



**HAL**  
open science

## Présentation d'une technique de parallélisation d'un logiciel de PIV 2D-2C utilisée sur super ordinateur

Pierre Elyakime

### ► To cite this version:

Pierre Elyakime. Présentation d'une technique de parallélisation d'un logiciel de PIV 2D-2C utilisée sur super ordinateur. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097652

**HAL Id: hal-02097652**

**<https://hal.science/hal-02097652>**

Submitted on 12 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Présentation d'une technique de parallélisation d'un logiciel de PIV 2D-2C utilisée sur supercalculateur.

Pierre ELYAKIME

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Université de Toulouse, Toulouse, France

Email auteur correspondant : pierre.elyakime@imft.fr

De nombreux algorithmes de vélocimétrie par images de particules ont été proposés ces dernières années pour améliorer la précision des résultats spatiaux et temporels. Des techniques comme la méthode multi grille avec déformation des images, très coûteuses en temps de calcul ont bénéficié de l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs pour être implémentées. Mais ces algorithmes sont généralement développés pour être exécutés sur un seul cœur d'un ordinateur et ne profitent pas de la totalité de la puissance de la machine, en particulier des supercalculateurs. Dans cet article, la technique de parallélisation à mémoire distribuée sera adaptée à un logiciel de traitement de données issues de la PIV 2D-2C développé à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Des tests de performance HPC sur le supercalculateur EOS du centre de Calcul de Midi-Pyrénées (CALMIP) ont montré des gains de temps de calcul proche de  $n$  pour un calcul lancé sur  $n$  cœurs. Un calcul sur le quart des cœurs du nouveau supercalculateur de CALMIP OLYMPE, soit sur 3240 cœurs a été réalisé sur une séquence d'environ 200 000 images de résolution 1280 par 800 pixels. Le calcul en séquentiel sur un cœur a été estimé à 127 jours, en parallèle sur 3240 cœurs ce calcul a duré une heure.

## 1 Introduction

La Vélocimétrie par images de particules (PIV) 2D-2C est de nos jours une technique bien connue, maîtrisée et largement utilisée aussi bien en recherche que pour des applications industrielles. De nombreux algorithmes de PIV ont été proposés pour améliorer la précision des résultats spatiaux et temporels, mais actuellement la principale limitation de la PIV réside dans le temps de post-traitement et de calcul sur les séries d'images générées par les caméras. Cela est d'autant plus vrai que ces caméras utilisées en PIV évoluent rapidement et offrent désormais des temps d'acquisition de plus en plus longs avec des images très résolues : la mémoire embarquée de 288 GB de la caméra Vision Research Phonton V2012 par exemple permet d'obtenir une série de 198589 images de résolution 1280 par 800 pixels. Ces nouvelles capacités permettent des analyses plus complètes, plus précises et de meilleure qualité en mécanique des fluides en particulier pour des écoulements fortement turbulents. Les volumes des séries d'images générées par ces nouvelles caméras sont devenus très importants. Les campagnes expérimentales dépassent couramment les cent mille images soit plus de 100GB de données qui sont exploitées par un traitement numérique de PIV 2D-2C fiable mais lourd et long. Ces algorithmes ont su profiter de l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs, en particulier l'évolution des processeurs lors de ces 20 dernières années, pour améliorer la précision des résultats. Mais la plupart de ces logiciels traitent les données avec un algorithme séquentiel exécuté sur un cœur de calcul et ne profitent pas de la totalité de la puissance de la machine. Ceci est d'autant plus vrai que le nombre d'unités de calcul augmente très fortement tandis que la fréquence des processeurs a tendance à stagner. Au cours des dernières années, des techniques d'accélération des algorithmes ont été développées, comme l'accélération par GP-GPU (Graphics Processing Unit) proposées par S. Tarashima [10]. Même si un facteur de 120 a été obtenu comparé à un traitement séquentiel sur CPU, cela reste insuffisant pour les traitements PIV récents plus lourds et plus longs. Les traitements de plusieurs séquences de plus de cent mille images peuvent durer plusieurs semaines, limitant les expérimentations et analyses. Le but de cet article est de présenter la technique de parallélisation à mémoire distribuée adaptée au logiciel de PIV 2D-2C développé au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Les performances de ce logiciel sur le supercalculateur du centre de CALMIP et les gains de performances obtenus seront détaillés. Avant cela, l'algorithme PIV 2D-2C de ce logiciel sera présenté et une validation sur des images de synthèse et sur un cas expérimental sera réalisée.

