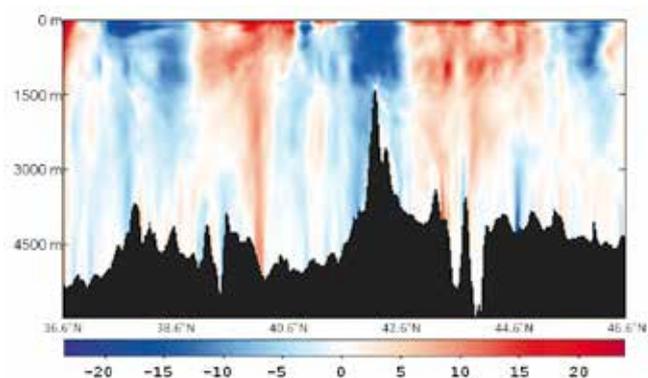


Figure 6. : Instantané du champ de vitesse zonale (rouge/bleu vers l'est/ouest, en cm/s) le long d'une section nord-sud à 19° ouest (section indiquée en Figure 5).

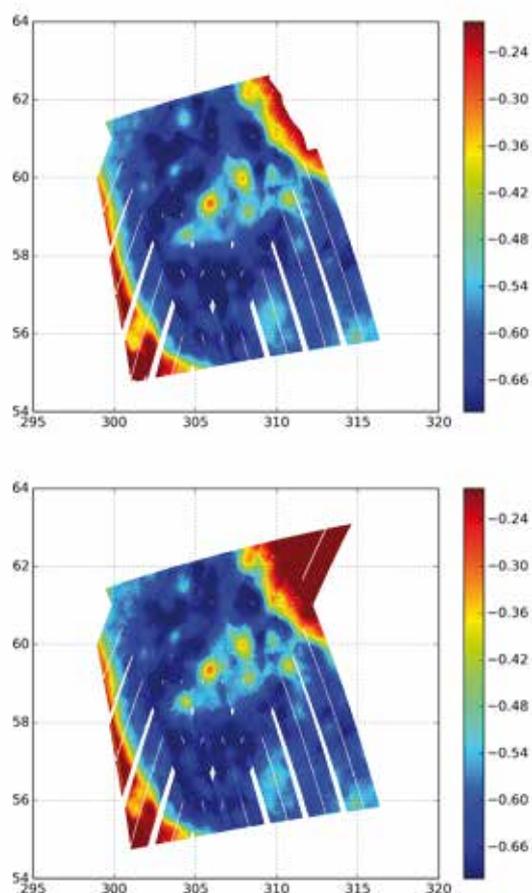


Figure 7. : Fauchée SWOT (sur une fenêtre de 5 jours) en Mer du Labrador construite avec le simulateur d'observation SWOT à partir des données de dénivellation de surface simulées par NATL60. Figure du haut : une construction sans simuler les erreurs instrumentales. Figure du bas : une construction utilisant un modèle de simulation des erreurs instrumentales.

5 Perspectives

La mission SWOT, parce qu'elle fournira des observations de la dénivellation et de la rugosité de la surface des océans à des échelles spatiales très fines, ouvre la voie à de véritables avancées de notre compréhension des mécanismes de transferts d'énergie entre échelles dans l'océan global et des échanges verticaux entre les eaux de surface et l'intérieur de l'océan. Ces avancées seront d'autant plus importantes que les estimations des courants de surface et de leurs gradients à fine échelle que nous produisons à partir des mesures de dénivellation de surface collectées par SWOT seront précises. Or, considérant la nature des erreurs de mesures et d'échantillonnage de SWOT, ces estimations dépendront fortement des méthodes d'inversion utilisées. Les données simulées par les modèles de circulation réalistes auront un rôle clé à jouer dans la conception

et la validation de ces méthodes d'inversion, ainsi que dans la conception des stratégies à mettre en œuvre pour l'assimilation des observations SWOT dans les modèles opérationnels de prévision de l'océan.

Fortes des premiers résultats obtenus lors des Grands Challenges GENCI 2014, notre équipe a été en mesure de soumettre une contribution originale au SWOT Science Team qui donne une grande part à l'utilisation intensive du modèle au 1/60° NATL60 développé à l'occasion du grand challenge. Cette contribution porte sur l'étude des informations que les futures observations SWOT donneront sur la dynamique à fine échelle des couches de surface, et sur les méthodes d'inversion par lesquelles ces informations pourront être acquises. ■

OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE CÔTIÈRE

Influence de la résolution verticale dans un océan côtier à très haute résolution.



Sébastien THEETTEN
(IFREMER, centre de Brest)

Ont contribué au projet :

Frédéric VANDERMEIRSCH, Guillaume CHARRIA (IFREMER)

Nicole AUDIFFREN (CINES)

SOMMAIRE

1	Contexte scientifique	32	3	Principaux résultats	34
2	Quel modèle numérique pour le golfe de Gascogne ?	32	4	Conclusions	36
	Mise en œuvre de l'application	33	5	Références	36
	Simulations réalisées	33			

1 Contexte scientifique

Dans un contexte de changement climatique (IPCC, 2007, 2013), l'environnement côtier est particulièrement sensible aux évolutions de la dynamique océanique. En particulier, des modifications du contenu thermique océanique, de la circulation et de la variabilité saisonnière peuvent avoir un impact significatif sur l'activité biologique (e.g. occurrence d'efflorescences d'algues toxiques, hypoxie), sur les ressources halieutiques (e.g. évolutions dans les populations de pélagiques) et sur l'évolution écogéomorphologique des côtes et des estuaires. Ce défi a été réalisé en relation avec le projet LEFE/GMMC ENIGME (Evolution Interannuelle de la dynamique dans le golfe de Gascogne et la Manche) et la proposition DARI n° c2013017096 (*Impact Régional des Evolutions Climatiques sur les 50 dernières années à l'échelle du golfe de Gascogne et de la Manche - IREC-GM*).

L'analyse des impacts aux échelles régionales de l'évolution climatique passe donc par une compréhension détaillée des processus physiques en milieu côtier. La complexité de ces processus, en particulier à haute fréquence (e.g. marée, influence du vent sur des colonnes d'eau peu profondes, circulation fortement influencée par la bathymétrie), nécessite des observations et des modèles spécifiques à ces échelles spatiales et temporelles. Dans ce cadre, différents modèles numériques de l'environnement côtier (tel que MARS3D1 utilisé dans ce défi) sont développés. Sur la base de ce modèle, dépendant des différentes conditions aux limites du système (modèles plus globaux pour les conditions océaniques, modèles météorologiques pour les conditions

atmosphériques, modèles et observations pour les apports par les rivières), nous visons à analyser et à quantifier l'impact des évolutions pluri-décennales aux échelles régionales et plus particulièrement dans le golfe de Gascogne et la Manche.

1 <http://wwz.ifremer.fr/mars3d>

Plus spécifiquement, le défi scientifique a pour objectif d'explorer l'influence des vitesses verticales sur la circulation moyenne de la région Gascogne (Klein et al, 2009), en particulier la zone à proximité du talus où se développe des interactions fortement non-linéaires entre la circulation du large et côtière ainsi qu'avec la topographie. En effet, de nombreuses simulations font état de raffinement des processus physiques sur l'horizontale sans augmenter la résolution verticale ; dans ce défi, le nombre de niveaux verticaux a été de 100 et a permis d'atteindre une résolution verticale dans les couches limites de surface et de fond de l'ordre de quelques dizaines de cm. Les simulations réalisées à 1km de résolution horizontale d'une période de 10 ans sont une première dans la région du golfe de Gascogne.

En choisissant d'augmenter la précision de la stratification dans les zones de productions tourbillonnaires, nous visons une mise en évidence d'une part de l'influence de la turbulence géostrophique sur la durée de vie de ces structures sous méso-échelle (Hua et al, 2013) et d'autre part nous cherchons à quantifier la génération de filaments, qui se détachent de ces tourbillons océaniques, fortement associés aux mouvements verticaux. ■

2 Quel modèle numérique pour le golfe de Gascogne ?

La configuration de circulation régionale côtière BACH1000 (correspondant à une maille de 1km) est construite à partir du code de modélisation numérique MARS3D (Duhaut et al, 2008). Ce code a été développé à l'IFREMER pour différents types d'applications dans le domaine côtier (des domaines estuariens jusqu'aux régions côtières couvrant le plateau et le talus continental) avec la possibilité de coupler avec des modèles de biogéochimie et de sédimentologie. Le code MARS3D est écrit en Fortran 90 et comporte un schéma ADI sur le mode barotrope et la coordonnée verticale de type sigmas généralisées. L'utilisation des techniques de parallélisation MPI et OPENMP pour optimiser les calculs permet de déployer des configurations de modèles sur différentes plateformes de calcul. Ainsi, des simulations numériques sont réalisées sur des stations de travail de laboratoire, mais aussi sur des calculateurs scientifiques

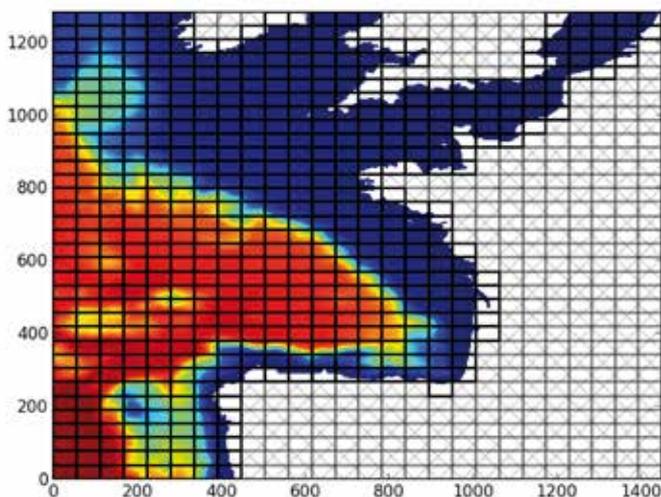
plus puissants. Le code MARS3D est utilisé depuis de nombreuses années sur les machines du méso-centre « Pôle de Calcul Intensif pour la Mer » basé sur le centre IFREMER de Brest (actuellement, le calculateur Caparmor, machine SGI Altix ICE 80200 comprenant 2352 coeurs de calculs répartis sur 294 noeuds). En 2012, dans le cadre du projet ENIGME (et de la demande de calcul IREC-GM), nous avons porté la configuration BACH4000 (maille de 4km sur l'horizontale et 40 niveaux verticaux) sur la machine JADE du CINES pour étudier la faisabilité et réaliser des tests de performances. Les premiers résultats très encourageants, nous ont conduits en 2013 et 2014 à mener de longues simulations (~50 ans) de la circulation océanique dans le golfe de Gascogne et la Manche avec la configuration BACH4000. Ces simulations dans cette région sur une telle période de temps n'avaient jusqu'à présent jamais été réalisées. Ces expériences ouvraient la

voie à l'étude sur l'environnement côtier dans un contexte de changement climatique avec l'utilisation du modèle numérique MARS3D. L'arrivée du nouveau ordinateur OCCIGEN au CINES a permis, en plus, de poursuivre les expériences numériques sur des échelles de temps pluri-décennales, d'augmenter la résolution spatiale en diminuant la taille des mailles sur l'horizontale ce

qui est fait classiquement. L'originalité des expériences proposées pour le Grand Défi est d'augmenter aussi la discrétisation verticale en augmentant très significativement le nombre de niveaux verticaux.

Mise en œuvre de l'application

La parallélisation du modèle est faite par une méthode de décomposition de domaine classique (*i.e.* le découpage est géographique). La grille de calcul est découpée en sous-maillage bidimensionnel sur l'horizontale (il n'y a pas de parallélisation sur la verticale). Les sous-domaines contigus ont une zone de recouvrement de 3 points pour assurer l'implémentation des schémas numériques (ordre 5 dans notre cas). Les calculs entre les différents sous-domaines sont réalisés par l'échange de message avec la bibliothèque MPI. La Figure II.1 représente le découpage retenu pour la réalisation du Grand Défi sur Occigen.



Dans le cas de la parallélisation uniquement par MPI, chaque exécution du code dans les sous-domaines est une tâche MPI affectée à un **coeur**. Dans le cas d'une parallélisation hybride (MPI et OPENMP) chaque exécution du code dans les sous-domaines est une tâche MPI affectée à un **processeur** et chaque tâche MPI lance plusieurs threads OPENMP sur les coeurs du processeur.

Pour mettre en œuvre la simulation du Grand Défi, nous avons procédé en plusieurs étapes. Avant le lancement du Grand Défi, nous avons préparé sur la machine JADE une « maquette » du modèle BACH1000 avec 40 niveaux à partir de la configuration BACH4000 qui avait déjà tourné en production. Après la mise au point de la configuration sur JADE, nous l'avons portée sur OCCIGEN. À l'aide de cette configuration, nous avons pu réaliser des tests de performances et étudié la scalabilité du code.

Figure II.1 : découpage du domaine de calcul de la configuration BACH1000. Le nombre total de sous-domaines est de 884. 326 sous-domaines sont exclus des calculs car ils ne contiennent aucun point de mer (sous-domaine hachurés). Il n'y a donc que 558 sous-domaines de pris en compte ce qui réduit de 37 % les coûts de calcul. (La bathymétrie est représentée par le gradient de couleurs).

Simulations réalisées

Les différentes expériences et mises au point décrites précédemment ont permis de réaliser deux principales simulations du golfe de Gascogne et de la Manche à 1 km de résolution spatiale et dans des conditions de forçages et de paramétrages identiques. Ces deux simulations en présence de **forçage de marée** couvrent une période de 10 ans (2001-2010). La différence réside dans le nombre de niveaux verticaux utilisés. La première présente

40 niveaux verticaux (nommée **BACH1000_40lev**) et la seconde, objectif du grand défi, présente 100 niveaux verticaux (nommée **BACH1000_100lev**).

Ces deux réalisations nous permettent ainsi d'aborder la question principale de ce défi résidant dans l'impact de la résolution verticale sur la dynamique régionale simulée. ■

3 Principaux résultats

La simulation sur 100 niveaux verticaux avec une résolution spatiale à 1km permet le développement de structures à fines échelles de l'ordre quelques kilomètres (Figure III.1). Ces structures restent peu observées à ce jour (les seules observations à ces échelles sont limitées à des campagnes ponctuelles de mesures ou restent fortement contaminées par la présence de nuages) et se développent de manière cohérente dans les simulations. Nous pouvons ainsi voir la présence de tourbillons dans la partie profonde du golfe de Gascogne, des refroidissements au large dans la partie Nord du domaine liés au mélange associé aux ondes interne sur le talus continental, un front thermique important en

Mer d'Iroise (front d'Ouessant) et le développement d'upwellings (remontées d'eaux froides) à proximité du cap Finisterre en Espagne. Au-delà de ces structures relativement connues, nous pouvons noter la présence de fines échelles sur le plateau continental qui restent aujourd'hui peu décrites.

