

Proposition d'action de recherche coopérative : TéléGéo

Coordinateur : Pierre Alliez

19 février 2002

Nous proposons une action de recherche coopérative TéléGéo (Géométrie et Télécommunications) autour de la transmission de contenus géométriques sur les réseaux. Cet action s'inscrit parfaitement dans les deux axes privilégiés de l'appel à propositions : "Combiner simulation numérique et réalité virtuelle" et "Développements d'applications sur le Web".

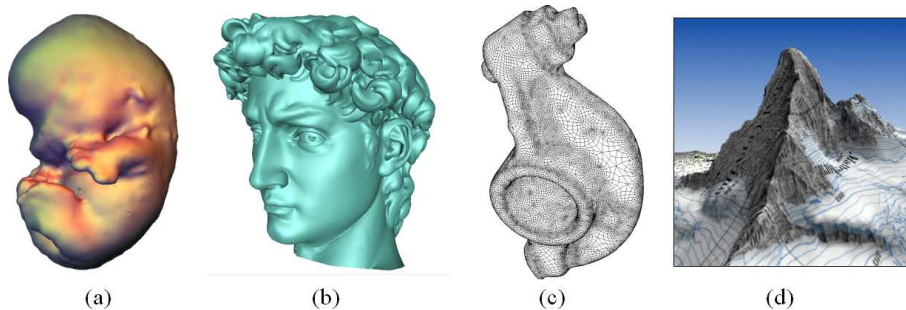


FIG. 1 – Exemples de données géométriques provenant de (a) l'imagerie médicale, (b) l'histoire de l'art, (c) la conception assistée par ordinateur et (d) la topographie.

Les objectifs de l'action

- Créer une synergie autour de la transmission en réseau d'objets géométriques,
- Étudier et développer des techniques de traitement et de représentation numérique de l'information géométrique pour des applications sur des réseaux hétérogènes,
- Partager des connaissances scientifiques entre les équipes impliquées,
- A moyen terme, acquérir une acuité sur la notion de contenu informationnel d'une structure géométrique.

Les thèmes de recherche

- Géométrie algorithmique,
- Technologies de l'information,
- Codage, compression,
- Traitement numérique de la géométrie,
- Informatique graphique.

Les applications

- Visites virtuelles,
- Boutiques virtuelles,
- Modélisation et conception en réseau,
- Télé-médecine,
- Histoire de l'art,
- Travail collaboratif.

Les participants

- PRISME, INRIA Sophia Antipolis,
- ISA, INRIA Lorraine,
- TEMICS, IRISA Rennes,
- TSI, ENST Paris,
- CREATIS, INSA Lyon.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Problématique	4
2.1	La géométrie, un "signal" complexe	4
2.2	Les contraintes du réseau	5
2.2.1	Temporalité	5
2.2.2	Qualité	5
2.2.3	Quantité	5
2.3	Compression et transmission	6
3	Etat de l'art	6
4	Actions proposées	7
4.1	Compression de modèles surfaciques	7
4.2	Compression de modèles volumiques	9
4.3	Recherche d'objets	9
4.4	Applications et impact	9
5	Participants	10
5.1	Projet PRISME INRIA	10
5.2	Projet ISA INRIA	10
5.3	Projet TEMICS IRISA	10
5.4	TSI/TII ENST PARIS	11
5.5	Laboratoire CREATIS	11

1 Introduction

Ces dernières années ont témoigné d'une augmentation vertigineuse de la quantité de données circulant sur les réseaux, celle-ci étant essentiellement liée au développement du multimédia. Ce développement a été possible grâce à une famille d'algorithmes regroupés sous le domaine du traitement numérique du signal, ces derniers nécessitant une réelle expertise sur le type des données à traiter, compresser et transmettre.

Un travail de recherche équivalent pour la préparation, le codage et la transmission des données géométriques constitue le thème de proposition d'action "Géométrie et Télécommunications" décrite dans ce document. L'ambition consiste à anticiper sur la déferlante prévisible des objets géométriques sur les réseaux (Figure 1), la "quatrième vague" du multimédia après l'audio, l'image et la vidéo, promettant une diversité d'applications sans précédent. Il s'agit pour cela de mettre en synergie plusieurs équipes et leur savoir afin d'acquérir une connaissance théorique sur l'information contenue dans les données géométriques.