## 2 Méthode itérative de PIV multi grille de corrélation croisée par FFT avec déformation des fenêtres d'interrogation

Le logiciel de PIV 2D-2C, nommé CPIV-IMFT est un code non commercial, multi plateforme et parallèle. Il se base sur l'algorithme « Multi-grid continuous windows shift technique with image Distortion » [3]. Cet algorithme itératif multi grille avec déformation des fenêtres d'interrogation détermine récursivement les vecteurs vitesses en résolvant la corrélation croisée par la technique de transformation rapide de Fourier (FFT).

Pour commencer une estimation du champ de vitesse  $(u_0, v_0)$  est calculée à partir de larges fenêtres d'interrogation, 64 par 64 pixels, par une méthode conventionnelle sous pixel de PIV avec résolution de la corrélation par FFT [3, 13]. Une première correction de ce champ de vitesse est apportée en s'inspirant de la technique « Continuous Window Shift technique » (CWS) [3, 4]. L'idée principale de cette méthode est de faire tendre itérativement les déplacements des particules vers un déplacement nul. Pour réaliser cela, les centres des premières et secondes fenêtres d'interrogation de taille 32 par 32 pixels sont décalées continûment et symétriquement d'un demi-vecteur à chaque itération. A l'étape  $n$ , les images  $I_{n+1}$  et  $J_{n+1}$  sont alors reconstruites par interpolation bilinéaire. Cette technique de déplacement d'une fraction de pixel réduit les erreurs dues aux déplacements entiers connus sous le nom du phénomène du peak-locking [4, 11]. Le pic de corrélation est déterminé avec une précision sous pixel en utilisant une interpolation polynomiale du second ordre à partir du logarithmique d'une fonction gaussienne [7]. A la fin des itérations, le pic de corrélation est centré sur l'origine de la matrice de corrélation et la vitesse mesurée est presque nulle. Après chaque itération, les vecteurs correcteurs  $(u_i^c, v_i^c)$  sont ajoutés au vecteur estimateur pour ajuster le champ de vitesse comme présenté dans les Formules 1 et 2. Le nombre d'itérations maximal a été mis à 3, car il faut généralement moins de 3 itérations pour obtenir des déplacements inférieurs à 0,05 pixels [3].

$$u_n(x, y) = u_0(x, y) + \sum_{i=1}^n u_i^c(x, y) \quad (1)$$

$$v_n(x, y) = v_0(x, y) + \sum_{i=1}^n v_i^c(x, y) \quad (2)$$

Ce traitement itératif sous-pixel améliore pour quelques cas seulement la mesure du gradient de vitesse : pour des gradients de vitesse à de petites échelles rencontrées dans les écoulements turbulents l'approche présente quelques limites [3]. Pour améliorer cela, une technique de déformation de l'image est ajoutée à la technique itérative de décalage sur des fenêtres d'interrogation de taille décroissante. Cette méthode est réalisée pour annuler autant que faire se peut le déplacement des particules sur les images des particules. Le pic de corrélation est centré successivement avec les itérations sur l'origine de la matrice de corrélation. Les vecteurs correcteurs  $(u_i^c, v_i^c)$ , calculés avec une précision sous pixel, sont ajoutés comme dans les formules 1 et 2 de la technique CWS pour corriger le vecteur initial. La déformation continue des images de particules est réalisée en retirant des images le champ prédit initialement pour la première itération et le champ corrigé pour les itérations suivantes. A l'étape  $n$ , les images déformées  $I_{n+1}$  et  $J_{n+1}$  obtenues selon les Formules ?? et ?? sont reconstruites par une interpolation « sinus cardinale » [5, 8].

$$I_{n+1}(i, j) = I_0(x_p, y_p) = I_0 \left( i - \frac{u_n(i, j)}{2}, j - \frac{v_n(i, j)}{2} \right) ?? \quad (3)$$

$$J_{n+1}(i, j) = v_0(x_q, y_q) = J_0 \left( i - \frac{u_n(i, j)}{2}, j - \frac{v_n(i, j)}{2} \right) ?? \quad (4)$$

Dans les expressions  $(x_p, y_p)$  et  $(x_q, y_q)$ , le champ de vitesse  $[u_n(i, j), v_n(i, j)]$  peut se retrouver hors du maillage du champ de vitesses. Dans ce cas, il est reconstruit par une interpolation polynomiale du second ordre à partir de 6 vecteurs voisins [6]. Cette interpolation représente le point central de l'algorithme. Son ordre élevé peut annuler les effets des gradients de vitesse sans avoir à les calculer,