La Figure III.2 vient compléter cet aperçu avec une quantité, la vorticité relative ($dv/dx - du/dy$) où u et v sont respectivement les courants zonaux et méridiens) qui représente le « taux de rotation » du fluide et donc par extension les zones les plus tourbillonnaires. Sur cette figure, nous pouvons noter trois caractéristiques

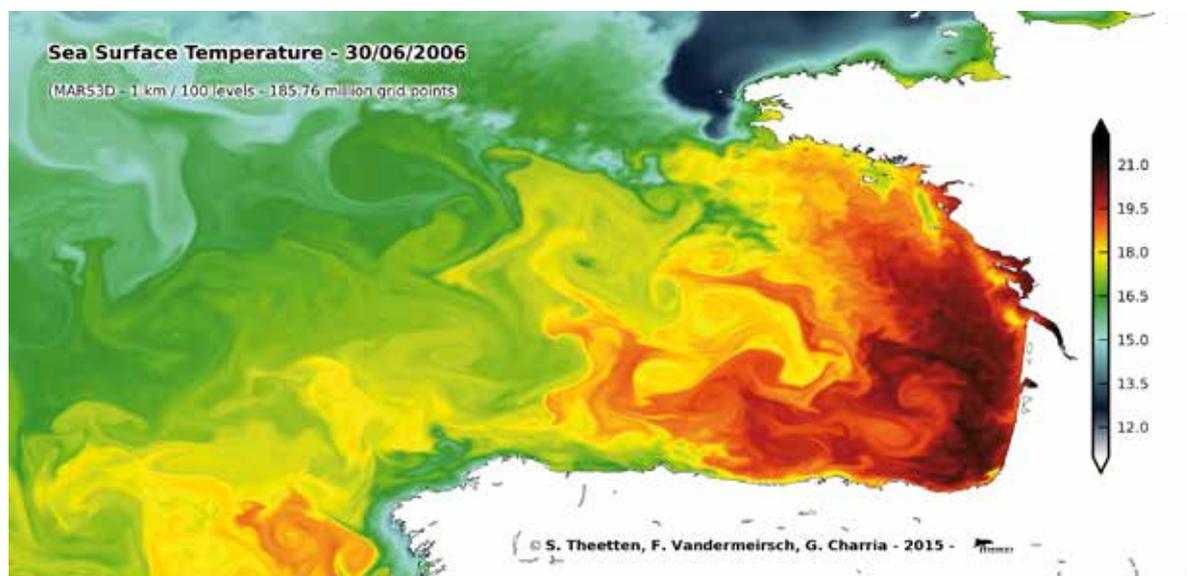
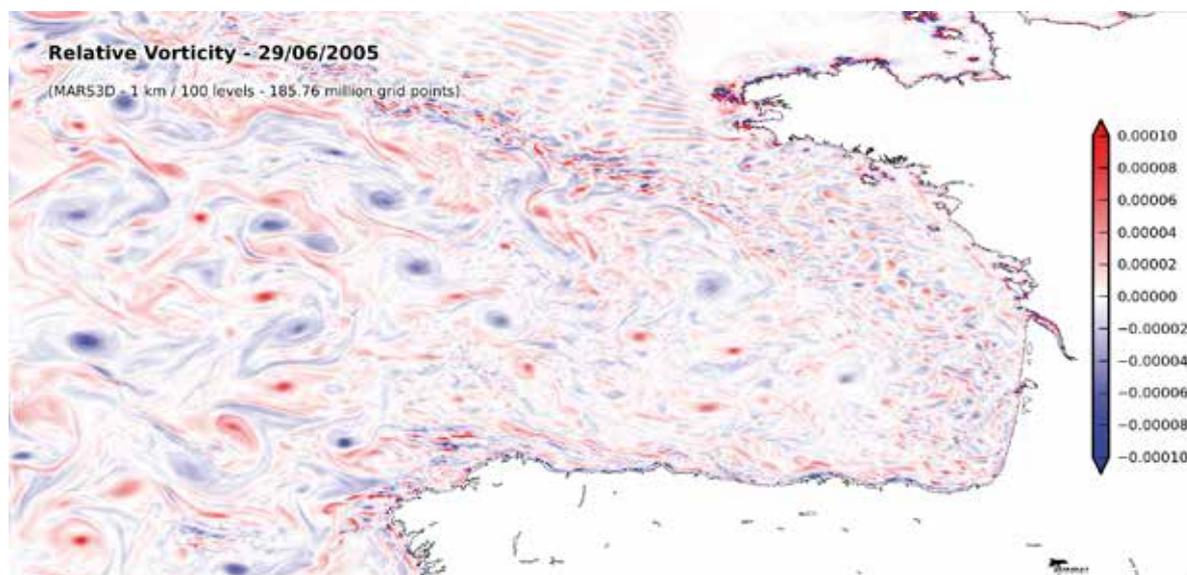


Figure III.1: température de surface de la simulation BACH1000_100lev pour le 29 Juin 2005.



intéressantes : sur le plateau continental, nous observons un ensemble de petites structure énergétiques ; et, au large, les structures tourbillonnaires ont une échelle spatiale plus large à cette date.

Au delà de l'aperçu à 2 dimensions du golfe de Gascogne, la figure III.3 montre un exemple de structure verticale avec une stratification thermique (différence importante entre eaux chaudes de surface et eaux froides de fond) saisonnière bien définie. Les oscillations à l'interface (thermocline) entre ces deux couches sont d'autant mieux résolues que la résolution verticale est fine.

La (sous)mésoéchelle et sa variabilité aux échelles interannuelles ?

Ces simulation à haute résolution ont permis de mettre en évidence une saisonnalité marquée dans la dynamique à (sous)mésoéchelle (échelles spatiales inférieures à 50 km, Figure III.4). Cette saisonnalité a été mise en évidence dans des régions énergétiques (en présence de courants intenses associés à un ensemble de tourbillons cohérents) telles que le Pacifique Nord (Sasaki *et al.*, 2014). Cependant, nous observons que dans une région énergétiquement plus faible, cette saisonnalité reste aussi très marquée y compris sur les régions de plateau (Figure III.5).

Les simulations du grand défi montrent pour la première fois cette activité (sous)mésoéchelle et son évolution aux échelles interannuelles dans le golfe de Gascogne en surface comme en profondeur.

L'enjeu actuel réside maintenant dans l'analyse des mécanismes à l'origine de ces évolutions. ■

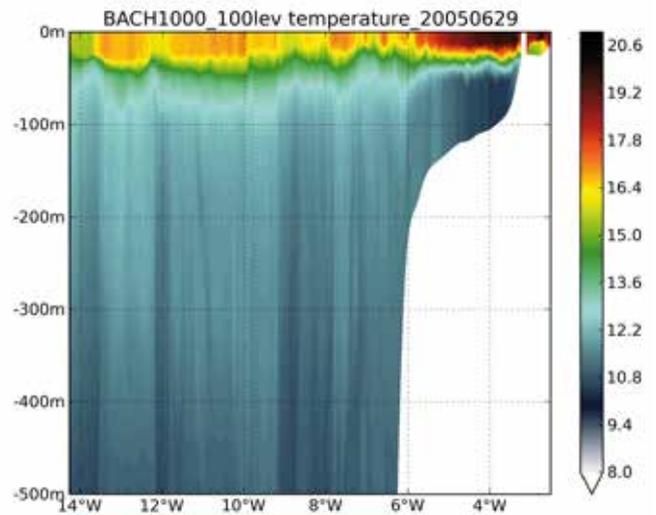


Figure III.3 : section verticale de température simulée à 47.3°N pour le 29 Juin 2005.

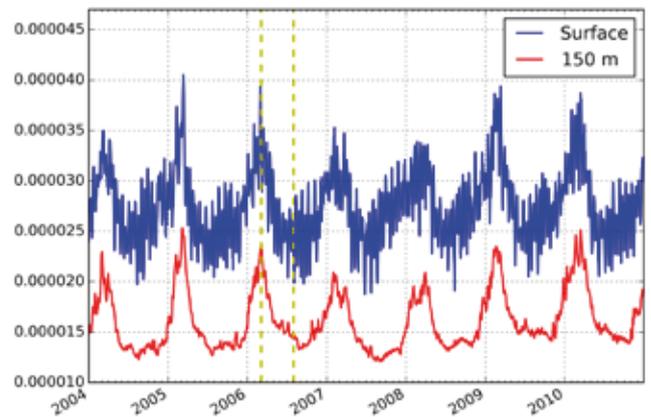


Figure III.4 : évolution temporelle de la vorticité relative (s^{-1}) en surface (bleu) et à 150m de profondeur (rouge). Les lignes pointillées représentent la date du 05/03/2006 et du 31/07/2006.

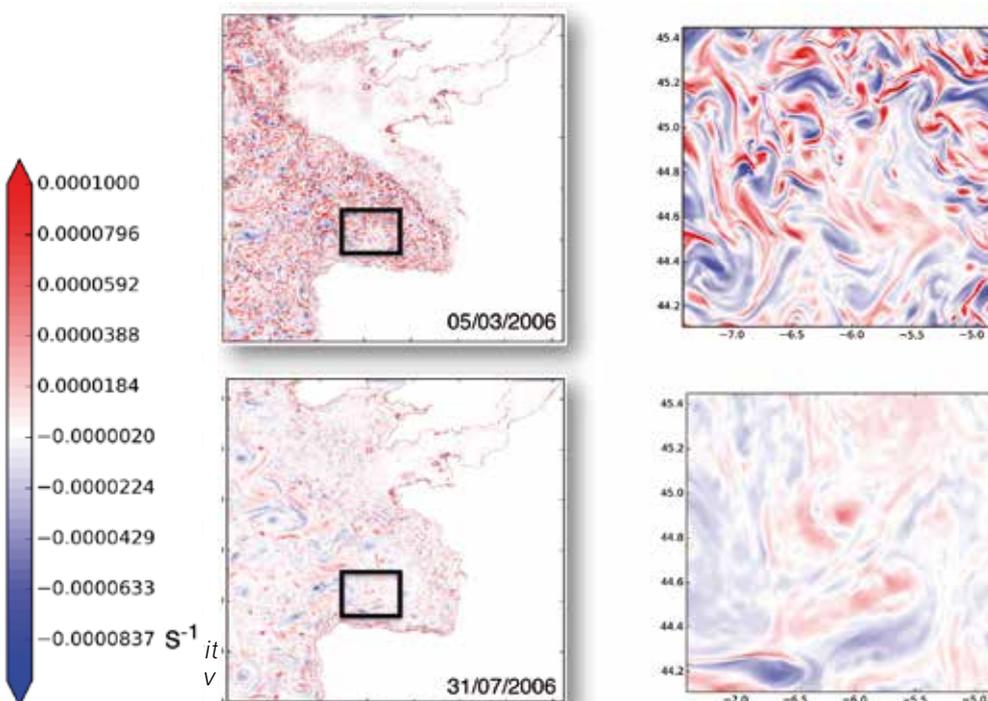


Figure III.5 : vorticité relative (s^{-1}) de surface le 5 Mars 2006 (haut) et le 31 juillet 2006 (bas) avec un zoom sur la zone encadrée à droite.

4 Conclusions

Le grand défi sur OCCIGEN a constitué une opportunité sans précédent pour notre équipe de réaliser des simulations réalistes de la dynamique du golfe de Gascogne et de la Manche à très haute résolution spatiale (1km de résolution horizontale et 100 niveaux verticaux) et temporelle (sortie journalières pour une durée de simulation de 10 ans).

Les expériences réalisées ont permis des avancées significatives à différents niveaux :

- au niveau technique avec le portage du code MARS3D sur OCCIGEN, son analyse de performances et l'ensemble des échanges qui ont permis de tester le nouvel environnement de calcul,

- au niveau scientifique avec deux simulations constituant une base de données numériques pour l'analyse et la compréhension de la dynamique fines échelles dans le golfe de Gascogne et la Manche et son influence sur la dynamique interannuelle. Les premières analyses montrent des processus cohérents et une variabilité saisonnière à (sous)mésoéchelle qui n'était pas forcément attendue dans une région de bord Est des océans. L'origine de ces évolutions reste à expliquer.

Ces nouvelles simulations ouvrent ainsi la vers de nouvelles expériences numériques visant à décrire et mieux comprendre la circulation côtière aux échelles interannuelles. ■

5 Références

- **Duhaut T., M. Honnorat, L. Debreu (2008).** Développements numériques pour le modèle MARS, PREVIMER report - Ref : 06/2 210 290.
- **Hua Bach-Lien, Menesguen Claire, Le Gentil Sylvie, Schopp Richard, Marsset Bruno, Aiki Hidenori (2013).** Layering and turbulence surrounding an anticyclonic oceanic vortex : in situ observations and quasi-geostrophic numerical simulations. *Journal Of Fluid Mechanics*, 731, 418- 442. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2013.369>.
- **Klein Patrice, Isern-Fontanet Jordi, Lapeyre Guillaume, Roulet G., Danioux Eric, Chapron Bertrand, Le Gentil Sylvie, Sasaki H. (2009).** Diagnosis of vertical velocities in the upper ocean from high resolution sea surface height. *Geophysical Research Letters*, 36, -. Publisher's official version : <http://dx.doi.org/10.1029/2009GL038359>
- **Sasaki, H., Klein, P., Qiu, B., & Sasai, Y. (2014).** Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere. *Nature communications*, 5.

SATURNE

Dynamique de l'atmosphère des planètes gazeuses.



Aymeric SPIGA
(Laboratoire de Météorologie Dynamique,
Université Pierre et Marie Curie)

Ont contribué au projet :

Yann MEURDESOIF (LSCE, CEA)

Mikel INDURAIN, Thomas DUBOS,
Ehouarn MILLOUR, Sandrine GUERLET (LMD)

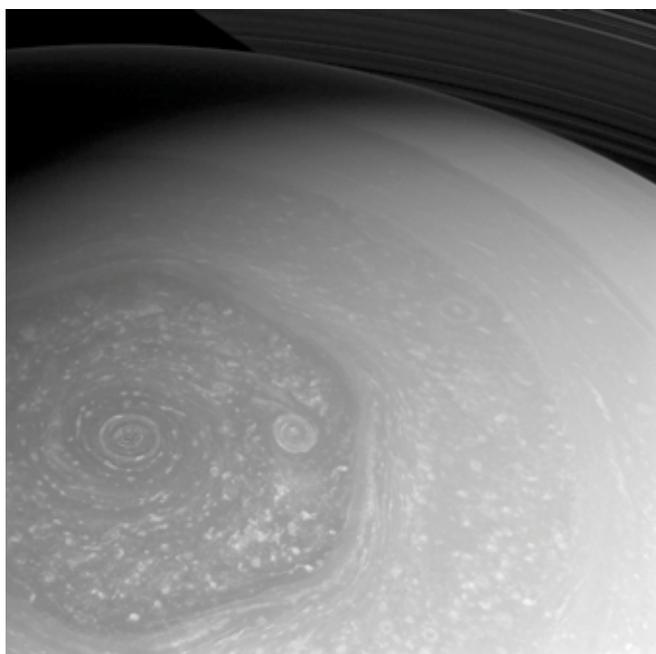
Nicole AUDIFFREN, Johanne CHARPENTIER (CINES)

SOMMAIRE

1	But scientifique et justification HPC	38	3	Résultats scientifiques de ce grand défi	42
2	Code et moyens de calcul déployés pour notre grand défi	39	4	Conclusion	45

1 But scientifique et justification HPC

L'exploration spatiale des planètes géantes Jupiter et Saturne a révélé la puissance des courants et tourbillons atmosphériques qui les traversent. Suite à la récente moisson de données sur leur atmosphère, et en prévision de futures missions, les géantes gazeuses s'imposent désormais comme des environnements extrêmes dignes d'intérêt en dynamique de l'atmosphère. Les progrès les plus notables ont été obtenus depuis une décennie (soit un tiers d'année Saturne, longue de 30 ans !) par les mesures de l'orbiteur Cassini qui ont confirmé toute la richesse dynamique de l'atmosphère de Saturne (jets et tourbillons), les évolutions saisonnières, ainsi que de nombreuses énigmes dynamiques qui restent inexplicables par les modèles dynamiques actuels : oscillation équatoriale, orages convectifs géants, vortex polaire hexagonal, transport considérable d'espèces chimiques d'un hémisphère à l'autre,.... Ce contexte appelle une réflexion poussée sur les phénomènes météorologiques dans les géantes gazeuses, notamment comment ondes et instabilités naissent et interagissent avec la circulation moyenne de l'atmosphère, et comment ces phénomènes dans des environnements à rotation rapide se comparent aux phénomènes terrestres du même type – ou s'il s'agit de phénomènes originaux, ce qu'ils nous apprennent sur la théorie de la dynamique des fluides géophysiques. À ce contexte observationnel récent très stimulant, en passe d'être renouvelé avec des prochaines missions de la NASA (USA) et de l'European Space Agency, s'ajoute une dimension calcul haute performance : les progrès récents des ressources informatiques rendent désormais possibles la modélisation météorologique à fine résolution spatiale de ces planètes gazeuses d'une taille considérable, où les instabilités planétaires se développent à plus petite échelle spatiale relativement au rayon de la planète que sur Terre (4 à 5 ordres de grandeur).



Stimulés par le contexte scientifique précité, ainsi que des interactions avec des astrophysiciens de l'Observatoire de Paris, nous avons achevé et publié début 2014 [Guerlet et al. dans la revue *Icarus*] un ensemble de paramétrisations physiques capable de représenter avec un bon accord avec les données disponibles l'environnement de la planète géante Saturne (en prévoyant après quelques mineures adaptations de le faire fonctionner également pour Jupiter). Ces paramétrisations physiques prennent en compte les spécificités des planètes géantes : transfert radiatif dominé par les hydrocarbures, flux de chaleur interne, absence de surface, et, pour Saturne, ombre portée des anneaux. Notre modèle permet de reproduire la structure thermique de Saturne en très bon accord avec les observations disponibles.

La moisson d'observations spatiales de l'orbiteur Cassini a fait entrer la modélisation atmosphérique des géantes gazeuses dans une nouvelle ère, à la croisée de l'astrophysique et de la géophysique. Alors que tous les modèles publiés comportaient une grande part d'idéalisation dans la représentation de l'écoulement du fluide atmosphérique et des forçages physiques (par exemple, interactions entre l'atmosphère et le rayonnement solaire incident), des modèles de climat global plus complets, plus proches de ceux développés sur Terre, Mars, Vénus ont commencé à voir le jour au début de cette décennie. Ces modèles de climat global pour Jupiter et Saturne ont pu aider, par exemple, à examiner l'activité des ondes et instabilités dans la troposphère (couche de mélange et lieu de la convection nuageuse) ou la stratosphère (couche surmontant la troposphère et lieu de processus radiatifs dominants). Ces modèles préliminaires manquent néanmoins soit 1. des paramétrisations physiques adaptées au cas de Saturne et Jupiter ; 2. d'une résolution horizontale suffisamment fine pour résoudre les ondes et instabilités importantes ; 3. d'une étendue verticale permettant de coupler troposphère et stratosphère, donc résoudre l'intégralité du cycle de vie des ondes atmosphériques responsables des signatures observées par l'orbiteur Cassini.