Cette proposition détaille les raisons de réunir des compétences complémentaires du domaine, tout particulièrement en ce qui concerne les maillages et les télécommunications. Une proposition de COLOR (3D-Net) est également en cours à Sophia pour une application de compression/visualisation de modèles 3D sur le réseau réunissant les projets PRISME pour les aspects compression géométriques, REVES pour les aspects images et PLANETE pour les aspects réseaux.

2 Problématique

2.1 La géométrie, un "signal" complexe

La diversité de la géométrie est à la mesure de la complexité des objets qui nous entourent. Contrairement à la transition du son (1D) à l'image (2D), puis à la vidéo (2D+T), le passage à la géométrie nécessite bien plus qu'une adaptation à une dimension supérieure (3D ou 3D+T pour les modèles animés). En particulier, la théorie et les outils de traitement du signal ne s'appliquent pas directement. Ceci est dû aux nombreuses propriétés distinctives de la géométrie, parmi lesquelles :

- Une absence de paramétrisation globale : les signaux multimédia classiques (son, image et vidéo) peuvent être vus comme des fonctions sur un espace Euclidien. Au contraire, les données géométriques n'ont pas de représentation naturelle sous forme de fonctions. Par exemple, une surface admet plusieurs paramétrisations locales, mais aucune paramétrisation globale ;
- Un échantillonnage irrégulier : la plupart des signaux audio, image et vidéo sont régulièrement échantillonnés lors de la conversion analogique/numérique, et une grande partie des outils développés pour le traitement du signal re-

posent sur cette première hypothèse. Les données géométriques, comme les maillages, admettent à la fois une irrégularité en terme de connectivité et une non-uniformité géométrique ;

- La topologie : une notion fondamentalement distinctive des objets tridimensionnels, qu'il s'agit de prendre en compte lors du traitement et de la représentation de la géométrie.

En plus des propriétés distinctives de la géométrie qui compliquent singulièrement le défi du traitement numérique de telles données, les principes de transmission de l'information nous rappellent que la version idéale d'un réseau – c'est à dire l'ubiquité, même pour des bases de données gigantesques – se confronte rapidement au niveau des progrès technologiques actuels.

2.2 Les contraintes du réseau

2.2.1 Temporalité

Dans un monde en réseau, les objets sont remplacés par des flux, une représentation naturellement bien adaptée à leur transmission. Cette contrainte nous invite à ajouter une composante temporelle aux données en développant notamment des techniques progressives de codage.

2.2.2 Qualité

En plus de la contrainte temporelle liée au débit limité et souvent variable d'un réseau s'ajoute une composante peu connue des utilisateurs des réseaux : la notion de transmission avec pertes ou plus généralement avec une dégradation du signal en cours de transmission. Cette réalité est d'autant plus importante que l'on se dirige vers une tendance au *nomadisme* impliquant une diversification des réseaux avec des qualités et des débits très variables.

2.2.3 Quantité

Le déploiement de très grandes bases de données géométriques pose également le problème de l'organisation de l'information sur les réseaux. Il s'agit notamment d'éviter la sensation d'océan d'information sans balise. En particulier, comment faciliter la recherche de données par le contenu ? Peut-on indexer les données géométriques ?

D'une manière plus générale, la problématique réseau consiste à développer une acuité sur la notion de contenu informationnel d'une structure géométrique afin d'en faciliter la modélisation, le traitement, la représentation, la recherche, le codage et le transport sur des réseaux hétérogènes. Dans le cadre de cette action nous proposons de focaliser tout particulièrement nos efforts sur la compression en vue d'une transmission en réseau, puisque ce problème coïncide avec les besoins les plus urgents en terme d'applications.

