



**HAL**  
open science

## Contribution à l'étude des surfaces discrètes et continues, transformation et reconstruction

Romain Raffin,

► **To cite this version:**

Romain Raffin,. Contribution à l'étude des surfaces discrètes et continues, transformation et reconstruction. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Aix-Marseille Université, 2013. tel-02465111

**HAL Id: tel-02465111**

**<https://hal.science/tel-02465111>**

Submitted on 3 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ



IUT D'AIX-MARSEILLE

Habilitation à diriger des Recherches  
en Informatique

---

# Contribution à l'étude des surfaces discrètes et continues, transformation et reconstruction

---

présentée par :

Romain RAFFIN

en vue d'obtenir l'Habilitation à diriger des Recherches de l'Université Aix-Marseille



soutenue le 11 décembre 2013 devant le jury composé de :

Gudrun ALBRECHT	Examineur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
Loïc BARTHE	Rapporteur, Université Paul Sabatier, Toulouse
Christian GENTIL	Examineur, Université de Bourgogne
Stefanie HAHMANN	Rapporteur, Université de Grenoble
Behzad SHARIAT	Rapporteur, Université de Lyon 1
Marc DANIEL	Tuteur, Université d'Aix-Marseille

---

## REMERCIEMENTS

Résumer les douze années depuis ma nomination de Maître de Conférences n'est pas une tâche facile. Même si la situation géographique n'a pas changé (Iut de Provence, site d'Arles), j'ai assumé des responsabilités pédagogiques, administratives et de recherche dans un environnement difficile (éloignement des structures, création de l'IUT de Provence, développement d'une formation, restructuration du laboratoire, fusion des IUT d'Aix-Marseille). J'oublierai sans doute des personnes dans mes remerciements et j'espère qu'elles m'excuseront. Mes premiers remerciements vont aux personnes de l'IUT qui m'ont soutenus dans cette tâche ou qui ont parfois mis de l'huile dans les rouages pour que les enseignants-chercheurs aient plus de liberté dans leur activité de Recherche : Thierry Millet et les directions successives, les personnels administratifs qui ont su répondre aux urgences et aux besoins, je ne les citerai pas tous car le *turn-over* a été important mais ils se reconnaîtront. J'exprime aussi mon respect pour les personnes que j'ai croisées et qui malgré des situations difficiles ont œuvré pour améliorer le quotidien : Karim, Claude, Cécile, Gérald, Pierrick, ... Merci à mes guides dans Apogée : Martine, Cécile, Annick et Nathaly qui ont su me faire comprendre les arcanes de ce soutien indispensable mais parfois traumatisant des Directeurs d'Études.

Merci au laboratoire LSIS et à Marc Daniel, le « chef » de l'équipe G-Mod pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis de prendre mon envol, le pari était risqué. Merci à Marc pour son hospitalité personnelle et professionnelle, sa chaleur humaine, sa disponibilité et sa réflexion toujours pointue, j'avoue ici mon profond respect. Les collègues de l'équipe évidemment qui permettent de créer cette activité d'échange et de réflexion, ponctuée de moments de convivialité. Je n'oublie pas mes compagnons de l'équipe à l'IUT, Brett, Éric, Sébastien qui sont des collègues de Recherche, d'Enseignement, et des amis. Un petit mot spécialement pour Gilles, parti trop tôt de l'IUT, après 15 années où nous nous sommes supportés, entraînés et développés. Nous avons traversé la thèse, les débuts galériens de l'IUT, la remise en question de notre travail et l'envie de s'en sortir avec le même esprit. Il y aura toujours un petit ~~vers~~ verre de goyave à la maison.

Mes remerciements vont aussi aux doctorants qui m'ont permis de donner une dynamique à ma Recherche, ceux que j'ai co-encadré Khoi, Axel, Thierry, Cang qui sont partis (ou presque) vers d'autres horizons, nous avons passé de bons moments, parfois dans une grande urgence mais finalement tous ont été récompensés. J'espère avoir été pour eux un bon « papa » de recherche. Et ceux que j'ai croisés et appréciés, Raphaël, Jean-Christophe, Mehdi, Gaël, Claire, Valentin, Dimitri, Guillaume, ..., tous font partie de cette petite famille que nous avons constituée au fil des ans. La valorisation de la Recherche me tient à cœur et pour cela la plate-forme technologique de l'IUT a eu une place particulière, merci Jean-Luc.

Pour terminer merci à Édouard Thiel d'avoir expertisé mon dossier pour l'Université d'Aix-Marseille, ainsi que mesdames et messieurs les membres du jury qui ont bien voulu valider mon travail d'enseignant-chercheur sans oublier les rapporteurs pour avoir accepté ce travail supplémentaire.

## Remerciements

---

Finalement, mais de loin le plus important pour moi, mes pensées vont également à ma famille - des plus grands au plus petits ainsi qu'à ceux qui ne sont plus, et un énorme merci à Véronique, Caroline et Mathieu qui me supportent, m'aident moralement en me permettant de faire la coupure avec ce métier très prenant.

Merci à vous tous.

---

## RÉSUMÉ

Ma carrière en tant qu'enseignant-chercheur a commencé à l'Université de Bourgogne, dans l'équipe « Images » du laboratoire LE2I. J'y ai passé mon doctorat et deux ans d'ATER temps plein. J'ai ensuite été nommé Maître de conférences à l'Université de Provence (aujourd'hui Aix-Marseille Université, AMU, ex-périmètre P1), à l'IUT de Provence. Mon laboratoire d'accueil est le LSIS (Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes, UMR CNRS 7296), dans le projet G-Mod (modélisation géométrique). Mes enseignements ont eu lieu principalement en Systèmes d'exploitation et en Imagerie Numérique dans les niveaux de formation DUT, L3Pro, M1 et M2.

Mes travaux de Recherche couvrent plusieurs thèmes en modélisation géométrique : la déformation géométrique de maillages surfaciques, les courbes et surfaces paramétriques pour la reconstruction, les surfaces de subdivision (vues comme un passage des surfaces aux maillages, et vice-versa) et les surfaces fermées épaisses (*offset*). Les applications de ces modèles ont été diverses (reconstruction à partir de données médicales, trajectographie, CAO - conception assistée par Ordinateur, normalisation).

Je souhaite que ma recherche ne reste pas mono-thématique mais essaie de s'adapter à chaque problème posé. J'ai parfois fait des choix plus éloignés de mes compétences initiales (surfaces paramétriques bi-périodiques pour la reconstruction, surfaces implicites pour la déformation) mais toujours dans un but de proposer une solution particulière, en collant au plus près des besoins. Ce sera également un thème important de mes activités futures, en voulant conjuguer surfaces discrètes et continues, de manière à utiliser le meilleur de chaque représentation en maîtrisant la complexité de passage d'une représentation à une autre.

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1. Activités pédagogiques</b>	<b>9</b>
1.1 Historique de l'administration à l'IUT . . . . .	10
<b>2. Activités de Recherche</b>	<b>12</b>
2.1 Historique des activités de Recherche . . . . .	13
2.2 État de l'Art . . . . .	15
2.2.1 Les déformations de formes libres . . . . .	15
2.2.2 Les surfaces paramétriques . . . . .	18
2.2.3 Les surfaces de subdivision . . . . .	19
2.3 Travaux de fin de doctorat . . . . .	24
2.3.1 Fonction de déformation . . . . .	25
2.3.2 Enveloppes d'influence . . . . .	26
2.3.3 Trajectoire de déformation . . . . .	27
2.3.4 Conclusion . . . . .	27
2.4 Déformations d'objets (suite des travaux de thèse) . . . . .	28
2.4.1 Objets volumiques discrets . . . . .	28
2.4.2 Surface à pôles . . . . .	29
2.4.3 Surfaces de subdivision . . . . .	30
2.5 Surfaces de subdivision, passage continu $\leftrightarrow$ discret . . . . .	33
2.5.1 Passage d'une surface à pôle à une surface de subdivision . . . . .	34
2.5.2 Raccordement de surfaces de subdivision . . . . .	37
2.6 Courbes et surfaces . . . . .	38
2.7 Normalisation . . . . .	45
2.8 Conclusion intermédiaire . . . . .	48
2.9 Projets et contrats . . . . .	49
2.9.1 Projet Carnot Star « Repara », 2011 . . . . .	49
2.9.2 Projet « Éphèbe », 2011-2012 . . . . .	49
2.10 Conclusion . . . . .	54
<b>3. Projets de Recherche</b>	<b>55</b>
3.1 À court terme . . . . .	55
3.2 À plus long terme . . . . .	57
3.3 Implication dans la Recherche . . . . .	59

Table des matières

---

Publications personnelles	61
Bibliographie	68
4. Publications représentatives	78
Curriculum Vitæ	131

---

## INTRODUCTION

Ce mémoire est réparti selon quatre chapitres dont trois couvrent la Recherche. Après cette introduction, le premier chapitre présente les activités pédagogiques et administratives depuis ma nomination en 2001. Il s'attache à montrer les relations constantes avec le monde économique, qui a permis de déboucher sur des projets scientifiques et l'encadrement d'un doctorant en financement région-entreprise. Il montre également qu'une partie de mes activités est liée à la structure d'enseignement à laquelle je suis rattaché. Le chapitre suivant (page 12) dresse l'état courant de mes activités de recherche. Ma thématique principale est la modélisation géométrique. Elle se développe pour mon cas dans le domaine de la conception (Conception Assistée par Ordinateurs, CAO), mais des extensions peuvent être faites dans le domaine du jeu ou de la production graphique, des données médicales. Ce thème de Recherche a toujours une dynamique forte, poussé par les différentes applications mais également par son lien avec les mathématiques. Il est par exemple difficile de définir une pièce par des mots du dictionnaire courant mais « beaucoup » plus aisé d'utiliser un ensemble de descripteurs mathématiques, des positions, des voisinages ou des formules définissant des courbes, des surfaces ou des volumes. Mes travaux de Recherche ne sont pas mono-thématiques, mon habitude est plutôt d'aggréger des compétences existantes pour répondre au mieux à un problème spécifique. Cela n'empêche pas un travail théorique sur les méthodes mais permet d'adapter la réponse théorique d'une méthode (ou le mélange de plusieurs) à une interrogation particulière.

Nous y verrons donc dans le deuxième chapitre que mon sujet de doctorat sur les déformations de formes libres m'a permis d'appréhender des problématiques de modélisation géométrique, de contraintes de déformations, de l'utilisation de surfaces implicites, volumiques discrètes, de courbes et surfaces paramétriques ou de subdivision (travaux personnels de doctorat, de collaboration avec S. Lanquetin du LE2I, avec R. La Greca du LSIS, d'encadrement d'un master en 2005). L'objectif final de ce travail est de donner accès à des outils génériques de déformation, basés sur des contraintes à poser sur l'objet initial (à l'instar de l'extension SCODEF [BD93] [BR94] des Déformations de Formes Libres - FFD [SP86], un point une ligne, une courbe ou plus), la définition d'une contrainte par un lieu géométrique qui doit être satisfait par la déformation (un vecteur de déplacement, une courbe) et le voisinage impacté par la déformation. En dehors de ces outils de modélisation, ces outils sont parfois utilisés dans la gestion de la peau de personnage (*skinning*) par le biais de systèmes de coordonnées ou de déformation par *cages* [JZvdP+08, GPCP13].

J'ai ensuite puisé dans ces compétences pour démarrer un projet de recherche sur les surfaces de subdivision où l'objectif est de permettre un passage des modèles continus à des modèles discrets et inversement (travaux de thèse de Khoi Nguyen Tan, soutenue en 2010). Les surfaces de subdivisions sont largement utilisées dans le domaine de la production infographique (jeu, cinéma, publicité) car leur mise en œuvre est relativement simple et que les objets définis de manière grossière peuvent être lissés facilement (augmentation du nombre de facettes, utilisation d'un schéma basé sur des coefficients barycentriques pour faire tendre le maillage vers une surface  $C^1$ ,  $C^2$ , ..., -continue). Cette opération de lissage peut être faite lors du calcul de la scène finale et trouve son intérêt à l'utilisation de fermes



de calculs lors du rendu. Ces surfaces sont également intéressantes car elles lient l'aspect discret des maillages initiaux à des surfaces limites paramétriques obtenues par une infinité de subdivisions (le lecteur pourra se référer aux *courses notes* du Siggraph pour une présentation exhaustive des surfaces de subdivision [ZS00a]). Le principal écueil pour une utilisation en CAO vient des 2 types majeurs de représentation : les surfaces d'interpolation et d'approximation. Les surfaces d'interpolation sont utiles car elles conservent les sommets initiaux de subdivision en subdivision, mais « détendent » au fur et à mesure la surface en en diminuant la tension. Le contrôle se fait donc sur les sommets (ou les arêtes). Les surfaces d'approximation contractent le maillage tout au long des subdivisions successives. Le contrôle peut donc se faire sur la continuité de la surface finale (ce qui est intéressant pour la conception) mais pas sur les positions. Nous cherchons donc dans les travaux de ce projet à utiliser une surface approximante dont on contrôlerait la contraction. En poussant plus loin l'analyse, un manque est apparu rapidement sur la gestion du raccordement de maillages et de surfaces de subdivision (thèse de Cang Phan Anh, soutenue en 2013). Ce problème reste encore ouvert et est un défi important pour la recherche en Modélisation Géométrique.

Un troisième axe de Recherche a porté sur les courbes et surfaces paramétriques pour la reconstruction d'objets lors de l'ANR MoDyPe (ANR-09-SYSC-008, 2010-2013), avec la thèse de Thierry Bay soutenue en 2012. Nous avons développé un modèle de surfaces paramétriques périodiques, des méthodes de reconstruction (*fitting*) par minimisation d'énergie, des descriptions géométriques, mécaniques, paramétriques d'offsets pour construire un objet surfacique épais (volume creux) adaptable à la mécanique (par éléments finis). De nombreuses méthodes de reconstruction généralement liées à une description d'objet (implicite/paramétrique, discrète/continue, surfacique/volumique, ponctuelle/topologique, ...). Nous avons choisi un modèle paramétrique pour généraliser les sorties disponibles de notre « work package » : surfacique continue pour de l'analyse locale fine, surfacique discrète pour la visualisation, volumique discrète (en éléments finis) pour la simulation mécanique. Afin de prendre en compte le bruit dû à la saisie des points par les experts et au recalage des données selon les plans de coupe d'IRM<sup>1</sup>, nous nous sommes basés sur une déformation de la surface paramétrique (via ses points de contrôles) et une convergence vers les points de données par une minimisation d'énergie. L'innovation de notre processus a été de prendre en compte des distances bi-directionnelles des données à une discrétisation de la surface et inversement au lieu de la classique projection orthogonale qui induit des artefacts (glissement de la surface et repliements). Afin de coller au mieux aux formes à reconstruire, l'algorithme n'utilise pas un corpus de connaissances a priori mais recherche des axes principaux (curvilinéaires) par des méthodes statistiques (notamment un axe médian). De la même manière la forme initiale est obtenue par analyse radiale selon cet axe médian. La principale difficulté qui ouvre également des champs de recherche très intéressants est provoquée par la création des hexaèdres utiles à la simulation mécanique. Pour ce domaine des recherches existent également, reposant sur des maillages discrets, nous nous sommes appuyés sur la surface paramétrique d'approximation pour mieux contrôler la qualité des hexaèdres produits. Il reste malgré tout des difficultés selon les courbures locales ou les formes globales des objets, et l'expression purement fonctionnelle de ce modèle est toujours à l'étude.

L'ensemble de ces travaux m'ont donné une connaissance globale applicable dans le domaine de la normalisation des échanges des objets géométriques entre systèmes d'informa-

---

1. Imagerie à Résonance Magnétique

tion géographiques (thèse Région PACA-Geomatys d'Axel François). Nous avons participé et apporté nos compétences aux *Technical Committees* de l'Open Geospatial Consortium, pour proposition à l'ISO 19107. Ces travaux ont porté sur la généralisation des objets (dans un environnement de modélisation par concepts), la généralisation des opérations pouvant s'effectuer entre objets et le besoin d'un passage dynamique d'un modèle à l'autre pour les entrées, les calculs et les sorties des différents algorithmes.

Une partie de mes travaux de Recherche porte également sur des collaborations avec d'autres équipes, d'autres champs disciplinaires. Ils sont détaillés à la fin de ce deuxième chapitre. La conclusion de ce chapitre identifie les problèmes encore ouverts, et le troisième chapitre (à partir de la page 55) présentera mes projets de recherches à court et plus long termes. Après la liste de mes publications et la bibliographie des références de ce document (depuis la page 78), le lecteur pourra trouver 5 publications représentatives de mon travail de Recherche. Finalement un curriculum vitæ détaillé clôt ce mémoire.

## ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

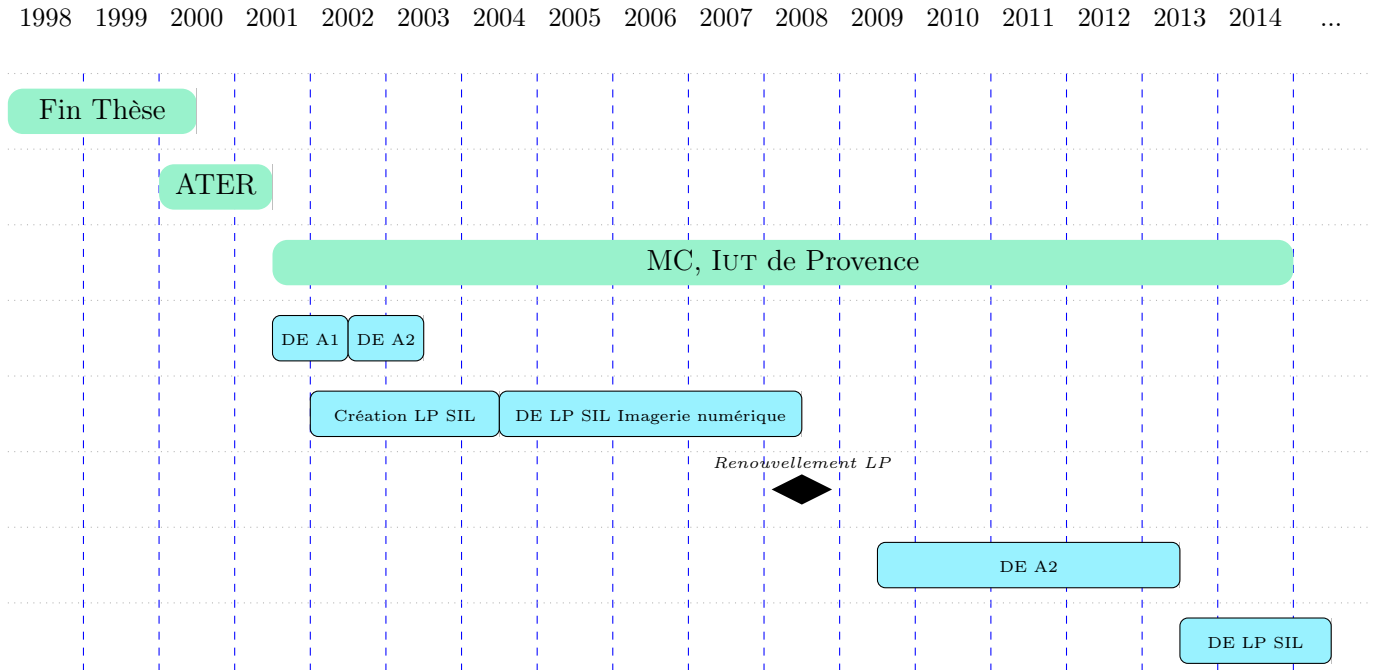
Mes activités pédagogiques se sont déroulées à l'IUT de Provence, au département Informatique du CERI de l'Université d'Avignon, au département Sciences de l'Université d'Aix-Marseille et dans quelques formations annexes mais enrichissantes (École des Beaux-Arts d'Aix en Provence, École Militaire de l'Air, Maths en Jeans). Je donne annuellement et en moyenne depuis ma nomination en tant que Maître de conférences 60 heures de Systèmes d'exploitation en DUT Informatique, 25h en Licence Professionnelle (LP) « Imagerie Numérique » dans le tronc commun (Gnu Linux, shell, programmation système), et 60h de Synthèse d'images (modélisation géométrique, OpenGL) en DUT 2<sup>ème</sup> année et 65h en LP. Depuis 2008 30h dans le Master2 professionnel « Réseaux et multimedia » de l'Université d'Avignon sur le traitement de données multimedia et leurs encodages pour la transmission, et depuis 2012-2013 dans le Master « Sciences de l'Information et des Systèmes » (SIS) de l'Université d'Aix-Marseille, en M2 sur les modèles pour la production d'images : traitement et visualisation de données géométriques à haute-performance (30h, Geometry Processing, OpenGL, GLSL, WebGL, OpenMP) et en M1 sur les modèles géométriques continus et discrets, courbes et surfaces, subdivision.

Tous ces enseignements impliquent la responsabilité du module et l'inscription dans la maquette de la formation. Mes activités pédagogiques concernent évidemment l'encadrement de stagiaires DUT/LP (en moyenne 7 par ans) et les soutenances (15 par an), ainsi que les projets tuteurés, que nous avons orientés à Arles vers des besoins d'industriels, de PME/PMI, de TPE ou de laboratoires publics/privés. Ces projets de déroulent sur un ou deux ans (en LP ou en DUT respectivement), ont pour objectif de parcourir l'ensemble d'un projet Informatique, de l'expression des besoins au cahier de maintenance et s'effectuent en liaison avec des enseignants extérieurs, professionnels de la gestion de projet réputés dans la standardisation et très actifs, sous contrôle d'un enseignant de l'IUT. Les 4 à 6 étudiants fonctionnent en groupe avec un chef de projet et avec un rythme assez proche de l'entreprise et développent un prototype ou une preuve de concept. J'encadre 2 à 3 projets tuteurés par an sur des sujets divers comme la visualisation de bases de données 3D sur l'Internet (avant-projet Ephèbe que nous verrons plus loin), reconnaissance vidéo de signes de la Langue des Signes, gestion de notices d'images sous format Dublin Core, ...

Ces dernières activités permettent un rapprochement avec le milieu industriel et de recherche appliquée qui nous permet de suivre les contraintes du marché, les technologies en devenir ou les besoins de Recherche et d'Innovation. Ce point a toujours été important pour moi.

## 1.1 Historique de l'administration à l'IUT

La figure suivante montre les responsabilités pédagogiques et administratives que j'ai assumées à l'IUT. Elles sont surtout centrées sur les étudiants, via la Direction des Études (DE) de 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> années de DUT ou de responsabilité de licence professionnelle (LP).



**Figure 1.1.** Responsabilités administratives et directions d'études (DE)

J'ai été missionné en 2002 pour la création de la licence professionnelle « Systèmes Informatiques et Logiciels » (SIL) mention « Imagerie Numérique » à l'IUT. Cette licence souhaite 1) effectuer un rôle d'ascenseur pour les étudiants de provenance diverses, avec une composante informatique dans leur formation (DUT, BTS, Licence générale mais aussi CPGE, Formation Continue), 2) leur donner une compétence reconnue dans le domaine restreint du développement pour la synthèse et la manipulation d'images. Ce niveau de qualification permet aux étudiants d'avoir un bon bagage technique et d'être intégrables facilement et d'avoir assez de réflexion sur le sujet pour discuter facilement avec les développeurs seniors ou les chefs de projet de leurs entreprises d'accueil. Malgré les poursuites d'études en Master, les insertions en entreprises de la spécialité dès le diplôme obtenu sont très bonnes, ainsi que les avis sur nos étudiants. Au final la licence a été créée en 2004 et renouvelée sous ma responsabilité en 2008. Après quelques années de Directeur d'Études 2<sup>ème</sup> année, je reprends la responsabilité de cette licence professionnelle en septembre 2013.

La mission d'enseignant à l'IUT couvre également le respect du Programme Pédagogique National (PPN) par les enseignants et vacataires, l'encadrement et l'accompagnement des étudiants, et le respect de la règle de l'assiduité. Nous avons participé aux différentes versions de PPN modifiant les enseignements de tronc commun (architecture, systèmes, réseaux) ou de spécialité (option, mention, parcours) comme l'Imagerie Numérique (PPN 2003, 2005 et 2013). Cette activité m'a engagé dans l'expertise des Licences Professionnelles pour

l'AERES<sup>1</sup> (depuis 2010), et vers ma nomination au CNU<sup>2</sup> pour la 27<sup>ème</sup> section (2011-2015).

La relation permanente avec les entreprises pour les stages et projets nous permet également de proposer de les accompagner dans l'innovation. Je me suis tourné vers l'expertise des projets de Crédits d'Impôts Recherche (CIR) et Jeune Entreprise Innovante (JEI), avec la DRRT PACA<sup>3</sup>. C'est un travail entraînant que d'arriver à faire la part entre l'innovation et le développement, entre le prototype et l'industrialisation et de suivre également les cheminements de Recherche et Développement au grès des besoins et des réussites scientifiques. Cette relation avec les entreprises a également induit ma participation au Conseil d'Administration du PRIDES « Industries Culturelles et Patrimoines » développé par la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI) du Pays d'Arles depuis 2 mandats en tant que représentant du laboratoire LSIS. Ce « Pôle Régional d'Innovation et de Développement Économique Solidaire » est une association labellisée par la région PACA, qui tisse des liens entre entreprises et chercheurs, de l'archéologie à la prise de vue aérienne, de la rénovation de statues à l'analyse sociologique des visites d'un site culturel.

---

1. Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur <http://www.aeres-evaluation.fr/>

2. Conseil National des Universités <http://cnu27.iut2.upmf-grenoble.fr/>

3. Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie <http://www.drirt-paca.fr/>

## ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Ce chapitre regroupe mes travaux de Recherche sur 15 ans, depuis mon doctorat au LE2I à Dijon jusqu'à aujourd'hui au LSIS UMR 7296, dans l'équipe G-Mod dirigée par M. Daniel.

Mes travaux sont principalement centrés sur la déformation géométrique de type formes libres, la reconstruction d'éléments géométriques, courbes et surfaces discrètes ou continues, à partir de nuages de points ou de maillages. Ces travaux sur des représentations d'objets géométriques m'ont également conduit à confronter ces représentations dans le cadre d'opérations (intersection, inclusion, CSG, ...) où le choix de la représentation induit une efficacité, une calculabilité. Globalement, les méthodes développées cherchent à obtenir le passage des modèles discrets aux modèles continus (et inversement), en gérant ce passage sous contraintes d'exactitude ou au minimum de connaissance des erreurs effectuées.

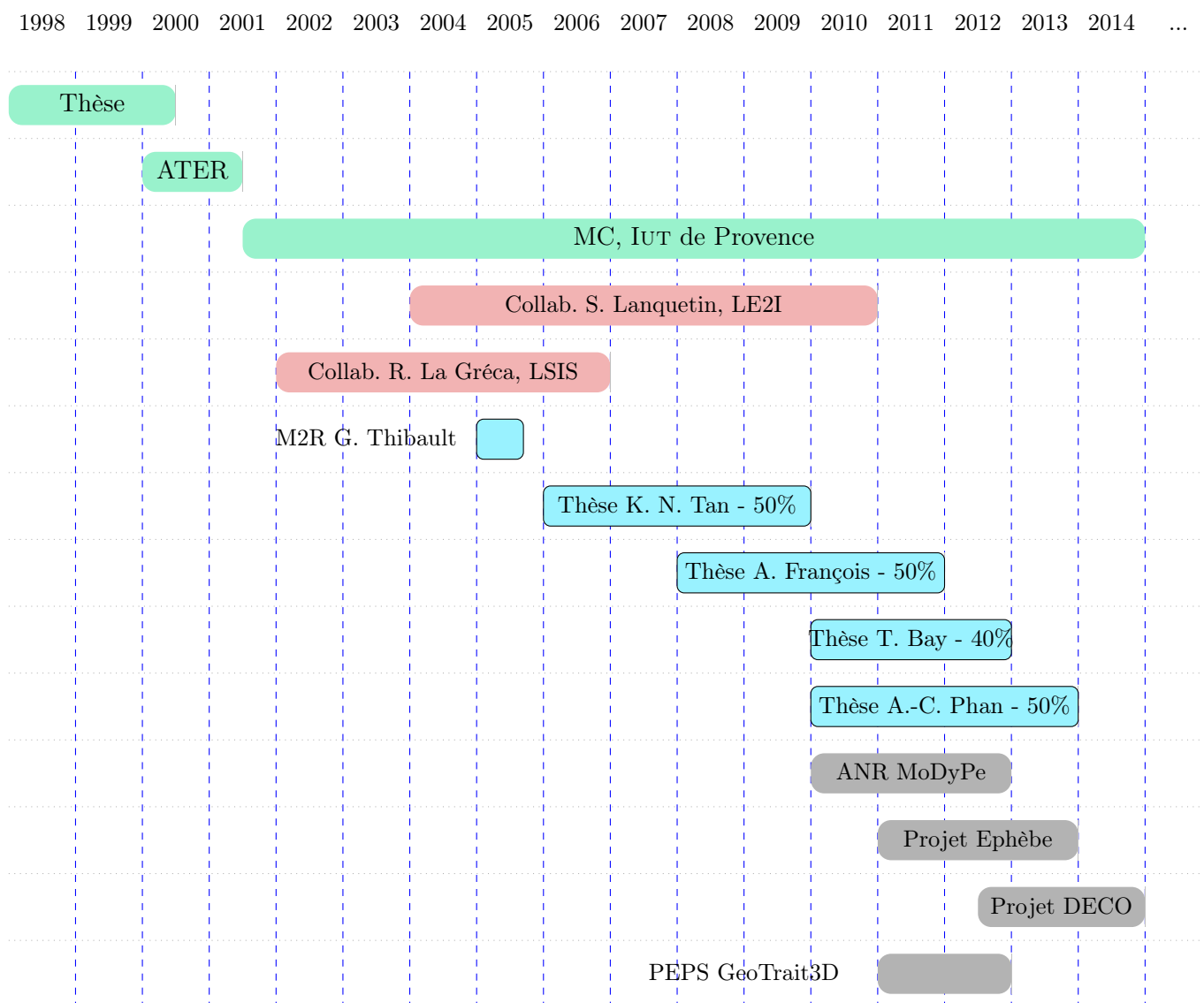
Les travaux sont présentés avec les publications qui correspondent, en classant par modèles de représentation d'objet géométrique. La volonté dans ce classement est de montrer que ma Recherche a toujours été guidée par le modèle de représentation. On assiste en début de document puis en fin à une convergence entre les modèles. Les déformations de formes libres, mon premier thème de recherche, veulent se détacher de la représentation des objets qu'elles déforment en s'appuyant seulement sur des sommets, sans tenir compte d'une topologie ou d'une fonctionnelle de courbe ou de surface. Cette méthode a montré ses limites puisqu'avec trop de libertés dans les contraintes de déformation l'utilisateur peut arriver à des cas critiques (auto-intersections, singularités). Après avoir évalué d'autres modèles d'objets (volumique discret, surfacique paramétrique, surface de subdivision), mes derniers travaux de recherche portent sur la généralité et la traduction de modèles. En partant du principe qu'un modèle ne peut répondre à toutes les problématiques je souhaite développer et maîtriser le passage sous contraintes d'un modèle à un autre.

C'est un enjeu majeur pour la CAO, qui souhaite définir un objet par une première ébauche lisse grâce à des surfaces de subdivision, puis effectuer un calcul précis sur des surfaces paramétriques de type B-spline, NURBS, pour finalement dériver l'objet en maillages pour la communication ou le calcul de collision. À l'inverse, il faut pouvoir remonter une propriété, une contrainte depuis le maillage vers l'objet continu. Ces va-et-vient entre les modèles discrets et continus ne se feront qu'avec des propriétés sémantiques associées aux objets ou à des parties de ceux-ci.

Quelques publications sur mes travaux sont disponibles dans ce document (Annexes 4, depuis la page 61). La bibliographie générale des publications référencées dans ce document est listée à partir de la page 77 .

## 2.1 Historique des activités de Recherche

La figure 2.1 suivante donne un panorama de mes activités de Recherche depuis la thèse, puis le poste d'ATER à l'Université de Bourgogne, et la nomination au poste de Maître de Conférences, 27<sup>ème</sup> section (Informatique) dans le département Informatique de l'IUT de Provence, site d'Arles.



**Figure 2.1.** Activités de Recherche

Cet aperçu montre une activité réduite les premiers temps de ma nomination en tant qu'enseignant-chercheur à l'IUT. Les difficultés de montage de cet institut et de la co-créditation du département Informatique (avec Gilles Gesquière, en binôme Directeur d'études - Chef de département respectivement) ont pris mon temps de Recherche à (plus de) 100%. Heureusement les collaborations avec des collègues (S. Lanquetin du laboratoire LE2I, R. La Gréca du LSIS et les enseignants-chercheurs en Informatique de l'IUT) m'ont permis de maintenir une activité de recherche jusqu'à une période plus propice en projets et en encadrements de

Masters et Thèses. Ces collaborations m'ont également donné à réfléchir sur ma thématique de Recherche et les interactions avec d'autres thèmes, d'autres modèles. Ce cheminement est présenté dans les parties suivantes du document, en faisant un rappel des travaux de doctorat sur la déformation de formes libres, principalement des maillages triangulaires, qui a été porté vers d'autres modèles de représentation discrète ou continue. Cette réflexion a induit le passage d'un modèle à un autre, dans la reconstruction d'objets géométriques à partir de sources plus pauvres en information, comme les nuages de points par exemple, et dans le cadre du passage discret  $\rightarrow$  continu.

Les recherches qui ont été menées, associées aux projets plus appliqués, m'ont montré que la reconstruction, ou le passage d'une représentation pauvre, discrète à une représentation continue et plus riche sémantiquement ne peut se faire que par la réintroduction de cette sémantique. Ce sera sans nul doute un chapitre majeur de mes recherches à venir.



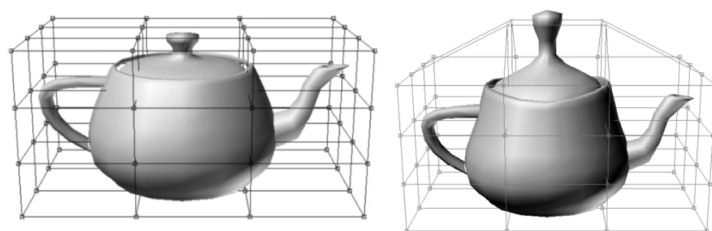
## 2.2 État de l'Art

Avant de décrire mes activités de Recherche, je souhaite proposer un court état de l'Art sur les méthodes qui ont construit mon parcours. L'objectif de cette partie n'est pas une présentation exhaustive et en profondeur de chaque méthode, mais de donner des repères au lecteur pour les parties suivantes. Des descriptions plus détaillées sont disponibles dans la bibliographie référencée pour ces méthodes, ou dans les mémoires de thèse des étudiants que j'ai encadrés. Comme pour mes travaux de recherche, cette partie est segmentée selon les modèles principaux d'objets utilisés pendant mes projets (surfaces paramétriques, surfaces de subdivision).

Je commencerai par les déformations de formes libres puisque ces méthodes ne sont pas liées à une représentation particulière.

### 2.2.1 Les déformations de formes libres

Ce thème de recherche prend sa source dans les déformations de Barr [Bar84]. L'utilisateur, au lieu de déplacer des sommets ou des groupes de sommets sélectionnés (comme [Par77] le propose), peut utiliser des outils plus globaux comme la rotation, la torsion, le pincement, ... Ces transformations sont exprimées matriciellement et s'applique généralement à tout l'objet. Sederberg invente en 1986 [SP86] le concept de « Déformation de Formes Libres » (*Free-Form Deformation* - FFD). Lorsque l'on souhaite déformer un objet géométrique, on le plonge celui-ci dans un maillage englobant, qui va être déformé, entraînant la déformation de l'objet initial (cf. fig. 2.2). La difficulté de l'algorithme étant évidemment d'exprimer les sommets de l'objet initial dans le repère du maillage englobant. Sederberg considère son parallélépipède comme un ensemble de points de contrôle d'un volume de Bézier, et utilise les polynômes de Bernstein comme les coefficients décrivant les coordonnées de chaque sommet initial. Les FFD cherchent donc à déformer un objet par ses points, sans tenir compte du voisinage ou de sa topologie. Ces déformations ne sont pas liées à la description de l'objet (points d'un maillage, de contrôle d'une surface, de centres de surfaces implicites, ...) ni à sa dimension. Leurs revers principaux sont que l'utilisateur ne maîtrise pas la forme de l'objet final, ni les contraintes de position des points initiaux.



