

Distances entre signatures topologiques

Julien Tierny

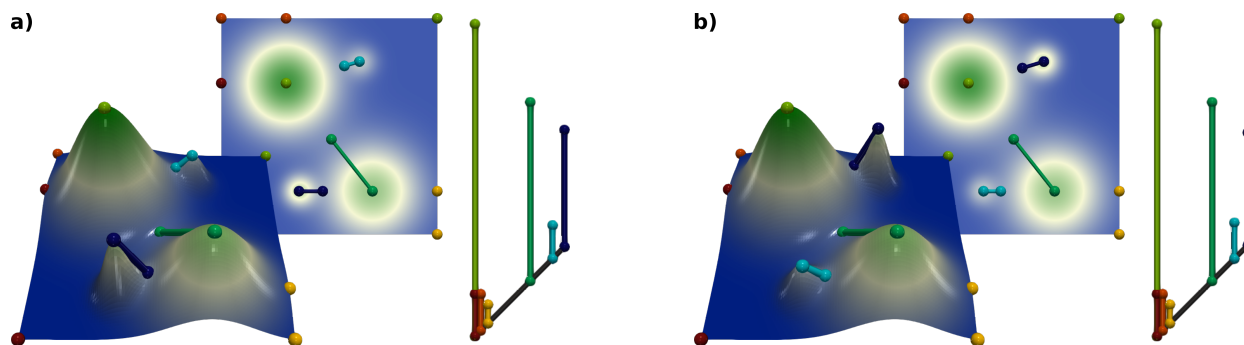


Fig. 1. Le sujet en une image – l’homologie persistante est un outil théorique puissant, qui permet en pratique d’introduire une mesure de bruit sur les structures topologiques, comme les singularités (sphères de couleur) dans cet exemple de carte d’élévation. Cette mesure de bruit, appelée *persistance*, permet de visualiser et de mesurer des structures topologiques à plusieurs échelles d’importance et d’extraire efficacement et avec précision les structures d’intérêt dans un jeu de données. La persistance est souvent associée au *diagramme de persistance* (à droite sur ces exemples), qui donne une représentation visuelle de la distribution des structures topologiques (ici des singularités) en fonction de leur plage de valeur dans les données. Ces diagrammes, grâce à leur stabilité [12], jouent un rôle central en analyse topologique de données: ils constituent en effet une représentation réduite des données particulièrement pertinente, qui capture les structures les plus importantes des données. Ainsi, il est possible dans de nombreuses applications d’effectuer des analyses avancées directement sur le diagramme plutôt que sur les données initiales, qui sont en général plusieurs ordres de grandeur plus volumineuses. Dans de nombreuses applications, il est nécessaire de comparer des jeux de données entre eux, à l’aide d’une mesure de distance (en apprentissage automatique par exemple). Dans ce cadre, il est très efficace de mesurer des distances entre diagrammes de persistance plutôt qu’entre les données initiales. La distance de Wasserstein entre diagramme est très utilisée en pratique: elle consiste à trouver un appariement optimal entre les structures des deux diagrammes à comparer (deux barres appareillées sont représentées avec la même couleur ci-dessus). Cependant, comme illustré dans cet exemple, plusieurs jeux de données significativement différents (les gaussiennes cyan et bleues foncées ont été permutées) peuvent admettre le même diagramme de persistance et la métrique de Wasserstein indiquera alors une distance nulle entre ces deux jeux de données. Cet exemple illustre le manque de pouvoir discriminant des diagrammes de persistance, qui pose problème dans de nombreuses applications pratiques. Dans ce stage, nous souhaitons répondre à ce problème en définissant et étudiant des mesures de distances entre signatures topologiques plus sophistiquées (arbres de jointure, graphes de Reeb, complexes de Morse-Smale), pour introduire des distances plus fidèles géométriquement aux données, et donc plus pertinentes dans les applications.

1 CONTEXTE

L’analyse topologique de données (TDA) [10, 13, 32, 40, 41] est une discipline à cheval entre informatique et mathématiques appliquées qui propose d’analyser des données complexes au vu de leur structure, de leur topologie [31]. Elle connaît un essor important depuis quelques années, dû principalement à ses succès récents en *data science* [32, 41] et en *machine learning* [9], ainsi qu’aux développements open-source récents la mettant en oeuvre [3, 44].