Fig. 1 : Images satellite du jet polaire hexagonal dans l'atmosphère de Saturne, qui permettent par ailleurs d'apprécier la finesse des structures ondulatoires.
Source : NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

Nous disposons au Laboratoire de Météorologie Dynamique de toutes les ressources pour construire un véritable modèle innovant qui rassemblera les trois caractéristiques précitées. Les paramétrisations physiques pour le cas de Saturne ont été testées en les interfaçant avec le cœur dynamique standard LMDz. Néanmoins, ces tests indiquent que les résolutions horizontale et verticale nécessaires pour reproduire les phénomènes clé et comprendre les énigmes dynamiques révélés par les observations de Cassini requièrent la performance et la scalabilité visées par le nouveau cœur dynamique DYNAMICO (développement conjoint LMD et CEA), qui ne peuvent être atteinte par notre cœur dynamique standard LMDz, et l'utilisation de ce nouveau modèle sur des architectures HPC type Occigen au CINES.

Le cœur dynamique DYNAMICO est l'archétype des solveurs hydrodynamiques de nouvelle génération qui présentent à la fois de bonnes propriétés de conservation des quantités physiques clé, une scalabilité maintenue sur de grandes populations de processeurs, et

une flexibilité pour les études dynamiques à toutes les échelles spatiales d'intérêt. Pour cela, DYNAMICO résout des courants atmosphériques globaux sur une grille icosahédrique innovante. Pour étudier Saturne, nous avons donc entrepris un couplage entre les paramétrisations physiques pour l'environnement de Saturne et Jupiter avec le nouveau cœur dynamique icosahédrique DYNAMICO. Cette étape constitue un préliminaire à l'interfaçage de DYNAMICO avec les paramétrisations physiques du modèle terrestre et la conduite de simulations couplées entre le modèle atmosphérique ainsi constitué et le modèle d'océan de l'IPSL. Toutes ces activités, dont l'étape « DYNAMICO pour Saturne » qui concerne le présent projet, sont rassemblées au sein de la proposition Highly Efficient Atmospheric modeling (HEAT) acceptée par l'Agence Nationale de la Recherche (AO « big data, décision, simulation, HPC ») en fin 2014. À terme, DYNAMICO est appelé à remplacer LMDz, en devenant le cœur dynamique de référence pour les simulations climatiques du LMD, notamment en vue de l'étude du changement climatique et de ses impacts. ■

2 Code et moyens de calcul déployés pour notre grand défi

Le code de notre « Global Climate Model » pour Saturne se décompose en 2 parties distinctes : d'une part le cœur dynamique chargé de résoudre les équations de Navier-Stokes sur la sphère en milieu tournant et d'autre part les paramétrisations physiques spécifiques à Saturne qui résolvent les phénomènes physiques au sein d'une même colonne d'atmosphère. La partie « physique » est donc parfaitement scalable puisqu'il s'agit de distribuer les différentes colonnes d'atmosphère aux tâches MPI/openMP disponibles. Aucun échange MPI n'est nécessaire entre les différentes tâches.

En revanche l'ensemble des communications entre processus MPI est concentré dans la partie dynamique (modèle « DYNAMICO »). Ce modèle hydrodynamique a été développé sur un nouveau maillage uniforme sur la sphère qui supprime les 2 points singuliers présent aux pôles du cœur dynamique de la génération précédente. D'une part il évite le filtrage des ondes près des pôles nécessaire aux critères de stabilité CFL (Courant, Friedrichs, Lewy) et d'autre part, il améliore considérablement l'efficacité du parallélisme du modèle, permettant d'obtenir des gains en temps de restitutions d'un facteur 20 à 40, en fonction de la résolution, par rapport à l'ancien cœur dynamique LMDz.

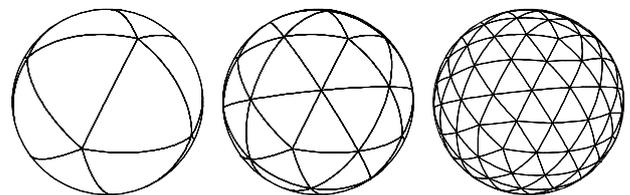
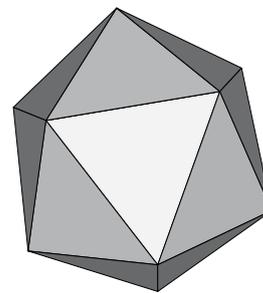


Fig.2 : Génération du nouveau maillage obtenu par raffinement de l'icosaèdre (niveau 2 et 3).

DYNAMICO a été développé sur un maillage basé sur le raffinement de l'icosaèdre (solide régulier à 20 faces, composé triangles équilatéraux). Il en résulte un maillage hexagonal beaucoup plus uniforme que les grilles régulières longitude-latitude, et qui ne présente pas de points singuliers aux pôles. Les pressions et températures sont évaluées au centre des mailles, les vents sur les bords et la vorticité aux sommets. Les schémas numériques utilisés sont explicites.

Bien que le maillage résultant soit fondamentalement de type « non-structuré », nous avons opté dans DYNAMICO pour une structure de donnée semi-structurée. En accolant deux à deux les triangles principaux de l'icosaèdre, nous obtenons un maillage composé de 10 tuiles losange, connectées entre elles par leur côté. Les losanges, composés d'hexagones, ont l'avantage d'avoir une structure informatique proche d'un maillage régulier. Nos schéma numériques accèdent aux données de manière contigüe et avec une bonne ré-utilisabilité du cache. Nous préservons ainsi la vectorisation, qui est un paramètre important de performance pour les générations de processeurs scalaires actuelles et futures. Sur ce plan, de récents tests sur machine vectorielle NEC SX8 ont montré que DYNAMICO était vectorisé à 99.67 %, permettant d'atteindre 60 % de la puissance crête de cette machine.

Le domaine global est donc composé de 10 losanges principaux. La décomposition de domaine s'effectue simplement en subdivisant chaque losange principal en sous-losanges. Plusieurs losanges sont assignés à un processus MPI, qui assigne ensuite chacun de ses losanges à une tâche OpenMP. Le multithreadisme openMP opère ainsi au niveau d'un domaine complet, évitant ainsi les problèmes de « false sharing » entre les autres threads. De surcroit, un niveau supplémentaire de parallélisme OpenMP a été ajouté, en opérant cette fois-ci au niveau des boucles les plus externes des schémas numériques. Les itérations sur les niveaux verticaux sont ainsi distribuées à chaque thread à l'aide de directives. Ces 2 niveaux de parallélisme openMP permet d'exécuter DYNAMICO sur un grand nombre de threads par processus sans pour autant dégrader les performances. C'est donc un excellent candidat pour tester l'hyperthreadisme. À ce sujet, DYNAMICO a été testé avec succès sur Xéon Phi en utilisant 240 threads par processus MPI et en obtenant ainsi des gains très significatifs (~+50 %) par rapport à 60 threads, correspondant au nombre de cœurs physique par processeur.

Au niveau MPI, DYNAMICO utilise uniquement des communications asynchrones point à point non bloquantes, qui permettent le recouvrement des calculs et des communications. Pour un meilleur recouvrement, le démarrage des communications est explicitement forcé au cours du calcul par des appels réguliers à MPI_TEST. Elles ont lieu uniquement entre losanges adjacents pour transférer les données dans le halo de recouvrement, nécessaires pour le pas de temps suivant. Lorsque plusieurs losanges sont gérés par un même process MPI (dans le cas du parallélisme mixte par exemple), les transferts entre losanges internes se font directement par copie de mémoire à mémoire afin d'éviter de surcharger la stack MPI. L'ensemble de ces développements a permis d'obtenir un code extrêmement scalable et un « weak scaling » parfait.

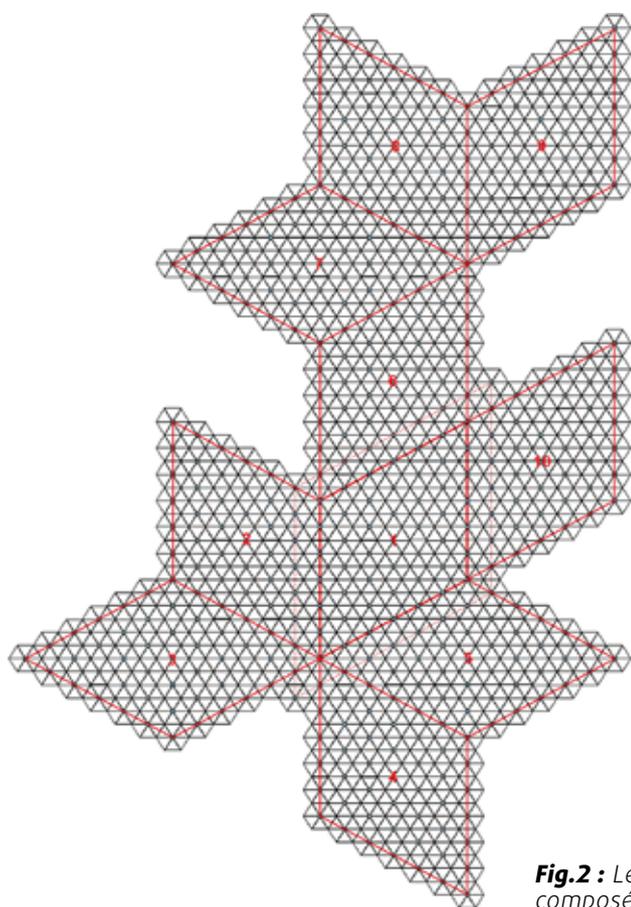


Fig.2 : Le maillage global, composé de 10 tuiles losanges.

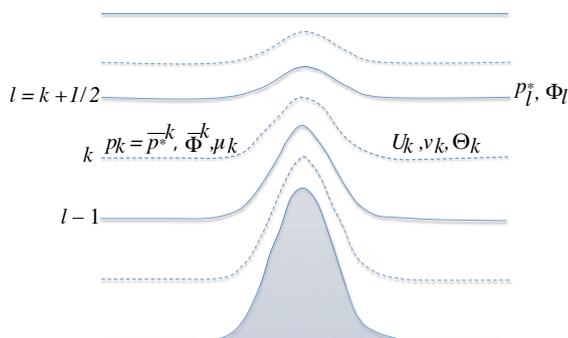
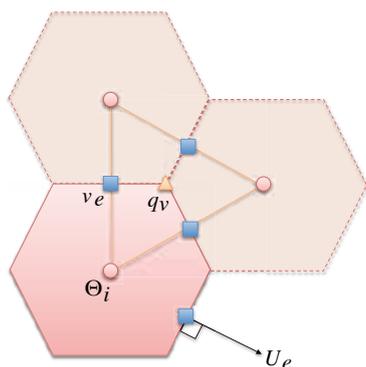


Fig3. : Génération du nouveau maillage obtenu par raffinement de l'icosaèdre (niveau 0, 1, 2) d'après Peter Schroder & Wim Sweldens, Spherical Wavelets: Efficiently Representing Functions on the Sphere.

Par ailleurs, notre modèle a bénéficié d'innovations en terme d'entrées/sorties (I/O). Pour effectuer ses sorties, notre configuration Saturne s'est appuyée sur XIOS (XML-IO-SERVER), développé au CEA/LSCE. Dans cette approche, des processus MPI (les serveurs) sont exclusivement dédiés aux tâches d'entrée-sortie. Les données sont envoyées de manière asynchrone des clients vers les serveurs, permettant ainsi de recouvrir les transferts et les écritures par du calcul. En utilisant les buffers adéquats, XIOS permet de lisser les pics I/O et d'envoyer un flux de donnée constant au système de fichier tout au long de la simulation, sans impacter les performances du modèle « client ». En outre, XIOS utilise les I/O parallèles qui permettent, d'une part d'agréger la bande passante I/O et d'autre parts d'obtenir des fichiers d'une seule pièce ne nécessitant pas de reconstruction en post-traitement. Le format de sortie est NETCDF4, s'appuyant sur HDF5. XIOS a été testé sur des configurations NEMO (code océanique) comptant jusqu'à 16000 cœurs de calculs et a été capable de soutenir en continu 3.6 Go/s (au format netcdf4) sur Curie tout au long de la simulation. Pour le projet Saturne, nous avons estimé la bande passante nécessaire aux IO à environ 200 Mo/s en continu pour les plus grosses simulations. Les I/O n'ont donc pas été un frein dans ce projet.

En dehors de la mise au point et de la phase d'équilibrage qui ont nécessité plusieurs années Saturne de simulation à basse résolution, le volume de calcul sur la machine Occigen au CINES pendant le grand défi s'est principalement concentré sur 3 résolutions horizontales (NB : 1 an Saturne = 30 ans terrestres) :

- 3 ans au 1/2° : 100 nœuds, 24 threads OpenMP / par processus MPI (2400 cœurs).
- 4 ans au 1/4° : 375 nœuds, 24 threads OpenMP / processus MPI (9000 cœurs).
- 1 an au 1/8° : 480 nœuds, 24 threads OpenMP / processus MPI (11520 cœurs).

Durant ce grand défi, nous avons consommé environ 11,5 millions d'heures de calcul et généré 86 To de données. Nous avons légèrement dépassé notre quota d'heures car les outils permettant d'estimer notre consommation exacte n'étaient pas encore disponibles ; en l'absence de ces outils nous utilisons un script développé par nos soins. L'utilisation de la totalité des heures allouées (et même un peu plus) traduit le succès technique et scientifique de ce grand défi.

Grand défi du CINES : Dynamico-Saturn Model : speed-up on Occigen

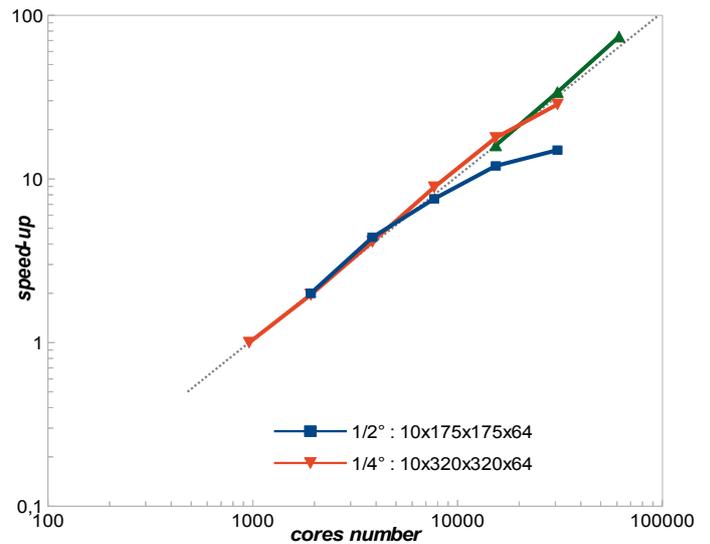


Illustration 1 : Études de scalabilité pour les 3 résolutions du grand défi : 1/2°, 1/4° et 1/8°. L'échelle est logarithmique pour les deux axes.

Comme nous étions en concurrence avec d'autres projets, nous nous sommes limités à utiliser au maximum le quart de la machine. Néanmoins, nous avons profité de la maintenance du 04/03/2015 pour faire une étude de scalabilité approfondie sur l'ensemble de la machine pour les 3 résolutions employées dans nos simulations grand défi.

Comme nous le constatons sur les courbes de scalabilité de l'illustration 1, nous avons obtenus d'excellents speed-up avec des régimes super-linéaires dans chaque cas. Les simulations au 1/8° ne montrent pas de points d'inflexion même en dépassant les 60 000 cœurs en mode hyperthreaded (30 000 cœurs physiques x 2), ce qui laisse augurer des gains potentiel de speed-up bien au-delà des 100 000 cœurs. ■

3 Résultats scientifiques de ce grand défi

Comme indiqué ci-dessus, nous avons réalisé les simulations de ce grand défi en utilisant un prototype de modèle SATURN-DYNAMICO où paramétrisations physiques de l'environnement de Saturne sont couplées avec le cœur dynamique DYNAMICO. Nous avons concentré nos efforts sur la conduite de simulations à résolution horizontale de plus en plus fine pour à la fois tester les performances en scalabilité de DYNAMICO et résoudre les tourbillons et structures de turbulence de grande échelle dans l'atmosphère de Saturne (Figure 1).

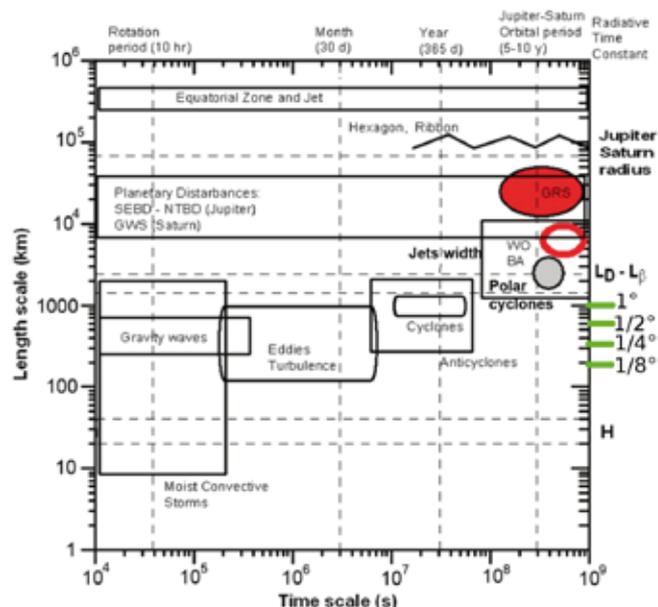


Figure 1 : Echelles typiques des phénomènes atmosphériques sur les planètes géantes [Sanchez-Lavega et al. 2015] et résolutions horizontales employées pendant le grand défi (traits verts sur l'axe vertical de droite).