**Figure 2.2.** Exemple de déformation FFD. À gauche la définition du volume englobant, à droite la modification de celui-ci et la déformation de la théière

Les possibilités données par les FFD ont entraîné la création de nombreux outils de déformation dans les années 1990-2000. Quelques pistes de recherche bibliographique :

- en dimension 0 - déformation ponctuelle, [HHH92], [BB91], [BR94], [MMT97]<sup>1</sup>,
- en dimension 1 - courbe de déformation, [LCJ93], [SF98]

1. Cette publication est aussi le début des systèmes de coordonnées locales pour le *skinning* de personnages.

- en dimension 2 - surface, [FMP96]
- en dimension 3 - volume, [HQ03], [HHH92], [LW94], [KMTT92], [MJ96], [Nie91], [GP89], [Coq90], [AB97], [FvT97], [Cre98]

D. Bechmann [BB91] [BD93] [BBT95] [BD95] a développé la déformation ponctuelle pour l'exprimer sous forme d'un système de contraintes à résoudre, quelle que soit la dimension des données initiales. Cela a été ensuite repris par Borrel et Rappoport [BR94] pour définir des enveloppes d'influence de contraintes ponctuelles, limitant ainsi la déformation. Ce modèle équivaut à considérer les espaces initiaux et finaux comme deux projections particulières sur  $\mathbb{R}^n$  d'un espace de dimension  $m$ . Une déformation de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}^n$  est définie par une fonction  $d : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  qui associe à chaque point son déplacement.

Si on définit :

- $Q(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  un point de l'espace  $\mathbb{R}^n$
- $\Delta Q(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n)$  les coordonnées du déplacement de  $Q$ .

$$\Delta Q = d(Q) = (d(x_1), d(x_2), d(x_3), \dots, d(x_n))^T$$

Avec  $M$  la matrice de projection :

$$d(Q) = M.f(Q) \tag{2.1}$$

*Remarque :* la fonction  $f$  définit le type de la déformation (par exemple locale ou globale).

Le principe de ce processus est simple a priori. L'utilisateur choisit seulement ses points de contraintes, par lesquels passera obligatoirement la courbe, la surface ou le volume transformé. On utilise ensuite les déplacements des points de contraintes pour initialiser la matrice  $M$ . On en déduit ensuite les déplacements de tous les points de l'espace. Pour une fonction  $f$  donnée, on peut donc définir le processus de déformation en trois étapes :

- L'utilisateur donne  $r$  contraintes  $C_i$ ,  $i \in [1, r]$  dans  $\mathbb{R}^n$  et spécifie leurs nouvelles positions. On pose  $d(C_i) = [d_1(C_i), d_2(C_i), \dots, d_n(C_i)]^T$  la variation des coordonnées des contraintes.
- La matrice  $M$  est obtenue en résolvant le système de  $n \times r$  équations ( $n$  par contrainte) :

$$d(C_i) = M.f(C_i) \quad \forall i \in [1, r] \tag{2.2}$$

- Une fois  $M$  calculée, le déplacement  $d(Q)$  d'un point quelconque  $Q$  de l'espace initial est donné par :

$$d(Q) = M.f(Q)$$

$M$  est la solution du système d'équations linéaires explicité à l'équation 2.2. En considérant chaque ligne  $M_j$  de  $M$  séparément, pour la  $j^{\text{ème}}$  coordonnée de l'espace  $\mathbb{R}^n$ , il est possible de résoudre les lignes de  $M$  indépendamment :

$$d_j(C_i) = M_j.f(C_i) = f^T(C_i).M_j^T, \quad \forall i \in [1, r] \text{ et } j \in [1, n]$$

En considérant toutes les contraintes, pour la  $j^{\text{ème}}$  coordonnée :

$$D_j = \begin{bmatrix} d_j(C_1) \\ d_j(C_2) \\ \vdots \\ d_j(C_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^T(C_1) \\ f^T(C_2) \\ \vdots \\ f^T(C_r) \end{bmatrix} . M_j^T = X.M_j^T \tag{2.3}$$

avec

$$X = \begin{bmatrix} f_1(C_1) & \dots & f_m(C_1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(C_r) & \dots & f_m(C_r) \end{bmatrix}$$

Comme le but de cette manipulation est de calculer la matrice  $M$ , on a :

$$M_j^T = X^{-1} \begin{bmatrix} d_j(C_1) \\ d_j(C_2) \\ \vdots \\ d_j(C_r) \end{bmatrix}$$

La difficulté essentielle de cette méthode réside dans le calcul de l'inverse de la matrice  $X$ . En effet, de dimension  $r \times m$ , cette matrice n'est en général pas inversible. Trois cas se présentent alors :

- Si  $m > r$ , le système a plus d'inconnues que d'équations, il admet donc une infinité de solutions, quel que soit le rang de la matrice  $X$ . Chaque solution correspond à une déformation satisfaisant les contraintes,
- Si  $m = r$  et si le rang de  $X$  est  $r$ , le système admet une solution unique. Les contraintes définissent alors complètement la déformation,
- Si  $m < r$ , le système n'a pas de solution, il faut alors utiliser une méthode qui donne une approximation de la solution satisfaisant au mieux les contraintes.

Il faut donc choisir, chaque fois que possible, une valeur de  $m$  supérieure (ou égale) au nombre de contraintes.

Borrel et Rappoport [BR94] ajoutent un rayon d'action et définissent le modèle SCODEF (*Simple CO*nstrained *D*eformation). Une contrainte est alors composée de :

- un point de contrainte  $C_i$ ,
- $D_i$  le déplacement de ce point,
- $R_i$  le rayon d'action associé à  $C_i$ ,
- $f_i$  la fonction associée à  $C_i$ .

La déformation est globalement identique et reprend l'équation 2.1. Le déplacement du point  $Q$  est donné par :

$$d(Q) = M.f(Q)$$

Comme la déformation est ici le résultat des déformations engendrées par les  $r$  contraintes, on peut écrire l'équation précédente sous la forme :

$$d(Q) = \sum_{i=1}^r M_i.f_i(Q) \tag{2.4}$$

$M_i$  est un vecteur colonne de dimension  $n$ , calculé pour pouvoir satisfaire les contraintes. Nous pouvons donc voir que le modèle est similaire à celui de [BB91] pour le produit simple.  $f_i$  représente la contribution de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte au déplacement du point  $Q$ . C'est une fonction scalaire dépendant de chacune des contraintes  $C_i$  et de leurs rayons  $R_i$  :

$$f_i(Q) = B_i \left( \frac{\|Q - C_i\|}{R_i} \right)$$

où  $B_i$  est une fonction de base B-spline centrée en 0 et décroissante pour être nulle en 1. On posera pour la suite de ce propos  $U_i(Q) = \|Q - C_i\|/R_i$  et  $f_i(Q) = B_i(U_i(Q))$ . On peut considérer  $U_i(Q)$  comme une paramétrisation locale des coordonnées du point  $Q$  dans  $C_i$ .

La valeur  $f(0) = 1$  permet d'assurer la satisfaction de la contrainte. Elle est nulle au-delà du rayon d'influence, garantissant le bon fonctionnement de celui-ci. La dimension de  $M$  est  $n \times r$  et celle de  $f(Q)$  est  $r$ . En fait  $M_i$  module la contribution de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte. La résolution d'un tel système est classique mais peut conduire à un calcul de minimisation lorsque les contraintes sont trop proches les unes des autres.

## 2.2.2 Les surfaces paramétriques

La reconstruction d'objets par des surfaces paramétriques de type Bézier, B-splines, NURBS a fait l'objet de très nombreuses publications. Les contraintes liées à chaque objet à reconstruire (dimension, représentation, présence de bruit, importance des courbures, ...) et à chaque domaine (construction navale, aéronautique, trajectographie, médical, production industrielle, ...) ont entraîné la création d'algorithmes spécialisés. Nous avons choisi d'utiliser ces modèles de surface, après comparaison avec d'autres méthodes parmi les plus utilisées :

- avec un modèle maillé de surface on peut citer [SLS<sup>+</sup>06] [Del06]. Bien souvent l'adaptation de la surface se fait par déformation depuis un modèle initial accouplé à une fonction d'énergie,
- avec une ou plusieurs surfaces implicites [TO99] [LKHW03] [Ges00] [ABCO<sup>+</sup>01] [Lev03],
- en combinant des surfaces algébriques [KBH06],
- en identifiant des points de données dans un ensemble de cellules discrètes [HK06]

Les surfaces paramétriques (ou « à pôles ») sont formées par des pôles (ou point de contrôles) et un ensemble de paramètres (cf. [PT97]). Les pôles sont les sommets d'un polyèdre dans  $\mathbb{R}^3$ . La paramétrisation de la surface permet de décrire dans un espace de dimension 2 des points de la surface dans  $\mathbb{R}^3$ . Une fonction utilise ensuite ces couples paramétriques  $(u, v)$  pour leur faire correspondre des triplets de coordonnées  $(x, y, z)$ . Cette fonction est une combinaison des points de contrôle affectés de coefficients barycentriques. Dans le cas d'une surface B-spline, les éléments à considérer pour l'algorithme de reconstruction sont déduits de la formulation de la surface :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) P_{i,j} \quad (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1] \quad (2.5)$$

avec  $k$  et  $l$  les ordres respectifs dans les directions paramétriques  $u$  et  $v$ , les  $P_{i,j}$  les points de contrôle, et les  $N_{i,k}$  et  $N_{j,l}$  les fonctions de base B-splines. À partir d'une séquence de nœuds dans l'intervalle paramétrique, on construit les fonctions de base grâce à une relation récursive. Par exemple pour la direction paramétrique  $u$ , les  $u_i$  nœuds créent les bases  $N_i$  par :

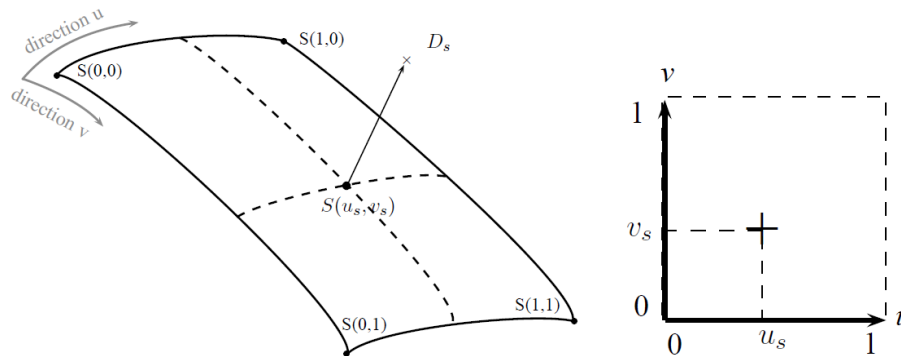
$$\begin{cases} N_{i,1}(u) = 1 \text{ si } u \in [u_i, u_{i+1}[ , \text{ et } 0 \text{ sinon} \\ N_{i,s}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+s-1} - u_i} N_{i,s-1}(u) + \frac{u_{i+s} - u}{u_{i+s} - u_{i+1}} N_{i+1,s-1}(u) \text{ avec } s = 2, \dots, k \end{cases} \quad (2.6)$$

L'ajustement de surfaces à pôle de ce type se fera ensuite via l'accroche de données à la surface (voir fig. 2.3), i.e la paramétrisation des points de données<sup>2</sup>. Cette partie est

---

2. On consultera les publications suivantes sur la paramétrisation a priori de courbes et surfaces : [Far02] [dB78] [RS82] [B86] [Lee89] [FN89].

la plus délicate puisqu'en fixant le couple  $(u, v)$  de chaque point de donnée elle induit une paramétrisation de la surface finale et donc l'évolution des caractéristiques locales (tensions, vitesses). Les paramètres à faire évoluer pour la reconstruction (en utilisant comme fonction de coût à minimiser la distance des points de données à leur homologues sur la surface) sont donc les pôles de la surface (cf. [dB78] [Dan89] [Cha06b]). Dans le cadre de méthode alternée, l'étape de paramétrisation est effectuée après chaque étape de minimisation (cf. [AB01] [SKH98] [Hos88] [SD03]).



**Figure 2.3.** Ajustement d'une surface B-spline  $S(u_s, v_s)$ , accrochée aux données  $D_s$

D'autres surfaces paramétriques peuvent être utilisées (T-splines [SZBN03], NURBS [PT97], [Sed11], [RB02], Bézier [Bé87], ...) les contraintes et les résolutions sont globalement les mêmes, le nombre de paramètres à gérer pendant l'ajustement est plus moins important.

### 2.2.3 Les surfaces de subdivision

Ces surfaces permettent un trait d'union entre les surfaces paramétriques (continues) et les maillages (discrets). Le passage du maillage initial à une surface (dite « surface limite ») se fait par pas successifs de subdivision. À chaque étape le maillage est raffiné jusqu'à, pour une infinité de pas, devenir une surface continue. Les surfaces de subdivision permettent donc une description *multirésolution* d'un objet.

Un *schéma* de subdivision définit le procédé itératif de cette construction. Ce procédé agit sur le maillage en insérant de nouveaux points et/ou en supprimant des points existants dans le maillage de contrôle de la surface cible. La plupart des schémas s'applique sur un type particulier de maillage de contrôle et converge vers une surface limite ayant des propriétés particulières. Ces surfaces permettent de représenter des topologies arbitraires [WW01].

Les surfaces de subdivision se sont répandues depuis 1978 avec les surfaces de Catmull et Clark [CC78] et de Doo et Sabin [DS78]. Auparavant les travaux de Chaikin [Cha74] ont posés le principe de la subdivision de courbes (*Corner cutting*).

Depuis de nombreux schémas ont été développés : on peut citer les schémas de subdivision de largment diffusés dans l'industrie Loop [Loo87], Butterfly [DLG90], le schéma de subdivision primal/dual [ZS01], ou le schéma de subdivision par  $\sqrt{3}$  [Kob00], etc. Il existe aussi des schémas de subdivision qui permettent des généralisations de spline uniforme/non-uniforme qui sont de degrés arbitraires [Sta01, SG09], ou des subdivisions non-uniformes de Catmull-Clark ou de Doo-Sabin [SZSS98].

Afin de les classifier, les méthodes de subdivision peuvent être décrites en deux composants, topologique ou géométrique [Zor00] :

- **topologique**, les schémas de subdivision changent la connectivité du maillage initial et peuvent être eux-même classés en deux groupes :
  - *Schéma primal* : chaque face du maillage initial est divisée en plusieurs faces. Les anciens sommets sont conservés et les nouveaux sommets sont insérés sur les arêtes du maillage subdivisé. Chaque nouvelle face a un sommet supplémentaire.
  - *Schéma dual* : un nouveau sommet est créé pour chaque face adjacente de l'ancien sommet. Une nouvelle face est créée pour chaque arête et pour chaque sommet. Les anciennes faces principales sont maintenues sur le maillage subdivisé.
- **géométrique**, les schémas géométriques des méthodes peuvent être eux aussi classifiés en deux groupes :
  - *Schéma d'approximation* : les sommets du maillage initial ne sont pas sur la surface limite. Après chaque étape de subdivision, les sommets de l'itération précédente sont déplacés ou éventuellement supprimés. Ce qui donne en général un meilleur aspect, mais donne moins de contrôle à l'utilisateur sur le résultat final.
  - *Schéma d'interpolation* : les sommets du maillage initial font partie de la surface limite. Les nouveaux sommets peuvent se déplacer après chaque étape de subdivision mais doivent rester sur la surface limite.

Le tableau 2.1, présente une classification des méthodes de Doo-Sabin, Catmull-Clark et Loop, qui sont les schémas approximants les plus utilisés. Pour ces mêmes surfaces le tableau 2.2 représente le type de produit tensoriel défini par la surface de subdivision, le type de surface limite engendré et la continuité de celle-ci. Les « s.e. » sont les sommets extraordinaires pour lesquels la valence est irrégulière (différente de 4 ou 6 sur un maillage quadrilatère ou triangulaire respectivement) [Lan04, BP07].

Subdivision	Type de schéma	Maillage
Doo-Sabin	Schéma dual d'approximation	Quadrangle
Catmull-Clark	Schéma primal d'approximation	Quadrangle
Loop	Schéma primal d'approximation	Triangle

TABLE 2.1. Classification de trois schémas de subdivision de surfaces

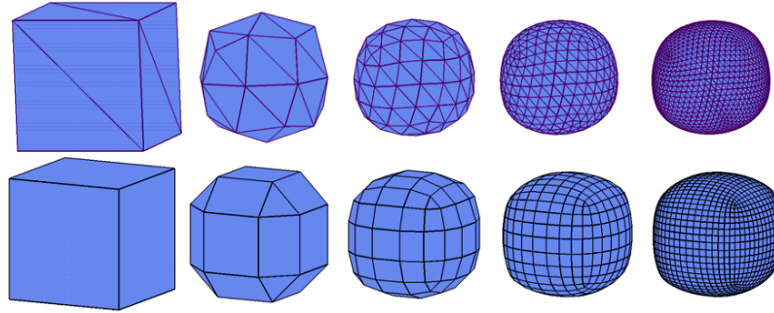
Subdivision	Produit tensoriel <sup>3</sup>	Surface limite	Continuité
Doo-Sabin	Box-spline quadratique	B-spline biquadratique uniforme	$C^1(C^0$ s.e.)
Catmull-Clark	Box-spline cubique	B-spline bicubique uniforme	$C^2(C^1$ s.e.)
Loop	Box-spline quartique	Bézier triangulaire biquartique	$C^2(C^1$ s.e.)

TABLE 2.2. Propriétés de ces trois schémas de subdivision

La figure 2.4 représente les résultats de subdivision d'un cube en prenant les schémas de subdivision de Loop et de Doo-Sabin.

Le modèle de subdivision hérite du modèle polyédrique. Il en partage donc les avantages et les inconvénients dans le domaine de la modélisation géométrique. Les avantages principaux du modèle de subdivision sont :

- l'application à un polyèdre de topologie arbitraire [Zor06],
- le peu d'itérations suffisant à obtenir un modèle maillé finement,



**Figure 2.4.** Un exemple de surfaces de subdivision un cube avec le schéma primal de Loop (en haut) et le schéma dual de Doo-Sabin (en bas) [Lan04]

- l'utilisation de la multi-résolution pour les calculs et la visualisation.

Les inconvénients du modèle de subdivision sont :

- la taille des données qui augmente de façon exponentielle après chaque étape de la subdivision.
- l'utilisation d'un maillage de contrôle comme pour une surface paramétrique et donc une manipulation indirecte de la surface lisse.

Afin de définir les sommets  $P_{k+1}$  de l'étape  $k + 1$  à partir des sommets  $P_k$  de l'étape précédente  $k$ , on utilise un masque de subdivision. Le masque contient l'ensemble des coefficients qui sont appliqués en  $P_k$  et son voisinage selon sa valence afin de calculer le ou les  $P_{k+1}$ . Un schéma de subdivision sera dit « uniforme » si le même masque est appliqué en tous points du maillage de subdivision. Un schéma « non-uniforme » ne s'applique donc pas sur toute la surface de la même façon.