2.3 Compression et transmission

La transmission des données sur le réseau pose rapidement le problème de la représentation des données géométriques, avant même la notion de compression proprement dite. Si l'on considère les objets dont seule la surface présente un intérêt pour le calcul ou la visualisation, les maillages se sont rapidement avérés être un mode de représentation compact et particulièrement bien adaptés à la visualisation ou au calcul géométrique. Représenter une géométrie surfacique par un maillage nécessite entre autre une théorie de l'échantillonnage et de l'approximation. Compresser un tel objet nécessite également un ensemble de repères et de bases sur lesquels le signal géométrique peut être décomposé, éventuellement sous une forme hiérarchique. L'art de la compression sans pertes consiste à dénicher puis à supprimer toute la redondance d'un signal. On dit alors que l'on atteint l'entropie du signal, qui coïncide avec la quantité minimale d'information non redondante nécessaire à la reconstruction parfaite du signal. Dans le cas de la compression avec pertes la problématique est bien plus délicate puisqu'elle fait intervenir la notion d'optimisation conjointe débit/distorsion.

Si l'on devait résumer plus simplement la problématique en terme de télécommunications et du point de vue d'un utilisateur, *maîtriser la qualité de service* sur les réseaux correspond certainement à la principale attente.

3 Etat de l'art

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.

Alors qu'il devenait de plus en plus aisé de générer et de manipuler les données géométriques, la concrétisation du passage en réseaux s'aurait bien plus délicate puisque l'on ne manipule pas un objet géométrique comme un signal "ordinaire" (voir section 2.1). Alors que de récents travaux avançaient un titre à mi-chemin entre le traitement du signal et de la géométrie : "Traitement de signal pour les maillages" [13], aujourd'hui, on n'hésite plus à parler de *Traitement Numérique de la Géométrie* [30] comme un domaine d'étude à part entière. La géométrie a donc remplacé le terme de signal, et un objet géométrique constitue une quantité d'information au même titre qu'un signal sonore, une image ou une vidéo. Il peut notamment s'agir d'un grand nombre de triangles ou de polygones pour les maillages surfaciques, de tétraèdres pour les maillages volumiques ou de toute autre structure de données choisie en fonction de l'application visée. Si elle ne simplifie pas la problématique, cette diversification des données illustre bien le potentiel applicatif de la géométrie.

Si l'on se limite aux maillages surfaciques, et que l'on remonte plusieurs

années en arrière, une énumération de graphes effectuée par Tutte en 1962 [35] constitue déjà un lien étroit avec la combinatoire – donc l’entropie – des maillages triangulaires. Après quelques travaux effectués en compression de graphes [34, 18], Deering [7] a marqué le départ de nombreux travaux en compression de maillages triangulaires [33, 31, 12, 29, 15, 3], et polygonaux [26, 16, 23, 19]. Il est à noter que l’analyse et la proche optimalité de certains algorithmes n’ont été effectuées que récemment [3, 19] pour la connectivité en montrant le lien avec l’énumération calculée par Tutte près de 40 ans en arrière [35, 36]. Une telle analyse pour les maillages non-manifolds ou volumiques reste à démontrer, et les algorithmes optimaux associés n’existent pas encore.

Les techniques de représentation progressive de données surfaciques [14, 40] et de compression associées ont également représenté un champ d’investigation important à partir de 96 [27, 32, 6, 17, 8, 20, 11, 2, 21, 37, 22]. Une approche optimisant conjointement le débit et la distorsion reste à développer, et il existe à ce jour seulement deux pistes de codage progressif de maillages volumiques [11, 28].

Comme pour la compression d’images et de vidéos, la difficulté du codage progressif – donc avec pertes – réside non seulement dans la mise au point de l’algorithme de décomposition progressive de la géométrie, mais aussi dans la définition d’une distorsion reliée à des critères perceptuels. En pratique, il convient de développer des outils de mesure de fidélité géométrique qui prennent en compte la géométrie mais aussi les paramètres de visualisation comme le point de vue, l’éclairage, les couleurs ou même les propriétés d’interaction lumière / matière comme le matériau.

4 Actions proposées

Les actions de recherche proposées s’articulent autour de la représentation, de la compression et de l’organisation de l’information géométrique, essentiellement pour les maillages surfaciques et volumiques. Nous pensons qu’une telle action constituerait un cadre efficace à la collaboration de personnes possédant des compétences très complémentaires : télécommunications, géométrie algorithmique, imagerie et données médicale, et informatique graphique (voir section 5). Une telle collaboration réunirait les conditions de réalisation de progrès significatifs vers les buts énoncés ci-après.