Nous avons tout d'abord effectué des simulations test avec une résolution $1/2^\circ$ qui, comme l'indique la Figure 1, est une configuration *eddy-permitting*, ce qui signifie que, bien que le spectre des ondes atmosphériques et tourbillons ne soit pas complètement résolu, les tourbillons les plus larges commencent à être intégrés. Nous avons constaté ce point sur les simulations effectuées, puisque la survenue de ces ondes aux moyennes latitudes permet de donner naissance aux jets alternés typiques de la troposphère de Saturne (Figure 2) – bien que le nombre et la largeur des jets ne soit pas compatible avec les observations (un peu trop de jets et largeur trop faible). De plus, l'intensité des jets était de l'ordre de 50 m/s soit la moitié de l'intensité observée. Néanmoins, ces simulations qui n'étaient pas l'objet du grand défi permettent de montrer le bien-fondé du couplage entre dynamique et physique, et par ailleurs d'indiquer que nous étions sur la bonne voie vers plus de réalisme en augmentant la résolution. En outre, le but de cette simulation était de fournir un état initial pour la simulation suivante au $1/4^\circ$.

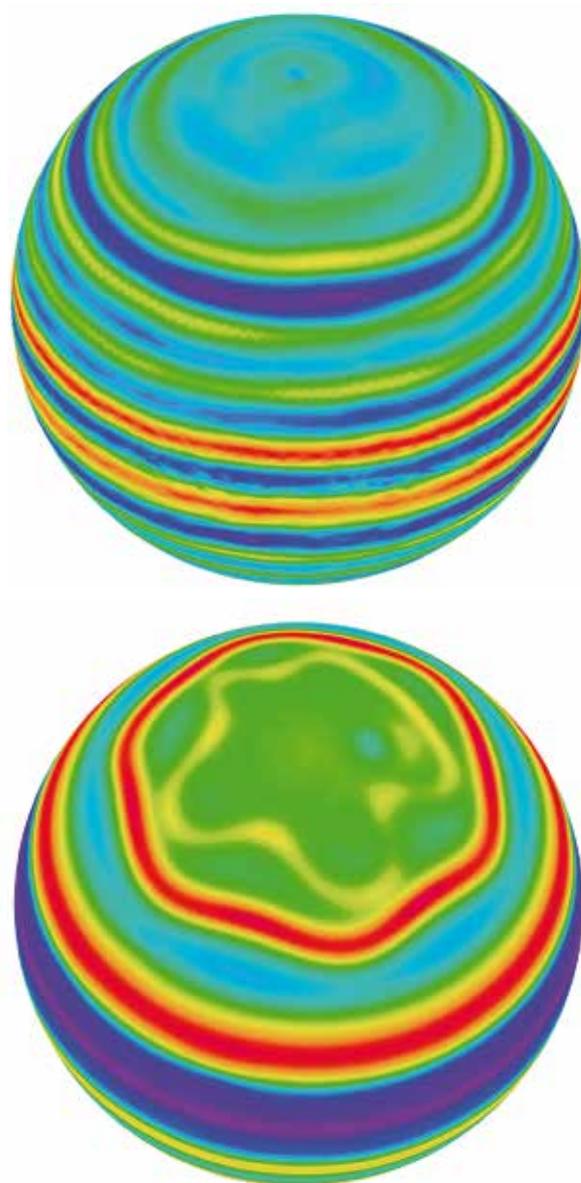


Figure 2 : Résultats d'une simulation $1/2^\circ$ après un an Saturne de simulation. Vent zonal dans la basse troposphère de Saturne (haut) et haute troposphère (bas). Valeurs comprises entre -35 m/s (violet) et 55 m/s (rouge) à gauche et -80 m/s et 65 m/s à droite.

Un élément notable de la simulation initiale au $1/2^\circ$ est la formation au bout d'un an de simulation d'une structure hexagonale du jet polaire qui montre une certaine ressemblance avec la structure observée en imagerie par les sondes Voyager et Cassini (Figure 2). Néanmoins, si la survenue d'un mode 6 d'oscillation du jet est remarquable, la latitude à laquelle cette instabilité s'installe dans le modèle est trop basse pour une comparaison favorable avec les observations. De plus, pour que le résultat soit robuste, il faut assurer que la structure perdure sur des simulations à plus haute résolution spatiale.

Nous sommes ensuite passés à une simulation au $1/4^\circ$. Une telle résolution employée dans un modèle de climat global avec une physique réaliste de Saturne (notamment transfert radiatif) est une première. La simulation au $1/4^\circ$ emploie un état initial tiré de l'état final de la simulation au $1/2^\circ$. Très rapidement, conformément à ce que les considérations théoriques pouvaient nous indiquer, des tourbillons de fine échelle sont apparus, en montrant une filamentation marquée (Figure 4). Par ailleurs, la simulation au $1/4^\circ$ montre l'émergence de vortex aux moyennes latitudes que ne montrait absolument pas la simulation au $1/2^\circ$, montrant par là que les simulations au $1/4^\circ$ permettent de passer du *eddy-permitting* au *eddy-resolving*, où une partie significative du spectre des tourbillons est résolue. Il convient également de noter dans ces simulations l'émergence d'une structure de jets alternés dont le nombre, la largeur et l'intensité sont conformes aux observations. Les simulations ne comportent néanmoins pas de jet équatorial en super-rotation, point sur lequel nous devons concentrer des améliorations futures – une telle absence était néanmoins attendue dans la mesure où le forçage convectif est absent des simulations, et a été montré par des études antérieures capable de faire émerger une super-rotation approchant celle observée (400 m/s).

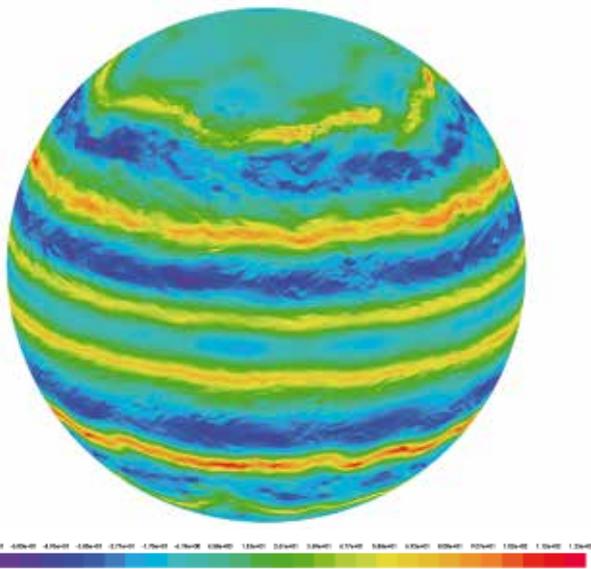


Figure 4 : Résultats d'une simulation $1/4^\circ$ après 500 jours Saturne de simulation. Vent zonal dans la troposphère, montrant à la fois les jets alternés et les instabilités associées. Valeurs comprises entre -81 m/s (violet) et 123 m/s (rouge).

Le début des simulations au $1/4^\circ$ montre une structure très perturbée, avec un spectre d'ondes très riche. L'un des effets de ces ondes et tourbillons est de sévèrement perturber le jet polaire, au point que toute structure hexagonale n'est désormais plus apparente, ce qui achève de montrer que l'établissement du jet hexagonal est bien plus complexe que ce que semble montrer de simples simulations au $1/2^\circ$. Par ailleurs,

nous avons commencé à explorer avec ces simulations la présence éventuelle d'une oscillation équatoriale de température, révélée par les observations de la sonde Cassini, et ayant certaines ressemblances avec l'Oscillation Quasi-biennale sur Terre. Cette oscillation est censée naître des interactions entre ondes équatoriales et écoulement moyen (en sachant que les ondes en question sont à la fois les ondes planétaires de Rossby et de Kelvin, et les ondes de gravité de plus petite échelle). L'exploration des résultats des simulations au $1/4^\circ$ doit être poussée plus en avant, néanmoins une analyse préliminaire montre qu'une oscillation équatoriale semble se dessiner dans les simulations au $1/4^\circ$, et se propager vers la basse troposphère au cours de l'année Saturne, comme le montre les observations du spectromètre CIRS à bord de Cassini. Ces résultats sont encourageants, néanmoins la structure verticale des vents zonaux et méridiens à l'équateur dans les simulations au $1/4^\circ$ montre une richesse dynamique qui n'encourage pas aux conclusions hâtives. De plus, si les signatures d'oscillation sont marquées sur le vent zonal, elles restent trop modérées sur la température pour être comparées aux observations.

Le grand défi a permis de prolonger des simulations au $1/4^\circ$ pendant deux années Saturne. Les résultats au bout de deux ans d'intégration se sont révélés assez surprenants, contrastant clairement avec la situation riche en perturbations de la Figure 4. Ces résultats montrent en effet une structure beaucoup plus « lisse » avec des jets ayant semble-t-il atteint un équilibre dynamique dans la troposphère. Au contraire, les vents et la température dans la stratosphère, notamment à l'équateur, traduisent toujours une activité ondulatoire marquée, voir paragraphe précédent sur l'oscillation équatoriale. Quoiqu'il en soit, comparée à la structure des vents sur Saturne, la structure des vents troposphériques apparaît trop lissée, quand bien même il faut reconnaître que cette structure n'était pas aussi perturbée que ce que montre la figure 4. De plus, les jets zonaux simulés se montrent trop puissants par rapport aux observations (cela peut aller jusqu'à un facteur 1.5 ou 2 de surestimation). Par ailleurs, la forme hexagonale du jet polaire nord n'apparaît pas clairement. Nous avons pensé que la dissipation horizontale d'énergie – utilisée dans les modèles de climat global pour éviter une accumulation d'énergie aux petites échelles en l'absence de circulations turbulentes trop petites pour être résolues – était trop forte dans les simulations réalisées au $1/4^\circ$. Nous avons donc entrepris, profitant là des moyens offerts par le grand défi, deux autres simulations au $1/4^\circ$ pendant deux ans, en employant une résolution 2x et 4x plus faible que ce qui avait été réalisé auparavant. Les résultats après quelques milliers de jours Saturne (Figure 6) montrent une structure d'onde et un développement toujours riches d'ondes et tourbillons (la simulation avec la dissipation la plus faible montrant même une activité accrue des tourbillons, vortex, et même la présence d'un jet très localisé au pôle nord qui semble cohérent

avec les observations). Néanmoins, même en limitant l'effet de la dissipation, il semble qu'au bout d'un an Saturne, la structure des jets parvient toujours à un lissage caractéristique tel celui mentionné ci-dessus. Une investigation plus poussée de cette sensibilité à la dissipation est nécessaire.

Nous avons enfin mis à profit le grand défi pour tenter des simulations au $1/8^\circ$ pendant un an, ce qui représente un ordre de grandeur en résolution horizontale d'amélioration par rapport aux meilleures simulations dans la littérature ($1/2^\circ$). Les premiers résultats (Figure 7) montrent une richesse supérieure aux simulations au $1/4^\circ$ en terme d'ondes atmosphériques et autres perturbations (y compris les vortex, dont la Figure 7 montre des exemples dans la région polaire nord). Les premières

analyses montrent que ces simulations sont capables de résoudre les ondes de gravité émises au sein des jets, ce que n'étaient pas capables les simulations au $1/4^\circ$. Les simulations au $1/8^\circ$ confirment par ailleurs la bonne tenue du modèle dans la reproduction de jets troposphériques conformes aux observations en terme de largeur, nombre et intensité. Néanmoins, au fur et à mesure de l'avancement de la simulation, nous avons noté la même tendance que les simulations au $1/4^\circ$ d'un lissage des perturbations, qui requiert une analyse plus poussée. ■

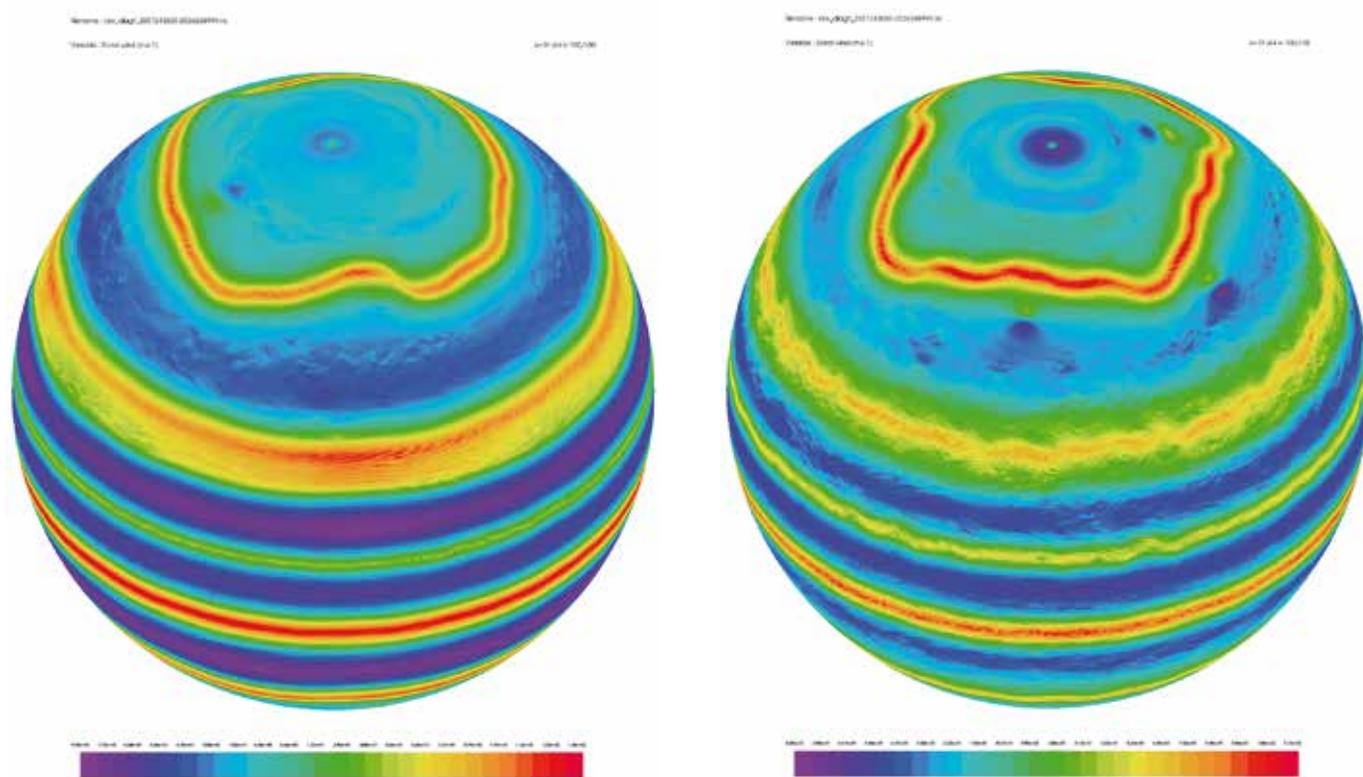


Figure 6 : Résultats d'une simulation $1/4^\circ$ après 2000 jours Saturne de simulation avec deux valeurs différentes de la dissipation sous-maille (gauche, 2x plus faible ; droite, 4x plus faible).

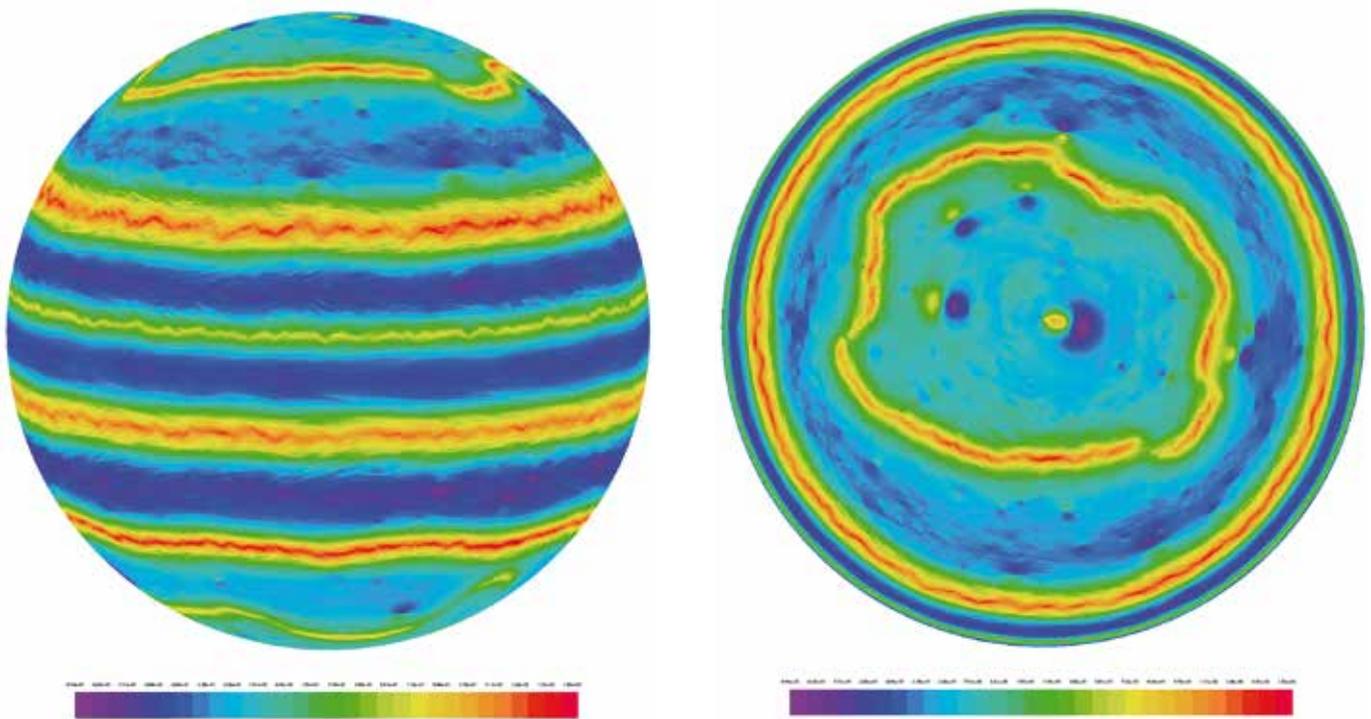


Figure 7 : Résultats d'une simulation $1/8^\circ$ après 500 jours Saturne de simulation. Vent zonal dans la troposphère. Deux vues (équatoriale et polaire nord) sont proposées pour le même champ.

