Compression de maillages, un état de l'art

Pierre Alliez, Olivier Devillers, Martin Isenburg, Sebastien Valette

Compression de maillages, un état de l'art

Pierre Alliez[1] Olivier Devillers[1] Martin Isenburg[2] Sébastien Valette[3]

[1] INRIA Sophia-Antipolis [2] UNC at Chapel Hill [3] CREATIS, INSA Lyon

Résumé

Le développement fulgurant des réseaux et de l'Internet permet l'échange d'objets géométriques complexes. Dans ce contexte les maillages jouent un rôle prépondérant, qu'ils soient surfaciques ou volumiques, à condition d'en construire une représentation adaptée à la transmission. Dans cet article nous passons en revue les principaux travaux effectués en compression mono-résolution, progressive et résiliente de maillages triangulaires, quadrangulaires, polygonaux, tetraédriques et hexaédriques.

Mots clefs

Compression, codage, maillages, surfaces, volumes.

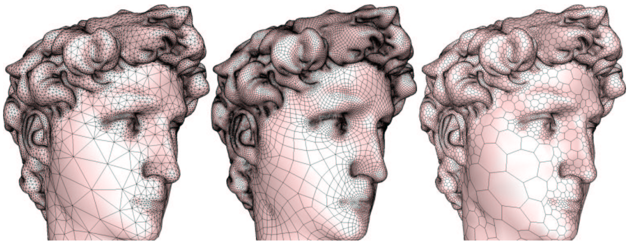

FIG. 1 – *La géométrie surfacique du David maillée par des triangles, des quadrangles et des polygones.*

1 Introduction

La géométrie est devenue une activité très importante de l'algorithmique, notamment depuis que les objets géométriques ont quitté le seul domaine de la conception et de l'ingénierie. Ce développement est lié aux progrès effectués en numérisation et en affichage en même temps qu'une explosion des capacités de calcul. Simultanément, le développement fulgurant des réseaux et de l'Internet permet l'échange de tels objets. Pourtant, et alors qu'il devient de plus en plus aisé de générer et de manipuler les données géométriques, la concrétisation du passage en réseaux s'avère bien plus délicate puisque l'on ne manipule pas un objet géométrique comme un signal multimédia ordinaire. En effet, les caractéristiques des données géométriques (topologie, absence de paramétrisation globale, échantillonnage non uniforme, structure irrégulière) sont telles que l'on n'hésite plus à parler aujourd'hui de *Traitement Numérique de la Géométrie* [1] comme un domaine d'étude à part entière. Un objet géométrique constitue ainsi une quantité d'information au même titre qu'un signal sonore, une image ou une vidéo. La compression géométrique est de ce fait un élément clé pour garantir le succès des applications sur les réseaux. Dans cet article nous portons notre attention sur la compression de *maillages* en classifiant les techniques au préalable.

2 Classification

La contrainte de *temporalité* des réseaux implique des besoins en compression (latence réduite) et en représentation progressive (un objet devient un flux adaptable sur le réseau). On distingue ainsi les algorithmes de **codage mono-résolution** (section 3) des algorithmes de **codage progressif** (section 4). Dans le cas du codage mono-résolution l'objectif consiste à supprimer la redondance contenue dans la description originale du modèle. Dans le cas du codage progressif la problématique est plus délicate puisqu'elle fait intervenir la notion d'optimisation du compromis débit/distorsion. Ceci implique de décomposer le "signal" géométrique sur un ensemble de bases pertinentes d'un point de vue perceptuel, tout en étant propices à la compression. La contrainte de *qualité* des réseaux implique également de concevoir des techniques de **codage résilient**, donc résistant à la dégradation du canal de transmission et/ou à la perte de paquets (section 5). Ces dernières méthodes sont encore peu développées car la majorité des données géométriques possèdent peu de contraintes de synchronisation temporelle, à l'inverse des séquences vidéo.

3 Codage mono-résolution

La compression mono-résolution consiste à représenter un maillage avec un nombre minimium de bits. La forme *globale* du modèle original n'est alors accessible qu'à la fin de la transmission (ce point est illustré par la figure 2).