4.1 Compression de modèles surfaciques

Etude de l’entropie de la géométrie et de la connectivité de maillages triangulaires et polygonaux, 2-manifold ou non, animés ou statiques. Il s’agit de développer et d’analyser des techniques de compression sans perte tout en recherchant une coïncidence du taux de compression avec l’entropie mesurée des données. Les applications concernent les modèles géométriques destinés à la si-

mulation ou d'autres modèles pour lesquels une reconstruction avec pertes n'est pas envisageable.

Compression avec pertes pour les données destinées à la visualisation. On étudiera notamment de nouvelles techniques de quantification adaptées à la géométrie, voire pilotées de manière optimale par le taux de compression visé. Le compromis vitesse / taux de compression constitue également une piste vers toujours plus de flexibilité algorithmique. Précisons ici que la représentation des données géométriques ne se limite pas à leur compression avec un taux maximal afin de minimiser les temps de transmission. L'enjeu réside aussi dans une prise en compte de tous les aspects de l'application visée ainsi que de l'infrastructure de télécommunications utilisée. La flexibilité recherchée est donc double : sur le comportement de l'algorithme d'une part et sur le mode de représentation d'autre part.

Remaillage Une même géométrie surfacique peut être approximée avec différents maillages, chacun aboutissant à une quantité d'information mesurée en bits et à un niveau de distorsion. Nous étudierons les techniques de remaillage générant le meilleur comportement débit/distorsion. Il est à noter qu'une telle étude implique d'étudier également les techniques d'approximation de surfaces puisque celles-ci influencent directement la distorsion.

Représentation progressive Il s'agira de s'interroger sur des structures alternatives mieux adaptées à la transmission progressive, donc plus proches d'un flux de données. Le comportement débit/distorsion est aussi à étudier tout au long de la reconstruction progressive.

Résilience On étudiera le comportement de techniques de compression robustes à la perte de paquets ou résistantes aux conditions dégradées de transmission. Il s'agira d'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 des pistes envisagées correspond à organiser les données sous une forme normale afin d'inférer une reconstruction plausible, même en l'absence d'une partie des données ou en présence de données erronées.

Maillages et ondelettes Actuellement l'analyse multirésolution décompose sur une base d'ondelettes des maillages surfaciques 3D par fusion/subdivision des cellules selon un processus régulier ou irrégulier. Alors que l'analyse multirésolution classique nécessite un remaillage des triangulations quelconques, la nouvelle génération utilise le maillage original tout en conduisant à une transmission sans perte et une compression efficace, ce grâce à la résolution d'un problème inverse discret [21, 37, 39, 38]. Une étude poussée de la résolution du problème inverse afin d'optimiser le compromis débit/distorsion offre un champ

d'investigation intéressant, ainsi qu'une analyse de la complexité de l'algorithme de compression.

Représentation par Atlas Un codage possible des objets consiste à les décomposer en parties homéomorphes à des disques, et à calculer une paramétrisation de ces disques. Il est ensuite possible de stocker des informations dans l'espace paramétrique ainsi obtenu, par exemple, les détails de hautes fréquences. Il est alors facile d'appliquer les techniques de compression d'images aux informations stockées dans cet espace 2D. L'analyse de Morse offre des outils intéressants pour cette segmentation des objets, et les applications conformes sont une piste à développer pour parvenir à une méthode de paramétrisation efficace.

4.2 Compression de modèles volumiques

Le codage des modèles volumiques n'a reçu qu'une faible attention jusqu'à ce jour, alors que les techniques d'acquisition se développent, notamment pour le domaine médical. Après un état des besoins et applications du domaine, nous développerons et analyserons des techniques de compression de maillages tétraédriques, voire polyédriques. Les taux de compression seront comparés avec une étude combinatoire de l'entropie afin de garantir une borne sur le taux de compression. Les techniques de paramétrisation de surfaces peuvent également être étendues aux maillages volumiques, afin de munir ces maillages d'un espace paramétrique 3D dans lequel le stockage d'informations pourrait être optimisé.

4.3 Recherche d'objets

L'augmentation de la quantité de données géométriques sur les réseaux posera inévitablement des problèmes de recherche par le contenu. L'enjeu consiste à munir les bases de données d'*index* capturant sous une forme concise et exhaustive les contenus géométriques, puis à développer un moteur de mise en correspondance associé. On s'interrogera également sur la pertinence de techniques de mise en correspondance travaillant directement sur les données stockées sous leur format compressé.