### Surfaces de subdivision de Catmull-Clark

Le schéma de subdivision de Catmull-Clark [CC78] est basé sur la définition du produit tensoriel de deux courbes Box-spline cubiques s'appliquant à des maillages quelconques et convergeant vers des maillages quadrangulaires. Par définition, la surface de subdivision de Catmull-Clark converge vers une surface B-spline bi-cubique. À l'inverse de la méthode de Doo-Sabin qui est dite « duale », et produit de nouvelles faces basées sur les anciennes, le schéma de Catmull-Clark est « primal » et crée de nouveaux points.

Soit  $M^k$  le maillage quadrangulaire de subdivision à l'étape  $k$  ( $k > 0, k \in \mathbb{R}^N$ ). Chaque face, arête ou sommet intérieur du maillage  $M^k$  peut produire un sommet du maillage  $M^{k+1}$ . À l'étape suivante ( $k + 1$ ) de subdivision de Catmull-Clark, trois types de nouveaux points sont créés : les points de face, les points d'arête et les points de sommet.

Les nouveaux points du maillage  $M^{k+1}$  sont calculés de la façon suivante (voir la figure 2.5) :

- les nouveaux points de face, pour chaque face du maillage  $M^k$  un point de face  $P_{2i,2j}^{k+1}$  de  $M^{k+1}$  est produit selon :

$$P_{2i,2j}^{k+1} = \left( P_{i,j}^k + P_{i,j+1}^k + P_{i+1,j+1}^k + P_{i+1,j}^k \right) / 4 \quad i = 0 \dots m - 2, j = 0 \dots n - 2$$

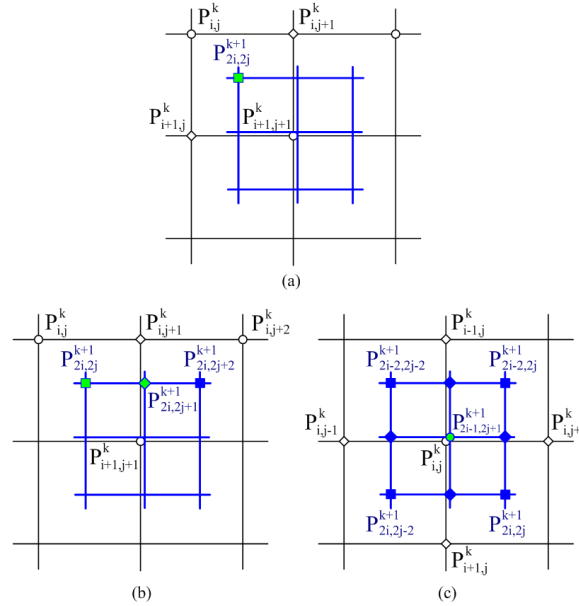
- les nouveaux points d'arête, pour chaque arête du maillage  $M^k$  un point d'arête  $P_{2i,2j+1}^{k+1}$  est créé. Ce point est obtenu par la moyenne des sommets  $P_{i,j+1}^k, P_{i+1,j+1}^k$  de cette arête, la moyenne des points de face  $P_{2i,2j+2}^{k+1}, P_{2i,2j}^{k+1}$  issus des deux faces adjacentes à cette arête, selon :

$$P_{2i,2j+1}^{k+1} = \left( P_{i,j+1}^k + P_{i+1,j+1}^k + P_{2i,2j+2}^{k+1} + P_{2i,2j}^{k+1} \right) / 4 \quad i = 0 \dots m-2, j = 0 \dots n-2$$

- les nouveaux points de sommet, pour chaque sommet du maillage  $M^k$  est créé un nouveau point de sommet  $P_{2i-1,2j-1}^{k+1}$ . Ce type de point est calculé en se basant sur le point de sommet original  $P_{i,j}^k$ , les nouveaux points de faces du maillage  $M^{k+1}$  et les points d'arête voisins de ce point :

$$P_{2i-1,2j-1}^{k+1} = P_{i,j}^k / 2 + \left( P_{2i-2,2j-2}^{k+1} + P_{2i-2,2j}^{k+1} + P_{2i,2j}^{k+1} + P_{2i,2j-2}^{k+1} \right) / 16 \\ + \left( P_{i,j-1}^k + P_{i,j+1}^k + P_{i-1,j}^k + P_{i+1,j}^k \right) / 16$$

$$i = 1 \dots m-2, j = 1 \dots n-2$$



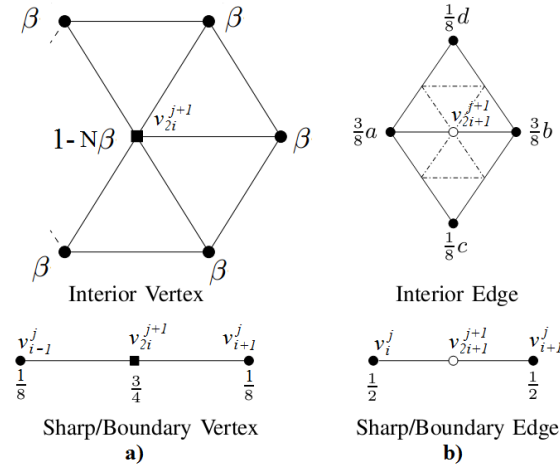
**Figure 2.5.** Calcul des nouveaux points du maillage de subdivision de Catmull-Clark

## Surfaces de Loop

Les surfaces de Loop [Loo87] ont été introduites en 1987 pour les maillages triangulaires. La subdivision consiste en deux étapes : la création des nouveaux sommets et faces en ajoutant de nouveaux sommets (*odd*) dans le milieu de chaque arête, puis les faces sont séparés sur chaque arête, en quatre sous-faces. La seconde étape est le calcul des nouvelles positions des anciens sommets (*even*), basé sur une combinaison barycentrique des voisins. Le masque de subdivision calcule les positions des nouveaux et anciens sommets de  $M^{k+1}$  comme le montre la figure 2.6, où les  $\bullet$  sont les anciens sommets de  $M^k$  et les  $\blacksquare$  représentent



les sommets déplacés de  $M^k$ ,  $o$  marque les nouveaux sommets de  $M^{k+1}$ . Sur cette figure la 2<sup>ème</sup> ligne « Sharp/Boundary » donne les coefficients pour les sommets de bord d'un maillage ouvert.



**Figure 2.6.** Masques de subdivision de Loop : a) anciens sommets ; b) nouveaux sommets

Numériquement les sommets *even*  $v_{2i}^{k+1}$  et *odd*  $v_{2i+1}^{k+1}$  du maillage  $M^{k+1}$  sont donnés dans le cas général par :

$$v_{2i}^{k+1} = (1 - N\beta)v_i^k + \beta \sum_{j=1}^N v_j^k$$

$$v_{2i+1}^{k+1} = \frac{3}{8}(a + b) + \frac{1}{8}(c + d)$$

avec

$$\beta = \frac{1}{N} \left( \frac{5}{8} - \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{N} \right)^2 \right)$$

$N$  est la valence du sommet *even*  $v_{2i}^{k+1}$ . La surface produite par la subdivision de Loop est approximante et  $C^2$  continue partout (sauf aux points extraordinaires).

Après ce bref état des méthodes et modèles sur lesquels sont basés mes travaux de Recherche, nous passons à la description de ces derniers. Historiquement les déformation de formes libres prennent une place importante, c'est le thème de mon doctorat mais également une passerelle intéressante pour des collaborations avec d'autres chercheurs. J'ai donc appliqué mes méthodes de déformation à des surfaces implicites (avec Gilles Gesquière, au LE2I), à des objets volumiques (avec Éric Remy et Sébastien Thon, au LSIS), à des surfaces paramétriques (avec Raphaël La Gréca, LSIS) ou à des surfaces de subdivision (avec Sandrine Lanquetin, au LE2I). Chaque projet m'a permis d'évaluer ma méthode de déformation mais aussi de comprendre les contraintes et les avantages de chaque modèle de représentation d'objets.

Des encadrements de doctorats m'ont ensuite donné la possibilité d'approfondir les représentations par surfaces de subdivision et par surfaces paramétriques. Cela a fait naître la thématique (et le besoin) de traduction d'une représentation à l'autre.

## 2.3 Travaux de fin de doctorat

Ma thèse avait comme sujet le déformation sous contraintes d'objets de formes libres. Elle exposait notamment la création de contraintes ponctuelles, curvilignes ou surfaciques, qui dans le cas des formes libres ne sont pas liées à une géométrie particulière (voir pour cela les publications [SP86], [Coq90]). Le but des déformations de formes libres est de pouvoir déformer un objet par ses points, sans tenir compte de sa topologie, que l'on ne cherche pas à modifier. Il n'y a donc évidemment pas de gestion des auto-intersections. Nous avons développé la définition de nouvelles contraintes, sans limiter à des points de l'espace, la requalification du déplacement qui peut s'assimiler à une trajectoire de la contrainte dans l'espace et la généralisation de la zone d'influence autour de la contrainte (isotrope, étoilée, polyédrique), ce qui permettait d'envisager des mélanges de zones d'influences de contraintes, avec répartition de la déformation. La méthode a ensuite été construite comme le passage d'une forme de base (la contrainte) à une autre, via une trajectoire. Elle s'appuyait sur les travaux de [BB91], [BD93] [BR94] concernant les SCODEF et les déformations  $n$ -D.

La déformation de formes libres peuvent se décomposer en 3 parties :

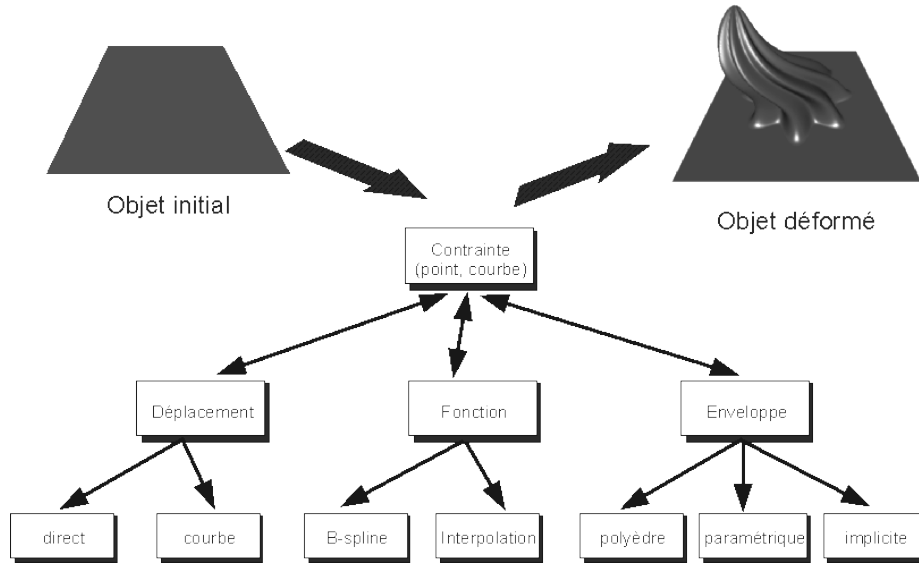
- définition de la contrainte (ponctuelle, curviligne, surfacique, ...)
- définition de l'objectif (un autre point de l'espace, une autre courbe, suivant une trajectoire, ...),
- définition de la zone d'influence de la contrainte,

La figure 2.7 donne un aperçu des méthodes associées, suivant les dimensions, la définition de la contrainte, ...

La déformation initiale sur laquelle nous avons travaillé SCODEF est définie par [BR94], sur le même principe que les déformations  $n$ -D de [BB91]. Elle n'est pas contrainte à une dimension et agit de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}^n$ . Soient :

- $n$  la dimension de l'espace,
- $r$  le nombre de contraintes qui définissent la SCODEF,
- $C_i$  la position d'un point de contrainte de l'espace original,
- $D_i$  son déplacement dans l'espace déformé,
- $R_i$  le rayon d'action associé à  $C_i$ ,
- $f_i$  la fonction de déformation associée à  $C_i$ .

La contrainte est notée  $C_i$  comme le point de contrainte par souci de concision. C'est à ce point seul qu'un déplacement est attribué dans la version initiale. Le fonctionnement



**Figure 2.7.** Schéma des outils de déformation mis en place

de la méthode SCODEF est le suivant, soit un point  $Q$  quelconque de  $\mathbb{R}^n$  (la déformation déforme donc tous les points de l'espace sans distinction, elle sera en réalité limitée à une forme ou à une zone d'influence), la déformation  $d$  est définie par un déplacement  $d(Q)$  du point  $Q$  par :

$$d(Q) = \sum_{i=1}^r M_i \cdot f_i(Q) \quad (2.7)$$

$M_i$  est un vecteur colonne de dimension  $n$ , calculé pour pouvoir satisfaire chacun des  $i$  contraintes. On peut remarquer que le modèle est similaire à celui de [BB91] pour le produit simple.  $f_i$  représente la contribution de la  $i^{\text{ème}}$  contrainte au déplacement du point  $Q$ . C'est une fonction scalaire dépendant de chacune des contraintes  $C_i$  et de leurs rayons  $R_i$  :

$$f_i(Q) = B_i \left( \frac{\|Q - C_i\|}{R_i} \right)$$

où dans la méthode originelle  $B_i$  est une fonction de base B-spline centrée en 0 et décroissante pour être nulle en 1. La suite de ce document donne les extensions que nous avons proposées dans la thèse.

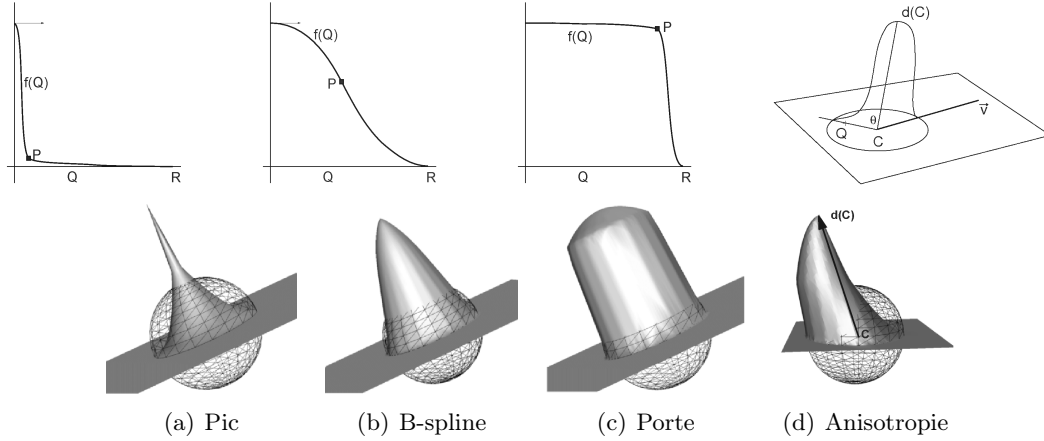
### 2.3.1 Fonction de déformation

Selon les configurations du point  $Q$  dans l'espace, le déplacement est plus ou moins accentué et même nul en dehors du rayon d'influence de la contrainte. La fonction  $B$  initiale résulte en un aspect « en cloche » de la déformation. Nous avons donc proposé plusieurs autres formes de fonctions de déformation qui respectent le principe précédent. Les contraintes de continuité entre la surface déformée et les bords s'expriment via la fonction de déformation :

- les deux points de passage obligés  $f(0) = 1$  et  $f(1) = 0$  qui traduisent le fait que la déformation est maximale au point de déformation, et nulle en dehors de la zone d'influence,

- les deux tangentes  $f'(0) = 0$ ,  $f'(1) = 0$  permettent de conserver, si elle existe, la continuité de l'objet.

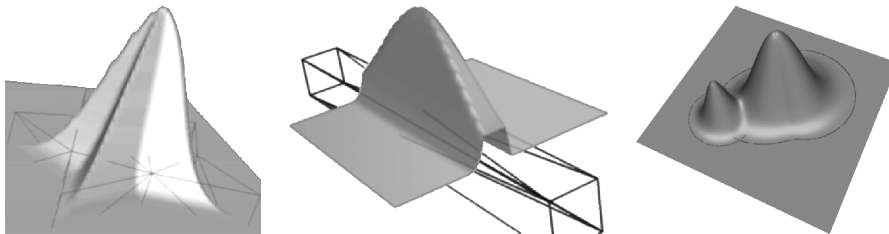
Au final la fonction est elle-même construite dans un éditeur qui décrit une courbe spline cubique d'interpolation d'Akima [Aki70], en laissant un point librement déplaçable par l'utilisateur dans l'intervalle  $[0, 1] \times [0, 1]$ , et en satisfaisant les contraintes précédentes (cf. fig 2.8). L'anisotropie de la déformation a également été mise en place en définissant des fonctions de répartition de la déformation autour du point central qui constitue la contrainte.



**Figure 2.8.** Différentes fonctions de déformation produisent différents résultats (a-c) / Contraintes anisotropes (d)

### 2.3.2 Enveloppes d'influence

Le travail sur les fonctions a fait partie de mes premiers mois de thèse (et avait également occupé mon DEA [Raf96]). Le problème principal de la méthode SCODEF réside dans le fait que, compte-tenu du rapprochement de 2 contraintes, la résolution du système de déformation n'est plus possible. Nous avons donc travaillé sur les enveloppes d'influence (les zones où les contraintes sont actives) pour essayer de séparer les contraintes. Cela nous a conduit à modifier la définition des zones d'influence, pour aller vers des superquadriques, des polyèdres étoilés en général, des compositions d'objets implicites (voir la Figure 2.9 pour quelques exemples).



**Figure 2.9.** Quelques exemples d'enveloppe d'influence

### 2.3.3 Trajectoire de déformation

Troisième amélioration du modèle initial, la notion de déplacement de la surface déformée pour atteindre le point cible. Si on considère ce déplacement comme un segment dans l'espace, on peut penser tordre celui-ci et obtenir une déformation qui ne soit plus seulement portée par un vecteur euclidien. La figure 2.10 montre des exemples des déformations obtenues, en utilisant des courbes de Bézier comme support des trajectoires. La principale difficulté dans ce cas étant le respect de la forme de la fonction de déformation, qui implique un suivi du repère de Frénet le long de la déformation, pour pouvoir faire suivre à l'ensemble des points de la surface initiale influencés par la déformation une courbe semblable à la première, en prévenant les auto-intersections.