Parcours canonique La plupart des techniques s'appuient sur le fait que l'ordre d'énumération du graphe constituant la connectivité des maillages n'importe pas pour les applications visées. Un nouvel ordre est ainsi calculé en parcourant la connectivité des maillages de manière déterministe. La notion de proximité et de corrélation intrinsèque au parcours permet d'en déduire une prédiction géométrique adaptée [2]. On distingue trois types d'approche en fonction du type d'élément choisi à chaque étape du parcours : face [3, 4], arête [5] ou sommet [6, 7]. L'enjeu consiste ensuite à coder l'information de connectivité d'un nouvel élément de manière aussi compacte que possible, et à optimiser la technique de prédiction géométrique pour maximiser le taux de compression. A quelques exceptions près [8, 9], le parcours de la connectivité guide la prédiction géométrique, qui s'opère par prédiction linéaire (différentielle [2], parallélogramme [6, 10]), ou non linéaire [9]. La compression de maillages volumiques met en œuvre des techniques similaires, en se limitant pour l'essentiel aux maillage tetraédriques [11, 12].

Approche valence Touma et Gotsman [6], puis Isenburg et Snoeyink [7] ont proposé deux approches codant la valence de chaque sommet, plus un nombre limité de codes d'accidents pour coder la connectivité des maillages triangulaires. Dans de nombreux maillages la distribution des valences étant faiblement dispersée, il en résulte des taux de compression extrêmement compétitifs. Récemment, un lien a été montré [13] entre l'entropie de l'approche valence et celle déduite d'une énumération de triangulations planaires effectuée par Tutte en 1962 [14]. Plus récemment, Isenburg [15], et Khodakovsky *et al.* [16] ont proposé une extension de l'approche valence aux maillages surfaciques polygonaux (un codeur sous la forme d'un service web est en cours de préparation [17]). Les performances d'une telle approche s'expliquent aussi par un lien avec une énumération de graphes planaires calculée par Tutte en 1963 [18]. Isenburg et Alliez ont récemment proposé une extension de l'approche valence aux maillages volumiques hexaédriques [19] afin de bénéficier d'une adaptation naturelle à la régularité des degrés d'arêtes présente dans ce type de maillage.

4 Codage progressif

L'idée de compression progressive des maillages implique la notion de raffinement : le maillage original est modélisé sous la forme d'une séquence de raffinements à partir d'un maillage de base arbitrairement simple. Au cours du décodage la connectivité du maillage est reconstruite à partir des informations de raffinement, et la géométrie est reconstruite par prédiction suivie de termes correctifs. Le principal intérêt réside ainsi dans l'accès à des reconstructions intermédiaires d'un objet au cours de sa transmission (voir Figure 2). L'enjeu consiste alors à reconstruire un objet aussi fidèle que possible à l'original tout au long de la transmission, on parle aussi d'optimisation du comportement débit / distorsion. Les sections suivantes décrivent les principales approches, en focalisant notre attention sur les travaux et les résultats d'une compression effectuée sur la connectivité des maillages.

FIG. 2 – *Les étapes intermédiaires de reconstruction d'un modèle pendant la décompression d'une technique mono-résolution (en haut) ou progressive (en bas).*

Encodage explicite Les *maillages progressifs* de Hoppe [20] correspondent à la première approche modélisant un maillage triangulaire surfacique sous la forme d'un flux de données adaptable sur le réseau. Au cours de l'encodage le maillage subit une série de contractions d'arêtes, réversibles au cours du décodage par séparation de sommets. Les symboles générés correspondent à la *localisation* explicite d'un sommet à séparer (coût : $log(n)$ lié à l'accès aléatoire, avec n le nombre de sommets), et à la désignation de deux arêtes incidentes au sommet à séparer par le décodeur pour le *raffinement*. Cette approche présente l'avantage de générer une granularité fine (par sommet) et de définir une métrique pour choisir une arête parmi les candidates à la contraction. Son coût total étant non linéaire ($n \cdot log(n)$), elle est réservée aux maillages de faible complexité.