Test cases	Stream wise displacement (U)		Crossflow displacement (V)	
	Relative error [%]	Absolute Error [pixel]	Relative error [%]	Absolute error [pixel]
Poiseuille	1.8	0.02	n.c	n.c
Lamb-Oseen Vortex	4.8	0.0086	4.9	0.0086
Uniform flow	0.4	0.0047	0.5	0.0052
Sink flow	5.6	0.0052	5.6	0.0053
Vortex flow	6.2	0.0066	7.9	0.0064
Shear flow	5.7	0.0069	n.c	n.c

Table 1: Erreur relative et absolue entre un champ de vitesse moyen calculé avec CPIV-IMFT à partir des images synthétiques provenant du projet FLUID et des résultats théoriques.

mais aussi introduire des erreurs importantes dans la mesure du champ de vitesse correcteur lorsque des vecteurs parasites sont utilisés [3].

Pour éviter cela, avant chaque itération de la déformation, le champ de vecteur est validé par seuillage sur la valeur du pic ratio (rapport du pic de corrélation principal sur pic de corrélation secondaire) et par seuillage sur les vecteurs voisins par la méthode des résidus de la médiane normalisés par la médiane des résidus [3, 12]. Les vecteurs parasites sont remplacés en utilisant l'interpolation polynomiale du second ordre précédente. La taille des fenêtres d'interrogation est alors réduite et le processus de déformation itératif est répété sur ces nouvelles fenêtres d'interrogation.

### 3 Validation avec des images de synthèse et observation sur un cas expérimental

Le logiciel CPIV-IMFT a été validé sur plusieurs cas tests de mécanique des fluides à partir d'images générées numériquement et fournies par le projet Européen FLUID [1]. Pour chaque cas, un champ moyen de vitesse a été calculé avec CPIV-IMFT. Les erreurs relatives et absolues ont été calculées à partir des résultats théoriques et sont présentées dans le Tableau 1. Les erreurs relatives sont comprises entre 0,4 et 7,9% pour l'ensemble des cas tests correspondant à des erreurs absolues en dessous du dixième de pixel.

e logiciel a également été utilisé sur un jeu de données expérimentales acquies dans le cadre du projet européen Smartwing Morphing Center (SMC) (M. Braza, <http://smartwing.org/SMS/EU/>). Une séquence de 1000 images a été traitée par le logiciel CPIV-IMFT et le logiciel commercial DAVIS de la société LaVision. La différence des champs de vitesse moyennés temporellement a été calculée et est représentée sur les deux histogrammes de la Figure 1. Le premier histogramme montre que 95% des valeurs du champ horizontal (streamwise displacement) calculé avec CPIV-IMFT ont une différence d'un peu moins du dixième de pixels avec le logiciel commercial DAVIS. Et 99% des valeurs du champ vertical (crossflow displacement) ont une différence de moins du dixième de pixel.

Les effets dus au ré-échantillonnage ou peak-locking des fenêtres d'interrogation après les étapes de déplacement et de déformation sont étudiés avec ce même jeu de donnés. Le peak-locking peut être observé sur l'histogramme 1D des deux composantes du champ de vitesse. Si la distribution présente des pics aux valeurs entières alors le peak-locking est important, alors que si l'histogramme est plat, le peak-locking est faible. La Figure 2 présente l'histogramme du cas étudié pour les logiciels CPIV-IMFT et DAVIS en excluant du champ de vitesse la partie masquée et les bords de l'image. La partie la plus sensible au peak-locking car la moins influencée par la physique correspond à des déplacements compris entre  $[-7,5 ; -0,5]$  pixels. On constate que les distributions sont similaires pour les deux logiciels avec un histogramme plat dans la zone intéressée.

Pour valider cette première observation, la partie fractionnaire des déplacements compris entre  $[-7,5 ; -0,5]$  pixels a été calculée en retranchant la partie entière de chaque déplacement. Ainsi seules les parties fractionnaires comprises entre  $-0,5$  et  $+0,5$  restent. La distribution est montrée dans la Figure 3. On observe là aussi un histogramme plat, sans pic important à l'origine. Un pic à l'origine et des distributions faibles près des déplacements fractionnaires de  $\pm 0,5$  pixels indiquent une concentration de déplacements entiers et donc un effet important du peak-locking.

