

Contributions au tatouage de maillages surfaceutiques 3D

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 9 décembre 2003

pour l'obtention des

Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications
(spécialité Signal et Image)

Doctorat de l'Université catholique de Louvain
(faculté des Sciences Appliquées)

par

François Cayre

Composition du jury

<i>Président :</i>	Jean-Jacques Quisquater	UCL
<i>Rapporteurs :</i>	Jean-Marc Chassery Olivier Devillers	INPG INRIA Sophia-Antipolis
<i>Examineur :</i>	Francis Schmitt	ENST Paris
<i>Directeurs de thèse :</i>	Benoît Macq Henri Maître	UCL ENST Paris

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à Henri Maître et Benoît Macq, qui ont accepté de me faire confiance pendant cette aventure d'un peu plus de trois ans. Qu'ils soient ici remerciés de la liberté totale dont j'ai pu bénéficier au sein de leurs équipes, de leur soutien indéfectible, de leur confiance surtout et enfin de leur regard critique sur ces travaux. Puissent-ils considérer ce travail comme l'expression la plus sincère de ma gratitude.

J'adresse de chaleureux remerciements à Olivier Devillers, qui s'est vite piqué au jeu du tatouage et m'a été d'une aide décisive en géométrie algorithmique. Qu'il soit ici remercié de s'être penché sur quelques-uns de mes problèmes, avec efficacité et rapidité, et d'avoir accepté de bien vouloir être rapporteur de ce travail. Ma gratitude va bien évidemment aussi à Jean-Marc Chassery, qui me fait l'honneur de s'intéresser à ces travaux, et d'en être le rapporteur. Je remercie aussi Francis Schmitt pour avoir suivi mes développements avec un œil acéré, même si les réflexes d'un tatoueur devant un maillage lui ont parfois paru un peu étranges. Merci également à Jean-Jacques Quisquater d'avoir accepté de juger ce travail : un intérêt tout particulier a été porté aux aspects de sécurité.

Je remercie encore Pierre Alliez, qui m'a permis de passer quelques jours décisifs au sein de PRISME, ainsi que Teddy Furon, Patrick Bas, Damien Delannay, Jean-François Delaigle, Frédéric Lefèbvre, Patrice Rondao-Alface et autres BMW... Mes remerciements vont également à Franck Davoine, de qui tout est parti, à Vincent Blondel, pour ses lumières en optimisation combinatoire, à Ton Kalker pour sa clarté et sa gentillesse, et à Isabelle Bloch, pour la musique et la littérature, et aussi un peu la science.

Merci aussi et surtout aux thésards de TELE et de TSI, qui ont réussi à me supporter pendant ces trois ans, merci à Marcella et Eduardo (et à Diego!), à Julien et Pauline, à Stéphane, Najib et Elen, merci à Oscar et Gaspar, les Heckle et Jeckle ibériques, à Yiolanda, Christophe (le Gosse), Yannis, Mariam, et Sabine. Et puis aussi à Christophe (celui qui milite pour l'abolition des structures musicales), Sveta, Ferdaous, Ryad Abdelfattah, Carlos, Alex (dans les caméras moultspectrals), Ève, Teh, Céline, Julie, Cléo, Slim, Ilaria, Tony, Yu, Grégoire et les autres...

Il n'aurait pas été possible d'arriver à bon port en si bon état tant moral que physique, politique, artistique, ou psychique sans les contributions très appréciées de : Ben et Élise (GNU no rulez!), Roland (revoir Liège...), Nico, Lolo, Amaël, Rocco, Stévos et les fadas du Square, MM. Saclier, Duce et Dumont (qui bien que roux reste un fort honnête homme), Nico et Sophie (je prends 10% des parts de la bergerie), Marie et Mathilde (pour les jeudis à la Flèche et plus encore), Tiphaine (des livres), Sophie (des bois) et Élise (des montagnes), Gégé (de la Butte), Lapin, Gibourse et Sophie, Taffitt, Deniche (depuis la sup...), Louloute, Méro, Crapule, et les gentils habitants de l'Ami Zondubô, Émeline et Caro (tous ensembles!), Patrice (not only hit music), Gégé (l'autre), Laure (pour un peu tout), Cécile (qui joue la vingt-neuvième de Mozart au cor à une heure du matin), Cécile (qui dort à une heure du matin), Cyrille et Carlotta (ma cabane au Canada...), Denis, Paul, Emma, mes voisins (pour leur patience à toute épreuve), la Tatarogne, Choucou et Bichou, Duchmoll, tout le monde à Miers, Nantes, Nice et ailleurs, et mes parents.

*The man who trades freedom
for security does not deserve
nor will he ever receive either.
Benjamin Franklin*

Table des matières

Introduction générale	1
1 Préambule : l’homme, le secret et le pouvoir	1
1.1 Lire un secret	2
1.2 Ecrire un secret	4
2 Positionnement de la thèse	8
3 Plan du manuscript	9

Tatouage et objets 3D

Chapitre 1	
Les techniques d’écriture secrète et leurs applications	15
1.1 Bref historique de l’écriture discrète	15
1.2 Tatouage et distribution des œuvres : une situation	21
1.3 Techniques numériques et cadres applicatifs	24
1.3.1 Stéganographie et contenus augmentés	25
1.3.2 Tatouage fragile, authentification et intégrité	26
1.3.3 Tatouage robuste et protection des documents	27
1.4 Le tatouage et son environnement	28
1.4.1 Vocabulaire	28
1.4.2 Le tatouage comme problème de télécommunication	28
1.4.3 Typologie des attaques	29

