

Visualisation Volumique Interactive Out-of-Core de séquences temporelles de données 3D multivariées

A GPU Scalable Out-of-Core Volume Rendering for 3D Temporal Multivariate Data

Antoine THEBAULT, Stéphanie PREVOST, Laurent LUCAS, Leonardo BRENNER

English Abstract—Scientific visualization enables a deeper insight into data structures and properties. For Gas and fluid simulations, particularly those resulting from real-world gas captures or Computational Fluid Dynamics (CFD) models, require the analysis and integration of multivariate attributes alongside dynamic temporal variations. We present our framework for a scalable volume rendering application designed for with an improved Out-of-core system to handle massive 3D temporal multivariate datasets from CFDs.

Our rendering framework, called FRIGAS (Fluid Rendering Infrastructure for Gas and Atmospheric Simulations), introduces a novel pipeline which leverages improvements in Direct Volume Rendering (DVR) techniques for large scale visualizations, addressing constraints regarding temporal structured data and multivariate analysis for interactive spatial and temporal navigation without HPC resources.



1 INTRODUCTION

La visualisation scientifique évolue en parallèle de l’augmentation constante de la taille des ensembles de données, du nombre de méthodes de génération de ces données et de la demande croissante en ressources de calcul adaptées. Les jeux de données atteignent désormais des tailles de l’ordre du pétaoctet, générés par des processus de captation ou de simulation.

Des travaux antérieurs [1], [6], [12] ont exploré ce défi en proposant de nouvelles méthodes de calcul pour le rendu volumique, permettant une gestion efficace et interactive de grands volumes de données, même en l’absence de ressources de calcul haute performance (HPC). Parmi ces approches, les méthodes Out-Of-Core se distinguent comme une solution prometteuse, offrant une base solide pour la visualisation à grande échelle de résultats issus de la mécanique des fluides et des captures de gaz.

Dans cet article, nous présentons FRIGAS, une application de rendu volumique optimisée, ainsi que son pipeline théorique. Nos contributions se concentrent sur la visualisation interactive de séquences temporelles (t timesteps) massives, multivariées (w

variables), issues de simulateurs de dynamique des fluides (CFD - *Computational Fluid Dynamics*), en $3D + t + w$. Notre approche vise à offrir aux utilisateurs un accès simplifié à ces ensembles de données complexes, tout en maintenant des performances de rendu élevées et simultanées sur les différentes variables étudiées.

2 TRAVAUX EXISTANTS

Les solutions existantes pour la visualisation des simulations CFD se déclinent en plusieurs approches. Par exemple, FluidX3D [8] intègre directement un rendu par Marching Cubes dans un moteur de simulation basé sur la méthode de Lattice Boltzmann, exploitant les capacités d’optimisation d’OpenCL. Cependant, cette approche in-situ reste étroitement couplée à la simulation elle-même, ce qui limite les possibilités d’exploration temporelle et multivariée des jeux de grande taille. Les utilisateurs de CFD se tournent souvent vers des outils comme VTK [11] et Paraview [2], qui offrent une interface intuitive et une multitude d’options d’analyse. Néanmoins, leur moteur de rendu volumique montre des limites lorsqu’il s’agit de répondre aux besoins de calcul intensif, notamment sans infrastructure HPC pour la distribution des tâches.

Dans le cadre de notre recherche, nous nous concentrons sur la visualisation scientifique efficace de données multivariées, avec un accent sur le traitement simultané de plusieurs variables par voxel, nécessitant une gestion optimisée des transferts de données et du rendu sur GPU. Parmi les méthodes existantes, la Residency Octree [6] améliore les octrees

- Antoine THEBAULT: Université de Reims Champagne-Ardenne, CEA, LRC DIGIT, LICIS, chaire OSMIUM, Reims, France
E-mail: antoine.thebault@univ-reims.fr.
- Stéphanie PREVOST: Université de Reims Champagne-Ardenne, CEA, LRC DIGIT, LICIS, Reims, France
E-mail: stephanie.prevost@univ-reims.fr.
- Laurent LUCAS: Université de Reims Champagne-Ardenne, CEA, LRC DIGIT, LICIS, Reims, France
E-mail: laurent.lucas@univ-reims.fr.
- Leonardo BRENNER: Université de Reims Champagne-Ardenne, CEA, LRC DIGIT, LICIS, chaire OSMIUM, Reims, France
E-mail: leonardo.brenner@univ-reims.fr.

classiques en ajoutant un cache hiérarchique persistant, optimisant ainsi les performances sur les jeux multicanaux. Toutefois, cette solution ne prend pas en charge l’exploration temporelle et la visualisation multivariée simultanée dans un même ensemble.