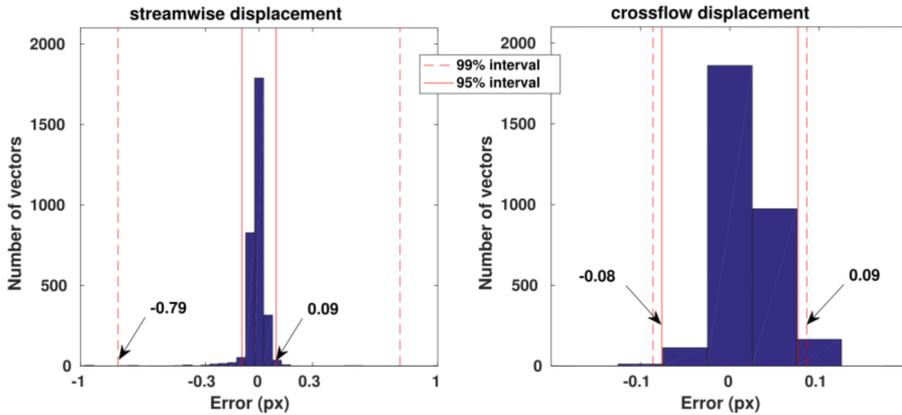


Figure 1: Histogramme des différences des erreurs moyennes entre CPIV-IMFT et DAVIS

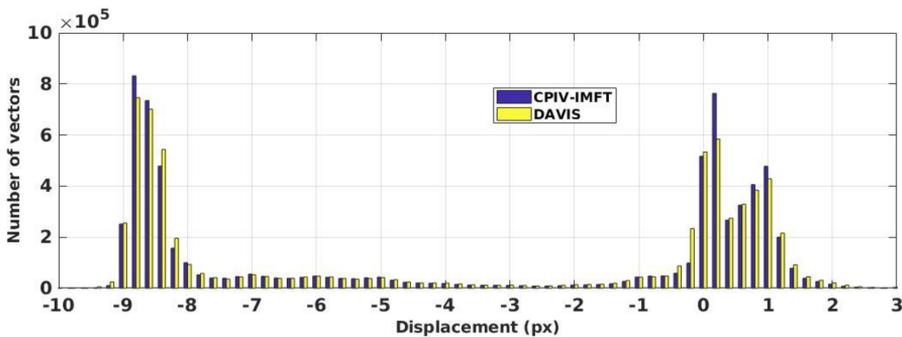


Figure 2: Distribution du champ de vitesse (CPIV-IMFT / DAVIS)

Pour compléter cette étude, E.J.F. Overmars [8] a mesuré le degré du peak-locking à partir de la formule 5.

$$C = 1 - \frac{N_{min}}{N_{max}} \quad (5)$$

où  $N_{min}$  et  $N_{max}$  correspondent aux distributions les plus petites et les plus grandes de l'histogramme des valeurs fractionnaires. Lorsque  $C = 0$ , le peak-locking est absent, tandis que lorsque  $C = 1$  le peak-locking est très fort. Le calcul de cette variable est faite dans l'intervalle  $[-7,5; -0,5]$  pixels. Les deux logiciels ont des valeurs très proches aux alentours de 0,27. L'ensemble des études menées pour observer et mesurer le peak-locking sur un jeu de données expérimental montre le bon comportement du logiciel CPIV-IMFT face à ce phénomène.

## 4 Technique de parallélisation du logiciel CPIV-IMFT

L'originalité de cet article porte sur la parallélisation de ce logiciel avec la technique de parallélisation à mémoire distribuée « Single Program Multiple Data » (SPMD). Dans cette approche schématisée sur la Figure 4, les tâches sont réparties et exécutées simultanément sur plusieurs unités de calcul (cœurs) avec des entrées (ou données) différentes. Cette technique peut être utilisée sur les ordinateurs de bureau dans quel cas le calcul est réparti sur les cœurs physiques et virtuels de la machine ou bien plus généralement sur les supercalculateurs. Ces derniers sont un ensemble de processeurs reliés entre eux par un réseau de communication dédié. En général, deux processeurs constituent un nœud du supercalculateur et chaque processeur possède plusieurs cœurs. Les tâches sont réparties sur les cœurs du supercalculateur. Les nœuds communiquent entre eux par messages à travers le réseau dédié : un processus utilise une fonction pour envoyer un message et l'autre processus utilise une autre fonction pour recevoir le message. Cette communication extra nœud se fait par un réseau d'interconnexion physique rapide, Infiniband par exemple, qui reste toutefois plus lent qu'un transfert de données interne au nœud.