4 Conclusion

Le bilan scientifique de ce grand défi Occigen/CINES est extrêmement positif, puisque nous disposons désormais de simulations très haute résolution, ayant permis de résoudre des phénomènes d'ondes et tourbillons jamais abordés auparavant par ce type de modèle dans la littérature. Nous avons clairement, avec l'aide d'Occigen, ouvert un nouveau front d'exploration en terme de modélisation des planètes géantes. Nous avons présenté ces résultats à deux conférences scientifiques internationales, avec des retours très curieux et impressionnés de la communauté. Comme toute étude exploratoire, à ce jour, nous devons encore énormément travailler pour analyser toute la richesse des simulations effectuées et rendre le bilan encore plus positif pour ce grand défi. Nous travaillons particulièrement depuis le début

de l'année 2015 à la construction d'outils d'analyse adaptés à l'étude des ondes et instabilités dans le cas d'un modèle à grille non structurée comme DYNAMICO. Nous avons également commencé à identifier dans ce rapport des pistes d'amélioration des simulations qui devront être explorées. ■

CREATE

Simulations aux grandes échelles d'un compresseur axial multi-étages.

Florent DUCHAINE
(CERFACS)



Ont contribué au projet :

Gabriel STAFFELBACH, Jérôme DE LABORDERIE,
Laurent GICQUEL (CFD and GLOBC Team, CERFACS)

Gabriel HAUTREUX, Bertrand CIROU (CINES)

SOMMAIRE

1	Contexte, enjeux et objectifs généraux	47	4	Résultats sur la physique de l'écoulement	50
2	Codes utilisés	48	5	Conclusions & perspectives	51
3	Résultats sur les performances des simulations	48	6	Bibliographie	51
	Test de performance du code AVBP.....	48			
	Exemple du batch utilisé :.....	49			
	Test de performance du code TurboAVBP.....	49			

1 Contexte, enjeux et objectifs généraux

Du point de vue industriel, la conception des moteurs aéronautiques propulsant les avions (Safran Aircraft Engines) ou les hélicoptères (Safran Helicopter Engines) fait intervenir différents bureaux d'études s'attachant à décrire les écoulements de fluides au travers des veines principales des systèmes : compresseur, chambre et turbine. Bien que ces éléments soient fortement liés par leur fonctionnement, leur étude est aujourd'hui corrélée à minima. Une des limitations importante des prédictions numériques pour la conception des moteurs réside dans les hypothèses qui sont faites pour les étudier de manière découplée. La simulation intégrée d'un moteur en prenant en compte le plus d'éléments possible (compresseur, chambre, injection de carburant liquide, turbine, effets technologiques) est reconnue par les industriels du secteur comme un challenge innovant qui permettra de concevoir efficacement les futurs moteurs. D'un point de vue scientifique, ceci représente un défi considérable puisqu'il faut coupler des techniques de calcul et des physiques très différentes. Des travaux récents ont montré qu'étendre les capacités d'un code de Simulation aux Grandes Echelles des écoulements turbulents réactifs compressibles usuellement utilisé pour simuler les chambres de combustion au traitement des machines tournantes est un élément clé pour ce type de défi [Wang]. En effet, l'utilisation de la SGE pour simuler les étages de turbine et de compresseur s'est tout d'abord révélé très prometteuse en prédisant les comportements obtenus avec les méthodes usuelles (de type Reynolds Average Navier-Stokes - RANS) et en apportant bon nombre d'éléments additionnels indispensables pour la compréhension de ces écoulements très complexes [Gourdain, Papado, Tucker]. Ensuite, pouvoir simuler l'ensemble des éléments du moteur avec diverses instances d'un code partageant le même cœur numérique permet de lever nombre de questions et incertitudes sur les couplages de méthodes numériques. La qualité des prédictions en SGE a un prix fort lié au régime de fonctionnement des turbomachines (hauts nombres de Reynolds et de Mach, présence importante d'écoulements pariétaux et de structures secondaires ...) imposant l'utilisation d'un nombre de degrés de liberté important à résoudre.

L'équipe CFD du CERFACS travaille aujourd'hui sur l'extension de son code AVBP pour traiter les turbomachines. Pour cela, plusieurs instances du solveur AVBP prenant en charge les parties fixes et mobiles des configurations sont couplées via le coupleur OpenPALM (co-développement ONERA-CERFACS). Des premiers tests sur des étages isolés de turbine puis de compresseur ont été menés, montrant les capacités de la méthode tant du point de vue des performances informatiques que des capacités prédictives. Une étude de faisabilité d'un calcul couplé entre une chambre et un étage de turbine a également été récemment menée, prouvant l'efficacité de la stratégie employée. Deux des prochains points de passage identifiés tant du point technique que scientifique sont (1) la capacité à traiter dans un seul calcul SGE plusieurs étages de turbomachines (2) sur une géométrie représentant le 360° azimutal de configuration (sans périodicité azimutale). Au niveau technicité, ces deux challenges impliquent d'être capable de générer les maillages, gérer les solutions produites, porter les outils sur des machines de calcul massivement parallèles et de soutenir la capacité de calcul. Scientifiquement, un tel outil permettra d'avoir accès à des capacités de prédictions importantes pour la conception des turbomachines : transport de point chaud au travers de étages, transferts thermiques, propagation du bruit, décollement tournant, pompage, ...).

Les simulations réalisées durant ce grand challenge ont permis de donner des premiers résultats sur les deux points de passage qui sont les calculs multi-étages et 360°. Pour cela, nous avons utilisé la configuration CREATE [Ottavy] qui est un compresseur représentatif d'un dispositif industriel (design proposé par Safran Aircraft Engines) et largement étudié expérimentalement au LMFA. La Figure 1 présente la géométrie étudiée. Elle est constituée d'un stator (IGV) et de trois étages de compression (R1/S1, R2/S2 et R3/S3). De plus, la cavité sous le premier stator (S1) a été prise en compte. ■

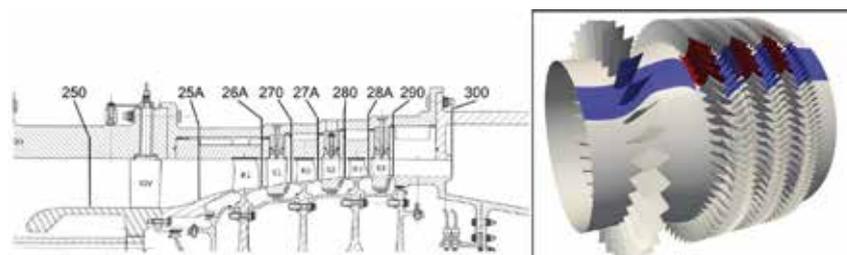


Figure 1. : Représentation du compresseur CREATE étudié durant le grand challenge. Gauche : vue en coupe de la configuration, droite : représentation 3D de la géométrie calculée.

2 Codes utilisés

Ce projet est réalisé avec le code de Simulation aux Grandes Echelles AVBP et le coupleur OpenPALM. L'outil qui en résulte permet de coupler n instances du code AVBP et d'échanger des données aux frontières communes. Il est ainsi possible d'avoir des instances fixes et d'autres mobiles afin de simuler les stators et les rotors d'une configuration type turbomachine.

AVBP est un code de simulation, co-développé par le CERFACS (<http://www.cerfacs.fr>) et l'IFP Energies Nouvelles (<http://www.ifp.fr>). Ce solveur résout les équations de Navier Stokes pour les écoulements turbulents réactifs compressibles gazeux et liquides. Capable de simuler aussi bien des écoulements académiques qu'industriels, AVBP s'appuie sur l'approche SGE (Simulation aux Grandes Echelles). Les algorithmes sont basés sur une structure de données applicable à des maillages non structurés hybrides, constitués d'éléments arbitraires. Le code AVBP utilise une famille de schémas dits "cell vertex". Des schémas peu dissipatifs et précis à l'ordre 3 en espace et en temps ont été spécialement développés dans le cadre d'études précédentes pour diminuer les erreurs de dispersion dans les simulations instationnaires [Colin]. AVBP peut également traiter des conditions aux limites non classiques (entrées pulsées, frontières non réfléchissantes, ...etc.). Construit pour profiter des architectures massivement parallèle, le code a été porté sur toutes les dernières technologies accessibles (Xeon, Xeon Phi, Power, AMD). Le parallélisme s'appuie sur l'approche SMPD avec la librairie MPI pour la gestion des communications et Parallel HDF5 pour les entrées sortie parallèles.

Le logiciel OpenPALM (Open Source sous License LGPL) est constitué des bibliothèques PALM développé par le CERFACS et CWIPI développé par l'ONERA. Le coupleur PALM aborde l'aspect dynamique de la gestion de processus et l'aspect générique des communications inter-processus. Il autorise l'exécution parallèle et séquentielle des codes de calcul, la description d'algorithmes évolués faisant intervenir si besoin le lancement de différentes instances d'un même code de calcul, le lancement en boucle de manière conditionnelle, tout ceci avec une gestion souple, efficace et générique des communications. PALM est aujourd'hui largement utilisé dans la communauté scientifique pour répondre à des problèmes d'assimilation de données ou dans des contextes de simulations multiphysiques. La bibliothèque CWIPI (Coupling With Interpolation Parallel Interface) permet de coupler des codes parallèles basés sur la définition de maillages au travers de communications MPI. Le couplage est fait par le biais d'une zone d'échange qui peut être discrétisée d'une manière différente pour chaque code couplé. CWIPI prend en compte tout type d'élément géométrique (polygone, polyèdre) et n'a aucune exigence sur la nature des cellules des maillages. CWIPI contient les fonctionnalités suivantes : le contrôle des processus couplés, l'emplacement géométrique, l'interpolation et l'échange des champs. Cette librairie a été conçue de manière à éviter les verrous limitant PALM sur le massivement parallèle. En particulier, le traitement des données et routage des communications sont déportés sur les codes eux-mêmes pour assurer une efficacité maximale dans un contexte massivement parallèle. Diverses simulations en mécanique des fluides et des structures ont montré le potentiel de CWIPI à traiter le couplage parallèle de manière performante. ■

3 Résultats sur les performances des simulations

Cette section présente les performances du code AVBP seul suivi des performances de la version TurboAVBP

qui couple deux instances du code AVBP via OpenPALM.

Test de performance du code AVBP

Le test retenu pour les analyses de scalabilité est le cas 150M du Cerfacs représentatif des simulations extrêmes prévues à l'horizon 2017 en production. Il s'agit d'un calcul réactif de comprenant 150 millions d'éléments tétraédriques.

L'environnement du test est :

- mkl/composer_xe_2015.0.090 (Intel MKL)
- idb/composer_xe_2015.0.090 (Intel Debugger)
- intel/15.0.0.090 (Intel Compiler Suite)
- bullmpil/1.2.8.1 (bullmpil)
- AVBP V7.0 beta rev. acca046c (19 Nov. 2014)
- Parallel hdf5 1.8.14 (installé à la main, la version du module ayant les headers fortran2003 qui posent problème).
- Les options de compilation du code sont :
- -fp-model-precise-O3-align-xCORE-AVX2-mkl=sequential

Exemple du batch utilisé :

```
# !/bin/bash
#SBATCH --nodes=1024
#SBATCH --ntasks-per-node=24
#SBATCH --cpus-per-task=1
#SBATCH --exclusive
#SBATCH -p all
#SBATCH -j AVBP #SBATCH --time=1000
#SBATCH --mail-type=ALL

module load intel
module load bullmpi/1.2.8.1
module load avbp

cd $SLURM_SUBMIT_DIR

export OMP_NUM_THREADS=1 export MKL_NUM_THREADS=1 ulimit -s unlimited
time srun -m block --resv-ports --cpu_bind=map_cpu:0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23 -n $(24*1024)/AVBP_V7.0_beta.OCCIGEN
```

Le code a été lancé avec des fichiers de pré-partitionnements générés au CERFACS en utilisant le partitionneur de maillage METIS 4.0.2. Les performances par itérations sont relevées sur le Tableau 1. Il s'agit des temps en secondes par itérations de la boucle temporelle uniquement. On a utilisé des nœuds entiers avec 24 tâches MPI par nœud. La scalabilité forte est excellente avec une efficacité de 68 % à 12288 tâches. La performance se dégrade petit à petit au delà. Ces performances sont consistantes avec celles observées sur la machine CURIE du TGCC au CEA. La dégradation du temps de calcul provient de l'utilisation importante de réduction collectives dans le code. Au delà de 12k tâches ces appels prennent une partie grandissante du temps de calcul pénalisant le temps par itération. Des tests et optimisations sur ce sujet et ces travaux resteront actifs au CERFACS.

Nb de tâches MPI	Secondes par itération	Efficacité
96	6,0051	100
192	2,9983	100,141747
384	1,5004	100,0583178
768	0,6699	112,052172
1536	0,37	101,4375
3072	0,1888	99,3958554
6144	0,1022	91,80987035
12288	0,0682	68,79009348
24576	0,0564	41,59117354
49152	0,0937	12,51730089

Tableau 1. : Relevé d'efficacité du code AVBP.

Test de performance du code TurboAVBP

L'outil TurboAVBP est un couplage entre plusieurs instances du solveur AVBP via le coupleur OpenPALM. Dans cette étude, deux instances d'AVBP sont utilisées : AVBP1 pour les parties statiques de la configuration (représentées en bleu sur la Figure 1) et AVBP2 pour les parties tournantes (représentées en rouge sur la Figure 1). À chaque itération et selon le mécanisme de couplage mis en œuvre dans TurboAVBP, les deux instances s'échangent des données sur les interfaces en contact géométrique [Wang]. Le protocole d'échange des grandeurs est composé de deux étapes : (1) une étape de localisation des points de maillages d'un domaine sur l'autre et (2) une étape d'échange des informations. La partie sur les échanges d'informations doit impérativement être réalisée à chaque itération temporelle, alors que ce n'est pas nécessairement le cas pour la partie de localisation (du fait des petits pas de temps utilisés avec le solveur explicite compressible AVBP). Le Tableau 2 présente les performances relevées pour la simulation avec TurboAVBP sur le maillage de 200 millions d'éléments de la configuration CREATE (maillage M2, voir plus bas). Dans ce test, les deux instances AVBP utilisent le même nombre de cœurs, assurant une synchronisation temporelle du point de rencontre pour les échanges. La scalabilité du code AVBP sur ce cas est très bonne jusqu'au nombre de cœurs maximum testé (7680). Comme pressenti, le temps de localisation est important. Il est intéressant de noter qu'il diminue au fur et à mesure que le nombre de cœurs augmente atteignant tout de même un plateau autour de 2 secondes. D'autre part, le temps pris par les échanges d'informations est de plusieurs ordres de grandeur plus petit que les temps d'itération du solveur AVBP. On note également une diminution du temps d'échange lorsque le nombre de cœurs augmente avec toutefois l'existence d'un plateau qui débute vers 3840 cœurs par instance.

Au vu de ces performances, les simulations du grand challenge ont été tournées en affectant entre 500 et 2000 cœurs à chaque instance d'AVBP et en localisant les données pour les échanges toutes les 10 itérations. ■

Nb de tâches MPI par instance AVBP	Secondes par itération AVBP	Secondes par localisation	Secondes par échanges
120	2,3021	6,909868	0,009422
240	1,1339	4,227053	0,005565
480	0,5615	3,617977	0,004701
960	0,2948	3,172484	0,003942
1920	0,1511	2,558007	0,003511
3840	0,0839	2,312224	0,004113
7680	0,0491	1,905274	0,004999

Tableau 2. : Performances relevées pour l'outil TurboAVBP.