De même, le Dynamic Scheduling [5] utilise des R-Trees pour accélérer les requêtes sur des données volumineuses en $3D + t$, mais reste principalement limité aux jeux mono-variés. Enfin, les méthodes de rendu Out-Of-Core [9] et [1] basées sur des tables de pages virtuelles GPU se révèlent efficaces pour les volumes structurés tels que définis par [10] en $3D$ et $3D+t$, mais leur utilisation de briques fixes de $128bits$ par voxel limite leur flexibilité.

3 CONTRIBUTION

Nous proposons un pipeline adaptatif composé de modules indépendants pour davantage de flexibilité. Ce pipeline est directement intégré dans notre application nommée FRIGAS (Fluid Rendering Infrastructure for Gas and Atmospheric Simulations). Une interface de rendu, au centre du pipeline, reçoit les briques de données prétraitées et normalisées, qui sont ensuite chargées sur le CPU puis GPU. Grâce à sa conception modulaire, notre pipeline prend en charge divers modes de rendu et méthodes de prétraitement des données, tout en restant indépendant des structures et formats de données. Le défi principal est d’associer le rendu par briques à un accès aux données optimisé pour le GPU, tout en restant agnostique aux formats et en permettant divers modes de visualisation.

Cette structure nous permet d’intégrer un rendu Out-Of-Core, tel que présenté par [9], pour des données structurées en $3D + t$ avec w variables. Cette solution s’appuie sur les améliorations existantes proposées par [1]. Il s’agit de proposer un traitement des données multivariées avec un système Out-of-Core adapté et extensible afin d’obtenir une visualisation simultanée de plusieurs variables par timestep. Pour cela, plusieurs développements ont été effectués pour définir une gestion des briques avec variables tout en gardant un cache GPU générique indépendamment de leur contenu. Selon la définition de leur taille ($128bits$ par voxel par défaut), les briques sont reconstituées à la volée, avec sélection dynamique des variables, via un masque. Les autres structures de données (Pages de caches à multi échelle ou MRPD notamment [9]) ont été retouchées afin d’inclure une pré-mémoire virtuelle (seuillage min/max par brique, puis par page) et de nouveaux attributs de sélection pour les *flags* d’état (*EmptyIf* selon la variable par exemple). Ceci est fait à la fois pour conserver les capacités de sélection en multivarié, tout en permettant des optimisations lors d’opérations de seuillage.

La visualisation simultanée que nous proposons reste actuellement limitée à un nombre défini de variables par timestep, sélectionnées parmi l’ensemble

des variables. Pour les jeux de données multivariés, l’utilisateur peut choisir d variables parmi les w disponibles afin de les visualiser de manière interactive.

Notre processus de prétraitement prend en charge plusieurs formats de données volumétriques $3D$ dont le format standard NSDF [7], ainsi que les fichiers NetCDF, adaptés aux jeux en $3D + t + w$.

Pour évaluer notre solution, nous avons sélectionné trois jeux de données distincts :

- Un premier est issu de simulations de propagation de fumée basées sur des méthodes de CFD [3]. Il se compose de 10 variables de type *float32* par voxel, stockées au format NetCDF, avec un total de 2005 timesteps sur une grille de résolution $61 \times 61 \times 81$.
- Le deuxième jeu de données provient de captures par caméra LiDAR, mesurant les concentrations de gaz méthane [13]. Il contient 8 variables de type *float32* par voxel, réparties sur une grille de $72 \times 32 \times 44$ avec 488 timesteps.
- Le troisième jeu est un ensemble volumineux avec une grille de $1536 \times 512 \times 512$ et 600 timesteps. En raison de sa taille, chaque variable génère jusqu’à 3 Go par timestep, même en l’absence d’analyse multivariée.