1.4.4	Sociologie économique de la piraterie	30
1.5	Conclusion	31
Chapitre 2		
Surfaces et maillages		33
2.1	Introduction	33
2.2	Principaux types de données surfaciques	33
2.2.1	Nuage de points	33
2.2.2	Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)	35
2.2.3	Maillages surfaciques	36
2.3	Surfaces triangulées	36
2.3.1	Propriétés topologiques	37
2.3.2	Triangulation de Delaunay	38
2.3.3	L'algorithme <i>Marching Cubes</i>	39
2.4	Paramétrisation des surfaces triangulées	40
2.4.1	Définition	41
2.4.2	Paramétrisation harmonique	43
2.4.3	Paramétrisation barycentrique de Tutte	44
2.4.4	Paramétrisation conforme	44
2.4.5	Paramétrisation de Floater	46
2.4.6	Découpe en disque topologique	47
2.5	Structures de données associées	47
2.5.1	Représentation brute	48
2.5.2	Représentation en demi-arête	48
2.5.3	Représentation <i>winged-edge</i>	49
2.6	Attributs supplémentaires	49
2.6.1	Grandeurs différentielles locales	50
2.6.2	Textures	51
2.6.3	Transparence	51
2.6.4	Réflectance	52
2.7	Modèles de distance entre maillages	53
2.7.1	Distance de Hausdorff et distance moyenne	53
2.7.2	Laplacien géométrique	54
2.8	Conclusion	54

Chapitre 3**Traitements usuels sur les maillages****55**

3.1	Codage de source	55
3.1.1	Schémas de prédiction/correction géométrique	55
3.1.2	Méthodes fondées sur la valence	56
3.1.3	Méthode de Taubin (MPEG-4)	62
3.2	Traitements affectant la géométrie uniquement	64
3.2.1	Ajout de bruit	64
3.2.2	Lissage	64
3.2.3	Rotation, translation et mise à l'échelle uniforme	65
3.2.4	Transformations perspectives	65
3.3	Traitements affectant la connexité	66
3.3.1	Renumérotation des points	66
3.3.2	Coupe	67
3.3.3	Décimation	67
3.3.4	Subdivision	69
3.3.5	Remaillage	70
3.4	Conclusion	71

Chapitre 4**État de l'art****73**

4.1	Schémas avec configuration géométrique locale	73
4.1.1	Arrangement global	75
4.1.2	Arrangement local	75
4.1.3	Arrangement indexé	78
4.2	Schémas sans configuration géométrique locale	79
4.2.1	Schéma de Wagner	79
4.2.2	Schéma <i>Vertex Flood</i>	81
4.2.3	Schéma pour l'intégrité	81
4.3	Autres espaces de représentation	83
4.3.1	Schéma dans l'espace spectral de la géométrie	83
4.3.2	Espace d'analyse multirésolution des maillages	84
4.3.3	Espace des NURBS	84
4.4	Conclusion	85

Contributions

Chapitre 5

Tatouage fragile par invariants géométriques

89

5.1	Motivations	89
5.2	Une primitive géométrique d'insertion	90
5.2.1	Description	90
5.2.2	Remarques sur la sécurité	92
5.2.3	Parcours en ruban pour un arrangement global	94
5.2.4	Un arrangement local	99
5.3	Arrangement indexé pour le tatouage fragile	103
5.3.1	Surcoût de codage	103
5.3.2	Stratégie pour le choix d'un autre invariant	103
5.3.3	Codage des numéros des bits par invariant	105
5.3.4	Validation de l'approche par arrangement indexé	106
5.4	Optimisation du nombre de sites	109
5.4.1	Algorithme	109
5.4.2	Preuve de terminaison	110
5.4.3	Discussion	112
5.5	Application au tatouage fragile	114
5.5.1	Contrôle de la distorsion	114
5.5.2	Détection	114
5.5.3	Sécurité des clefs	118
5.5.4	Résultats	119
5.6	Perspectives	121
5.6.1	Application du parcours optimal à la stéganographie	121
5.6.2	Application de l'arrangement indexé à l'intégrité	121
5.6.3	Tatouage de tous les triangles	123
5.6.4	Allocation adaptative des bits	123
5.7	Conclusion	123

Chapitre 6**Autour de la décomposition spectrale de la géométrie 125**

6.1	Cadre théorique	125
6.1.1	Opérateur laplacien pour le codage de source	126
6.1.2	Décomposition spectrale	127
6.1.3	Spectre de la géométrie	129
6.2	Partition du maillage	130
6.2.1	Remarques pratiques pour l'implantation	130
6.2.2	Un outil générant des partitions	131
6.2.3	Artefacts visuels dus à la partition	132
6.3	Bases de décomposition fixes	133
6.3.1	Augmentation des partitions et recouvrement	134
6.3.2	Transfert sur la connexité régulière	135
6.3.3	Cylindres topologiques	137
6.4	Un codeur/décodeur géométrique spectral	138
6.4.1	Schémas d'implantation	138
6.4.2	Transmission progressive de la géométrie	139
6.4.3	Compression et bases naturelles	140
6.4.4	Transmission et bases fixes	141
6.4.5	Remarques sur la décomposition spectrale	145
6.5	Tatouage spectral de la géométrie	146
6.5.1	Schéma de tatouage	147
6.5.2	Force et distorsion	151
6.5.3	Résultats	152
6.6	Conclusion	155

Conclusion**157****Bibliographie**