4 Résultats sur la physique de l'écoulement

Grâce aux ressources informatiques fournies par GENCI/CINES, nous avons pu mener diverses simulations permettant d'avancer rapidement notamment sur la mise en rotation du compresseur. En régime établi dans ces machines, l'écoulement va des faibles vers les hautes pressions du fait de l'action mécanique et du travail fourni par les pales de rotor. Cet établissement est contraire aux lois de la mécanique des fluides (sans apport de travail externe) et peut s'avérer compliqué à gérer proprement notamment avec des méthodes avancées de type Simulation aux Grandes Echelles. De plus, le point de fonctionnement (débit dans le compresseur) est directement piloté par la vitesse de rotation des aubes, le rapport de pression entre l'entrée et la sortie ainsi que les pertes (par frottement et hydrodynamiques) dans la veine. Cet équilibre est très sensible sur les compresseurs actuels un déséquilibre peut mener à un retournement de l'écoulement appelé pompage. La Figure 2 illustre le phénomène de pompage en montrant l'évolution temporelle de la vitesse sur une sonde placée en entrée du compresseur. Selon les pressions prescrites sur la condition limite aval un phénomène de pompage apparaît pour P1 et P2 alors qu'un régime stable se maintient pour P3. Ce régime correspond en termes de débit et de taux de compression au point expérimental visé.

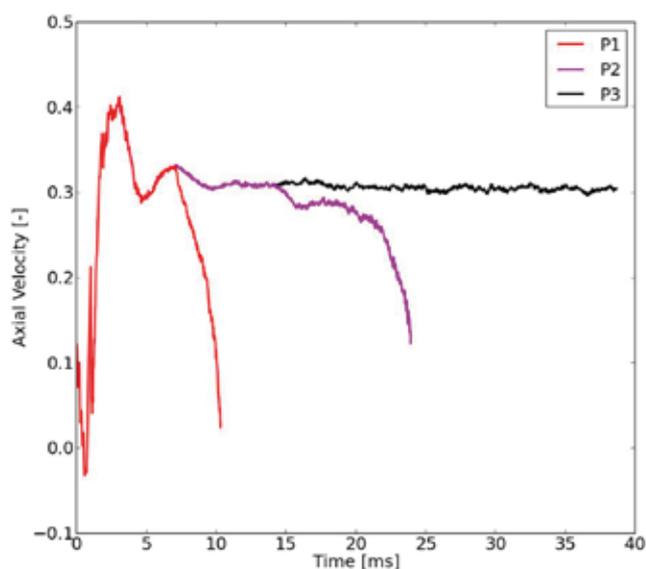


Figure 2. : Evolution temporelle de la vitesse sur une sonde placée en entrée de la configuration en fonction de trois des niveaux de pression P1, P2 et P3.

Au delà de l'effort indispensable de mise en place (mise en rotation de la géométrie, définition des options numériques, ajustement des pressions de sortie et tests de sensibilité), une étude de l'effet de la résolution en maillage a été menée. La Figure 3 présente les topologies de l'écoulement obtenues sur deux maillages M1 (90 millions) et M2 (200 millions d'éléments). À partir du premier étage, l'écoulement devient fortement turbulent avec la présence de nombreuses structures tourbillonnaires. Une différence flagrante entre les deux maillages est le sillage derrière l'IGV (Inlet Guide Vane), qui présente une instationnarité de type von Karman dans le cas M2 non présente dans le cas M1. De plus, on constate un changement de comportement important lié à la résolution dans les étages notamment un décollement important sur le stator S1 de la simulation M2 qui n'a pas lieu sur la simulation M1. Notons que du fait d'une meilleure résolution des pertes dans le cas M2, les points de fonctionnement (rapport entre le débit et le tau de compression) diffèrent un peu entre ces deux simulations. ■

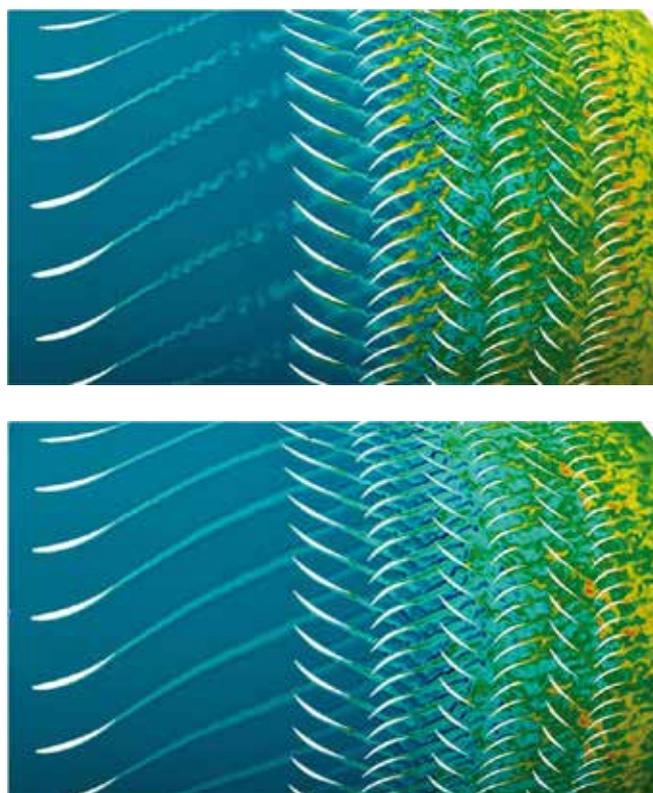


Figure 3. : Champs d'entropie à 50 % de la veine pour le maillage M1 (haut) et le maillage M2 (bas).

5 Conclusions & perspectives

L'accès à la machine OCCIGEN durant ce challenge nous a permis de réaliser rapidement un grand nombre de tests sur des Simulations aux Grandes Echelles d'un compresseur multi-étages avec prise en compte d'effet 360°. À la connaissance des auteurs, de telles simulations n'ont jamais été réalisées à ce jour. Nous avons pu dégager des préconisations importantes pour mettre en place des pratiques de calcul qui faciliteront les mises en place des simulations futures. De plus, des efforts vont également être menés pour améliorer les performances du coupleur OpenPALM notamment la partie de localisation très couteuse en ressources.

Concernant les avancées scientifiques, les simulations réalisées durant le challenge et actuellement poursuivies vont permettre d'identifier finement des mécanismes d'interaction rotor/stator ainsi des interactions d'étages à étages. Les post-traitements en cours vont servir à réaliser des comparaisons avec des données expérimentales ainsi qu'à investiguer les dynamiques présentes dans l'écoulement (topologie, origine des pertes etc). Enfin, un troisième niveau de maillage (M3) va être investigué dans les mois à venir afin d'approfondir la convergence en maillage et la sensibilité de l'écoulement à la résolution. ■

6 Bibliographie

- **[Colin]** O. Colin, M. Rudgyard, "Development of High-Order Taylor-Galerkin Schemes for Unsteady Calculation", J. Comp. Physics, 162(2) :338-371, 2000.
- **[Gicquel]** L.Y.M. Gicquel, N. Gourdain, J.-F. Bousuge, H. Deniau, G. Staffelbach, P. Wolf and T. Poinot, "High Performance Computing of Flows in Complex Geometries," Les Comptes Rendus, Serie Mathematiques, 339 (2-3), pp. 104-124, 2011.
- **[Gourdain]** Gourdain N. Prediction of the unsteady turbulent flow in an axial compressor stage. Part 1 : Comparison of unsteady RANS and LES with experiments. Computers and Fluids, 106(January) :119-129, 2015.
- **[Ottavy]** Ottavy, X., Trébinjac, I., Vuillarmet A., "Analysis of the Inter-row Flow Field within a Transonic Axial Compressor : Part 2 - Unsteady Flow Analysis", 45th International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, ASME Paper 2000-GT-0497, Journal of Turbomachinery Vol. 123 n°1, pp.57-63., Munich, Jan. 2001.
- **[Papado]** D. Papadogiannis, F. Duchaine, F. Sicot, L.Y.M. Gicquel, G. Wang and S. Moreau. Large Eddy Simulation of a high pressure turbine stage : effects of sub-grid scale modelling and mesh resolution. GT2014-25876. In ASME Turbo Expo 2014, Dusseldorf, Germany.
- **[Tucker]** P. Tucker and J. Tyacke. Eddy resolving simulation in aerospace – Invited paper. Applied Mathematics and Computation. In press. 2015.
- **[Wang]** Wang, F. Duchaine, D. Papadogiannis, I. Duran, S. Moreau and L.Y.M Gicquel. An overset grids method for large eddy simulation of turbomachinery stages. Journal of Computational Physics, 274 :333-355. 2014.

LE GRAPHÈNE POUR STOCKER L'ÉLECTRICITÉ

Simulation de supercondensateurs à électrodes de graphène perforé.



Mathieu SALANNE
(PHENIX, UPMC, CNRS)

Ont contribué au projet :

Matthieu HAEFELE (Mds, CNRS)

Benjamin ROTENBERG (PHENIX, UPMC, CNRS)

Gérard GIL (CINES)

SOMMAIRE

1	Retour d'expérience sur l'utilisation de la machine	53	2	Synthèse du sujet scientifique et des résultats obtenus	53
	Mise en œuvre de l'application.....	53			
	Environnements et outils.....	53			
	Stabilité des environnements matériels et logiciels.....	53			
	Performances et passage à l'échelle.....	53			

1 Retour d'expérience sur l'utilisation de la machine

Mise en œuvre de l'application

La mise en œuvre de l'application s'est très bien déroulée. Le programme est écrit en Fortran 90 et n'a pas de dépendance particulière à d'autre bibliothèque. Le programme a donc compilé et donné les bons résultats très rapidement. Après avoir testé différentes options de compilation pour activer les parties du code les plus

performantes sur OCCIGEN, nous avons pu lancer les expériences ciblées pour le grand défi. Nous avons alors constaté un problème de déséquilibre de charges. La résolution partielle de ce problème a retardé quelque peu le démarrage de la production.

Environnements et outils

Comme l'application n'a pas de dépendance particulière, l'environnement proposé était très satisfaisant. Nous avons simplement regretté l'absence de l'outil de

profiling Scalasca auquel nous sommes habitués sans que cela nous ait handicapé outre mesure.

Stabilité des environnements matériels et logiciels

La stabilité des environnements sur OCCIGEN a été très bonne (mais le projet n'a finalement duré que 6 semaines en production). Le seul changement notable a été le

passage du module bullmpi/1.2.8.1 à bullxmpi/1.2.8.3, qui a été très bien géré et n'a pas occasionné de problème pour nous.

Performances et passage à l'échelle

Il nous est difficile de commenter les performances obtenues sur OCCIGEN de manière quantitative car les systèmes étudiés sont plus gros (de près d'un ordre de grandeur) que lors de nos travaux précédents réalisés sur Curie. En pratique, il nous a fallu réduire énormément l'empreinte mémoire du code pour pouvoir effectuer ces simulations, et nous en avons profité pour améliorer certains déséquilibres de charge qui sont apparus du fait de la taille des systèmes. En conclusion, l'accès à OCCIGEN lors de ce grand challenge nous a permis d'optimiser de manière significative notre code, ce qui nous permet d'envisager l'étude de nombreux systèmes complexes dans le futur.

Le passage à l'échelle a été testé une fois les options de compilation les plus efficaces déterminées. La figure 0 montre l'accélération obtenue en fonction du nombre de cœurs employés. Le passage à l'échelle a été grandement amélioré grâce aux modifications déjà évoquées. La version précédente du code plafonnait lorsqu'on utilisait plus de 512 cœurs sur CURIE, tandis qu'ici nous obtenons une très bonne scalabilité jusqu'à 1000 cœurs, qui reste correcte jusqu'à 4000. ■

2 Synthèse du sujet scientifique et des résultats obtenus

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage de l'électricité caractérisés par des puissances très élevées, complémentaires des batteries Li-ion. Ils sont utilisés dans un nombre grandissant d'applications (bus à Shanghai depuis 2006, tramway et bus à Paris depuis 2009, système stop/start des voitures vendues par Peugeot depuis 2010). Le mécanisme de stockage dans les condensateurs ne faisant pas intervenir de réaction chimique, ces systèmes sont plus fiables, moins dangereux et moins toxiques que les batteries. En effet, les supercondensateurs stockent l'énergie à l'interface électrolyte/électrode par adsorption réversible des ions. En 2006, il a été démontré expérimentalement que des

ions pouvaient entrer dans les pores de taille inférieure à 1 nm présents dans les électrodes, faites de carbone nanoporeux, et que cela conduisait à une augmentation importante de la capacité de stockage (+100 % par rapport aux carbones utilisés jusqu'alors). Augmenter leur densité d'énergie permettrait d'étendre leur champ d'utilisation à tous les dispositifs électriques mobiles.

Pour atteindre cet objectif, il faut connaître les mécanismes moléculaires d'adsorption des ions à l'intérieur de carbones nanoporeux aux structures complexes. Pour cela, la dynamique moléculaire est devenue un outil incontournable, qui a fourni la première image

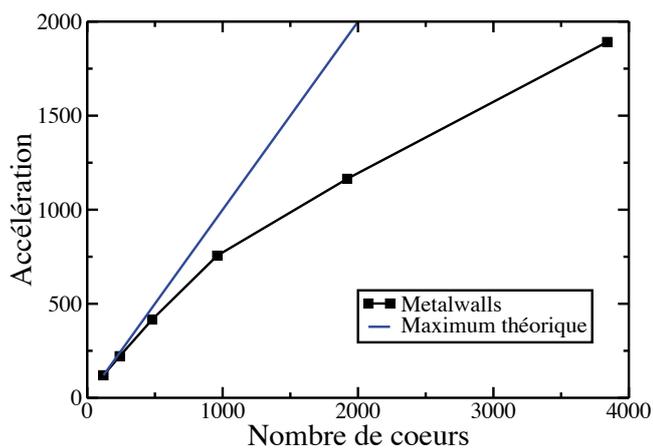


Figure 1 : Accélération du code en fonction du nombre de cœurs employés.

réaliste de la structure du liquide au sein d’une électrode de supercondensateur. Au cours de ce projet, nous avons étudié des systèmes avec de nouveaux types d’électrodes à base de graphène “perforé”. Des travaux expérimentaux très récents ont démontré que de tels supercondensateurs, lorsqu’ils emploient des électrolytes de type liquide ionique, présentent des performances prometteuses, avec en particulier un très bon compromis entre densité d’énergie et densité de puissance.

En effet, l’énergie stockée dans un supercondensateur est proportionnelle à la capacité C et au carré du potentiel électrique U auquel il est soumis. Les graphènes perforés, dont les premières synthèses viennent à peine d’être décrites dans la littérature, présentent l’avantage de pouvoir être densifiés, permettant ainsi de stocker des grandes densités d’énergie par unité de volume, ce qui permet de surmonter les limitations du graphène “classique”. La présence de perforations dans le plan de carbone permet également un transport efficace des ions, et donc de bonnes performances en puissance et des temps de charge/décharge très courts. Ces systèmes sont un grand défi pour les simulations car les structures modélisées ont des tailles très supérieures à celles étudiées jusqu’ici dans la littérature (y compris celles que nous avons simulées jusqu’à présent, qui étaient les plus gros systèmes modélisés jusqu’ici); la boîte de simulation que nous avons utilisée est représentée sur la figure 1. De plus, nous utilisons une méthode de simulation originale, qui permet de les maintenir à potentiel constant, comme dans un supercondensateur réel.

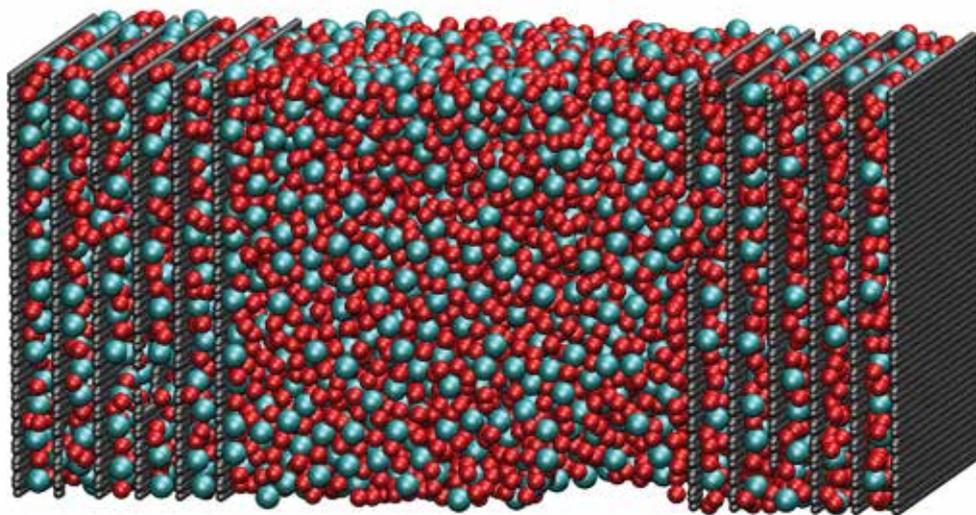


Figure 2 : Supercondensateur simulé dans ce projet. Les deux électrodes de carbone (en gris) sont constituées de plans de graphène, perforés afin de laisser passer le liquide ionique (vert: anions PF 6, rouge: cations 1-butyl-3-methylimidazolium). Elles sont maintenues à un potentiel électrique constant.