Parmi les différents outils d’analyse développés en TDA (comme le graphe de Reeb [19, 20, 33, 46], le complexe de Morse-Smale [16, 22, 29], etc...), l’homologie persistante [13, 14] est un outil fondamental qui propose de mesurer l’importance des structures topologiques (composantes connexes, cycles, cavités, etc.) selon leur *durée de vie* (leur plage de valeur dans les données). Cette théorie permet d’introduire une mesure de bruit sur les structures topologiques, appelée *persistance*, dont la stabilité a été démontrée d’un point de vue théorique [12], et qui permet en pratique de distinguer avec efficacité et précision les structures d’intérêt du bruit (voir Fig. 1). L’efficacité pratique de l’homologie persistante a été documentée dans de nombreuses applications, comme en imagerie médicale [4, 8], en biologie cellulaire [23], en mécanique des fluides [11, 18, 25, 36, 42], en physique des matériaux [15, 24, 28],

en combustion [6, 7, 21, 27], en chimie moléculaire [5, 17], en astrophysique [35, 38], en traitement de surfaces [43, 45, 47, 49], en compression [37] ou encore en monitoring de simulations numériques haute-performance [34].

2 PROBLÈME SCIENTIFIQUE

Les données considérées sont typiquement représentées sous la forme d’une fonction scalaire linéaire par morceaux $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$, associant une valeur réelle à chaque sommet d’une triangulation \mathcal{M} , qui représente un objet géométrique 2D ou 3D. En pratique, f représente dans les applications des niveaux de concentrations [15], des potentiels [17], des intensités [4], des températures [7], etc. Les sous-ensembles de niveau $f_{-\infty}^{-1}(i)$ sont définis comme la pré-image de l’intervalle ouvert $]-\infty, i[$ sur \mathcal{M} . Simplement, il s’agit de l’ensemble des points de l’objet au dessous d’une certaine valeur i . Quand i augmente, $f_{-\infty}^{-1}(i)$ change de topologie en un nombre fini de configurations: ses nombres de Betti [50] (nombres de composantes connexes, de cycles indépendants, de cavités, etc...) changent sur des points singuliers, appelés points critiques (sphères de couleur, Fig. 1). Chaque structure topologique de $f_{-\infty}^{-1}(i)$ est donc créée sur un premier point critique à une valeur i , puis détruite sur un second point critique à une valeur $j > i$. Le diagramme de persistance $\mathcal{D}(f)$ [12, 14] (Fig. 1) est une représentation graphique de ce processus, où chaque classe d’homologie persistante (chaque structure topologique) est représentée par une barre verticale pour laquelle la cordonnée en abscisse correspond à la valeur i et les

• Julien Tierny is with Sorbonne Université, CNRS, LIP6 UMR 7606, France. E-mails: julien.tierny@sorbonne-universite.fr.

extrémités en ordonnées correspondent à i et j . La *persistance* de la classe est donnée par $|j - i|$. Dans ce diagramme, le bruit topologique apparaît donc sous la forme de petites barres, proche de la diagonale ($|j - i| \rightarrow 0$), voir [40].

Dans un diagramme, la distance entre deux points a et b (deux sphères, Fig. 1) peut être donnée par la norme L_p (où 2 est une valeur usuelle du paramètre p):

$$d_p(a, b) = \sqrt[p]{(a_x - b_x)^p + (a_y - b_y)^p} \quad (1)$$

Ensuite, la distance de Wasserstein entre deux diagrammes $\mathcal{D}(f)$ et $\mathcal{D}(g)$, notée d_p^W , est donnée par:

$$d_p^W(\mathcal{D}(f), \mathcal{D}(g)) = \min_{\phi \in \Phi} \left(\sum_{x \in \mathcal{D}(f)} (d_p(x, \phi(x))) \right) \quad (2)$$

où Φ représente l'ensemble de toutes les mises en correspondance possibles entre les structures du diagramme $\mathcal{D}(f)$ et celle de $\mathcal{D}(g)$. Simplement, cette mesure repose sur une mise en correspondance optimale entre les barres des diagrammes, et mesure ensuite la distance entre diagrammes comme la somme des distances entre barres mises en correspondances par ϕ . Cette distance peut être calculée rapidement, de manière exacte [30, 36] ou approchée [26, 48].

Cependant, comme illustré Fig. 1, plusieurs jeux de données significativement différents (les gaussiennes cyan et bleues foncées ont été permutées) peuvent admettre le même diagramme de persistance et la métrique de Wasserstein indiquera alors une distance nulle entre ces deux jeux de données. Cet exemple illustre le manque de pouvoir discriminant des diagrammes de persistance, qui pose problème dans de nombreuses applications pratiques.

