

# Simplification de maillages CAO avec échantillonnage *anti-aliasing*

Jean-Luc PEYROT, Frédéric PAYAN et Marc ANTONINI

Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis - UMR7271 - UNS CNRS  
2000 route des Lucioles - Les Algorithmes - bât. Euclide B, 06900 Sophia Antipolis, France  
peyrot@i3s.unice.fr, fpayan@i3s.unice.fr, am@i3s.unice.fr

**Résumé** – Nous proposons une méthode de simplification de maillages surfaciques triangulaires basée sur un échantillonnage en disques de Poisson. La fidélité géométrique à l'objet original étant indispensable, notre méthode cherche aussi à préserver les arêtes saillantes tout au long du processus, depuis l'échantillonnage jusqu'à l'étape de triangulation des sommets. La méthode proposée est basée sur l'association d'une technique efficace d'échantillonnage direct par "lancer de fléchettes" (*dart throwing* en anglais) - satisfaisant les caractéristiques de bruit bleu et préservant les arêtes saillantes de l'objet - avec une méthode simple et robuste de triangulation pour éviter l'effet d'*aliasing géométrique* le long de ces arêtes. Notre méthode de simplification produit ainsi des maillages triangulaires de bonne qualité géométrique et visuelle, et dont les sommets présentent des caractéristiques satisfaisantes de bruit bleu.

**Abstract** – We propose a simplification scheme for triangular surface meshes based on Poisson disk sampling. In order to well approximate the geometry of the input shape, our simplification scheme takes into account the sharp features all along the process, from the sampling to the final triangulation. Our method consists in combining one efficient sampling method based on direct dart throwing - providing good blue noise properties and preserving sharp features - and a simple triangulation scheme - to avoid geometric aliasing artefacts during the meshing. Our method produces simplified meshes of high geometrical and visual qualities, while having satisfactory blue noise properties.

## 1 Introduction

De nombreuses méthodes de simplification de surfaces [5] ou de remaillage en général [2] sont proposées depuis maintenant plus de deux décennies. La plupart de ces méthodes proposent un ré-échantillonnage de la maille initiale, et vise principalement la fidélité de la géométrie du maillage de sortie à la surface d'origine, ainsi que la validité et la qualité de la triangulation obtenue.

Depuis peu, des travaux sont focalisés sur le développement de techniques d'échantillonnage de surfaces afin que la géométrie de la surface générée présente de bonnes caractéristiques spectrales [3]. De nombreuses techniques exploitent la distribution en disques de Poisson qui produit des grilles d'échantillonnage dont les caractéristiques sont proches de celles du bruit bleu. En effet, les propriétés de bruit bleu ont une grande importance pour de nombreuses applications comme le rendu 3D photoréaliste [7], le plaquage de textures [10], ou le traitement géométrique [12].

On distingue principalement trois approches pour échantillonner des points sur une surface selon une distribution de Poisson : i) les *méthodes basées paramétrisation* comme [1], qui travaillent dans un domaine paramétrique planaire où l'échantillonnage est plus aisé, mais qui souffrent de distorsions lors du plongement des échantillons sur la surface ; ii) les *méthodes directes* comme [4] (*i.e.* travaillant directement sur la surface), qui produisent des nuages de points présentant de bonnes qualités de bruit bleu, mais qui sont souvent complexes à cause des

calculs de géodésiques ; iii) les *méthodes de relaxation* telles que [17], qui présentent des caractéristiques proches du bruit bleu mais de manière moindre vis-à-vis des méthodes directes.

Un autre problème, commun à certaines de ces techniques, est que les caractéristiques géométriques de l'objet original ne sont pas prises en compte. Ces méthodes ne fonctionnent donc bien que sur des surfaces lisses. Les particularités géométriques telles que les arêtes saillantes seront perdues et la maille obtenue à partir de tels nuages de points produira des artefacts visuels inacceptables le long de ces arêtes (appelés souvent *aliasing géométrique* comme illustré sur la figure 1. De plus, la plupart de ces méthodes ne gèrent que les surfaces de faible complexité topologique.