Vers un coût de codage linéaire Afin de supprimer la non-linéarité des coûts de codage liée à une localisation explicite [20], plusieurs travaux utilisent la notion d'*ensembles indépendants* définis sur les maillages. Il en résulte un coût de codage réduit, au prix de contraintes sur la décimation lors de l'encodage (tous les éléments ne peuvent être candidats à la décimation). Dans le prolongement des maillages progressifs [20], Pajarola et Rossignac [21] regroupent les contractions d'arêtes en une série de systèmes indépendants correspondant à des niveaux de résolution. La localisation d'un sommet à décimer est effectuée par une 2-coloration des sommets du maillage (1 bit/sommet), pour chaque système. Il en résulte experimentalement un coût amorti de 3 bits par sommet, auxquels s'ajoute le coût du raffinement local, pour un total de 7.2 bits/sommet. Cohen-Or *et al.* [22] utilisent une alternance de 4- et 2-colorations des faces du maillage pour localiser un système indépendant de sommets à décimer. Une retriangulation locale et déterministe rebouche les trous formés à coût nul. Il en résulte un coût total de 6 bits/sommet. En observant une propriété liant la valence d'un sommet décimé à la distribution locale des valences après retriangulation, Alliez et Desbrun [23] améliorent l'approche précédente en générant une alternance de système de disques indépendants centrés sur des sommets de valence ≤ 6 pour les étapes impaires de décimation, et de valence 3 pour les étapes paires. Il en résulte une meilleure conservation de la régularité du maillage au cours de la décimation, cette propriété étant renforcée par une retriangulation déterministe des disques minimisant localement la dispersion des valences. La technique de décimation se *mutualise* ainsi avec le codage, puisque dans le cas de maillages "progressivement réguliers" la décimation opère une simplification par subdivision $\sqrt{3}$ inverse, et la valence de chaque sommet suffit à reconstruire la connectivité. Les coûts de codage moyens sont réduits à 3.7 bits/sommet. Karni *et al.* [24] regroupent les fusions d'arêtes par systèmes indépendants organisés le long d'une chaîne d'arêtes optimisée pour parcourir l'intégralité des sommets du maillage, tout en minimisant le nombre de sauts entre deux sommets non incidents sur le parcours. Il en résulte des coûts moyens de codage de l'ordre de 4.5 bits/sommet, ainsi qu'une reconstruction compatible avec un accès optimisé aux données pour un rendu efficace.

Valette et Prost [25] proposent une technique de codage par décimation particulièrement adaptée aux maillages construits par bissection des arêtes (par exemple, la subdivision de Loop) : un parcours déterministe sur le maillage fusionne les triangles par groupe de 4 autant que possible. L'adaptation de cette approche aux maillages irréguliers peut aussi fusionner les triangles par groupes de 3, de 2, ou les laisser inchangés, puis s'autorise un nombre réduit de bascules d'arêtes afin de lever les cas ambigus. Ainsi, le passage entre deux niveaux de résolution nécessite 1 bit par arête (et par niveau), auquel s'ajoutent quelques symboles supplémentaires pour les faces trisectées et les bascules d'arêtes. Le coût de codage de la connectivité est de 2 bits/sommet en moyenne.

Notons que la description des techniques décrites ci-dessus ne concerne que la connectivité, la majorité des techniques proposant des variantes autour de techniques prédictives s'appuyant sur la connectivité et la géométrie des maillages à différents niveaux de résolution. Bien que certaines techniques incorporent la notion de métrique (L^2 [20], volumique [23]) afin de contrôler la distorsion géométrique, la plupart des efforts se concentrent ici sur le codage de la composante combinatoire du maillage.