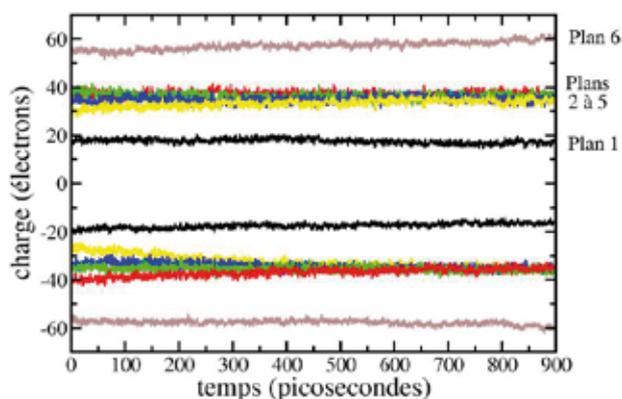


Figure 3: Fluctuation de la charge accumulée sur chaque plan de graphène au cours du temps lorsque le supercondensateur est chargé à 2,7 V. Le plan 1 est situé à l'extérieur sur la figure 1 tandis que le plan 6 est celui qui est en contact avec l'électrolyte. Le même code couleur est utilisé pour l'électrode négative.

Nos simulations de dynamique moléculaire nous fournissent la charge stockée sur les électrodes au cours du temps pour un potentiel électrique appliqué. Il apparaît sur la figure 2 que la charge se répartit de manière non uniforme sur les plans de graphène, en fonction de leur position dans la boîte de simulation. En moyenne, la charge surfacique est très proche de celle que l'on obtient dans le cas du graphite. Ceci montre que les bonnes performances de ces matériaux sont principalement dues à leur haute densité et non pas à un mécanisme particulier de stockage tel que ceux que nous avons mis en évidence dans d'autres matériaux nanoporeux.

Un grand avantage de la dynamique moléculaire est qu'elle donne aussi accès à la structure adoptée par le liquide ionique au sein des pores du carbone. Ainsi, comme illustré sur la figure 3, on peut voir que les ions s'organisent sous forme de monocouche à 0 V. Lorsqu'on charge un supercondensateur, les électrons s'accumulent sur la surface du graphène dans l'électrode négative, tandis que des trous électroniques se forment dans la positive, ce qui doit être compensé au sein du liquide. Trois mécanismes sont possibles: 1/ des contre-ions additionnels s'adsorbent 2/ des co-ions se désorbent ou 3/ il y a un échange d'ions. Ici, on peut voir que lorsque l'on passe à 2,7 V, la quantité de cations n'évolue presque pas au sein de l'électrode positive tandis que le nombre d'anions augmente de manière remarquable. Ceci montre que c'est le premier mécanisme qui régit le fonctionnement de notre supercondensateur.

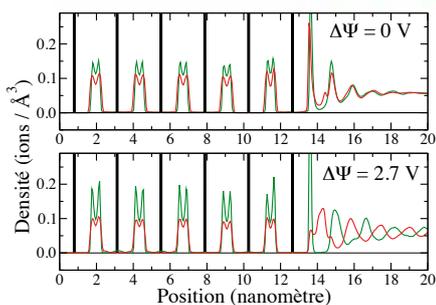
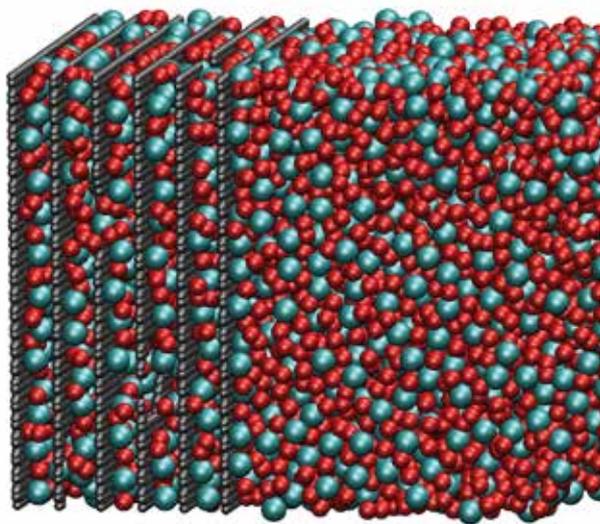


Figure 4: Densités ioniques à l'intérieur de l'électrode positive, pour des différences de potentiel appliquées de 0 et 2,7 V. Vert: anions, rouges: centre de masse des cations.

Sur le plan scientifique, ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives. En effet, il est maintenant possible de synthétiser des graphènes perforés de densités variées, ce qui correspondra à des espacements différents entre les différents plans de graphène. Il est alors fort probable que les variations de volume disponible pour le liquide vont induire des changements de mécanisme de charge, et donc des performances différentes. À plus long terme, la question des variations de volume lors de la charge/décharge fait également partie des questions pour lesquelles les simulations pourraient apporter des éclairages essentiels. Nous allons prochainement déposer un projet PRACE visant à étudier de nombreux systèmes inspirés de ceux que nous avons simulés ici, afin de proposer aux expérimentateurs les couples électrode / électrolyte les plus prometteurs pour les supercondensateurs de demain. ■

FLUIDEVRONS

Simulation aéroacoustique de jet subsonique et réduction de bruit par micro-jets

Steeve CHAMPAGNEUX
(AIRBUS)



Ont contribué au projet :

Guillaume Daviller, Marc Montagnac,
Jean-François Boussuge (CERFACS),
Michel Gazaix (ONERA),
Fabien Wlassow, Éric Chaput (AIRBUS),
Gabriel Hautreux, Bertrand Cirou (CINES)

SOMMAIRE

1	Contexte	57	4	Résultats	60
2	Cas d'Application	58	5	Perspectives	61
3	Codes de Calcul	59	6	Références	62

1 Contexte

Dans l'industrie du transport aérien, la réduction des nuisances sonores représente un enjeu majeur. On prévoit une croissance du trafic aérien de 4,5 % par an sur les 20 prochaines années [1]. Dans ce contexte, les réglementations internationales tendent à durcir la certification acoustique des aéronefs civils [2,3]. En vue de contrôler et contenir l'impact acoustique, l'ACARE a défini une feuille de route, définissant d'ambitieux objectifs d'ici 2050 : réduire de 65 % les émissions sonores soit -15 EPNdB par vol par rapport à des niveaux de référence évalués en l'an 2000 [4].

Le bruit généré par un avion dans sa phase de décollage provient principalement du système propulsif. En particulier, l'écoulement de jet issu du turbofan contribue largement au rayonnement acoustique à grande distance. Cette zone est le siège du mélange turbulent de l'écoulement éjecté à grande vitesse par la tuyère avec l'écoulement extérieur dû à l'avancement de l'avion. La turbulence produit l'essentiel de ce bruit directement en aval de la tuyère. L'origine de ces sources acoustiques se situe dans une zone en aval du cône potentiel du jet. Il est montré que les grandes structures turbulentes sont essentiellement responsables du bruit de jet dirigé vers l'aval à 30 degrés alors que les petites structures turbulentes sont plutôt à l'origine d'un bruit qui est essentiellement propagé vers l'amont.

Plusieurs types de dispositifs de réduction de bruit ont été étudiés expérimentalement. Certains ont été mis en œuvre sur avion, comme par exemple les chevrons [figure 0]. Ce sont des dispositifs statiques, passifs et permanents qui modifient la forme du bord de fuite de la tuyère. Ils agissent sur les zones de mélange du jet moteur et réduisent le niveau de pression acoustique (SPL) essentiellement à basse fréquence au prix d'une pénalité à haute fréquence et éventuellement sur la poussée moteur. D'autres types de dispositifs de contrôle actif tels que les micro-jets ont des performances équivalentes. Ils sont distribués de manière azimutale au bord de fuite de la tuyère, et agissent eux aussi sur le développement de la turbulence dans la zone de mélange. Contrairement aux chevrons, les micro-jets offrent une souplesse d'emploi. Ils permettent d'ajuster finement le contrôle, par injection continue ou pulsations. Ils peuvent aussi être désactivés dès la sortie des zones de restriction acoustique, en particulier pour recouvrer en croisière les performances optimales de la tuyère. Le dispositif « fluidevrons » ou « virtual chevrons » consiste à mettre en œuvre des micro-jets par paires convergentes pour mimer l'effet des chevrons.

La réduction de bruit de jet par contrôle par actionneurs actifs de type micro-jets a fait l'objet d'études expérimentales et numériques sur de nombreuses configurations depuis de plusieurs années, avec le soutien de projets de recherche européens et nationaux [5]. Ceci se traduit par de nombreuses publications scientifiques, parmi lesquelles [6, 7, 8, 9, 10].

La simulation numérique haute-fidélité LES (Large Eddy Simulation), associée à une méthode d'analogie acoustique FWH (Ffowcs-Williams & Hawkins), offre la capacité d'accéder à tous les détails de l'écoulement turbulent. C'est aujourd'hui un outil incontournable, complémentaire aux moyens expérimentaux, pour l'analyse et la compréhension des mécanismes de génération du bruit, en premier lieu sur des configurations simplifiées de jet [11]. A présent que la faisabilité de ce type de calcul est démontrée, l'étape suivante consiste à transposer la méthode à des configurations avions réalistes. La simulation des turbofans double flux à grand taux de dilution sera alors envisageable, en prenant en compte des géométries plus complexes et une physique plus représentative, par exemple l'effet de la température, la prise en compte d'un nombre de Reynolds plus élevé ou encore des dispositifs de contrôle réalisables sur avion.

Ce grand challenge GENCI s'inscrit dans cet effort d'identification des sources de bruit, de développement de dispositifs de contrôle d'écoulement viables pour leur atténuation, et de validation des techniques de simulation sur des configurations académiques.



Figure 0 : Configuration typique de chevron, extrait de [24].

2 Cas d'Application

Dans cette optique, on réalise la restitution numérique d'une expérience [figure 1] conduite par l'institut PPRIME de Poitiers dans la soufflerie anéchoïque « bruit et vent » du CEAT [12]. La signature acoustique d'un jet axisymétrique issu d'une tuyère simple flux de 5cm de diamètre y a été mesurée. Le jet est isotherme (288K) et subsonique (nombre de Mach acoustique 0.9, soit une vitesse de 306 m/s). Il est caractérisé par un nombre de Reynolds basé sur le diamètre de la tuyère et la vitesse d'éjection de l'ordre de 1 Million. Ce jet principal est contrôlé à l'aide de 8 paires de micro-jets convergents deux à deux à 40°, distribués de manière azimutale au bord de fuite de la tuyère et inclinés vers l'axe du jet principal d'un angle de pénétration de 60°. La vitesse en sortie de buse des micro-jets est égale à celle du jet principal, le rapport des diamètres étant de 15. Des données expérimentales sont disponibles avec et sans contrôle.

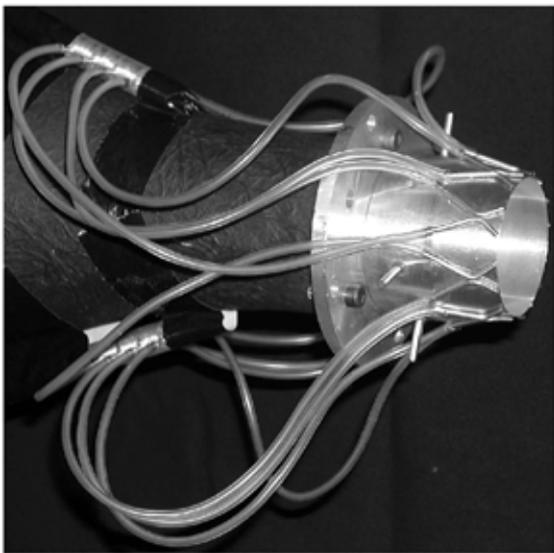


Figure 1 : Dispositif expérimental, institut PPRIME

De nombreuses simulations numériques de configurations de tuyères équipées de chevrons ont d'ores et déjà été réalisées à l'aide de technique LES. Cependant, la simulation des micro-jets reste difficile d'accès du fait de la grande disparité des échelles spatiales et temporelles à résoudre simultanément. En pratique, cela se traduit par la mise en œuvre de maillages de taille conséquente. Les temps de restitution sont très longs et les coûts de calculs associés significatifs.

Pour limiter ces coûts, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont fréquemment utilisées. Ainsi, on modélise traditionnellement ce type d'actuateur à l'aide d'un terme source, actif dans les cellules du maillage concernées. Cela permet d'éviter le raffinement de maillage requis pour bien représenter les micro-jets. Lorsqu'il est introduit dans les équations de conservation de Navier-Stokes, il permet de simuler l'injection de fluide [9] en

général au prix d'un nécessaire exercice de calibration. Dans le cas présent, on s'affranchit de cette modélisation en considérant un maillage très résolu et en imposant des conditions limites géométriquement représentatives de ces micro-jets. Elles sont incorporées au bord de fuite de la tuyère en épaississant légèrement la lèvre de cette dernière par rapport à la réalité expérimentale.

La coexistence d'échelles de longueur caractéristiques disparates (épaisseur de la couche de mélange, diamètre des micro-jets et taille du cône potentiel du jet principal) impose des maillages très denses. Ici, 20 points de maillages sont requis dans un diamètre de micro-jet pour représenter correctement l'injection. La direction azimutale est quant à elle discrétisée par pas de 0.25°, soit 1456 points. De plus, la couche limite à l'intérieur de la tuyère est résolue jusqu'à la paroi. L'objectif de simuler simultanément les mécanismes de génération de bruit issus de l'écoulement turbulent à proximité de la tuyère ainsi que les mécanismes de propagation du bruit en champ lointain conduit à réaliser des simulations acoustiques directes du bruit émis jusqu'à un nombre de Strouhal de 5 à 7 diamètres en aval de la tuyère. Pour ces raisons, le maillage comporte 2 Milliards de cellules.

Ce type de simulation bénéficie de l'expérience acquise par le CERFACS, dans le cadre d'un précédent projet PRACE (2012061057) [13,14], qui a permis de mettre au point l'ensemble des ingrédients clés pour démontrer la faisabilité de telles simulations LES. Il a aussi permis de valider qualitativement les résultats obtenus vis-à-vis des références expérimentales disponibles sur plusieurs cas de jet, en particulier pour un nombre de Mach plus faible.

Ce grand challenge GENCI offre l'opportunité de générer une base de données de simulation de référence constituée d'enregistrements similaires au dispositif expérimental, mais complétée de certaines mesures alors inaccessibles : grandeurs aérodynamiques instantanées tridimensionnelles dans tout le domaine de calcul avec des échantillonnages plus résolus à proximité des micro-jets, dans des plans de coupes transverses et axiaux équidistants entre 0D et 5D. La simulation est également instrumentée avec des sondes de pression situées sur l'axe du jet, dans la couche de mélange, autour du jet et dans le cône d'expansion du jet [figure 3]. Les ondes acoustiques sont propagées à grande distance à l'aide de l'analogie de FWH. On utilise pour cela une surface cylindrique ouverte [figure 2], englobant la tuyère et le jet à 3D de l'axe du jet. La pression est mesurée à l'aide de 40 antennes acoustiques constituées chacune de 20 microphones et distribuées dans le secteur angulaire compris entre 20° et 120° à 55D de l'axe du jet principal. Cette base de données sera exploitée ultérieurement.



Figure 2 : Instrumentation de la simulation : Surface FWH

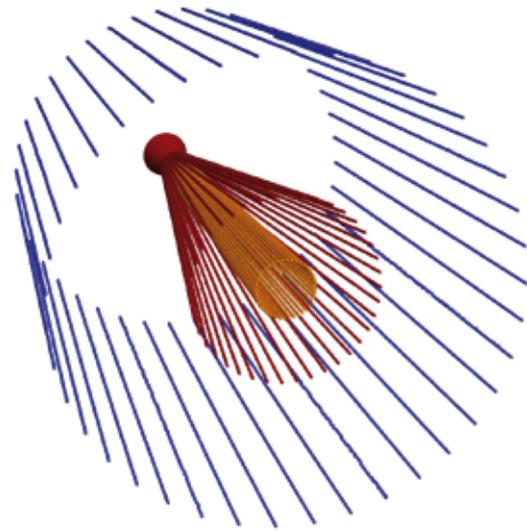


Figure 3 : Instrumentation de la simulation : Sondes de pression

3 Codes de Calcul

Le code industriel elsA (ensemble logiciel pour la simulation en Aérodynamique) [15, 16], mis à disposition par l'ONERA et déployé sur la machine OCCIGEN, résout les équations de conservation de Navier-Stokes dans leur formulation compressible, à l'aide d'une approche volume finis sur des maillages structurés multi blocs. Ce code est utilisé de manière intensive à Airbus pour des études aérodynamiques et aéroacoustiques depuis une quinzaine d'années.

Ce logiciel est écrit en C++ et Fortran, et l'interface utilisateur en Python. Les communications parallèles point à point et bloquantes entre les domaines de calculs (blocs) distribués sont gérées par des primitives MPI. Les échanges de données entre blocs sont orchestrés à l'aide d'un scheduler, basé sur le graphe de connectivité global entre blocs. Le partitionnement du maillage associé à l'équilibrage de charge est réalisé à l'aide d'un algorithme greedy, visant à rendre homogène de nombre de cellules affectées à chaque core [17].

Dans le cadre d'un projet PRACE Preparatory Access (2010PA0671), le logiciel elsA a précédemment fait l'objet de tests de scalabilité faible (un bloc par core donc un équilibrage parfait en charge et en communications) sur la machine CURIE au GENCI/CEA (bi 8-cores Intel Sandy Bridge EP à 2.7GHz, 4GB/core). Le temps de restitution et l'efficacité mesurés sont satisfaisants sur la gamme de nombre de cores considérés, jusqu'à 16384 [figure 4].