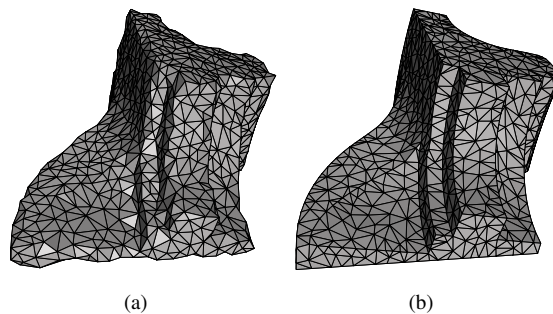


FIGURE 1 – Mise en évidence de l'*aliasing géométrique*. FANDISK reconstruit sans (a) ou avec (b) respect des arêtes saillantes.

Notre objectif consiste à créer une méthode de simplification de maillages surfaciques triangulaires de type CAO (arêtes saillantes, coins, genre élevé...) qui soit efficace en terme de complexité de calcul et qui contrôle simultanément les propriétés spectrales et géométriques des résultats.

Pour cela, l'algorithme proposé combine une méthode originale d'échantillonnage direct de la surface basée sur un "lancer de fléchettes", qui est efficace et peu complexe par rapport aux autres méthodes de l'état de l'art - permettant d'assurer une distribution en disques de Poisson de la géométrie - avec une technique simple et robuste de détection d'arêtes saillantes (voir Section 2). Le nuage de points généré ainsi aura globalement des propriétés de bruit bleu, tout en préservant les spécificités géométriques de la surface initiale [14]. Dans un second temps, notre algorithme utilise une technique originale de triangulation des échantillons qui évite les effets d'*aliasing* autour des zones saillantes (voir Section 3). Cette technique, qui est la principale contribution de cet article, utilise l'algorithme de Dijkstra [8] pour générer grâce à une implémentation parallélisée sur GPU, une partition de Voronoï géodésique sur la surface du maillage initial.

Les résultats expérimentaux montrent que notre méthode de simplification produit des maillages ayant non seulement des propriétés de bruit bleu satisfaisantes, mais sont aussi fidèles géométriquement et visuellement à la surface originale (voir Section 4).

## 2 Echantillonnage direct

Cette partie décrit succinctement la technique proposée pour produire, à partir du maillage d'entrée dense  $M$ , le nuage de points  $V_s$  qui sera par la suite triangulé pour obtenir sa version simplifiée  $M_s$ . Un des avantages de notre méthode est de gérer des maillages 2-variétés, ouverts ou fermés, et de genre quelconque.

Notre technique d'échantillonnage s'appuie sur la méthode de "lancer de fléchettes" (*dart throwing* en anglais) pour générer une distribution en disques de Poisson (répartition spatiale uniforme mais irrégulière des échantillons). Pour cela, l'algorithme choisit un échantillon aléatoirement parmi les sommets de  $M$ , et veille à ce qu'il respecte une distance minimale avec tous les autres échantillons déjà placés. En 2D, cette distance minimale est représentée par un disque centré sur l'échantillon. Pour une surface plongée dans l'espace 3D, on utilise le terme "disque géodésique" qui correspond à la zone de la surface autour de l'échantillon où chaque sommet se trouve à une distance géodésique inférieure à la distance minimale donnée. De plus, étant donné nos objectifs, la grille d'échantillonnage dépend de la courbure, afin de mieux approximer la surface initiale : plus la courbure en un point est importante, plus le disque géodésique associé sera petit (voir Figure 2).

La conservation des saillances sur  $M_s$  est garantie par une étape préalable de classification des sommets de  $M$  en fonc-

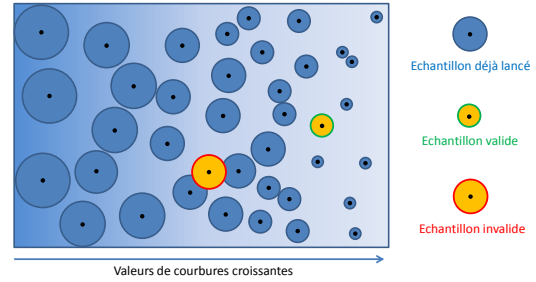


FIGURE 2 – Principe du "lancer de fléchettes" (*dart throwing* en anglais) sur un plan.

tion de la courbure qui guide ensuite l'échantillonnage pour traiter progressivement les *coins*, les *arêtes saillantes* et enfin les zones *lisses*. Nous recommandons la lecture de [14] pour obtenir plus de détails et de résultats sur cette technique.