4.4 Applications et impact

Les applications nécessitant une omniprésence de la géométrie en tous points d'un réseau sont concernées par cette proposition : visites virtuelles, histoire de l'art, conception et simulation en réseau. Pour les données volumiques l'application privilégiée sera la visualisation et la transmission de données médicales 3D via internet pour le télé-diagnostic.

Impact La géométrie en réseau aura un impact éducatif et culturel via la documentation enrichie, le télé-enseignement et les visites virtuelles. Un impact

important devrait être mesuré également pour les sciences du vivant où l'imagerie et la réunion d'experts en réseaux constituent une réalité de la médecine de demain.

5 Participants

Cette proposition d'action de recherche coopérative regroupe des chercheurs de trois projets INRIA, une équipe de l'ENST Paris et une équipe de l'INSA Lyon.

5.1 Projet PRISME INRIA

Les activités du projet PRISME sont centrées autour des algorithmes géométriques et consistent à développer une approche pragmatique et réaliste de la conception d'algorithmes. Cette ambition se concrétise par de nombreux travaux sur les triangulations et par la bibliothèque CGAL [5]. Le projet a récemment développé une approche originale pour la compression de modèles tridimensionnels [11], sans concurrence pour les modèles dits *non manifolds*. Avec le recrutement de Pierre Alliez en décembre 2001 [1], PRISME renforce ses compétences dans ce domaine.

Personnes impliquées : Pierre Alliez, Olivier Devillers.

5.2 Projet ISA INRIA

Les activités du projet ISA concernent des aspects liés à la fois à la reconnaissance d'images et à la synthèse d'images. L'axe de recherche *modélisation et calculs géométriques* du projet a développé la représentation *Virtual Mesh*, qui permet de représenter des propriétés géométriques des objets dans un espace paramétrique abstrait. Le projet a développé des applications de cette représentation pour la simulation d'illumination globale [4] et pour le placage de textures sur des surfaces triangulées complexes [25, 24]. Nous comptons à présent explorer des applications de ces méthodes à la compression de maillages, à l'analyse, à la représentation et à la manipulation de données volumiques (*Virtual Mesh Volumique*).

Personnes impliquées : Bruno Lévy, Sylvain Petitjean, Nicolas Ray.

5.3 Projet TEMICS IRISA

Les activités du projet TEMICS concernent le traitement et la modélisation d'images et de vidéos à des fins de communication sur réseaux. Les activités de recherche du projet s'articulent autour de trois thèmes principaux : Analyse, modélisation et édition de séquences vidéo ; Codage conjoint source-canal pour la transmission sur Internet et liens sans fils ; et Tatouage d'images fixes et de

séquences vidéo. A ces thèmes principaux viennent s'ajouter des thèmes transversaux de scalabilité, de sélectivité, de représentation et de codage à réduction de débit.

Afin de rendre les vidéos plus interactives, l'équipe a récemment travaillé sur la notion de navigation à distance dans les vidéos. Une telle fonctionnalité nécessite entre autres d'extraire et de transmettre une description géométrique 3D de la scène en plus des données photométriques [9]. Cette représentation est transmise sous la forme d'un flux de modèles 3D VRML, qui peut être compressé sous forme scalable [10]. La contribution de l'équipe TEMICS consisterait à proposer un cadre applicatif aux méthodes de compression de maillages surfaciques non structurés, et à partager des connaissances sur les approches de compression progressive/scalable et la prise en compte de critères de rendu visuel.

Personnes impliquées : Raphaële Balter (doctorante), Luce Morin (maître de conférences).

5.4 TSI/TII ENST PARIS

Les activités du groupe TII (Traitement et Interprétation des Images) du département TSI (Signal-Images) concernent la mise en oeuvre de schémas complets de traitement, d'analyse et d'interprétation d'images, en particulier de scènes complexes.

La description des objets complexes tridimensionnels pour leur analyse ou leur représentation fixe ou animée dans un contexte télécommunicant fait partie des domaines d'applications envisagés. La contribution du groupe TII consisterait à renouveler les besoins d'outils théoriques pour une représentation des objets 3D réellement compatible avec la transmission en réseau.