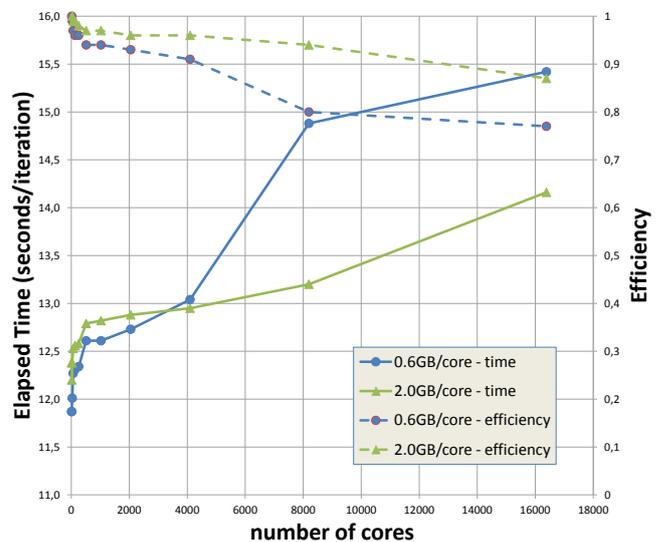


Figure 4 : Efficacité et temps de calcul par itération fonction du nombre de cores

Les simulations réalisées dans le cadre de ce grand challenge GENCI ont été distribuées sur 8192 cores, essentiellement dans l'optique de réduire le temps de restitution dicté par le faible pas de temps, donc le grand nombre d'itérations (plus de 250000), et non pas par la taille du calcul puisque moins de 1GB de mémoire par core est nécessaire.

Le logiciel elsA implémente l'état de l'art actuel des techniques de simulation instationnaire des écoulements turbulents, en particulier la Simulation des Grandes Echelles (SGE/LES). Les schémas numériques mis en œuvre sont spécifiquement optimisés pour les applications aéroacoustiques [18] : les flux en espace sont discrétisés à l'aide d'un schéma compact implicite précis à l'ordre 6 [19]. Une méthode explicite de Runge-Kutta à 6 étapes [20] à faible dispersion et dissipation est mise en œuvre pour l'intégration temporelle. Aucun modèle de sous-maille n'est explicitement utilisé. Les petites échelles de la turbulence non-résolues par le maillage sont modélisées par un filtre compact, qui sert aussi à stabiliser le schéma spatial. Des conditions limites non-réfléchissantes [21] sont utilisées pour la frontière radiale du domaine de calcul ainsi que pour l'injection du jet principal. Pour ce dernier, un profil turbulent de vitesse moyenné est imposé au niveau de la condition limite. Il est perturbé avec des fluctuations de vitesse

de sorte que le jet turbulent instationnaire en sortie de tuyère soit représentatif de l'expérience. Une formulation basée sur les caractéristiques est utilisée pour la condition de sortie en aval du domaine [22] ainsi que pour l'injection des micro-jets.

Par ailleurs, la base de données est générée à l'aide du logiciel Antares [23]. Ce logiciel opensource est développé par le CERFACS en langage python sur la base des bibliothèques VTK. Le couplage entre Antares et elsA est implémenté de sorte que le logiciel Antares puisse accéder aux données d'elsA en mémoire pendant le calcul. Cela permet d'optimiser la taille des données sur disque en minimisant l'écriture des solutions 3D.

La propagation acoustique en champ lointain est également réalisée pendant le calcul à l'aide de la formulation intégrale FWH.

4 Résultats

Les simulations ont été réalisées par le CERFACS sur la machine OCCIGEN.

Les 10 millions d'heures CPU consommées (soit environ 50 jours) ont permis de produire une base de données très résolue en espace. Celle-ci couvre une durée de 0.017 secondes, une fois évacuée la phase transitoire, soit 120 temps convectifs (temps basé sur le diamètre de la tuyère et la vitesse du son en champ lointain). Près de 60 TB de données ont été enregistrés.

L'analyse préliminaire du champ aérodynamique dans le jet indique une bonne corrélation entre calcul et expérience quant à l'effet des micro-jets sur la turbulence.

Ces simulations LES permettent d'accéder à une description très fine de la turbulence à proximité des jets, et en particulier de comprendre comment les micro-jets impactent très localement le jet principal [figure 5, et figure 6]. Elles permettent aussi d'analyser les conséquences de

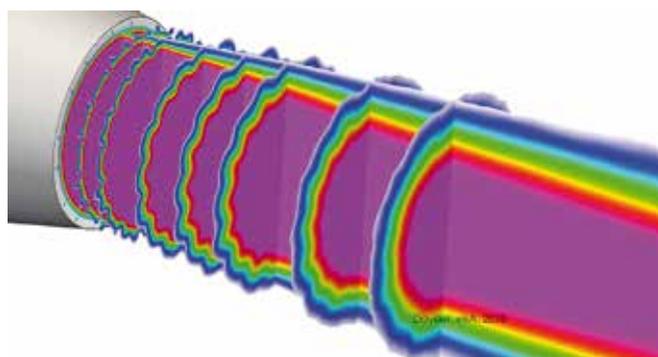


Figure 5 : Champ moyen de vitesse axiale

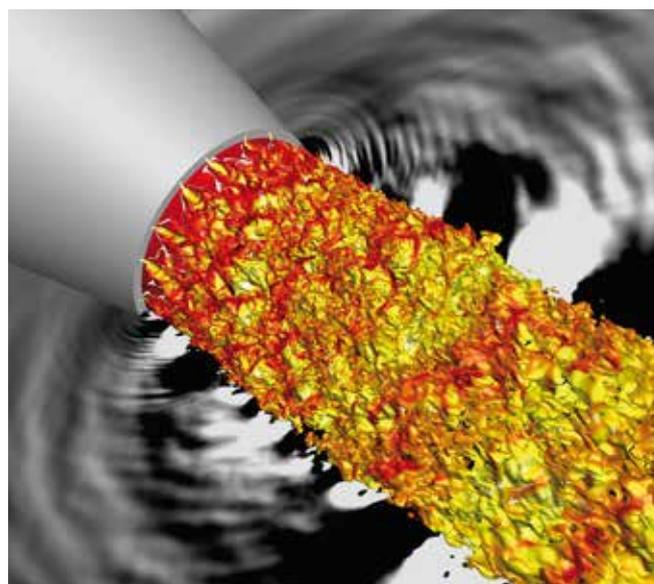


Figure 6 : Iso-surfaces de vitesse axiale (30% de la vitesse du jet) colorées par la densité.

cette interaction sur l'acoustique rayonnée [figure 7]. En aval de la région d'interaction des jets, la destruction des structures turbulentes les plus énergétiques induit une réduction du bruit de mélange à basse fréquence. L'augmentation des structures turbulentes de petite échelle résultant de l'effet de soufflage des micro-jets conduit à un accroissement du bruit à haute fréquence. Ces simulations permettent d'observer directement la réduction de l'intensité et la longueur des ondes acoustiques qui sont propagées. À grande distance, le niveau de pression acoustique global [OASPL, figure 8]

obtenu par simulation est bien corrélé avec les mesures expérimentales qui indiquent une réduction du bruit de 2.5 dB lorsque les micro-jets sont activés. Les spectres de niveau de pression acoustique [par exemple à 90°, figure 9] sont également cohérents, la différence à basse fréquence étant due à la durée de simulation qui nécessiterait d'être poursuivie.

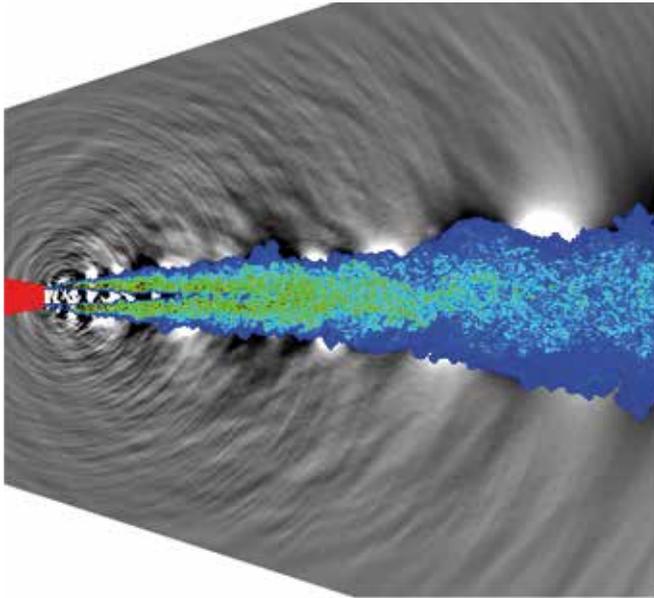


Figure 7 : Iso-contours de vorticité & champ acoustique émis (fluctuations de pression)

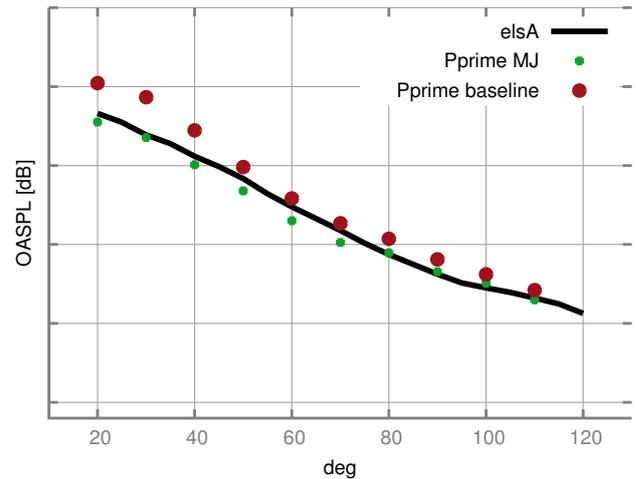


Figure 8 : Signature acoustique à 55 diamètres : OASPL en fonction de l'angle d'observation

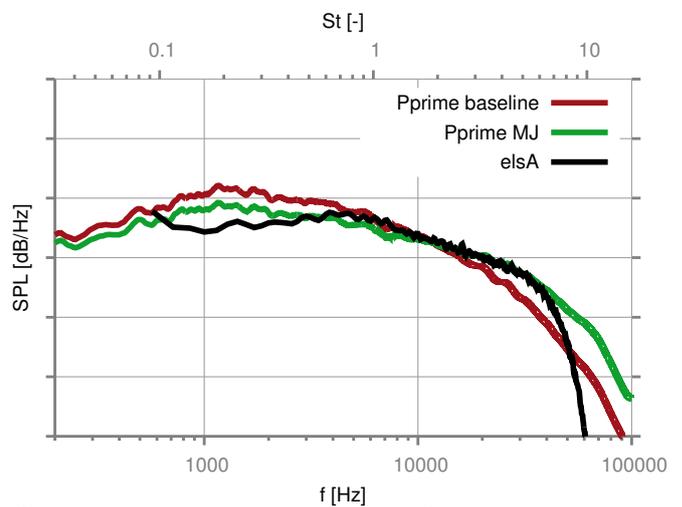


Figure 9 : Signature acoustique à 55 diamètres : Spectre de SPL

5 Perspectives

L'analyse aérodynamique et acoustique détaillée de cette base de données reste à finaliser. Elle permettra à terme de mieux comprendre les mécanismes physiques à l'origine de la réduction du bruit à l'oeuvre dans cette configuration particulière de micro-jets.

Les enseignements tirés de cette expérience permettront aussi d'optimiser la performance de ces simulations, en particulier leur temps de restitution, afin de les rendre plus accessibles et reproductibles.

Dès lors, on disposera d'un outil pour qualifier plus précisément et systématiquement l'influence des paramètres tels que la disposition, le nombre et les caractéristiques des micro-jets ainsi que la nature du contrôle, par exemple continu ou pulsé, sur le niveau de réduction du bruit [9].

Cela ouvrira la voie au développement de stratégies de contrôle actif en conjonction avec l'approche expérimentale, en soufflerie et sur avion.

Les effets d'échelle et de température [18, 9] devront être pris en compte pas à pas afin d'améliorer la représentativité de ces simulations par rapport à des systèmes propulsifs réalistes. Bien sûr, la disponibilité de ressources de calcul intensif demeure une condition indispensable pour continuer à progresser dans cette direction.

Nous remercions le GENCI d'avoir contribué à ces progrès et nous nous félicitons de la collaboration efficace entre les partenaires impliqués dans ce grand challenge, le CERFACS & l'ONERA. Nous remercions également l'institut PPRIME pour nous avoir fourni les données expérimentales nécessaires à la validation du calcul.

6 Références

- [1] <http://www.airbus.com/company/market/global-market-forecast-2016-2035>
- [2] An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies - http://www.aerospacelab-journal.org/sites/www.aerospacelab-journal.org/files/AL07-01_0.pdf
- [3] <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/SGAR.2015.ETM.Vol.1.pdf>
- [4] <http://www.acare4europe.org/mitigate-aircraft-and-airport-noise-0>
- [5] <http://www.iroqua.fr>
- [6] Rapport de synthèse projet REBECCA : Réduction du bruit de jet. Contract report CR/CFD/13/36, CERFACS Toulouse, June 2013. Daviller G., Puigt G., and Boussuge J.-F.
- [7] Rapport commun Pprime CERFACS de synthèse au projet REBECCA. Contract report CR/CFD/13/38, Pprime et CERFACS, Juin 2013. Daviller G., Puigt G., Boussuge J.-F., and Delville J.
- [8] Jet noise reduction using microjets : Status, conclusion and future trends, REBECCA Final Meeting, June, 28th, 2013 SNECMA Villaroche. G. Daviller et al.
- [9] Simulation of Flow Control with Microjets for Subsonic Jet Noise Reduction M. Huet, G. Rahier and F. Vuillot, ONERA - <http://www.intechopen.com/books/applied-aerodynamics/simulation-of-flow-control-with-microjets-for-subsonic-jet-noise-reduction>
- [10] Numerical Study of a Double Stream Jet : ZDES Simulation, Stability Analysis and Noise Reduction, F. Sartor, F. Gand, M. Huet, S. Beneddine, D. Sipp, ONERA - 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference Washington, D.C. - <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-3259>
- [11] A. Fosso-Pouangué, M. Sanjosé, S. Moreau, G. Daviller and H. Deniau, Subsonic Jet Noise Simulations Using Both Structured and Unstructured Grids, AIAA Journal 53 (2015)
- [12] <http://ceat.univ-poitiers.fr/installations/soufflerie-anechoique-bruit-et-vent>
- [13] <http://www.prace-ri.eu/prace-5th-call-publications>
- [14] G. Daviller, J.-F. Boussuge, M. Montagnac, H. Deniau, M. Gazaix and C. Bogey, Jet-noise reduction by fluidic active control, Journal of Sound and Vibration, 340 - Aeroacoustics research in Europe : The CEAS-ASC report on 2013 highlights (2015)
- [15] <http://elsa.onera.fr>
- [16] An Overview of the Multi-Purpose elsA Flow Solver - <http://www.aerospacelab-journal.org/sites/www.aerospacelab-journal.org/files/AL2-10.pdf>
- [17] High performance computing to simulate large scale industrial flows in multistage compressors. International Journal of High Performance Computing Applications, 24(4) :429-443, 2010. N. Gourdain, M. Montagnac, F. Wlassow, and M. Gazaix.
- [18] Effets de température sur le développement et l'acoustique d'un jet subsonique à nombre de Reynolds élevé par simulation des grandes échelles R. Biolchini, C. Bailly, M. Koenig, J.-F. Boussuge - http://acoustique.ec-lyon.fr/publi/biolchioni_cfm15.pdf
- [19] A. Fosso Pouangué, H. Deniau, F. Sicut et P. Sagaut, Curvilinear finite-volume schemes using high-order compact interpolation, J. Comput. Phys. 229(13) (2010)
- [20] C. Bogey, C. Bailly, A family of low dispersive and low dissipative explicit schemes for flow and noise computations, J. Comput. Phys. 194 (1) (2004)
- [21] C. Bogey and C. Bailly, Three-dimensional non-reflective boundary conditions for acoustic simulations : far field formulation and validation test cases, Acta Acustica 88 (2002)
- [22] A. Fosso-Pouangué, H. Deniau, N. Lamarque, T. Poinot, Comparison of outflow boundary conditions for subsonic aeroacoustic simulations, Int. J. Numer. Meth. Fluids 68(10) (2012)
- [23] <http://www.cerfacs.fr/antares>
- [24] Understanding and Reduction of Cruise Jet Noise at Model and Full Scale - J. Huber, S. Sylla, Airbus; K. Britchford, Rolls-Royce, plc.; E. Laurendeau, Sogeti High Tech; V. Fleury, J. Bulté, ONERA; D. Long, Aero Systems Engineering - 30th AIAA Aeroacoustics Conference - <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-3382>

ELSA

Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur

950, rue de Saint-Priest - 34097 Montpellier Cedex 5 - France

Tél. : 04 67 14 14 14 - Fax : 04 67 52 37 63

www.cines.fr - services utilisateurs : svp@cines.fr

Directeur de la publication : Francis DAUMAS

Co-rédacteur en chef : Olivier ROUCHON