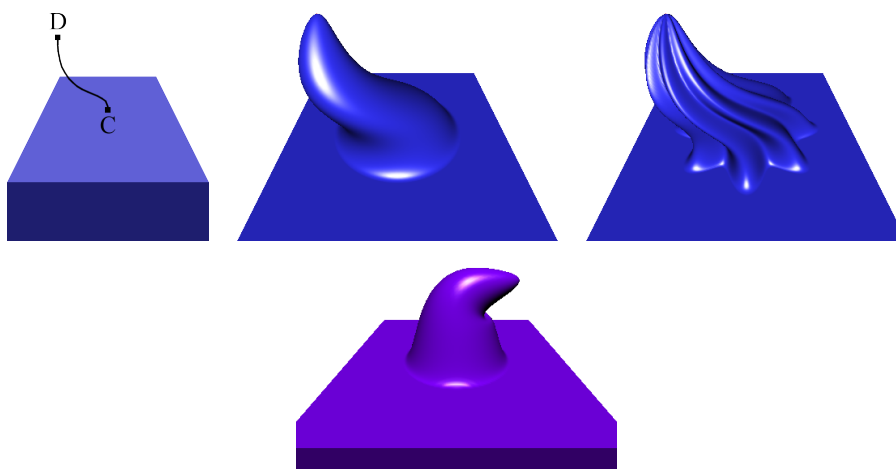


Figure 2.10. Extension des zones d'influence et trajectoires

### 2.3.4 Conclusion

Ma thèse de doctorat a porté sur la déformation d'objets par contraintes de dimensions quelconques. Les objets déformés sont des maillages surfaciques, les contraintes sont un lieu (pas forcément ponctuel), une zone d'influence (pas forcément isotrope), une fonction de déformation (de forme variée). Même si ces travaux sont assez anciens, ils sont toujours d'actualité, comme le montre la publication récente (2013) d'un chapitre d'ouvrage sur les déformations de formes libres [Raf13a].

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ Romain Raffin. Déformation  $nD$  libres sous contraintes. Master's thesis, Université de Bourgogne, 1996. Mémoire de DEA
- ▶ R. Raffin and M. Neveu. Déformations avec contraintes pour la modélisation géométrique et la reconstruction d'objets. In *Actes des Vèmes Journées de l'AFIG*, pages 111–119, november 1997
- ▶ R. Raffin, M. Neveu, and B. Derdouri. Constrained deformation for geometric modeling and object reconstruction. In *WSCG, 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization*, volume 2, pages 299–306, february 1998

- ▶ R. Raffin and M. Neveu. Déformations sous contraintes : modèle scodef étendu. In *Courbes, surfaces et algorithmes*, september 1999
- ▶ R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Extended constrained deformations: a new sculpturing tool. *proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 219–224, 1999
- ▶ R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Curvilinear displacement of free-form based deformation. *The Visual Computer*, 16:38–46, 1999. Springer-Verlag Editions
- ▶ R. Raffin. *Déformations sous contraintes généralisées*. PhD thesis, Université de Bourgogne, Dijon, 2000. Direction Marc Neveu
- ▶ R. Raffin. *Free-Form deformations*, volume 7 of *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*. Springer-Verlag, 2013

## 2.4 Déformations d’objets (suite des travaux de thèse)

À la suite des travaux de thèse, j’ai cherché à utiliser la méthode de déformation sur d’autres types d’objets afin de la confronter dans l’expression des contraintes ou de la déformation à d’autres descriptions de géométries ou de topologies. Alors que les méthodes de déformation de formes libres s’appliquent de façon « naturelle » à des objets définis par des maillages polyédriques (points, arêtes, faces), la question se pose pour d’autres types d’objets. En effet les FFD ne transforment qu’un ensemble de points initiaux vers un autre ensemble de points de même taille, la topologie, les voisinages, l’existence de fonctions de description de l’objet initial ne sont pas du tout gérés par le modèle.

### 2.4.1 Objets volumiques discrets

Les outils pour la déformation d’objets discrets, comme par exemple dans le cadre de la sculpture virtuelle, sont généralement des outils binaires [PF01] ou mettant en place des systèmes de masses ressorts coûteux [MQ02]. Notre innovation a été de porter les déformations de type SCODEF pour ces représentations, permettant la création de nouveaux outils.

La problématique des objets volumiques discrets s’est imposée rapidement conjointement à l’encadrement d’un stagiaire de Master2 Recherche, G. Thibault. Nous avons cherché à appliquer la déformation de formes libres en tenant compte de cette description. Notre méthode s’est basée sur celle d’Ayasse [AM02] et nous l’avons appliquée au cas de la sculpture virtuelle. Notre objectif a été d’adapter l’entrée d’un outil dans la matière en adoptant une déformation « réaliste », qui pousserait la matière. La densité de matière, la viscosité, la combinaison des forces et des directions de poussée sont réglées par des fonctions continues, spatiales, à la manière des fonctions de déformation de la méthode SCODEF. Les images de la figure 2.11 donnent quelques réalisations de ces déformations.

Parallèlement à ces travaux, nous avons effectué des recherches sur la voxelisation d’objets maillés, ce qui a ensuite débouché sur la thèse de X. Heurtebise [Heu07] (sous la direction S. Thon).

Ces travaux ont fait l’objet des publications suivantes :

- ▶ R. Raffin, G. Gesquière, E. Rémy, and S. Thon. Virsculpt: a virtual sculpting environment. In *GraphiCon 2004*, pages 184–187, Moscou, september 2004
- ▶ S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. A low cost antialiased space filled voxelization of polygonal objects. In *GraphiCon 2004*, pages 71–78, Moscou, september 2004

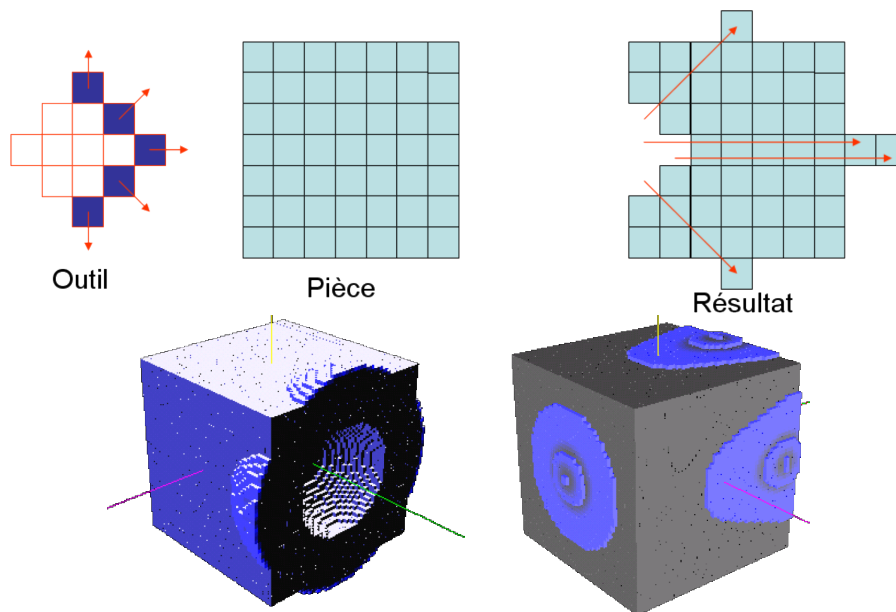


Figure 2.11. Exemples de déformations de volumes discrets

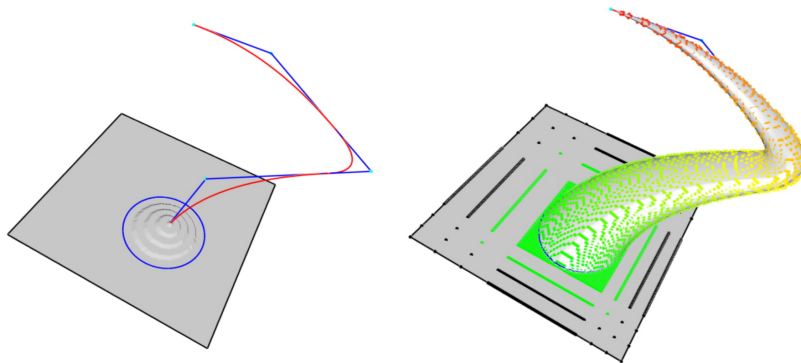
- ▶ G. Thibault. Outils de déformation pour la sculpture virtuelle. Master's thesis, Université de la méditerranée, juin 2005. Mémoire de DEA
- ▶ R. Raffin, G. Thibault, and G. Gesquière. Simple and efficient tools for virsculpt. In *GRAPP 2006, Proceedings of the first international conference on computer graphics theory and applications*, pages 436–440, Lisboa, february 2006
- ▶ X. Heurtebise, R. Raffin, and S. Thon. Sculpture virtuelle. In *132ème congrès national des Sociétés Historiques et Scientifiques*, Arles, april 2007

### 2.4.2 Surface à pôles

Dans le cadre des outils de modélisation rapide, d'ébauche, les déformations de formes libres sont également intéressantes. La publication de [HHH92] pour manipuler directement des surfaces grâce aux déformations de formes libres de type FFD va dans ce sens mais reste cantonnée à des contraintes ponctuelles.

Nous avons porté la déformation SCODEF sur des courbes et surfaces paramétriques, avec un docteur du LSIS (R. La Gréca [LaG05]). La méthode développée pendant son doctorat permet la déformation de surfaces à pôles sous contraintes, dans le cadre de la modélisation déclarative. L'utilisateur décrit l'objet qu'il veut obtenir et un moteur de satisfaction de contraintes et d'inférence propose des solutions valides. Un des premiers outils qu'il a donc dû mettre en place concerne la résolution de contraintes, dures ou molles (un lieu de passage exact de la surface, une forme plus ou moins bombée). Ce travail est assez proche des déformations de formes libres et nous avons joint nos deux méthodes (voir la figure 2.12 pour un résultat).

Nous avons modifié la méthode de satisfaction de contrainte initiale que R. La Gréca avait développée pour l'adapter aux chemins de contraintes. Cela a obligé la mise en place d'une séquence dans la déformation de la surface, pour suivre « pas à pas » la trajectoire fixée par l'utilisateur, du point initial sur la surface au point de destination. L'avantage de



**Figure 2.12.** Déformation d'une surface Nurbs par une contrainte suivant un chemin de déformation

cet outil réside dans la définition d'une déformation de surface paramétrique par un objet ponctuel (et non un fonctionnelle globale ou locale).

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ R. La Gréca, R. Raffin, and G. Gesquière. Punctual constraint resolution and deformation path on nurbs. In *Graphicon*, 2007
- ▶ R. Raffin, G. Gesquière, and R. La Gréca. Déformations de modèles géométriques. Technical Report LSIS.RR.2007.001, LSIS, 2007
- ▶ R. Raffin, R. La Gréca, and G. Gesquière. Constrained Free Form Deformation of NURBS surfaces. In *Curves and Surfaces*, Avignon, France, july 2006

### 2.4.3 Surfaces de subdivision

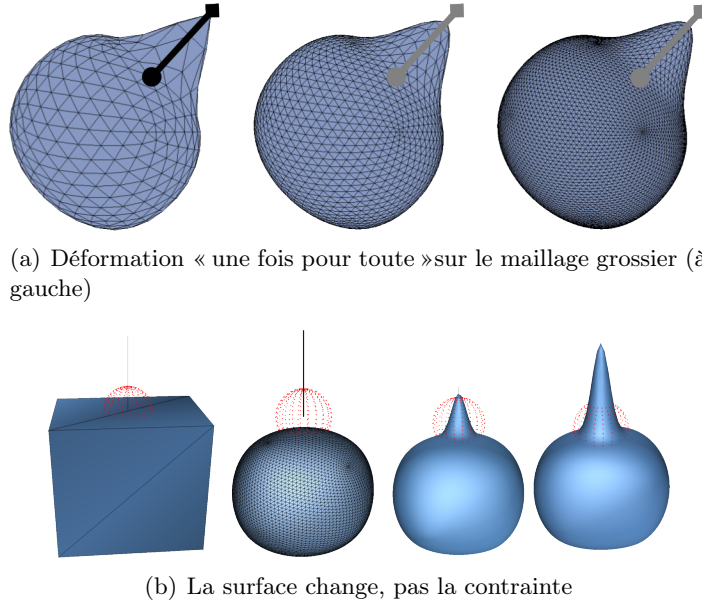
Conjointement à ces travaux exploratoires sur les déformations, une collaboration avec S. Lanquetin, du laboratoire LE2I de Dijon, a permis de s'intéresser aux surfaces de subdivision. En effet les travaux antérieurs sur la déformation de surfaces de subdivision [LM00] décrivent globalement des fonctions à appliquer aux surfaces, en modifiant la description de celles-ci. Le principal problème de ces surfaces, qui ont pris une place importante dans le domaine de la modélisation géométrique, est leur capacité à la contraction (pour la plupart des schémas de subdivision). Pour pouvoir utiliser une méthode de déformation de formes libres dans ces descriptions, il faut pouvoir désigner un point de l'objet initial et lui faire suivre une trajectoire pour atteindre une position cible. Dans le cas des surfaces de subdivisions approximantes, la désignation est toujours possible (puisque l'objet de départ est polyédrique) mais cette position initiale est modifiée par la contraction de la surface. Le problème vient donc de la disparition du point de contrainte.

Les deux images de la figure 2.13 montrent les problèmes qui apparaissent. Si la déformation est effectuée naïvement sur le maillage de départ, une fois seulement, les subdivisions successives vont éroder ce résultat (image 2.4.3). On peut donc penser à appliquer la déformation à chaque niveau de subdivision mais, si la contrainte ne bouge pas, la surface elle est modifiée par la subdivision (voir l'image 2.4.3). La déformation n'est plus solidaire de la surface au point où elle devait agir, et de moins en moins de points sont pris en compte dans la zone d'influence.

Grâce aux travaux de S. Lanquetin [Lan04], des méthodes de suivi de points d'une surface initiale à travers les niveaux de subdivision successifs ont été mises en place. Nous

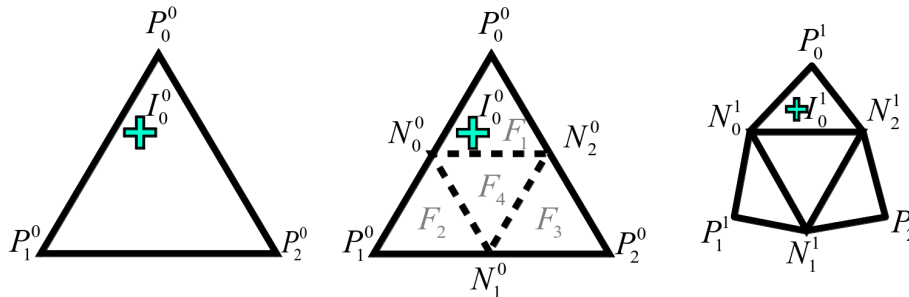


pouvons donc utiliser ces outils pour suivre le point de contrainte ou la courbe de contrainte, d'un niveau à l'autre. Nous avons donc défini ainsi une déformation de formes libres sur un niveau de maillage et la faisons suivre de niveaux en niveaux de subdivision.



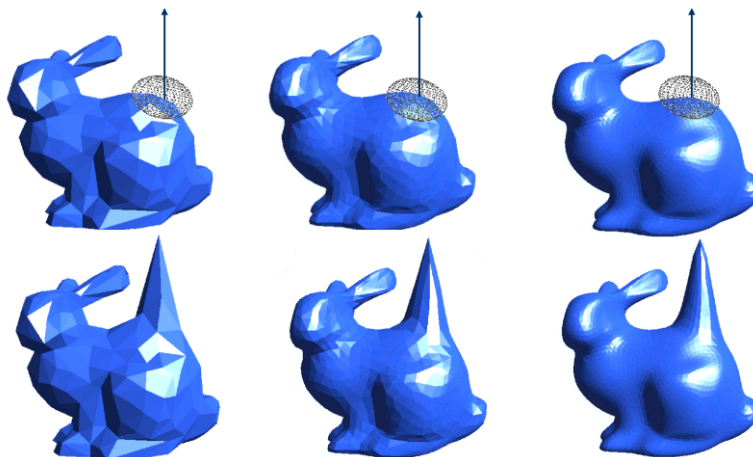
**Figure 2.13.** Difficultés de la déformation de surfaces de subdivision

Pour rappel, la méthode développée par S. Lanquetin est décrite ci-après. Si nous cherchons à suivre la contrainte de niveaux en niveaux, il faut suivre le point de contrainte. Dans un premier temps il faut savoir à quelle face de la surface de subdivision initiale il appartient. Cela nécessite un calcul de la position du point par rapport aux sommets de chaque face. Une fois la face trouvée, subdiviser et ré-appliquer la combinaison barycentrique ne suffit pas. En effet, suivant les schémas de subdivision, les points, les arêtes ou les faces créés sont soumis à une modification de position. Il faut donc savoir dans quelle future face se positionnera le point après subdivision. On cherche pour cela son appartenance à une des sous-faces induites par la face initiale, sans tenir compte du masque de subdivision (i.e. en restant dans le plan de la face initiale). Une fois la sous-face trouvée, il ne reste plus qu'à calculer les coordonnées barycentriques du point dans cette sous-face, appliquer le schéma de subdivision sur la face initiale et projeter le point dans la sous-face grâce aux coordonnées précédentes (cf figure 2.14).



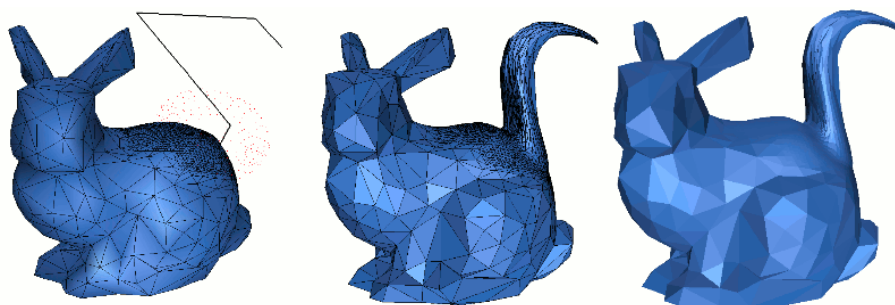
**Figure 2.14.** Étapes du projeté d'un point sur un niveau suivant de subdivision

Comme le point de contrainte reste sur la surface, la déformation peut s'effectuer quel que soit le niveau, (voir figure 2.15).



**Figure 2.15.** Suivi de la déformation sur une surface de subdivision, selon les niveaux

Comme la méthode de déformation peut également définir un chemin de déformation, nous pouvons appliquer la multi-résolution du maillage, déjà mis en place pendant la thèse sur des maillages, en appliquant à l'intérieur de la zone d'influence, des algorithmes de subdivision locaux. Cela permet de mieux définir la trajectoire que prend la surface pour atteindre le point cible de la déformation, en raffinant le maillage, là-aussi la méthode s'applique quel que soit le niveau de subdivision (figure 2.16).