Codage par occurrences Pour la compression d'un nuage de points discret en dimension arbitraire, Devillers et Gandoin utilisent un *kD-tree* et transmettent une séquence d'occurrences de points (le nombre de points présents dans chaque cellule) [26]. Il est démontré que l'on peut ainsi se contenter de transmettre seulement des occurrences au cours d'un découpage successif de l'espace pour reconstruire sans perte et de manière progressive l'information géométrique d'un nuage de points. La notion de compression réside dans la notion de *partage de bits* intrinsèque à la notion de transmission d'occurrences de points plutôt qu'une localisation par sommet. Par exemple, transmettre l'information "300 points" localisés dans une cellule en début de transmission correspond à partager les premiers bits de poids fort de 300 sommets, simultanément. Au cours du décodage l'information disponible correspond à une localisation progressivement affinée des positions. Au final, l'information géométrique reconstruite est sans perte si l'on ne considère pas l'ordre sur les points. D'un point de vue théorique, il est démontré que cette technique économise asymptotiquement l'information d'ordre sur les points : $n \log n$ dans le cas d'une distribution uniforme des points dans l'espace. En effet, une distribution uniforme, minimisant la possibilité de partage de bits, correspond ici au pire des cas. Bien que la connectivité originale ne soit pas garantie, un maillage du nuage de points original peut être reconstruit au cours de la transmission à l'aide d'une triangulation géométrique (par exemple, de Delaunay). Récemment, Devillers et Gandoin [27] ont adapté cette technique au codage progressif de maillages simpliciaux surfaciques et volumiques, démontrant ainsi la pertinence d'une approche où le codage de la connectivité est entièrement guidé par la géométrie, contrairement aux techniques précédentes.

Décomposition spectrale L'approche spectrale présente des similarités avec le codage par transformée très répandu pour le codage des signaux. Karni et Gotsman [28] appliquent une décomposition spectrale en projetant la géométrie du maillage sur un ensemble de vecteurs propres provenant de la diagonalisation de l'opérateur Laplacien discret. Bien qu'en l'absence de conditions satisfaisant une analogie avec la transformée en cosinus discrète appliquée à des signaux uniformément échantillonnés sur des structures régulières, les auteurs constatent une décorrélation géométrique suffisante. Les résultats démontrent une représentation progressive avec un comportement débit/distorsion satisfaisant pour les objets lisses. Cette méthode présente toutefois plusieurs points délicats : pour limiter le coût de calcul des vecteurs propres le maillage doit être partitionné, ce qui entraîne une distorsion aux frontières entre les zones de la partition. Enfin, la progressivité de la reconstruction réside seulement sur la géométrie, la connectivité étant inchangée au cours de la transmission. Des améliorations ont ensuite été proposées par l'utilisation de bases fixes [29] et d'une superposition des zones encodées [30]. La décorrélation géométrique optimale par l'intermédiaire d'une décomposition spectrale est toutefois encore un problème ouvert.

Remaillage et ondelettes On aborde ici la famille des techniques les plus prometteuses en ce qui concerne la compression *géométrique*, que l'on distingue volontairement de la compression de maillages. L'idée du codage par remaillage et ondelettes consiste à considérer le maillage original seulement comme une instance de la géométrie auquel on s'intéresse (c'est à dire la surface). On peut ainsi s'autoriser à *remailler* cette géométrie de manière aussi régulière et uniforme que possible, afin de représenter le signal géométrique sous une forme compatible avec la décomposition en ondelettes. La régularité parfaite étant impossible à obtenir pour des topologies arbitraires, les auteurs convertissent le modèle original en un maillage semi-régulier (régulier par morceaux) où la théorie des ondelettes démontre sa supériorité [31, 32]. Mentionnons également une technique d'ondelettes applicable aux maillages irréguliers [25].

5 Codage résilient

En plus de la contrainte temporelle liée au débit limité et souvent variable d'un réseau s'ajoute la notion de transmission avec pertes ou plus généralement avec une dégradation du signal en cours de transmission. Le but consiste à organiser les données sous une forme cohérente de telle sorte qu'une transmission incomplète ou erronée des données n'engendre qu'un effet mesuré sur la fidélité de la reconstruction vis à vis des données originales. Une solution proposée par Bischoff et Kobbelt [33] correspond à organiser les données sous une forme *normale* afin d'inférer une reconstruction plausible à partir de la seule information géométrique, qu'elle soit partielle ou totale. D'autres solutions basées respectivement sur le partitionnement [34] et la protection de données [35] ont été également proposées. Le panorama global des publications du domaine démontre une volonté des acteurs de résoudre prioritairement la problématique du comportement débit/distorsion (en considérant une transmission de qualité), avant de considérer une transmission avec pertes ou dégradée puisque celle-ci intervient aujourd'hui essentiellement pour des données diffusées au cours du temps, comme la vidéo ou le son.