## 3 Triangulation des échantillons

Cette section expose la contribution proposée pour trianguler l'ensemble de points  $V_s$  issu de l'étape d'échantillonnage afin d'obtenir le maillage simplifié  $M_s$ . Pour cela, beaucoup de méthodes de la littérature utilisent la triangulation de Delaunay, duale d'une partition de Voronoï centroïdale. Ces méthodes proposent diverses algorithmes pour valider la topologie des maillages finaux et utilisent souvent l'algorithme *Fast Marching* [15] pour approximer le diagramme de Voronoï géodésique. On peut citer par exemple les travaux de Peyré *et al.* [13], qui utilisent une approximation du diagramme de Voronoï pour faire du remaillage par paramétrisation.

Dans notre contexte, la principale contrainte lors de la triangulation est la conservation des arêtes saillantes. En effet, positionner des points sur les arêtes saillantes durant l'étape d'échantillonnage ne suffit pas à éviter l'*aliasing géométrique*, comme expliqué ci-dessous.

### 3.1 Technique proposée

Pour trianguler les points du nuage  $V_s$ , nous commençons par créer son diagramme de Voronoï sur le maillage d'entrée  $M$  (i.e. chaque point de  $V_s$  est un site de la partition). Pour générer la connectivité du maillage final  $M_s$ , il faut relier par une arête les sites dont les frontières des cellules de Voronoï s'intersectent. C'est la création de ces arêtes qui peut provoquer l'*aliasing géométrique*, comme l'illustre la figure 3(b). On peut observer que deux échantillons positionnés sur une arête saillante (en bleu), peuvent avoir des cellules de Voronoï disjointes (rouge et orange), du fait de leur éloignement trop important par rapport aux autres échantillons. Par conséquent l'arête saillante est perdue après triangulation.

Pour pallier à ce problème, nous ajoutons une pondération aux distances géodésiques  $d_{géod}$  de toutes les arêtes du maillage

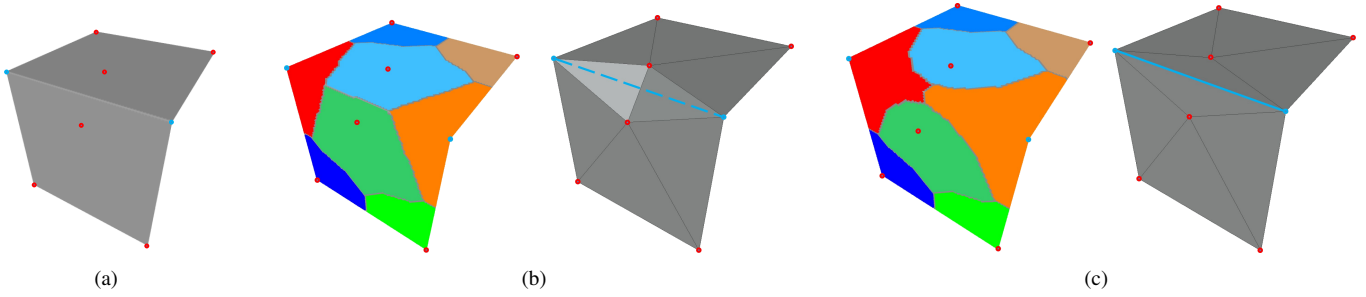


FIGURE 3 – Méthode proposée pour éviter l’*aliasing* le long des arêtes saillantes. (a) Surface initiale. (b) et (c) Partition et triangulation obtenues respectivement sans et avec la technique proposée.

$M$  lors de la croissance de régions comme suit :

$$d_{pond}(s1, s2) = \alpha \cdot d_{géo}(s1, s2), \quad (1)$$

avec  $s1$  et  $s2$  deux sommets voisins sur  $M$  et  $\alpha$  une pondération égale à 1 si  $s1$  ou  $s2$  ne se trouve pas sur une arête saillante (géodésique classique), ou inférieure à 1 si  $s1$  et  $s2$  appartiennent tous deux à une arête saillante. Cette distance pondérée a pour effet d’accélérer la croissance de régions le long des arêtes saillantes et ainsi d’étirer les cellules de Voronoï le long de ces dernières, assurant ainsi leur contact (voir Figure 3(c)). Empiriquement, une valeur de  $\alpha$  égale à 0,3 est efficace pour tous les maillages testés.