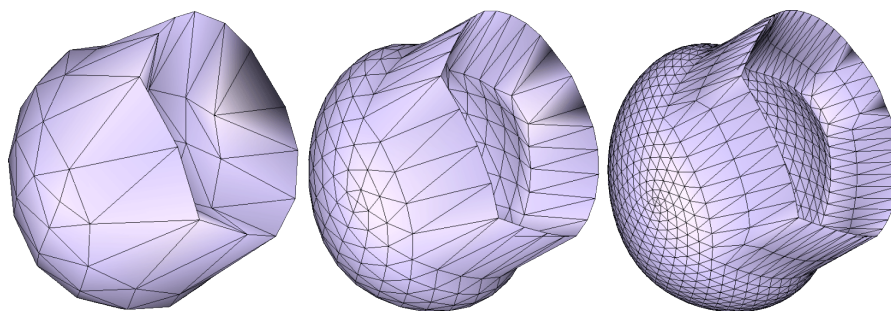


**Figure 2.16.** Déformation par une trajectoire, raffinement du maillage par subdivision locale

Grâce à cette combinaison d'algorithmes, notre travail nous permet de suivre les points d'une polyligne et d'activer la déformation par courbes-contraintes (voir la figure 2.17). Au final, les méthodes mises en place pour des maillages polyédriques statiques (au sens de la résolution) ont été portées aux surfaces de subdivision (les schémas utilisés ont été Loop, Catmull-CLark et Butterfly) et permettent (en s'astreignant du schéma de subdivision) de contraindre le passage de la surface en un point ou une polyligne de l'espace.

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- S. Lanquetin and R. Raffin. Déformations libres de surfaces de subdivision. In *Actes des journées du GTMG'05*, pages 109–119, march 2005. Poitiers, France



**Figure 2.17.** Déformation par une courbe de contrainte, et suivi au long des niveaux de subdivision

- ▶ S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Constrained free-form deformation on subdivision surfaces. In *Advances in Computational Methods in Sciences and Engineering*, number ISSN 1573–4196, pages 311–314, 2005. Selected papers from the international conference of computational methods in sciences and engineering
- ▶ S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Generalized SCODEF deformations on subdivision surfaces. In *Articulated motion and deformable objects*, LNCS 4069, pages 132–142, july 2006. proceedings of 4th International Conference AMDO
- ▶ S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(Issues 3-4):189–199, february 2010

## 2.5 Surfaces de subdivision, passage continu $\leftrightarrow$ discret

Les travaux vus précédemment sur les surfaces de subdivision ont permis de poser les bases d’outils et de méthodes géométriques pour les subdivisions. Ils ont mis en évidence le lien fort entre les maillages polygonaux des premiers niveaux de subdivision et la surface limite qui peut être obtenue du maillage initial (les points de contrôle) de la surface continue. L’objectif de notre réflexion a donc été de fournir de nouveaux algorithmes à un secteur assez peu porté sur ce type de surface : la conception. En effet, les objets habituellement utilisés dans les approches-métier de la CAO sont les surfaces à pôles, Bézier, B-splines et NURBS [Ma05]. Ces surfaces ont le grand avantage de pouvoir gérer une continuité, de localiser un point en fonction de paramètres, et de finalement avoir une expression compacte des points de contrôles, nœuds, et intervalle de paramètres. Leur manipulation par contre est difficile, l’impact des points de contrôle que l’utilisateur manipule étant difficile à prévoir intuitivement.

Nous l’avons vu précédemment, si une déformation de formes libres peut être suivie de niveaux en niveaux tout au long de la subdivision, on crée par là-même une méthode de déformation de la surface limite continue. La mise en œuvre de cette déformation est simple pour l’utilisateur qui peut pré-visualiser le résultat de la déformation sur le maillage polyédrique avant de lancer le calcul sur la surface limite (lorsqu’elle n’est pas trop complexe).

Nous avons donc concentré le travail de 2 thèses (Khoi Nguyen Tan, 2006-2010 et Cang Phan Anh, 2010-2013) sur ce sujet. Ce travail va également être intégré et développé dans le projet Carnot Arts - Star « DECO », pour une durée de 2 ans à partir de septembre 2013, regroupant les équipes INSM et G-Mod du LSIS - UMR 7296 et les équipes ConSuM et

GéoCon du LE2I - UMR 6306.

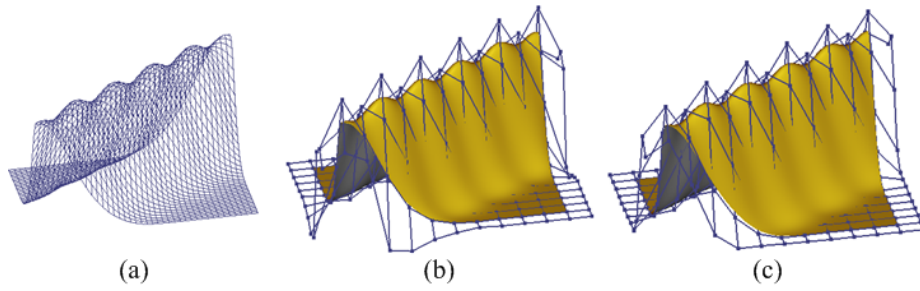
### 2.5.1 Passage d'une surface à pôle à une surface de subdivision

L'objectif de ce travail est de passer réciproquement d'un modèle paramétrique à pôles à un modèle de subdivision discret. Les axes de recherche sont la recherche des méthodes de discrétisation permettant la conversion d'un modèle paramétrique à un modèle polyédrique d'approximation, le développement de méthodes de subdivision pour convertir un modèle paramétrique en un modèle de subdivision et inversement, la reconstruction d'objets paramétriques 3D en utilisant les méthodes de subdivision inverse. Les méthodes sont analysées via la discrétisation des surfaces paramétriques obtenues. Nous utilisons les méthodes de subdivision de courbes de Chaikin [Cha74], Doo-Sabin [Doo78] pour les courbes et Loop [Loo87], Catmull-Clark [CC78], Sederberg [SZSS98] pour les surfaces. Lorsque c'est possible, via la définition du schéma de subdivision, nous évaluons également les subdivisions inverses uniforme et non-uniforme (Chaikin, Doo-Sabin, Catmull-Clark, Sederberg). Ces méthodes servent ensuite à la reconstruction d'une surface de subdivision à partir d'un maillage. Là-aussi deux méthodes ont été construites, la première à partir d'une subdivision inverse uniforme, mais qui a comme inconvénient principal qu'elle ne peut interpoler les bords ou les coins d'un maillage puisque la subdivision inverse, en contractant le maillage à chaque niveau de subdivision, ne peut conserver la position de ses bords.

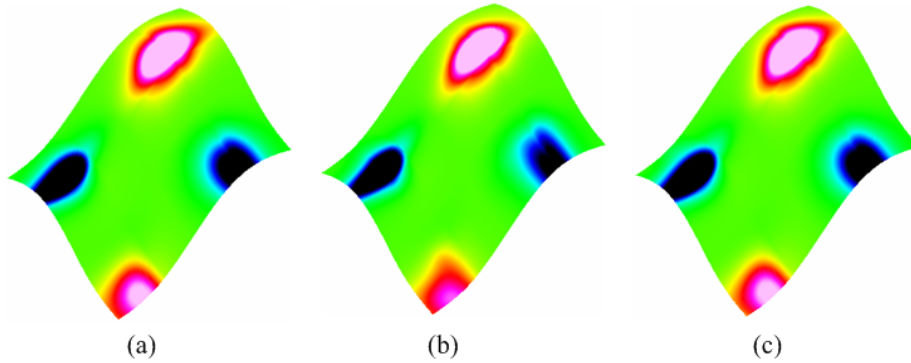
Le problème est sensiblement similaire au passage d'une courbe de Bézier, interpolant par construction ses points de contrôles extrêmes, à une courbe spline uniforme, qui ne peut assurer directement cette contrainte (sans artifice comme un ensemble de points ayant la même position). Pour tenter de pallier cette contraction on débute l'algorithme par une extension du maillage initial, en le déformant par ses quatre bords (pour un carreau), en rajoutant (pour le schéma initial de Catmull-Clark) des quadrangles de bord. Les positions des sommets placés sont déduits de la formule de subdivision inverse de Catmull-Clark. Cette première méthode naïve ne convient pas puisqu'elle construit par extrapolation une surface fantôme qui sert à la subdivision inverse, sans autre contrainte qu'après subdivision la surface limite contienne les points du maillage initial [MRF06]. Aucune réflexion n'est menée sur la forme, la topologie, des critères locaux et globaux de description du maillage initial. Cet algorithme n'étant pas satisfaisant, nous avons mis en place un second algorithme (basé sur [MMK07]) qui au lieu de ne s'intéresser qu'aux bords a un fonctionnement plus homogène. On calcule dans un premier temps le maillage  $M_0$  par subdivision inverse du maillage  $M_{init}$ . Si on déduit la surface limite de  $M_0$ , elle n'interpole pas le maillage initial  $M_{init}$  à cause de la contraction. On calcule ensuite pour chaque sommet du maillage  $M_{init}$  la distance (minimale, la paramétrisation étant inconnue) à la surface limite. Cet ensemble d'erreurs sert pour une seconde méthode de reconstruction où l'on utilise la subdivision inverse pour déduire un second maillage  $M_0$ .

La figure 2.18 montrent des résultats de cette recherche pour les 2 algorithmes,  $S^{ext}$  pour le premier et  $S^{fit}$  pour le second. La distance moyenne des erreurs de reconstruction est de l'ordre de  $10^{-3}$ , avec l'obtention de la surface limite approximante du maillage en entrée  $M_{init}$  et le maillage  $M_0$  qui, par une subdivision de Catmull-Clark, aboutit à cette surface.

La seconde méthode de reconstruction propose d'utiliser des subdivisions inverses non-uniformes. La difficulté dans ce cas est d'évaluer des vecteurs de nœuds. Deux algorithmes sont également présentés, la reconstruction rapide par approximation d'une surface B-spline non-uniforme en utilisant les vecteurs d'intervalle d'un maillage quadrangulaire par une méthode de paramétrisation et la reconstruction par interpolation d'une surface par la sub-



(a) Maillage initial, surface initiale, surface reconstruite



(b) Surface initiale

$k$	Taille	$S^{ext}(u, v)$		$S^{fit}(u, v)$	
		$D_{max}$	$D_{avg}$	$D_{max}$	$D_{avg}$
1	$43 \times 43$	$10.47 \cdot 10^{-2}$	$0.92 \cdot 10^{-2}$	$5.09 \cdot 10^{-2}$	$0.15 \cdot 10^{-2}$
2	$23 \times 23$	$28.00 \cdot 10^{-2}$	$1.53 \cdot 10^{-2}$	$5.14 \cdot 10^{-2}$	$0.18 \cdot 10^{-2}$
3	$13 \times 13$	$42.29 \cdot 10^{-2}$	$4.74 \cdot 10^{-2}$	$5.14 \cdot 10^{-2}$	$0.19 \cdot 10^{-2}$

(c) Distances entre le maillage initial et les surfaces de reconstruction

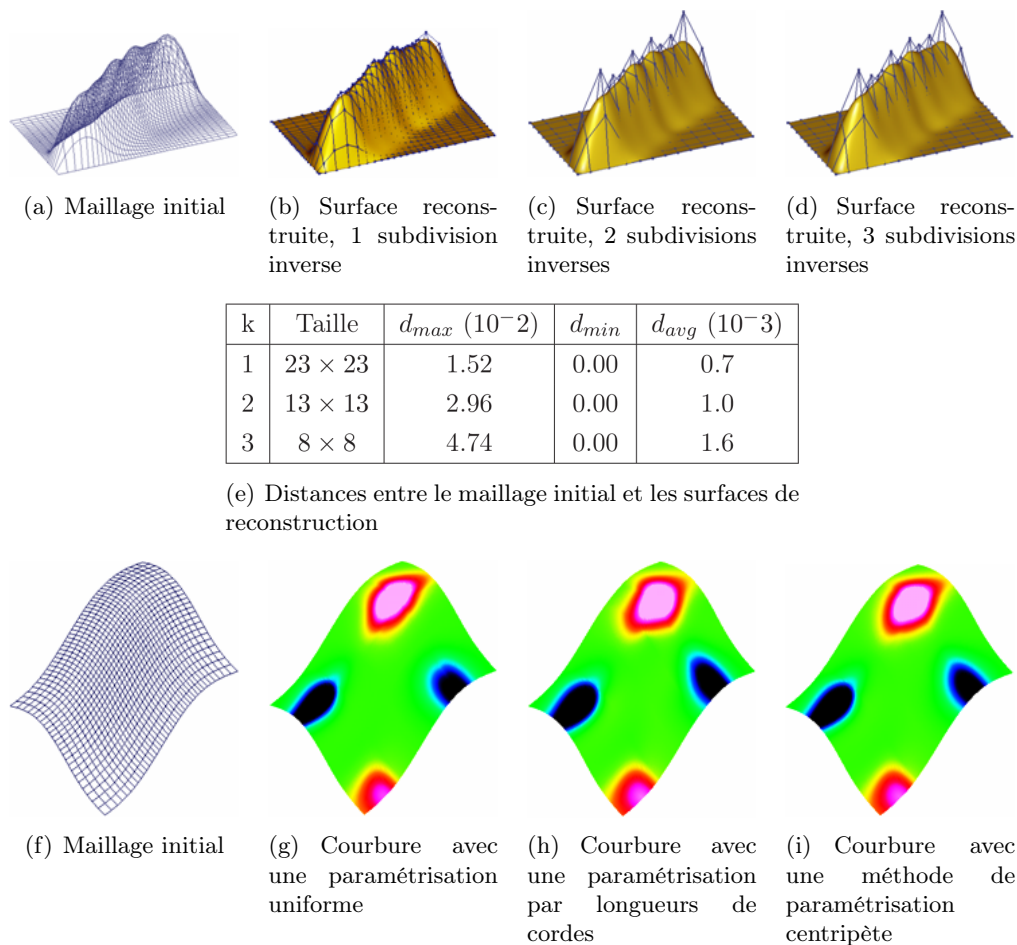
**Figure 2.18.** Résultats de la reconstruction par subdivision inverse uniforme de Catmull-Clark

division inverse en se basant sur les projections des points initiaux sur la surface cible. La figure 2.19 montre quelques résultats obtenus par cette deuxième méthode, non-uniforme, pour plusieurs niveaux ( $k$ ) de subdivision inverse.

Finalement les résultats sont similaires au 2<sup>ème</sup> algorithme de reconstruction uniforme mais la qualité étant liée au niveau de subdivision inverse, on peut, dans le cadre d'un processus itératif, décider d'un arrêt de la reconstruction si la distance moyenne dépasse un seuil minimal.

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. Reconstruction de surface b-spline par subdivision non-uniforme inverse. In *Journées du GTMG 2009*, pages 67–76, Toulouse, France, march 2009
- ▶ R. Raffin. Reconstruction de surfaces paramétriques à partir de surfaces maillées par des surfaces de subdivision. In invited speaker, editor, *Journée "Approximation, Géométrie et Image"*. SMAI-AFA, Association Française d'approximation, november 2009



**Figure 2.19.** Résultats de la reconstruction par subdivision inverse non-uniforme de Catmull-Clark

- ▶ K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *IEEE-RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies*, pages 336–339, VietNam, july 2009
- ▶ K. Nguyen Tan. *Surfaces polyédriques et surfaces paramétriques : une reconstruction par approximation via les surfaces de subdivision*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2010. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin
- ▶ R. Raffin, K. Nguyen Tan, and M. Daniel. Using geometry to help converting a discrete mesh to parametric surface via subdivision. In *Curves and Surfaces 2010*. SMAI-AFA, 28 june 2010

Ces travaux ont permis de faire un lien entre représentation discrète et continue via les surfaces de subdivision. Elles ont été appliquées aux schémas de courbes et surfaces les plus utilisés (Chaikin, Doo-Sabin, B-spline, Loop, Catmull-Clark). Afin de pouvoir être comparées, ces méthodes utilisent des surfaces paramétriques communes en entrée, discrétisées pour obtenir le maillage initial. On peut alors mesurer l’erreur réelle de la reconstruction (distance, courbure), puisque la surface exacte est notre point de départ. La régularité, l’uniformité du maillage n’ont pas été étudiées et ces méthodes seront mises à mal si le maillage est irrégulier. Dans ce cas, les méthodes de paramétrisation et de calcul de distances ne

seront plus représentatives puisque s'appliquant de manière locale, ce qui engendrera des artefacts (ondulation, tension de la surface mal répartie).

### 2.5.2 Raccordement de surfaces de subdivision

Poursuivant dans la voie précédente sur le passage des surfaces maillées aux surfaces continues, nous avons pointé le problème de la gestion de surface composée de patches de niveaux de subdivision et/ou de schémas de subdivision différents sur deux carreaux que l'on souhaite joindre et éventuellement raccorder en continuité (en définissant une continuité géométrique sur les maillages). Une seconde thèse a donc été initiée sur ce sujet en octobre 2010 avec A.-C. Phan, qui soutiendra en octobre 2013.

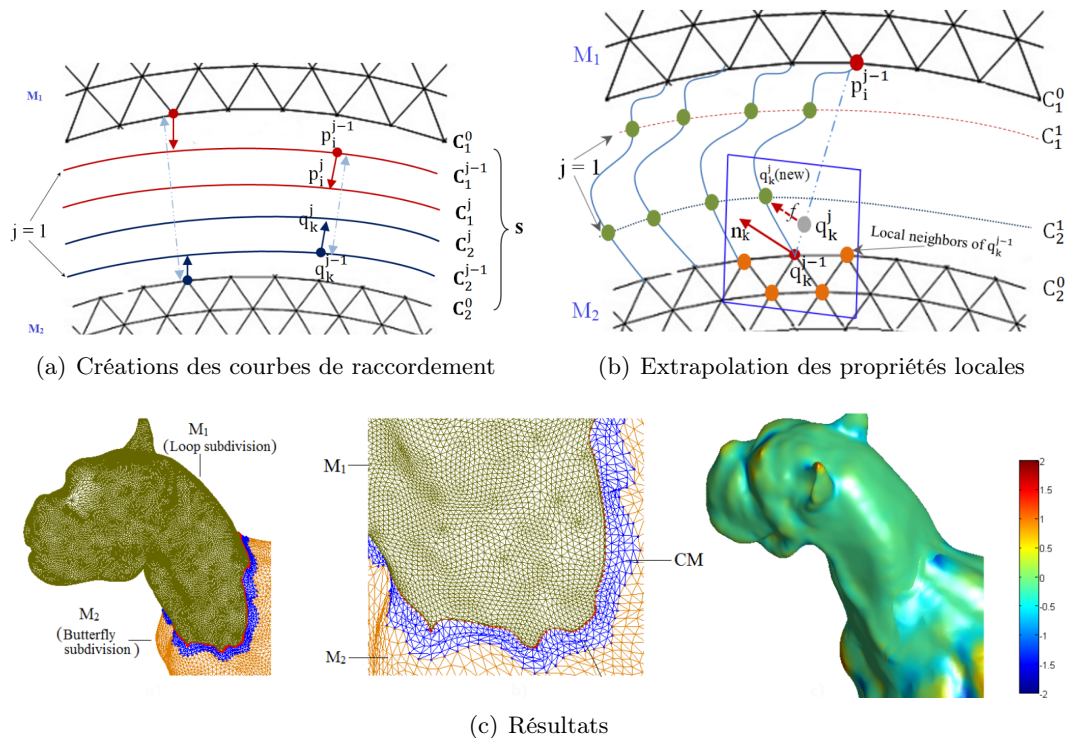
Dans l'idéal ce travail cherche donc à utiliser en entrée deux surfaces de subdivisions jointives de schémas différents, de niveaux différents et à les subdiviser, avec différentes itérations, en conservant les jointures et les propriétés locales (tangence, normales, courbures discrètes, et sur les surfaces limites). Avant d'arriver à cet objectif, nous nous sommes concentrés sur le raccordement de maillages et la conservation de propriétés le long d'un maillage de connexion.