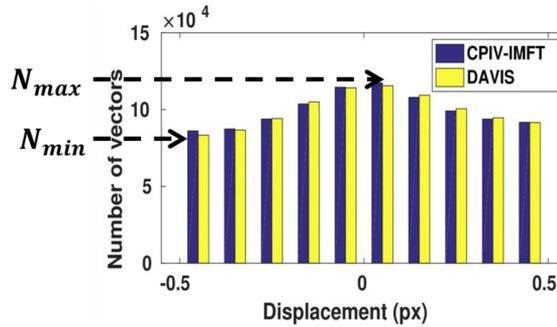


Figure 3: Distribution de la partie fractionnaire du champ de vitesse (CPIV-IMFT / DAVIS)

Les communications et donc les échanges de données entre nœuds sont par conséquent un facteur limitant du temps de calcul. Pour appliquer ce modèle de parallélisme, une surcouche au logiciel CPIV-IMFT

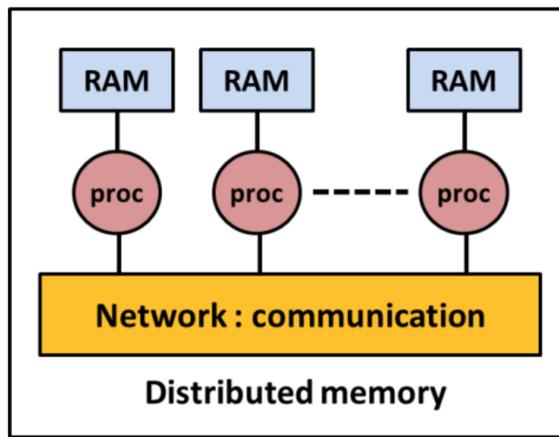


Figure 4: Architecture à mémoire distribuée

a été développée avec la bibliothèque Message Passing Interface (MPI) afin de lancer les traitements de PIV 2D-2C en parallèle. Cette surcouche divise la séquence initiale d'images en plusieurs sous séquences et les répartit sur les différents cœurs d'un ordinateur ou d'un supercalculateur. Chacun des cœurs exécute indépendamment le logiciel de PIV 2D-2C CPIV-IMFT sur ces sous séquences. De cette façon, les communications MPI se limitent à une barrière MPI après l'écriture du fichier de paramètres de chaque cœur et avant l'exécution de CPIV-IMFT en parallèle. A la fin du traitement PIV, les résultats sont renommés pour retrouver l'ordre de la séquence initiale. La Figure 5 schématise la technique de parallélisation SPMD appliquée au logiciel CPIV-IMFT pour un calcul PIV 2D-2C d'une séquence de 200 images sur deux nœuds de calcul. Les images sont réparties par sous séquences de cinq images sur 40 cœurs, soit 2 nœuds de 2 processeurs de 10 cœurs. Chaque cœur exécute le logiciel CPIV-IMFT pour le traitement de PIV 2D-2C. A la fin des calculs, les résultats sont renommés pour retrouver l'ordre original de la séquence. La surcouche parallèle au logiciel CPIV-IMFT a été conçue pour que les communications entre nœuds soient quasi-nulles.

## 5 Performance de CPIV-IMFT sur les supercalculateurs

Les performances de la parallélisation du logiciel CPIV-IMFT ont été testées sur le supercalculateur du méso-centre de calcul de Midi-Pyrénées EOS. Ce supercalculateur fabriqué par le constructeur français Bull et d'une puissance crête de 274 TéraFlops soit 274 milles milliard d'opérations en virgule flottante par seconde répartit les 12240 unités de calcul (cœurs) sur 612 nœuds. Chaque nœud est équipé de deux processeurs INTEL *Ivy Bridge* 2,8 Ghz avec 10 cœurs et d'une mémoire de 64 Go. La communication entre les nœuds se fait par le réseau physique d'inter-connexion rapide *Infiniband Full Data Rate*.

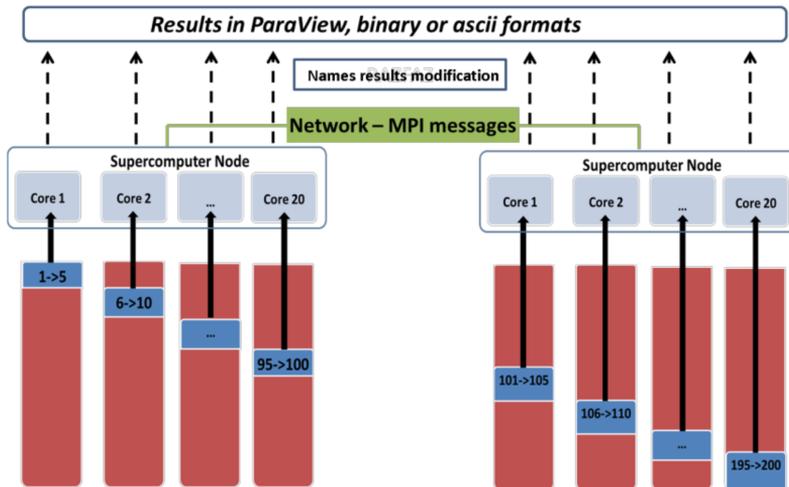


Figure 5: Répartition d'un calcul PIV pour 200 images sur 2 nœuds

L'architecture de ce super calculateur est montrée dans la Figure 6. Avec la quasi absence de communi-