Enfin, l’application FRIGAS permet d’explorer les données $3D$ multivariées aussi bien via l’architecture Out-of-Core que l’ensemble de la visualisation. L’interface d’abstraction du pipeline facilite également la connexion à des applications externes ou via des API. Le système de visualisation repose sur différents modules de rendu adaptés aux variables (MIP, minIP, meanIP, MIDA [4], Rendu volumique (DVR) combiné pour 1 à N variables simultanées, Isosurfaces, Projections de propriétés $3D$ avec position, profondeur, normales, etc.). La mise à jour des frames se fait à la demande, selon les interactions utilisateur ou les requêtes temporelles, permettant une navigation temporelle et spatiale interactive.

4 CONCLUSION

En conclusion, nous avons présenté notre contribution à la visualisation à grande échelle de données $3D + t + w$ au moyen d’un système Out-Of-Core (OOC), structuré autour d’un pipeline générique et d’une application de visualisation complète. Cette solution offre une approche performante pour l’exploration interactive de grands jeux de données multivariés.

À l’avenir, nous envisageons d’étendre cette contribution par des études supplémentaires sur la visualisation multivariée et temporelle en temps réel, afin de mieux analyser les résultats scientifiques. Nous prévoyons également des améliorations sur le chargement des données, ainsi que sur l’architecture de notre système, notamment par l’intégration de réseaux de neurones pour une gestion plus intelligente et efficace des briques.

REFERENCES

- [1] W. Alexandre-Barff, H. Deleau, J. Sarton, F. Ledoux, and L. Lucas. A GPU-based Out-of-core Architecture for Interactive Visualization of AMR Time Series Data. In R. Bujack, D. Pugmire, and G. Reina, editors, *Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, pages 1–11. The Eurographics Association, 2023.
- [2] U. Ayachit. *The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application*. Kitware, Inc., Clifton Park, NY, USA, 2015.
- [3] M. G. Bosilovich, R. Lucchesi, and M. Suarez. Merra-2: File specification. Technical Report 9, GMAO Office, 2015.
- [4] S. Bruckner and M. E. Gröller. Instant Volume Visualization using Maximum Intensity Difference Accumulation. *Computer Graphics Forum*, 28(3):775–782, June 2009.
- [5] M. Flatken, A. Berres, J. Merkel, I. Hotz, A. Gerndt, and H. Hagen. Dynamic Scheduling for Progressive Large-Scale Visualization. In E. Bertini, J. Kennedy, and E. Puppo, editors, *Eurographics Conference on Visualization (EuroVis) - Short Papers*, pages 36–41. The Eurographics Association, 2015.
- [6] L. Herzberger, M. Hadwiger, R. Krüger, P. Sorger, H. Pfister, E. Gröller, and J. Beyer. Residency octree: A hybrid approach for scalable web-based multi-volume rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(1):1380–1390, Jan. 2024.
- [7] Klacansky. OpenVis shared dataset. <https://klacansky.com/open-scivis-datasets/>, 2016.
- [8] M. Lehmann. Combined scientific cfd simulation and interactive raytracing with OpenCL. In *Proceedings of the 10th International Workshop on OpenCL, IWOCCL '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [9] J. Sarton, N. Courilleau, Y. Remion, and L. Lucas. Interactive visualization and on-demand processing of large volume data: A fully GPU-based Out-of-Core approach. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(10):3008–3021, 2020.
- [10] J. Sarton, S. Zellmann, S. Demirci, U. Güdükbay, W. Alexandre-Barff, L. Lucas, J. M. Dischler, S. Wesner, and I. Wald. State-of-the-art in large-scale volume visualization beyond structured data. *Computer Graphics Forum*, 42(3):491–515, 2023.
- [11] W. Schroeder, K. Martin, and B. Lorensen. *The Visualization Toolkit (4th ed.)*. Kitware, 2006.
- [12] Q. Wu, D. Bauer, M. J. Doyle, and K.-L. Ma. Interactive volume visualization via multi-resolution hash encoding based neural representation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(8), 5404–5418., 2023.
- [13] R. Yuvaraj, T. Lauvaux, P. Ciais, J.-L. Bonne, L. Joly, A. Groshenry, and A. Ba. High-resolution modelling of methane plumes: validation and sensitivity experiments to explore UAV and satellite observations. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 18958, Apr. 2024.