6 Conclusion et travaux futurs

La compression géométrique est un sujet actif depuis plusieurs années [2] dans le domaine de l'informatique graphique et de la géométrie algorithmique. Nous avons volontairement restreint cet état de l'art à la compression mono-résolution, progressive et résiliente de *maillages* afin de résumer les principales avancées théoriques et algorithmiques.

Parmi les approches, un travail fondateur de Touma et Gotsman [6] s'est avéré très difficile à concurrencer depuis 1998. Depuis, Khodakovsky *et al.* [16] ont expliqué les performances d'une telle approche par un lien avec l'énumeration des graphes planaires. Cette technique s'est ensuite avérée applicable aux maillages polygonaux [15, 10, 16], au codage progressif [23] et au codage de maillages volumiques [19]. Devillers et Gandoin [27] ont récemment conçu une technique de codage progressif de nuages de points discrets, en montrant un gain asymptotique minimal correspondant à l'ordre sur les points, et une adaptation à l'absence d'uniformité.

Pour le codage progressif, les techniques procédant par remaillage [31] abordent la compression géométrique des surfaces lisses, voire lisses par morceaux avec une approche débit/distorsion. La distorsion s'exprime ici entre surfaces, et plus seulement entre maillages. Les capacités de décorrélation des ondelettes se sont avérées dans ce cadre extrêmement performantes. Comme pour d'autre signaux l'enjeu principal consiste à trouver des bases sur lesquelles le signal géométrique peut être décomposé via une décorrélation optimale. Pour des applications de codage sans perte et mono-résolution de maillages, il serait souhaitable de développer une technique de compression de maillages volumiques comportant des cellules arbitraires, et plus seulement tetraédriques ou hexaédriques. Une généralisation de l'approche degré/valence [15] aux polytopes constituerait aussi un réel progrès. Pour le codage progressif, une direction de recherche prometteuse se situe du côté des approches débit/distorsion mettant en œuvre une phase de discrétisation anisotrope associée à une décomposition sur des bases d'ondelettes adaptées aux surfaces lisses par morceaux. La problématique consiste à réunir les connaissances dans les domaines de l'échantillonnage, de l'approximation et de la théorie de l'information afin de remporter l'enjeu d'une *modélisation* des objets adaptée à la machine, puis au réseau.

Références

[1] Wim Sweldens et Peter Schröder, éditeurs. *Digital Geometry Processing*. Course Notes. ACM Siggraph, 2001.

[2] M. Deering. Geometry Compression. *ACM Siggraph Conference Proceedings*, pages 13–20, 1995.

[3] S. Gumhold et W. Strasser. Real Time Compression of Triangle Mesh Connectivity. *Siggraph Conference Proceedings*, pages 133–140, 1998.

[4] J. Rossignac. Edgebreaker : Connectivity Compression for Triangle Meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999.

[5] M. Isenburg. Triangle Strip Compression. *Proceedings of Graphics Interface 2000*, pages 197–204, 2000.

[6] C. Touma et C. Gotsman. Triangle Mesh Compression. *Graphics Interface 98 Conference Proceedings*, pages 26–34, 1998.

[7] M. Isenburg et J. Snoeyink. Mesh Collapse Compression. Dans *Proceedings of SIBGRAPI'99, Campinas, Brazil*, pages 27–28, 1999.

[8] B. Kronrod et C. Gotsman. Optimized compression of triangle mesh geometry using prediction trees. *Proceedings of 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 602–608, 2002.

[9] Haeyoung Lee, Pierre Alliez, et Mathieu Desbrun. Angle-analyzer : A triangle-quad mesh codec. Dans *Eurographics Conference Proceedings*, pages 383–392, 2002.

[10] Martin Isenburg et Pierre Alliez. Compressing polygon mesh geometry with parallelogram prediction. Dans *Visualization Conference Proceedings*, pages 141–146, 2002.

[11] A. Szymczak et J. Rossignac. Grow & fold : Compression of tetrahedral meshes. Dans *Proceedings of the 5th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 54–64, 1999.

[12] S. Gumhold, S. Guthe, et W. Strasser. Tetrahedral mesh compression with the cut-border machine. Dans *Visualization Conference Proceedings*, pages 51–58, 1999.