Personnes impliquées : Francis Schmitt (Professeur).

5.5 Laboratoire CREATIS

CREATIS (Centre de Recherche et d'Applications en Traitement de l'Image et du Signal) est une unité de Recherche commune à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et à l'Université Claude Bernard-Lyon 1. CREATIS est associée au CNRS (UMR 5515) et affiliée à l'INSERM. La "mission" de l'unité consiste à exploiter et à développer les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC), en matière de modélisation des systèmes d'acquisition d'images, de traitement des images et de modélisation mathématique du Vivant.

Personnes impliquées : Seung-Woo Lee (Doctorant 2002-2004), Sébastien Valette (ATER), Rémy Prost (Professeur).

Références

- [1] ALLIEZ, P. *Etude de la représentation géométrique et texturale de scènes en réalité virtuelle 3D pour les services de visualisation dans un contexte télécommunicant*. Thèse de doctorat en sciences, ENST Paris, France, 2000.
- [2] ALLIEZ, P., AND DESBRUN, M. Progressive Compression for Lossless Transmission of Triangle Meshes. In *SIGGRAPH '2001 Conference Proceedings* (2001), pp. 198–205.
- [3] ALLIEZ, P., AND DESBRUN, M. Valence-driven connectivity encoding of 3d meshes. In *Eurographics 2001 Conference Proceedings* (Sept. 2001), pp. 480–489.
- [4] ALONSO, L., CUNY, F., PETITJEAN, S., PAUL, J., LAZARD, S., AND WIES, E. The virtual mesh : A geometric abstraction for efficiently computing radiosity. *ACM Transaction on Graphics* (2001).
- [5] The CGAL reference manual, Aout 2001. Release 2.3.
- [6] COHEN-OR, D., LEVIN, D., AND REMEZ, O. Progressive Compression of Arbitrary Triangular Meshes. In *IEEE Visualization 99 Conference Proceedings* (1999), pp. 67–72.
- [7] DEERING, M. Geometry Compression. In *ACM SIGGRAPH 98 Conference Proceedings* (1995), pp. 13–20.
- [8] DEVILLERS, O., AND GANDOIN, P.-M. Geometric Compression for Interactive Transmission. In *IEEE Visualization 00 Conference Proceedings* (2000), pp. 319–326.
- [9] GALPIN, F. *Représentation 3D de séquences vidéo ; Schéma d'extraction automatique d'un flux de modèles 3D, applications à la compression et à la réalité virtuelle*. PhD thesis, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Rennes 1, France, 2002.
- [10] GALPIN, F., AND MORIN, L. Computed 3d models for very low bitrate video coding. In *Proceedings of the IEEE conference on Visual Communications and Image Processing, VCIP'2001* (2001), vol. 4310.
- [11] GANDOIN, P.-M. *Compression progressive sans perte de structures géométriques*. Thèse de doctorat en sciences, université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2001.
- [12] GUMHOLD, S., AND STRASSER, W. Real Time Compression of Triangle Mesh Connectivity. In *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings* (1998), pp. 133–140.
- [13] GUSKOV, I., SWELDENS, W., AND SCHRÖDER, P. Multiresolution signal processing for meshes. In *Proceedings of SIGGRAPH 1999* (1999), pp. 325–334.
- [14] HOPPE, H. Progressive meshes. In *Proceedings of SIGGRAPH 1996* (1996), pp. 99–108.
- [15] ISENBURG, M. Triangle Strip Compression. *Proceedings of Graphics Interface 2000* (2000), 197–204.