### 3.2 Implémentation parallélisée sous GPU

Pour calculer le diagramme de Voronoï basé géodésique, on utilise l’algorithme de Dijkstra [8], qui est rapide, fiable et relativement simple à implémenter. Afin d’accélérer encore le processus de triangulation, nous avons choisi d’implémenter une version optimisée pour GPU à partir de [11]. En effet, la génération d’une partition de Voronoï est relativement aisée à paralléliser en utilisant un *thread* par échantillon. Cependant la mise à jour de l’appartenance des sommets de  $M$  à une cellule donnée doit être sécurisée au niveau de leurs frontières grâce à l’utilisation d’une exclusion mutuelle, permettant ainsi de ne pas générer de valeurs aberrantes (voir Figure 4).

## 4 Résultats et conclusion

La qualité spectrale de notre technique d’échantillonnage ayant déjà été démontrée dans [14], nous nous concentrons ici sur la fidélité géométrique (RMSE [6]) et la qualité visuelle (MSDM2 [9]) des maillages simplifiés par notre algorithme : voir tableau 1. Nous comparons nos résultats à ceux générés par la méthode de l’état de l’art [16], nommée par la suite VCP. D’un point de vue géométrique (RMSE), notre méthode obtient des résultats similaires à VCP, voire légèrement meilleurs lorsque le genre augmente (SOCKET et CASTING). D’un point de vue visuel (MSDM2), nous observons la même tendance, celle-ci est confirmée par la figure 5, où l’on voit que les arêtes saillantes sont globalement bien préservées avec notre méthode.

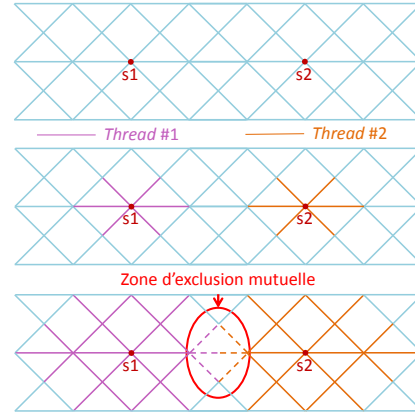


FIGURE 4 – Principe de la croissance de régions parallélisée sous GPU. On constate l’existence d’une zone (cercle rouge) où des valeurs aberrantes pourraient apparaître si les *threads* #1 et #2 modifiaient en même temps la distance d’un même sommet à l’échantillon le plus proche.

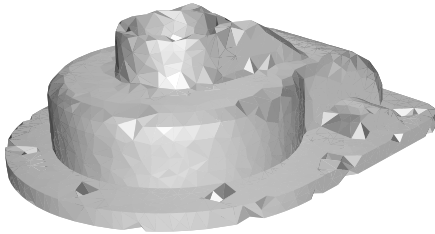
D’un point de vue robustesse, nous avons remarqué que notre algorithme produit des maillages topologiquement valides quel que soit le genre, contrairement à VCP : SOCKET et CASTING (voir figure 5(c)) ne sont pas 2-variétés avec cette méthode<sup>1</sup>. On voit d’ailleurs un artefact de reconstruction sur le haut de CASTING, ce qui peut aussi expliquer en partie la RMSE en faveur de notre méthode pour cet objet.

Pour conclure, nous avons développé une méthode simple et efficace de simplification qui génère des maillages dont la géométrie possède des caractéristiques spectrales satisfaisantes (proche du bruit bleu), sans sacrifier pour autant la fidélité géométrique et visuelle à la surface originale. Ceci est du principalement au fait que notre algorithme cherche à préserver les arêtes saillantes originales durant ses deux principales phases. De plus, nous montrons l’intérêt d’utiliser une méthode directe plutôt qu’une approche basée relaxation ou paramétrisation pour ré-échantillonner des maillages de type CAO, puisque cela permet de traiter efficacement n’importe quel genre.

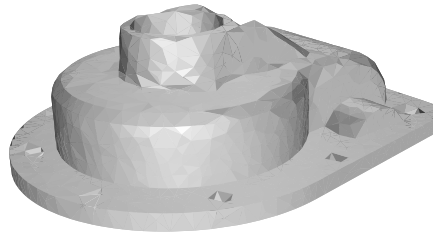
<sup>1</sup>. Ceci explique pourquoi aucune valeur de MSDM2 n’est indiquée dans le tableau pour ces objets.