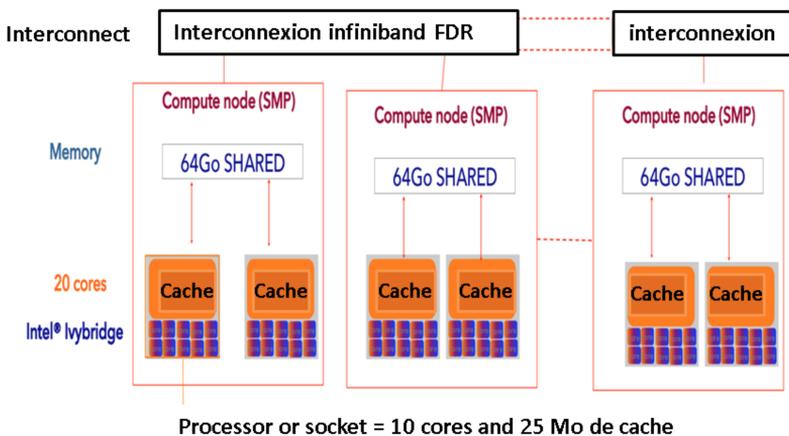


Figure 6: Architecture du super calculateur EOS (N. Renon, cecam\_2017\_first\_part.pdf)

cations entre nœuds dans la surcouche parallèle de CPIV-IMFT un facteur d'accélération correspondant au nombre de nœuds utilisés est attendu. Les performances parallèles (ou HPC) du logiciel CPIV-IMFT ont été évaluées sur le supercalculateur EOS de CALMIP à partir du jeu de données complets utilisé dans la partie 3 de ce présent article. La séquence traitée est composée de 66772 images (128GB) et a été utilisée sur 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 et 40 nœuds (soit 10, 20, 40, 100, 200, 400, 600 et 800 cœurs) du supercalculateur EOS. La courbe d'évolution du temps de traitement en fonction du nombre de cœurs utilisés est montrée sur la Figure 7. Un gain de temps de 36,75 entre 1 et 40 nœuds, soit entre 20 et 800 cœurs, est observé. Ce facteur d'accélération n'est pas tout à fait linéaire puisque le gain est de 36,75 et non de 40 entre 1 et 40 nœuds. L'accélération du traitement parallèle s'observe sur la courbe de « speed-up » présentée dans la Figure 8 et construite à partir de la formule 6, représentant le rapport du temps  $T(1)$  pris par un élément de calcul sur le temps  $T(n)$  pris par  $n$  éléments de calcul. Pour cette étude, l'élément de calcul considéré est le nœud plutôt que le cœur car le nœud est un élément de calcul complet, tandis que le temps de calcul sur un cœur dépend de l'utilisation des autres cœurs sur le nœud.

$$S(n) = \frac{T_{20cores}(1)}{T_{20cores}(n)} \quad (6)$$

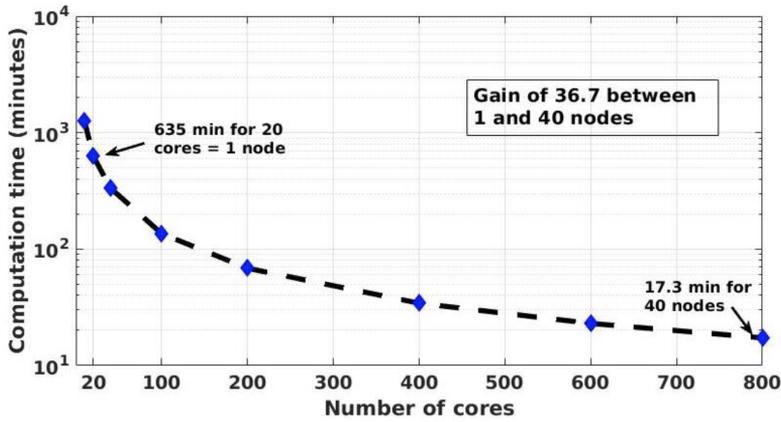


Figure 7: Temps de restitution du logiciel CPIV-IMFT sur EOS (CALMIP)