Dans ce stage, nous souhaitons répondre à ce problème en définissant et étudiant des mesures de distance entre signatures topologiques plus sophistiquées (arbres de jointure [20], graphes de Reeb [33, 46], complexes de Morse-Smale [22, 44]), pour ainsi introduire des distances plus fidèles géométriquement aux données et donc plus pertinentes dans les applications. Nous définirons et implémenterons des algorithmes efficaces pour leur calcul (si possible progressifs) et nous évaluerons leur pertinence dans le cadre de suivi dans le temps de structures topologiques dans des exemples de mécanique des fluides. Parmi les pistes possibles, nous étudierons la possibilité d'éteindre la distance de Wasserstein des diagrammes de persistance vers les arbres de jointures en considérant des distances d'édition entre graphes [39].

3 PERSPECTIVES

Ce stage est proposé dans l'optique d'une poursuite en thèse de doctorat sur le thème de l'analyse topologique de données.

De manière plus générale, ce stage et sa possible poursuite en thèse apporteront un bagage de compétences scientifiques et techniques pointues et recherchées dans le domaine de la *data science* et de l'analyse et de la visualisation interactive de données scientifiques (TDA, TTK [44], ParaView [51]). Il constitue donc une expérience fortement valorisable pour accéder à des fonctions R&D sur ces thèmes, dans le monde académique comme industriel (Kitware, EDF, Total, CEA, etc.).

4 ORGANISATION DU STAGE

Le stage pourra se dérouler selon les étapes suivantes:

1. Etudier la bibliographie existante sur:
 - l'analyse topologique de données [13, 40];
 - la distance de Wasserstein [12, 36];
 - autres mesures de distance existantes [1, 2, 39]
2. Imaginer et mettre en oeuvre un algorithme de calcul de distance géométriquement stable entre signatures topologiques (par exemple entre arbres de jointure);

3. Valider l'approche d'un point de vue expérimental sur une variété de jeux de données pratiques provenant de divers contextes applicatifs, notamment dans le cadre d'appariement de structures au cours du temps.

Les programmes d'expérimentation seront écrits en C++, sous la forme de modules pour la plate-forme open-source d'analyse topologique de données "*Topology ToolKit*" (TTK) [44] (intégrée à ParaView [51]).

Le stage peut durer de 16 à 24 semaines, selon les disponibilités du stagiaire. Il s'agit d'un stage rémunéré (rémunération académique standard, environ 500 euros par mois).

5 PROFIL

Nous recherchons un(e) étudiant(e) très motivé(e)! Curiosité, ouverture d'esprit, créativité, et ténacité sont les aptitudes de caractère que nous recherchons. Ce stage s'adresse aux étudiants en dernière année de master en informatique ou mathématiques appliquées (et domaines connexes) ou aux étudiants en dernière année d'école d'ingénieurs. Le stagiaire devra être à l'aise avec la programmation en C++, ou motivé pour le devenir. Un intérêt pour la 3D, la géométrie, la topologie et plus généralement pour les mathématiques et l'informatique est requis.

6 LIEU

Ce stage aura lieu au laboratoire d'informatique (LIP6) de Sorbonne Université, en plein coeur de Paris (arrêt Jussieu, lignes 7 et 10). Il sera encadré par Julien Tierny, chercheur au CNRS, expert en analyse topologique de données pour la visualisation et l'analyse de données scientifiques (<http://lip6.fr/Julien.Tierny>).

7 CANDIDATURES

Nous invitons les candidat(e)s à nous faire parvenir leur lettre de candidature accompagnée d'un CV mis à jour à Julien Tierny (julien.tierny@sorbonne-universite.fr). Nous vous encourageons à nous contacter par email pour toute question ou pour discuter davantage du sujet.