La méthode de raccordement s'exécute en trois temps (voir les schémas de la figure 2.20) : 1) la création des courbes de raccordement, qui sont une extrapolation des courbes frontières des deux maillages. Pour cette étape les deux maillages et les courbes de raccordement sont considérés planaires ; 2) l'extrapolation des propriétés locales des deux bords des maillages vers la courbe au milieu du raccordement. On essaie donc de conserver les propriétés locales des bords puis, en s'écartant, de diminuer le poids de ceux-ci pour arriver au milieu du raccordement avec une contribution équilibrée des deux bords. L'extrapolation des propriétés locales se base sur 3 méthodes : en utilisant des fonctions à bases radiales (RBF [BB03]) afin d'obtenir une surface d'extrapolation, en reconstruisant par arcs circulaires une normale globale ou locale à un ensemble de points, ou également en calculant, grâce à des voisinages successifs, des plans tangents locaux. Ces calculs permettent de modifier les courbes de la première étape en créant des courbes gauches. 3) lorsque ces courbes-supports sont créées nous en effectuons une discrétisation adaptée aux deux schémas de subdivision (triangles, quadrangles, densité de faces) afin de ne pas obtenir de fractures, de trous entre les maillages initiaux et le maillage de raccordement. La figure 2.20 montre les schémas des phases 1) et 2) du raccordement ainsi que le résultat de la méthode sur un objet défini par deux surfaces de subdivision.

Le raccordement fonctionne mais le problème du suivi d'un niveau à son suivant reste encore ouvert. En effet la méthode que nous avons retenue est purement géométrique pour pouvoir s'astreindre de la définition des subdivisions de part et d'autre du trou et ne s'appuie donc que sur les données du niveau de subdivision courant (points, arêtes, face). La difficulté de créer un maillage de raccordement qui se déforme, par son schéma de subdivision, pour assurer la jointure entre les deux maillages initiaux reste un problème scientifique intéressant, et sera développé dans nos futurs travaux.

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ Anh-Cang Phan. *Crack removal and hole filling on composite subdivision meshes*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille, 2013. to be defended
- ▶ Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform. In *Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology*, SoICT '12, pages 81–90, New York, NY,



**Figure 2.20.** Schémas et résultats du raccordement de surfaces de subdivision

USA, 2012. ACM

- Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Joining meshes with a local approximation and a wavelet transform. In Vaclav Skala, editor, *The 21-st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2013*, WSCG 2013, Plzen, Czech Republic, 24-27 june 2013. ISBN 978-80-86943-79-4

## 2.6 Courbes et surfaces

La reconstruction de surfaces ou de courbes cherche à atteindre le même but que les méthodes vues dans le chapitre précédent. On dispose d'un nuage de points (sans voisinage, sans notion de la topologie de l'objet initial) ou d'une séquence d'éléments (liste ordonnée de points) et on souhaite reconstruire une courbe ou une surface paramétrique interpolante, ou approximante. Nous présentons ici les travaux menés dans cette optique, pendant le doctorat de T. Bay. L'application de cette reconstruction porte sur la reconstruction d'organes mous, dans le but de modéliser, comprendre et proposer une simulation chirurgicale des organes pelviens.

Le projet MoDyPe (sous la référence ANR-09-SYSC-008) a été initié en janvier 2010 pour 3 ans, il réunit trois centres hospitalo-universitaires (dont le CHU La Timone de Marseille) et trois laboratoires :

- le LSIS, équipe I&M (initiatrice du projet, M.E. Bellemare pour porteur) pour le traitement des images médicales en amont (reconnaissance, caractérisation), et l'équipe G-Mod (pour laquelle j'étais responsable du *work package* « Choix du modèle géomé-



trique ») sur la gestion d'un modèle géométrique reconstruction du nuage de points issu du traitement d'images et préparé pour la simulation mécanique,

- le LMEE et l'IBISC pour la modélisation mécanique de la dynamique pelvienne grâce aux éléments finis en 2D et 3D.

Le pôles du projet s'organisent en 4 *work packages* (WP) :

1. WP1, segmentation,
2. WP2, modélisation géométrique,
3. WP3, modélisation physique,
4. WP4, caractérisation et recalage.

Ces *work packages* forment un process tel que décrit à la figure 2.21. La séquence de fonctionnement du projet global consiste dans un premier temps à reconstruire une surface épaisse pour les tests mécaniques, à partir des images des IRM statiques de la patiente (segmentation guidée par les experts médicaux). Une fois une simulation mécanique effectuée, elle doit être validée par l'expert médical en accord avec la vérité-terrain d'une IRM dynamique de la même patiente lors d'un effort de poussée abdominale. Cette effort permet le diagnostic d'un dysfonctionnement des organes pelviens ou de leurs liens sustentateurs, il sera donc également modélisé dans la simulation numérique. Si les résultats de la simulation mécanique ne peuvent être recalés sur les images de l'IRM dynamique, les défauts sont caractérisés par les experts du projet. Le modèle boucle ensuite sur le WP de traitement géométrique pour une nouvelle expression de la surface épaisse (action sur la discrétisation en éléments volumiques, le placement, l'épaisseur, le type d'élément) ou sur le WP mécanique pour la modification ou la prise en compte de nouveaux paramètres de la simulation ou bien encore la caractérisation physique des éléments. Le procédé se base donc sur une rétro-action entre le modèle simulé et le modèle réel afin de converger sur les paramètres physiques, mécaniques des organes et de leurs liens. Cette connaissance est en effet inexistante dans le milieu médical et l'obtention de ces paramètres est quasiment impossible (in-vivo ou non) à cause de la nature de ces organes (vessie, utérus, vagin, colon) et de la structure du plancher pelvien (fascia, muscles abdominaux, interfaces).

Le procédé ne cherche pas à être complété en temps-réel, sa première priorité est d'obtenir des paramètres physiques et physiologiques décrivant numériquement les organes mous du plancher pelvien afin d'effectuer une simulation numérique préparant à une intervention chirurgicale. La pratique actuelle des interventions de consolidation est souvent liée à la connaissance seule du praticien. L'analyse développée par le projet MoDyPe améliorerait l'accroche des organes à des éléments « fixes » en réduisant le risque de déchirure de la consolidation, ce qui augmenterait le confort et diminuerait le taux de retour des patientes.

Pour la modélisation géométrique, nous avons décidé de reconstruire une surface d'approximation en utilisant une surface à pôle (B-spline) périodique, de manière à manipuler une surface lisse, quitte à la dégrader sous contrôle lors de la création des éléments discrets. La modélisation des trous dans la surface se faisant par restriction paramétrique, nous avons là un modèle continu, adaptable aux besoins de nos collègues mécaniciens, dans lequel les caractéristiques locales (tangences, courbures, continuités) sont calculables exactement, notamment lors de la création de l'épaisseur des organes. L'avantage de la surface périodique est évidemment d'avoir un seul plan paramétrique pour ce seul carreau et donc de ne pas considérer de raccordement ou de sous-expressions paramétriques d'autres carreaux. La méthode de reconstruction souhaite prendre en compte l'imprécision de la segmentation, celle-ci se faisant sur des données peu contrastées (pour les contours des organes) et sur relativement

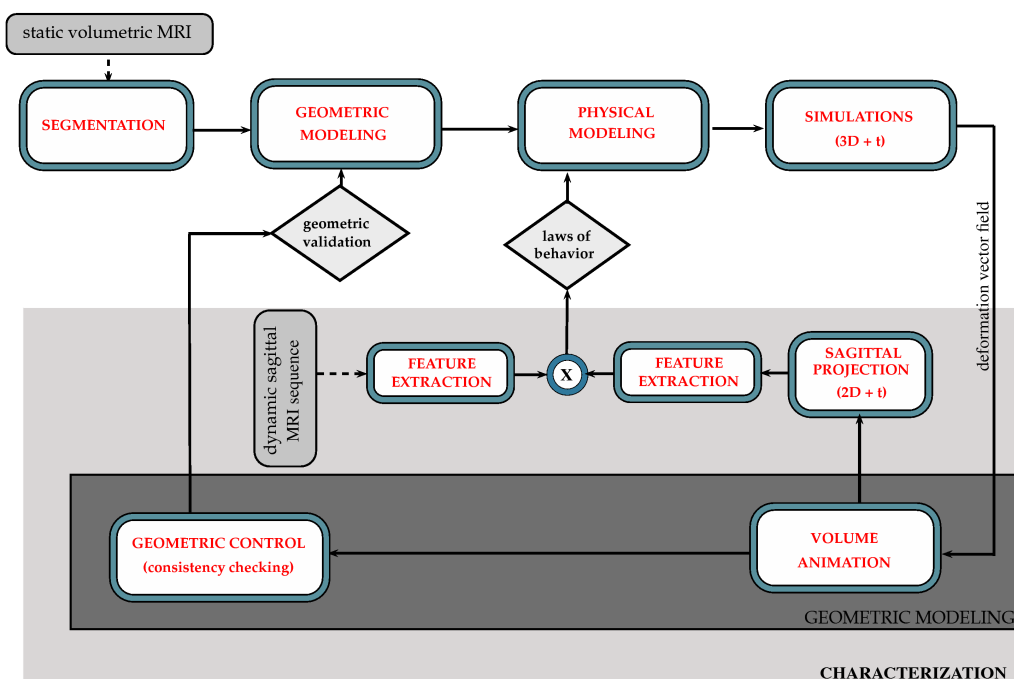


Figure 2.21. Process du projet MoDype

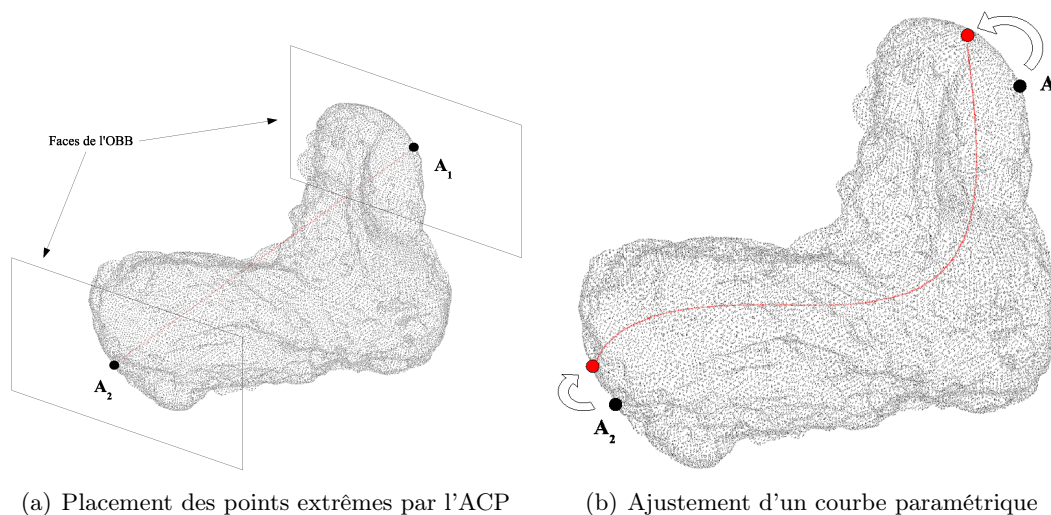
peu d'informations validées par l'expert (sur une centaine d'images du plan sagittal). Les nuages de points en entrée sont donc inorganisés, ne sont donc pas nécessairement uniformément dense et contiennent des aberrations liées au processus de reconstruction (à l'aide du logiciel open-source ITK-SNAP [YPH+06]) comme des groupes de points à l'« intérieur » des organes. Une reconstruction basée sur l'expression des normales locales à la surface de reconstruction et la distance « la plus petite », liée à une projection selon ces normales, serait donc trop sensible à la qualité des données. Ces travaux viennent notamment compléter les algorithmes de reconstruction par projection de J.C. Chambelland [Cha06a] dans l'équipe G-Mod du LSIS.

La reconstruction s'effectue en 3 phases :

1. une analyse des données pour la caractérisation d'un axe dans le nuage de points, afin de soutenir la reconstruction,
2. l'initialisation de la surface de reconstruction basée sur cet axe,
3. l'approximation des données par itération, en rapprochant progressivement la surface des données.

Pour la première phase, l'analyse en composante principale (ACP) qui pourrait être effectuée naïvement montre ses limites sur des nuages de formes non convexes. Nous avons donc défini un axe non linéaire, sous la forme d'une courbe de Bézier. Une ACP fournit les positions dans l'espace de points extrêmes du nuage en entrée. Ces points sont accrochés aux points de données les plus proches et deviennent les 2 points extrêmes de la courbe de Bézier modélisant l'axe de la forme. La courbe de Bézier présente l'avantage, pour un faible nombre de points de contrôle, de ne pas osciller et d'utiliser des outils simples de calcul de distances, suffisant pour cette première approximation de l'inertie de cet ensemble de points. Cet axe est ensuite ajusté selon les contraintes avec le même algorithme que la

reconstruction de la surface (décrite plus loin). La figure 2.22 présente la construction de cet axe curviligne pour un nuage de points d'un utérus.

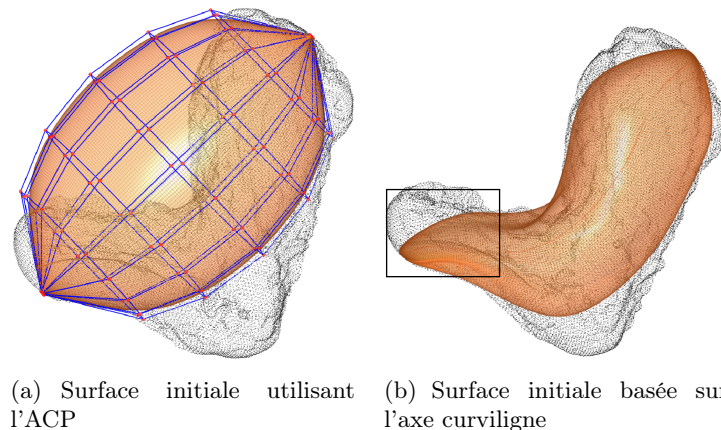


**Figure 2.22.** Étape 1 de la reconstruction : axe non linéaire du nuage de points

La seconde phase de la reconstruction concerne l'initialisation de la surface qui servira au processus itératif d'ajustement. L'axe d'inertie curviligne du nuage étant posé, nous décrivons une surface simple suivant cette courbe. L'algorithme est assez simple, des plans moyens sont répartis perpendiculairement à cette courbe, selon la densité et la répartition des points de contrôle de la surface de reconstruction voulue. Ces plans sont ensuite réduits en polygones fermés par un accrochage aux données du nuage de points. L'ensemble axe non linéaire + polygones fermés permet de construire un premier polyèdre de contrôle pour la surface d'ajustement. Celle-ci n'est pas simplement un cylindre généralisé générique issu de la courbe mais cette première surface a une forme proche des extrema locaux du nuage de points, tout en suivant la courbe. La figure 2.23 compare les deux approches, par ACP et axe non linéaire, on y voit une meilleure approche des données par la surface initiale basée sur un axe non linéaire et un meilleur plongement de la surface à l'« intérieur » de la forme, ce qui facilitera la reconstruction en évitant les oscillations à la frontière ou l'interpénétration de la surface.

Le cadre de l'image de droite montre que les points extrêmes ne sont pas forcément ceux qui participent à l'accroche de la courbe, cela dépend de la complexité de la forme et de la flexibilité de la courbe (liée évidemment à son ordre).

L'ajustement proprement dit de la surface est la troisième étape de la reconstruction. Les deux premières sont spécifiques au projet MoDyPe, cette dernière est beaucoup plus générale et peut s'appliquer à d'autres problématiques que les organes mous du projet MoDyPe. Elle se base classiquement sur une minimisation d'énergie définie par la distance entre les points de données et la surface initiale. L'apport scientifique vient de l'utilisation d'une énergie bidirectionnelle calculée par la distance des points de données aux points les plus proches sur la surface discrétisée et inversement des points de la surface discrétisée aux points de données. En considérant ces deux fonctionnelles, si l'énergie basée sur ces deux distances diminue, la distance globale entre la surface et les points de données diminue elle aussi. La paramétrisation de la surface n'est pas un choix d'importance, mais elle permet d'accélérer l'ajustement en donnant de meilleures valeurs de distance. Elle peut entraîner un glissement



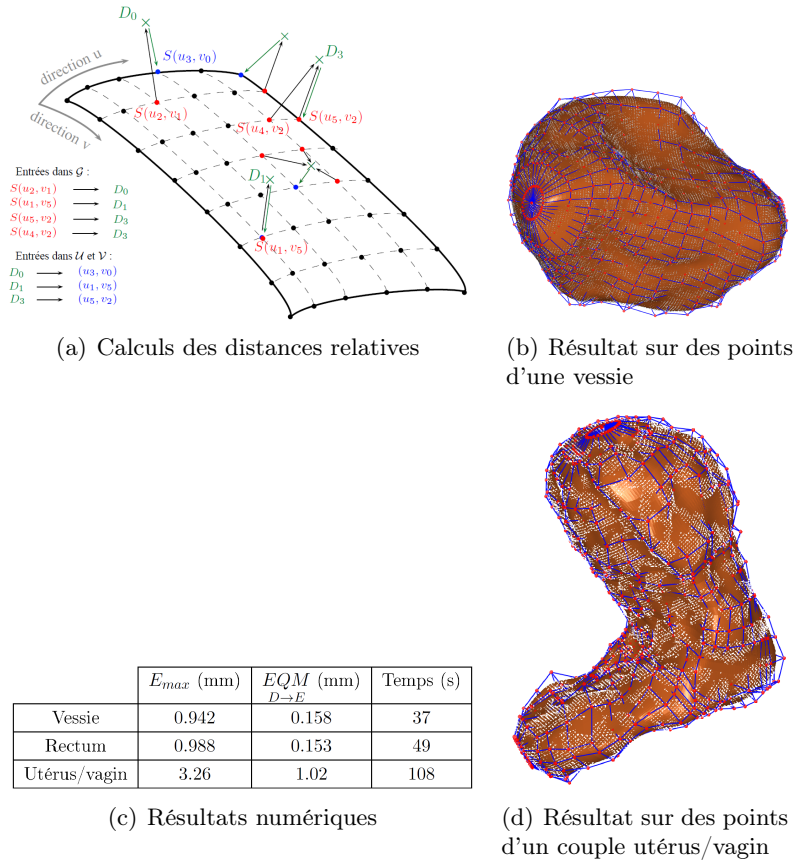
**Figure 2.23.** Étape 2 de la reconstruction : surface initiale

de la surface de reconstruction sur ou sous le nuage de points mais cela n'influence pas l'itération suivante où la discrétisation est re-calculée. L'ajustement est obtenu par itérations successives avec descente de gradient à pas optimal sur les points de contrôle de la surface, par une modification de l'algorithme de régularisation locale [Had95] adapté aux surfaces périodiques. La figure 2.24 illustre le calcul des distances, la surface est schématisée par les points et quadrangles noirs, les points de données par les croix vertes. Les distances de la surface vers les données sont les vecteurs noirs et des données vers la surface en vert. On voit que les relations ne sont pas bijectives, l'important étant de construire un graphe de correspondance entre points de données et points de la surface discrétisée. Ce graphe donne toutes les co-distances des points de la surface et de données qui serviront pour le calcul de l'énergie. Le tableau de la même figure donne les mesures d'erreurs sur les 3 nuages en entrée (il est à noter qu'il n'y a qu'un seul nuage pour l'utérus et le vagin). On peut y voir que l'ajustement est globalement sous le seuil d'erreur de la segmentation d'images (1 mm, d'après les formats des IRM statiques) sauf pour le couple utérus/vagin où la forme « en L » de l'objet ne facilite le remplissage de l'espace par la surface.