TABLE 1 – Fidélité géométrique et qualité visuelle des maillages simplifiés avec notre méthode ou avec VCP.

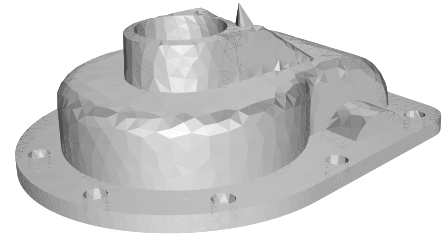
Modèles	Genre	RMSE		MSDM2	
		Notre méthode	VCP	Notre méthode	VCP
FANDISK	0	0.000413	0.000247	0.393490	0.410350
ROCKER ARM	1	0.001767	0.000810	0.536100	0.574910
SOCKET	7	0.000408	0.000858	0.311500	—
CASTING	9	0.000933	0.001094	0.427550	—



(a) Notre méthode sans pondération.



(b) Notre méthode avec pondération.



(c) VCP (ce maillage n'est plus 2-variété).

FIGURE 5 – CASTING simplifié avec différentes techniques (2 153 sommets).

## Remerciements

Ce travail de thèse est supporté financièrement par la *Région Provence Alpes Côte d'Azur* et la société Noomeo (Toulouse). Nous remercions aussi Leonardo Hidd Fonteles pour son aide lors de l'implémentation sous GPU de l'algorithme de Dijkstra.

## Références

- [1] P. Alliez, M. Meyer, M. Desbrun *Interactive geometry remeshing*. ACM SIGGRAPH'02, 2002.
- [2] P. Alliez, G. Ucelli, C. Gotsman, M. Attene *Recent advances in remeshing of surfaces Shape Analysis and Structuring* Mathematics and Visualization, Springer, 2008.
- [3] M. Botsch, L. Kobbelt *Resampling Feature and Blend Regions in Polygonal Meshes for Surface Anti-Aliasing* Computer Graphics Forum, Proceeding of Eurographics '01, Vol. 20, Nb. 3, 2001.
- [4] D. Cline, S. Jeschke, K. White, A. Razdan, P. Wonka *Dart throwing on surfaces*. Computer Graphics Forum 28, 2009.
- [5] P. Cignoni and C. Montani and R. Scopigno *A Comparison of Mesh Simplification Algorithms* Computers & Graphics, Elsevier, 2008.
- [6] P. Cignoni, C. Rocchini, R. Scopigno *Metro : Measuring Error on Simplified Surfaces* Computer Graphics Forum (1998), pp. 167-174, 1998.
- [7] E. Cheslack-Postava, R. Wang, O. Akerlund, F. Pellacini *Fast, realistic lighting and material design using non-linear cut approximation*. ACM Transactions and Graphics, 2008.
- [8] E.-W. Dijkstra *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische Mathematik 1, 1959.
- [9] G. Lavoué *A Multiscale Metric for 3D Mesh Visual Quality*. Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing), 2011.
- [10] A. Lagae, P. Dutré *A procedural object distribution function* ACM Transactions and Graphics, 2005.
- [11] A. Munshi, B. Gaster, T.-G. Mattson, J. Fung, D. Ginsburg *OpenCL Programming Guide*. Pearson Education, 2011.
- [12] D. Nehab, P. Shilane *Stratified Point Sampling of 3D Models* Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, 2004.
- [13] Peyré, G. and Cohen, Laurent D. *Geodesic Remeshing Using Front Propagation* International Journal in Computer Vision, 2006.
- [14] J-L. Peyrot, F. Payan, M. Antonini. *Feature-preserving direct blue noise sampling for surface meshes*. Eurographics, 2013.
- [15] J.-A. Sethian. *A Fast Marching Level Set Method for Monotonically Advancing Fronts* Proc. Nat. Acad. Sci, 1995.
- [16] S. Valette, J-M. Chassery, R. Prost. *Generic Remeshing of 3D Triangular Meshes with Metric-Dependent Discrete Voronoi Diagrams*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008.
- [17] Y. Xu, R. Hu, C. Gotsman, L. Liu. *Blue noise sampling of surfaces*. Computer and Graphics 12, 2012.