REFERENCES

- [1] U. Bauer, X. Ge, and Y. Wang. Measuring distance between reeb graphs. In *Symp. on Comp. Geom.*, 2014.
- [2] K. Beketayev, D. Yeliussizov, D. Morozov, G. H. Weber, and B. Hamann. Measuring the distance between merge trees. In *Proc. of TopoInVis*. 2014.
- [3] T. Bin Masood, J. Budin, M. Falk, G. Favelier, C. Garth, C. Guenet, P. Guillou, L. Hofmann, P. Hristov, A. Kamakshidasan, C. Kappe, P. Klacansky, P. Laurin, J. Levine, J. Lukaszczuk, D. Sakurai, M. Soler, P. Steneteg, J. Tierny, W. Usher, J. Vidal, and M. Wozniak. An Overview of the Topology ToolKit. In *TopoInVis*, 2019.
- [4] A. Bock, H. Doraiswamy, A. Summers, and C. Silva. Topoangler: Interactive topology-based extraction of fishes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2017.
- [5] R. A. Boto, J. C. Garcia, J. Tierny, and J.-P. Piquemal. Interpretation of the reduced density gradient. *Molecular Physics*, 2016.
- [6] P. Bremer, G. Weber, J. Tierny, V. Pascucci, M. Day, and J. Bell. A topological framework for the interactive exploration of large scale turbulent combustion. In *Proc. of IEEE eScience*, 2009.
- [7] P. Bremer, G. Weber, J. Tierny, V. Pascucci, M. Day, and J. Bell. Interactive exploration and analysis of large scale simulations using topology-based data segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011.
- [8] H. Carr, J. Snoeyink, and M. van de Panne. Simplifying flexible isosurfaces using local geometric measures. In *IEEE VIS*, 2004.
- [9] F. Chazal, L. Guibas, S. Oudot, and P. Skraba. Persistence-based clustering in Riemannian manifolds. *Journal of the ACM*, 2013.
- [10] F. Chazal and J. Tierny. Topological data analysis, online class. <http://lip6.fr/Julien.Tierny/topologicalDataAnalysisClass.html>.
- [11] F. Chen, H. Obermaier, H. Hagen, B. Hamann, J. Tierny, and V. Pascucci. Topology analysis of time-dependent multi-fluid data using the reeb graph. *Computer Aided Geometric Design*, 2013.
- [12] D. Cohen-Steiner, H. Edelsbrunner, and J. Harer. Stability of persistence diagrams. In *Symp. on Comp. Geom.*, 2005.