[13] P. Alliez et M. Desbrun. Valence-driven connectivity encoding of 3d meshes. Dans *Eurographics Conference Proceedings*, pages 480–489, 2001.

[14] W. Tutte. A Census of Planar Triangulations. *Canadian Journal of Mathematics*, 14 :21–38, 1962.

[15] Martin Isenburg. Compressing polygon mesh connectivity with degree duality prediction. Dans *Graphics Interface Conference Proc.*, pages 161–170, 2002.

[16] Andrei Khodakovsky, Pierre Alliez, Mathieu Desbrun, et Peter Schröder. Near-optimal connectivity encoding of 2-manifold polygon meshes. *The Journal of Graphical Models/Special Issue*, 2002.

[17] Martin Isenburg, Pierre Alliez, et Jack Snoeyink. A benchmark coder for polygon mesh compression, 2002. http ://www.cs.unc.edu/~isenburg/pmc/.

[18] W. Tutte. A Census of Planar Maps. *Canadian Journal of Mathematics*, 15 :249–271, 1963.

[19] Martin Isenburg et Pierre Alliez. Compressing hexahedral volume meshes. Dans *Pacific Graphics Conference Proceedings*, pages 284–293, 2002.

[20] H. Hoppe. Progressive meshes. Dans *ACM Siggraph 96 Conference Proceedings*, pages 99–108, 1996.

[21] R. Pajarola et J. Rossignac. Compressed Progressive Meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(1) :79–93, 2000.

[22] D. Cohen-Or, D. Levin, et O. Remez. Progressive Compression of Arbitrary Triangular Meshes. Dans *IEEE Visualization Conference Proceedings*, pages 67–72, 1999.

[23] Pierre Alliez et Mathieu Desbrun. Progressive encoding for lossless transmission of 3d meshes. Dans *ACM Siggraph Conference Proceedings*, pages 198–205, 2001.

[24] Z. Karni, A. Bogomjakov, et C. Gotsman. Efficient compression and rendering of multi-resolution meshes. Dans *Visualization Conference Proceedings*, 2002.

[25] S. Valette et R. Prost. A wavelet-based progressive compression scheme for triangle meshes : Wavemesh, 2001. Soumis pour publication.

[26] O. Devillers et P-M. Gandoin. Geometric Compression for Interactive Transmission. *Visualization Conference Proceedings*, pages 319–326, 2000.

[27] Pierre-Marie Gandoin et Olivier Devillers. Progressive lossless compression of arbitrary simplicial complexes. *ACM Transactions on Graphics*, 21 :372–379, 2002. ACM Siggraph Conference Proceedings.

[28] Z. Karni et C. Gotsman. Spectral Compression of Mesh Geometry. Dans *ACM Siggraph Conference Proceedings*, pages 279–286, 2000.

[29] Z. Karni et C. Gotsman. 3d mesh compression using fixed spectral basis. Dans *Graphics Interface Conference Proceedings*, pages 1–8, 2001.

[30] F. Cayre, P. Rondao Alface, F. Schmitt, et H. Maître. Compression and watermarking of 3d triangle mesh geometry using spectral decomposition. Dans *SPIE 47th Annual Meeting*, 2002.

[31] Andrei Khodakovsky, Peter Schröder, et Wim Sweldens. Progressive Geometry Compression. *Siggraph Conf. Proceedings*, pages 271–278, 2000.

[32] Frédéric Payan et Marc Antonini. 3D mesh wavelet coding using efficient model-based bit allocation. Dans *Proceedings of 1st Int. Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pages 391–394, 2002.

[33] Stephan Bischoff et Leif Kobbelt. Towards robust broadcasting of geometry data. *Computer & Graphics*, 2001. to appear.

[34] C. Bajaj, S. Cutchin, V. Pascucci, et G. Zhuang. Error resilient streaming of compressed vrml. Rapport technique, TICAM, Univ. of Texas, 1998.

[35] Ghassan Al-Regib, Yucel Altunbasak, et Jarek Rossignac. An unequal error protection method for progressively compressed 3d models. Dans *Proceedings of ICASSP*, 2002. To appear.