La courbe de speed-up de la Figure 8 montre une accélération de 36,75 pour un traitement sur 40 nœuds. La différence entre le facteur d'accélération obtenu (36,75) et attendu (40) peut s'expliquer par plusieurs raisons : le nombre d'images à traiter n'est pas un multiple du nombre de cœurs : plusieurs cœurs ont un calcul supplémentaire. Un calcul parallèle sur beaucoup de nœuds entraîne des sous séquences plus petites, certaines peuvent posséder des images plus compliquées à traiter (plus de vecteurs faux, plus d'itérations) et provoque un ralentissement général du calcul. Pour évaluer plus efficacement le code, il faudra traiter ultérieurement une séquence de 65600 images composées de la même paire d'images. Les

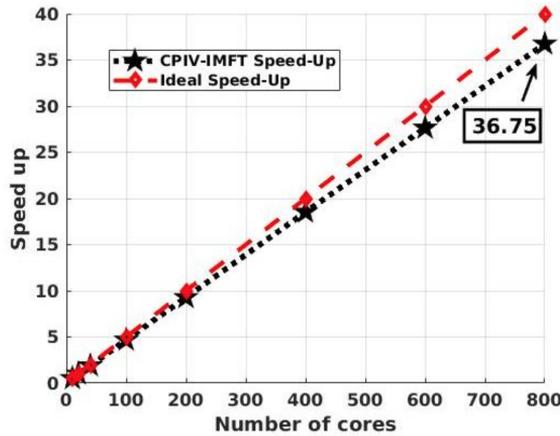


Figure 8: Courbe de speed up du logiciel CPIV-IMFT sur EOS (CALMIP)

performances parallèles d'un logiciel sont également évaluées en mesurant la « scalabilité » (ou efficacité d'échelle) d'une application. Cette mesure indique l'efficacité d'un code à utiliser un nombre croissant de nœuds. La courbe d'efficacité du logiciel CPIV-IMFT est montrée dans la Figure 9, et construite à partir de la formule (7), où  $n$  est le nombre de nœuds et  $S(n)$  est le speed-up pour  $n$  nœuds.

$$Eff(n) = \frac{S(n)}{n} \quad (7)$$

La courbe d'efficacité de la Figure 9 montre que la parallélisation du logiciel est très performante avec une efficacité qui tend vers 0,92 pour 100 cœurs et qui semble se stabiliser aux alentours de 0,91 pour 800 cœurs.

Les Figure 7, 8 et 9 montrent que la parallélisation du logiciel CPIV-IMFT est très performante. La courbe de speed-up de la Figure 8 est proche de la courbe idéale. Le facteur gagné est ainsi presque linéairement dépendant du nombre de nœuds utilisés. Le gain de temps obtenu entre un calcul effectués sur 1 cœur et sur 800 cœurs se calcul en multipliant le speed-up obtenu sur 40 nœuds par le nombre de

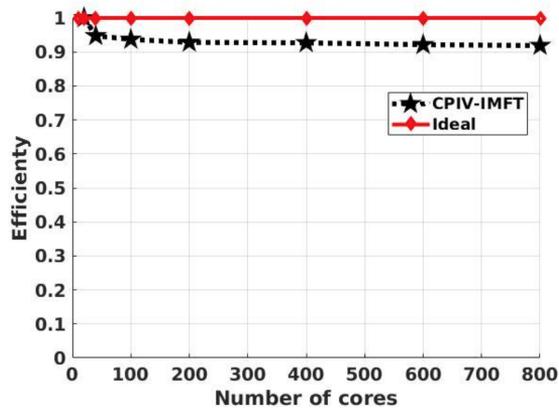


Figure 9: Courbe d'efficacité de la scalabilité du logiciel CPIV-IMFT sur EOS (CALMIP)

cœurs par nœuds, c'est-à-dire  $20 \times S(40)$ , soit un gain de temps de 735. Ainsi, le calcul PIV en parallèle s'effectue en 17,5 minutes sur 800 cœurs tandis qu'en séquentiel sur un seul cœur il aurait duré plus de 8 jours. Le traitement sur une très longue séquence d'images : 198589 images de résolution 1280 par 800 pixels (provenant du projet de M. Braza, <http://smartwing.org/SMS/EU/>) a également été testé dans le cadre du « workshop applicatif » organisé par le centre de calcul de Midi-Pyrénées pour tester le nouveau supercalculateur OLYMPE. Ce supercalculateur de modèle SEQUANA ATOS-BULL d'une puissance crête de 1,365 Péta flop par seconde est formé de 13 464 cœurs répartis sur 360 nœuds de calcul. Chaque nœud est équipé de deux processeurs Intel(r) SKYLAKE 6140 à 2n3 Ghz avec 18 cœurs et sont interconnectés par le réseau de connexion physique Infiniband EDR à 100 Gb/s. Le logiciel CPIV-IMFT a été lancé sur le quart des cœurs d'OLYMPE soit 3240 cœurs. Le traitement en parallèle des 198589 images sur 3240 cœurs a duré seulement 1 heure et 4 minutes au lieu de 127 jours comparés à un calcul sur un seul cœur. Ce calcul a permis d'estimer un gain de temps de plus de 3000.