- [13] H. Edelsbrunner and J. Harer. *Computational Topology: An Introduction*. American Mathematical Society, 2009.
- [14] H. Edelsbrunner, D. Letscher, and A. Zomorodian. Topological persistence and simplification. *Disc. Comput. Geom.*, 2002.
- [15] G. Favelier, C. Gueunet, and J. Tierny. Visualizing ensembles of viscous fingers. In *IEEE SciVis Contest*, 2016.
- [16] R. Forman. A user’s guide to discrete Morse theory. *Adv. in Math.*, 1998.
- [17] D. Guenther, R. Alvarez-Boto, J. Contreras-Garcia, J.-P. Piquemal, and J. Tierny. Characterizing molecular interactions in chemical systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2014.
- [18] D. Guenther, J. Salmon, and J. Tierny. Mandatory critical points of 2D uncertain scalar fields. *Computer Graphics Forum (Proc. of EuroVis)*, 2014.
- [19] C. Gueunet, P. Fortin, J. Jomier, and J. Tierny. Contour forests: Fast multi-threaded augmented contour trees. In *IEEE LDAV*, 2016.
- [20] C. Gueunet, P. Fortin, J. Jomier, and J. Tierny. Task-based Augmented Merge Trees with Fibonacci Heaps. In *IEEE LDAV*, 2017.
- [21] A. Gyulassy, P. Bremer, R. Grout, H. Kolla, J. Chen, and V. Pascucci. Stability of dissipation elements: A case study in combustion. *Computer Graphics Forum (Proc. of EuroVis)*, 2014.
- [22] A. Gyulassy, P. T. Bremer, B. Hamann, and V. Pascucci. A practical approach to morse-smale complex computation: Scalability and generality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2008.
- [23] A. Gyulassy, D. Guenther, J. A. Levine, J. Tierny, and V. Pascucci. Conforming morse-smale complexes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2014.
- [24] A. Gyulassy, A. Knoll, K. Lau, B. Wang, P. Bremer, M. Papka, L. A. Curtiss, and V. Pascucci. Interstitial and interlayer ion diffusion geometry extraction in graphitic nanosphere battery materials. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2015.
- [25] J. Kasten, J. Reininghaus, I. Hotz, and H. Hege. Two-dimensional time-dependent vortex regions based on the acceleration magnitude. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011.
- [26] M. Kerber, D. Morozov, and A. Nigmatov. Geometry helps to compare persistence diagrams. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 22, 2016. Article No. 1.4.
- [27] D. E. Laney, P. Bremer, A. Mascarenhas, P. Miller, and V. Pascucci. Understanding the structure of the turbulent mixing layer in hydrodynamic instabilities. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2006.
- [28] J. Lukaszczuk, G. Aldrich, M. Steptoe, G. Favelier, C. Gueunet, J. Tierny, R. Maciejewski, B. Hamann, and H. Leitte. Viscous fingering: A topological visual analytic approach. In *Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes*, 2017.
- [29] J. Milnor. *Morse Theory*. Princeton U. Press, 1963.
- [30] D. Morozov. Dionysus. <http://www.mrzv.org/software/dionysus>, 2010. Accessed: 2016-09-15.
- [31] MyWhyU. A humorous look at the topology of curved space. <https://www.youtube.com/watch?v=p2oFJPh2yMw&list=PL09E9E697F585A58C>.
- [32] V. Pascucci, X. Tricoche, H. Hagen, and J. Tierny. *Topological Methods in Data Analysis and Visualization: Theory, Algorithms and Applications*. Springer, 2010.
- [33] G. Reeb. Sur les points singuliers d’une forme de Pfaff complètement intégrable ou d’une fonction numérique. *Acad. des Sci.*, 1946.
- [34] E. Santos, J. Tierny, A. Khan, B. Grimm, L. Lins, J. Freire, V. Pascucci, C. Silva, S. Klasky, R. Barreto, and N. Podhorszki. Enabling advanced visualization tools in a web-based simulation monitoring system. In *Proc. of IEEE eScience*, 2009.
- [35] N. Shivashankar, P. Pranav, V. Natarajan, R. van de Weygaert, E. P. Bos, and S. Rieder. Felix: A topology based framework for visual exploration of cosmic filaments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016. <http://vgl.serc.iisc.ernet.in/felix/index.html>.
- [36] M. Soler, M. Plainchault, B. Conche, and J. Tierny. Lifted Wasserstein matcher for fast and robust topology tracking. In *Proc. of IEEE Symposium on Large Data Analysis and Visualization*, 2018.
- [37] M. Soler, M. Plainchault, B. Conche, and J. Tierny. Topologically controlled lossy compression. In *Proc. of IEEE PacificVis*, 2018.
- [38] T. Sousbie. The persistent cosmic web and its filamentary structure: Theory and implementations. *Royal Astronomical Society*, 2011. <http://www2.iap.fr/users/sousbie/web/html/indexd41d.html>.
- [39] R. Sridharamurthy, T. B. Masood, A. Kamakshidasan, and V. Natarajan. Edit distance between merge trees. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018.
- [40] J. Tierny. Introduction to topological data analysis. <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01581941/file/manuscript.pdf>.
- [41] J. Tierny. *Topological Data Analysis for Scientific Visualization*. Springer, 2018.
- [42] J. Tierny and H. Carr. Jacobi fiber surfaces for bivariate Reeb space computation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2016.
- [43] J. Tierny, J. Daniels, L. G. Nonato, V. Pascucci, and C. Silva. Interactive quadrangulation with Reeb atlases and connectivity textures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012.
- [44] J. Tierny, G. Favelier, J. A. Levine, C. Gueunet, and M. Michaux. The Topology ToolKit. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2017. <https://topology-tool-kit.github.io/>.
- [45] J. Tierny, D. Guenther, and V. Pascucci. Optimal general simplification of scalar fields on surfaces. In *Topological and Statistical Methods for Complex Data*. Springer, 2014.
- [46] J. Tierny, A. Gyulassy, E. Simon, and V. Pascucci. Loop surgery for volumetric meshes: Reeb graphs reduced to contour trees. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2009.
- [47] J. Tierny and V. Pascucci. Generalized topological simplification of scalar fields on surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2012.
- [48] J. Vidal, J. Budin, and J. Tierny. Progressive Wasserstein Barycenters of Persistence Diagrams. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE VIS)*, 2019.
- [49] A. Vintescu, F. Dupont, G. Lavoué, P. Memari, and J. Tierny. Conformal factor persistence for fast hierarchical cone extraction. In *Eurographics (short papers)*, 2017.
- [50] Wikipedia. Betti numbers. https://en.wikipedia.org/wiki/Betti_number.
- [51] Wikipedia. ParaView. <https://en.wikipedia.org/wiki/ParaView>.