- [16] ISENBURG, M., AND SNOEYINK, J. Face fixer : Compressing polygon meshes with properties. In *ACM SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings* (2000), pp. 263–270.
- [17] KARNI, Z., AND GOTSMAN, C. Spectral Compression of Mesh Geometry. In *ACM SIGGRAPH 00 Conference Proceedings* (2000), pp. 279–286.
- [18] KEELER, AND WESTBROOK. Short encodings of planar graphs and maps. *DAMATH : Discrete Applied Mathematics and Combinatorial Operations Research and Computer Science* 58 (1995).
- [19] KHODAKOVSKY, A., ALLIEZ, P., DESBRUN, M., AND SCHRÖDER, P. Near-optimal connectivity encoding of 2-manifold polygon meshes, 2001. Submitted for publication : <http://www.multires.caltech.edu/pubs/pubs.htm>.
- [20] KHODAKOVSKY, A., SCHRÖDER, P., AND SWELDENS, W. Progressive Geometry Compression. In *Proceedings of SIGGRAPH 2000* (2000), pp. 271–278.
- [21] KIM, Y.-S. *Analyse adaptative et synthèse multirésolution de surfaces maillées par décomposition sur une base d'ondelettes*. Thèse de doctorat en sciences, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2001.
- [22] KIM, Y.-S., VALETTE, S., AND PROST, R. Adaptive wavelets based multiresolution modeling of irregular meshes via harmonic maps. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing ICIP 2001* (2001), pp. 210–213.
- [23] KRONROD, B., AND GOTSMAN, C. Efficient coding of non-triangular meshes. In *Pacific Graphics 2000 Conference Proceedings* (october 2000).
- [24] LEVY, B. Constrained Texture Mapping for Polygonal Surfaces. In *Computer Graphics (SIGGRAPH Conf. Proc.)* (2001), ACM.
- [25] LEVY, B., AND MALLET, J. Non-Distorted Texture Mapping for Sheared Triangulated Meshes. In *Computer Graphics (SIGGRAPH Conf. Proc.)* (July 1998), ACM.
- [26] LI, J., AND KUO, C.-C. J. Mesh connectivity coding by the dual graph approach, July 1998. MPEG98 Contribution Document No. M3530, Dublin, Ireland.
- [27] LI, J., AND KUO, C.-C. J. Progressive Coding of 3D Graphic Models. *IEEE Computer Graphics* 86 (june 1998), 1052–1063.
- [28] PAJAROLA, R., ROSSIGNAC, J., AND SZYMCAK, A. Implant sprays : compression of progressive tetrahedral mesh connectivity. In *IEEE Visualization 99 Conference Proceedings* (1999).
- [29] ROSSIGNAC, J. EdgeBreaker : Connectivity Compression for Triangle Meshes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (1999), 47–61.
- [30] SWELDENS, W., AND SCHRÖDER, P., Eds. *Digital Geometry Processing*. Course Notes. ACM SIGGRAPH, 2001.

- [31] TAUBIN, G., HORN, W., LAZARUS, F., AND ROSSIGNAC, J. Geometry coding and VRML. *Proceedings of the IEEE 96(6)* (1998), 1228–1243.
- [32] TAUBIN, G., AND ROSSIGNAC, J. Geometric compression through topological surgery. *ACM Transactions on Graphics 17*, 2 (April 1998), 84–115.
- [33] TOUMA, C., AND GOTSMAN, C. Triangle mesh compression. *Graphics Interface 98 Conference Proceedings* (june 1998), 26–34.
- [34] TURAN, G. Succinct representations of graphs. *Discrete Applied Mathematics 8* (1984), 289–294.
- [35] TUTTE, W. A Census of Planar Triangulations. *Canadian Journal of Mathematics 14* (1962), 21–38.
- [36] TUTTE, W. A Census of Planar Maps. *Canadian Journal of Mathematics 15* (1963), 249–271.
- [37] VALETTE, S. *modèles de maillages déformables 2D et multirésolution surfacique 3D sur une base d'ondelettes*. Thèse de doctorat en sciences, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.
- [38] VALETTE, S., KIM, Y.-S., MAGNIN, I., AND PROST, R. A multiresolution wavelet scheme for irregularly subdivided 3d triangular mesh. In *IEEE Int. Conf on Image Processing - ICIP* (1999), pp. 171–174.
- [39] VALETTE, S., KIM, Y.-S., AND PROST, R. The inverse problem of wavelet scheme construction for irregularly subdivided 3d triangular meshes. In *Quality Control by Artificial Vision QCAV 2001, Le Creusot, France* (may 2001), pp. 452–457.
- [40] YEMEZ, Y., AND SCHMITT, F. Progressive Multilevel Meshes from Octree Particles. *Proceedings of 2nd International Conference on 3-D Imaging and Modeling* (1999), 290–299.