## 6 Conclusion

Une technique de parallélisation à mémoire distribuée adaptée à un logiciel de traitement de données issues de la PIV2D- 2C a été présentée dans cet article. Cette parallélisation a été développée en tant que surcouche au logiciel CPIV-IMFT dont l'algorithme de PIV 2D-2C est itératif multi grille avec une technique de déformation des fenêtres d'interrogation. Ce logiciel a été présenté dans cet article et validé sur des images de synthèses montrant une erreur relative comprise entre 0,4% et 7,9% correspondant à moins d'un dixième de pixels. Une étude sur un cas expérimental a montré que l'algorithme était robuste face au phénomène du peak-locking et que 95% des résultats étaient très proches, de l'ordre du dixième de pixels, des résultats provenant du logiciel commercial DAVIS de la société LaVision. Ce présent article a surtout permis de montrer que l'approche parallèle combinée à une utilisation sur un supercalculateur permet d'obtenir des gains en temps de traitement très importants. Une accélération de 36,7 a été constatée pour un calcul sur 66772 images entre 1 et 40 nœuds du supercalculateur EOS, correspondant à un gain de temps de 735 entre 1 et 800 cœurs. Un traitement PIV sur une séquence d'environ 200 000 images exécuté sur 90 nœuds soit 3240 cœurs du nouveau supercalculateur OLYMPE de CALMIP a permis d'obtenir les résultats en seulement 1h04min au lieu de 127 jours pour un calcul sur un seul cœur, soit un gain de temps estimé à plus de 3000. Cette nouvelle approche pour le traitement de données issues de la PIV2D-2C permet ainsi aux expérimentateurs de traiter leurs données en quelques dizaines de minutes. Le facteur limitant est le temps de transfert depuis le pc d'acquisition jusqu'au supercalculateur. En rapprochant la puissance de calcul de l'expérimentation le temps de transfert serait fortement diminué et permettrait un temps de traitement en temps réel. Les expérimentateurs pourraient ainsi ajuster leur manipulation en fonction des résultats acquis dans la même journée.

## 7 Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce aux ressources HPC de CALMIP sous l'attribution P16016 (Calcul en Midi-Pyrénées).

## References

- [1] J. Carlier, Second set of fluid mechanics image sequences. European Project Fluid image analysis and description, 2005
- [2] G. Jodin, V.M. (2017). Dynamics of a hybrid morphing wing with active open loop vibrating trailing edge by time- resolved PIV and force measure. *Journal of Fluids and Structures*.
- [3] B. Lecordier, M. Trinité., Advanced PIV algorithms with Image Distortion. Validation and Comparison using Synthetic Images of Turbulent Flow. PIV03 Symposium, Busan, Korea, 2003
- [4] B. Lecordier, J.C Lecordier and M. Trinité, Iterative sub-pixel algorithm for the cross-correlation PIV measurements, In 3rd International Workshop on PIV, Santa Barbara, 1999
- [5] I. Lourenco, A. Krothapalli (1995) On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV. *Exp Fluids* 18:421–428
- [6] A. Nealen, An as-short-as-possible introduction to the least squares, weighted least squares and moving least squares methods for scattered data approximation and interpolation, <http://www.nealen.com/projects>, 130:150, 2004
- [7] H. Nobach, N. Damaschke and C. Tropea, High-precision sub-pixel interpolation in PIV/PTV image processing, *Int. Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2004
- [8] E.F.J Overmars, Warncke N.G.W., Poelma C. and Westerweel J., Bias errors in PIV: the pixel locking effect revisited, 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 05-08 July, 2010
- [9] T. Roesgen , Optimal subpixel interpolation in particle image velocimetry. *Exp Fluids* 35:252–256, 2003
- [10] S. Tarashima, M. T. , GPU accelerated direct cross-correlation PIV with window deformation, *Int. Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2010
- [11] J. Westerweel, Effect of Sensor Geometry On the Performance of PIV Interrogation, In Ninth International Symposium on Application of Laser Techniques to fluid Mechanics – Lisbon 13th-16th 1998, pages 1.2.1-1.2.8, 1998
- [12] J. Westerweel, F. Scarano, Universal outlier detection for PIV data, *Experiments in Fluids*, 2005, P.1096-1100
- [13] C.E. Willert, M.G. , Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 1991, P.181-193