Les graphes de distances sont calculés à chaque itération, de même que la diminution d'énergie. Les critères d'arrêt de l'algorithme d'ajustement peuvent être un nombre d'itérations, une distance minimale ou une différence de distances d'une étape à l'autre (surface stable). La traduction du modèle surfacique en éléments utilisables par la mécanique se fait suivant 3 phases :

- discrétisation de la surface de reconstruction, en suivant les contraintes du WP « Mécanique » sur le nombre total d'hexaèdres, le respect ou non de la courbure de la surface,
- calcul des normales réelles en chaque point de discrétisation grâce à l'expression de la surface,
- offset de chaque sommet le long de la normale, en créant différentes couches d'hexaèdres (utiles pour la simulation mécanique), jusqu'à l'épaisseur voulue (valeurs données par l'expert médical).

L'offset est donc créé géométriquement. Pour diminuer les auto-intersections des couches le processus part de la surface initiale calculée en phase 2 de la reconstruction pour aller vers la surface d'ajustement. La figure 2.25 montre deux résultats de la méthode de construction d'offsets, celle de gauche (2.25(a)) montre un exemple d'auto-intersection pour la surface

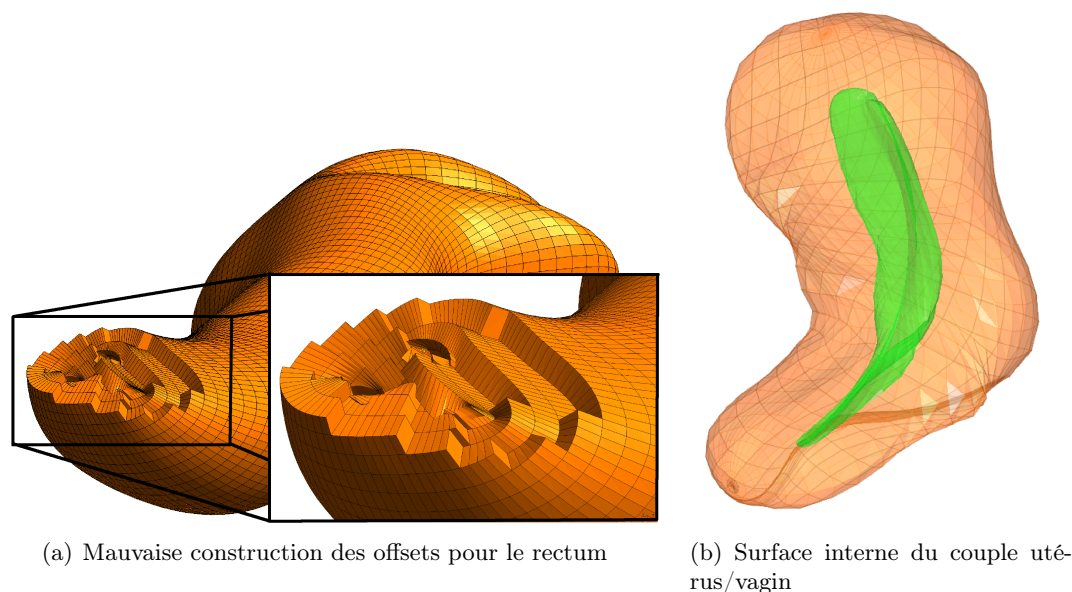


**Figure 2.24.** Schéma des distances utilisées pour le calcul d'énergie, résultats de l'ajustement

épaisse du rectum liée à une diffusion des couches de la surface reconstruite vers l'intérieur de l'objet. Ce problème est amoindri sur l'image de droite (2.25(b)) où la diffusion de l'intérieur vers l'extérieur permet de limiter les auto-intersections.

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, M. Daniel, and M. E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs. In IEEE, editor, *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC2011*, pages 4329–4332, Boston, MA, USA, 30 august 2011
- ▶ T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique de la dynamique pelvienne. In *Journées du GTMG 2011*, pages 93–102, Grenoble, France, 30 march 2011
- ▶ T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation de surfaces épaisses d'organes pelviens. In *Journées de l'AFIG 2011*, pages 45–53, Bidart, France, 12 october 2011
- ▶ T. Bay. *Modélisation de surfaces épaisses et fermées : application au cas des organes pelviens*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 11 2012. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin, Marc-Emmanuel Bellemare
- ▶ T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Leszek J Chmielewski Bolc Leonard, Tadeusiewicz Ryszard,



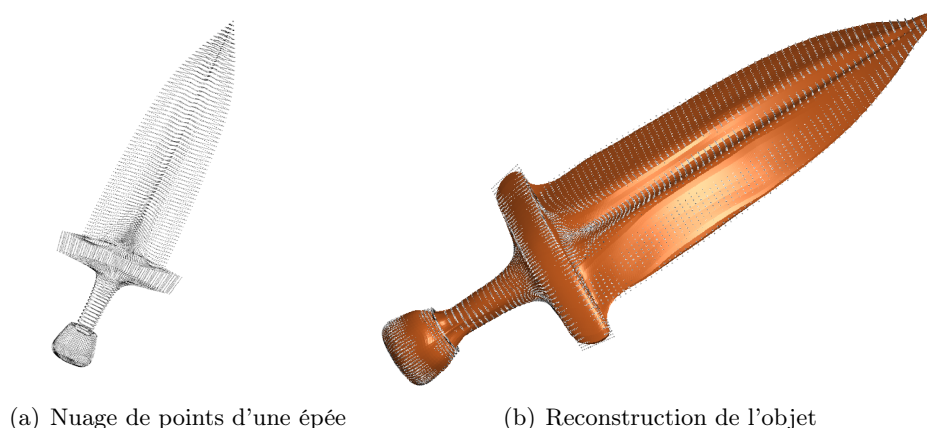
**Figure 2.25.** Quelques résultats des offsets pour la génération de surfaces épaisses

editor, *Computer Vision and Graphics: Proc. ICCVG 2012*, volume 7594 of *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 24 september 2012

- ▶ T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric modeling of pelvic organs with a discrete offset approach. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2012*, WSCG 2012, pages 27–30, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-80-0
- ▶ T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique d’organes pelviens par une approche offset. In *Journée du GTMG 2012*, pages 19–28, Strasbourg, France, 21 march 2012
- ▶ T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 82900I–1–82900I–14, Burlingame, California, USA, 2012

L’algorithme développé pour l’ajustement d’une surface à un nuage de points inorganisé est une troisième méthode pour passer d’un objet discret à un objet continu. Il permet également le retour vers une forme discrète, selon des contraintes de précision ou de description. Il a été appliqué à des modèles de CAO (voir la thèse de T. Bay [Bay12] et les exemples de la figure 2.26) et montre de bons résultats pour l’ajustement global.

Des problèmes locaux subsistent, inhérents à la méthode et aux reconstructions par surface à pôles de manière générale : la complexité de l’objet à reconstruire est rapidement un frein et les arêtes franches ne sont pas reconstruites, comme on le voit sur la garde de l’épée, à l’image 2.26(b). Pour les arêtes marquées de l’objet, la surface qui est définie comme de continuité  $C^1$  partout ne peut dégénérer suffisamment pour passer  $C^0$  et respecter cette contrainte, cela induirait forcément l’apparition d’artefacts, liés notamment à la méthode d’ajustement où la contrainte de distance n’est pas stricte (moyenne de distance de la surface aux points de données et réciproquement). Cela induirait également une tension importante



**Figure 2.26.** Exemple de reconstruction d'objet CAO

en cet endroit de la surface pour tirer les points de contrôle les uns vers les autres, il faut donc raffiner le polyèdre de contrôle par insertion de points sans obliger le reste de la surface à s'aplanir. La méthode géométrique de création des offsets n'est pas optimale car elle crée des auto-intersections locales (d'hexaèdres voisins) ou globales de la surface discrète sur elle même. Nous envisageons de gérer cette construction en même temps que l'ajustement de la surface en exprimant les contraintes géométriques des hexaèdres ou des couches comme des fonctionnelles à prendre en compte dans la minimisation d'énergie.

La complexité de l'objet à reconstruire est une contrainte structurelle que l'on retrouve dans les 2 projets précédents. Si l'objet à reconstruire n'est pas de genre 0, ou comporte des embranchements, la définition de l'axe curvilinéaire de départ n'est plus possible et l'algorithme de reconstruction ne peut se dérouler. Ce problème a également été pointé par les travaux sur les déformations de formes libres, dont une des solutions possibles a été la mise en place d'une structure arborescente hiérarchique entre les contraintes portant les déformations. Il intervient également dans la reconstruction basée sur des surfaces de subdivision puisque ces dernières sont ajustées par des distances de projection entre une première surface reconstruite et le maillage initial.

## 2.7 Normalisation

Nos travaux de recherche sur le passage discret  $\leftrightarrow$  continu nous ont également permis de travailler dans le domaine de la normalisation. C'est une application assez rare dans les travaux de recherche mais ces 4 années ont été très enrichissantes (2007-2011). En accompagnement de l'entreprise Geomatys (bourse de thèse Région d'A. François et conseil à l'innovation) reconnue dans les organisations en amont des comités ISO, nous avons travaillé sur la norme ISO 19107 pour l'intégration de la 3D dans le domaine de l'information géographique. Le laboratoire LSIS a donc été le premier laboratoire français membre de l'Open Geospatial Consortium (OGC, <http://www.opengeospatial.org/>) qui est une organisation internationale proposant les normes liées au géospatial à l'ISO (ISO TC 211). Les membres sont internationaux : Oracle, NASA, USGS, Tokyo University, Tata industries, Google, IGN ou Météo France. De même le laboratoire a intégré le chapitre français de l'OGC. Les « *working groups* » (WG) émettent des demandes de normalisation sur des sujets comme la description des objets géométriques 2D et 3D, la description de systèmes de

coordonnées et de leurs interactions, la modélisation de données sous-marines ou aériennes, les interfaces de communication entre aéroports et la gestion des trajectoires internationales, la description des symboles cartographiques, la gestion des risques ou des crises, la modélisation de villes virtuelles, du terrain au mobilier en passant par les infrastructures (cf. la figure 2.27 pour une vue générale des normes). L'objectif de cette normalisation étant évidemment que les logiciels développés soient inter-opérables. La plupart des prototypes développés utilisent massivement des communications par l'Internet (services web, SaaS, XML) ainsi que des visualisations sur des interfaces légères.

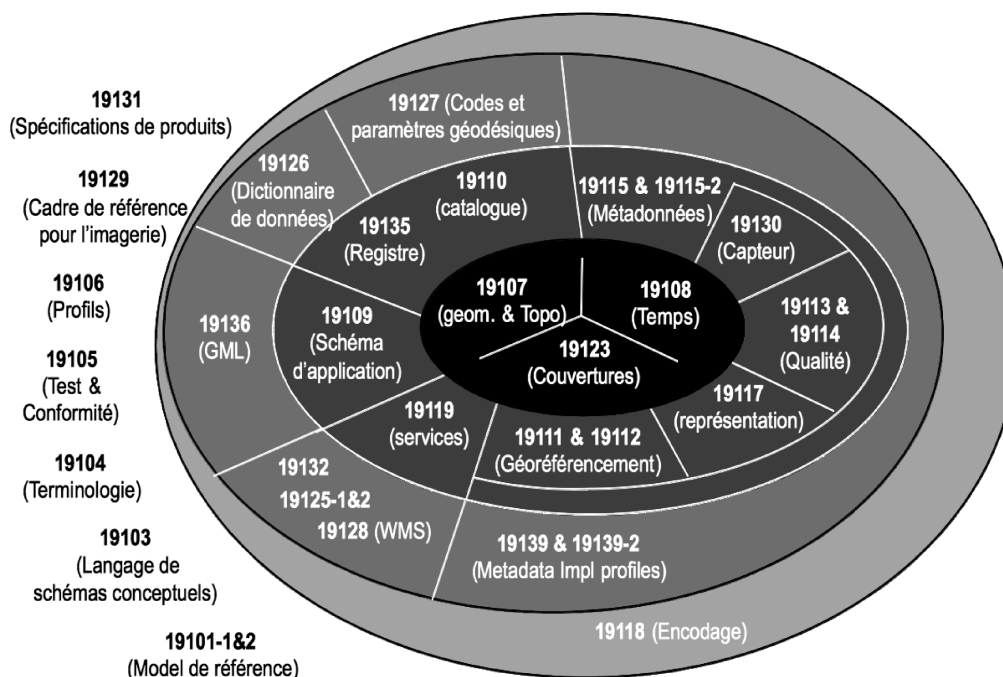


Figure 2.27. Vue d'ensemble des normes portées par l'OGC

Notre travail a surtout été méthodologique et a conduit à de nombreux rapports de conception à différents « *Technical Committees* » (TC) qui ont lieu tous les 6 mois, sur les modifications/ajouts à apporter à la norme existante. Nous avons également développé des prototypes de chacune de nos modifications pour montrer leurs intérêts. Les objets géométriques utilisés étant de toute description (point, courbe, polyèdre, quadriques, à pôles ou implicite), nous avons mis en place des modules de traitement de données géométriques génériques et des interfaces de changement de modèle. Par exemple l'intersection d'une sphère avec une autre se note `masphere.intersection(lautresphere)`, elle doit retourner un objet et son implémentation n'est pas fixée par la norme. Notre interface générique permet, suivant les paramètres de l'utilisateur, d'effectuer cette opération sur deux maillages issus de la discrétisation de la surface (initialement on donne les méridiens et parallèles de la sphère pour construire l'objet numérique la représentant), sur les expressions paramétriques ou implicites du même objet. Un important travail a donc été fourni pour la gestion des modèles, de conversion entre modèles et de maîtrise de la précision des différentes opérations. Si l'objet n'est pas « traduisible » en une autre description, on essaie de faire au mieux en traduisant le second objet de l'opération, en revenant dans le pire des cas à des opérations discrètes sur les maillages.



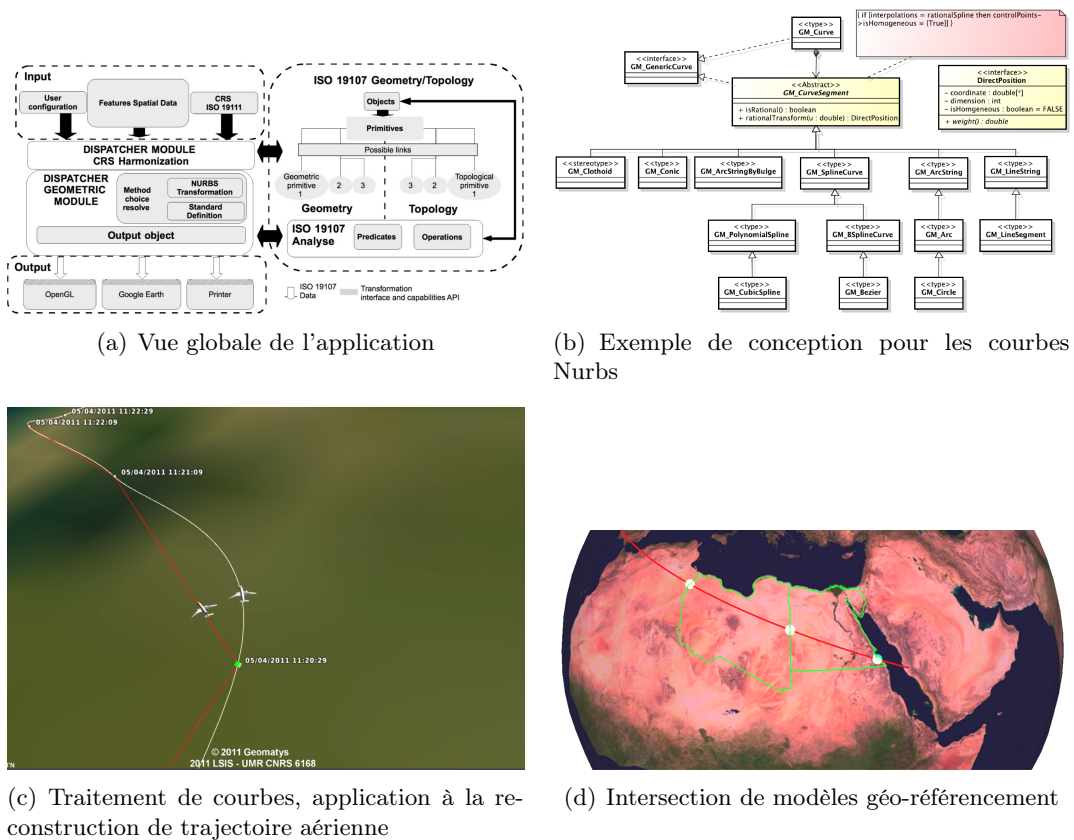


Figure 2.28. Quelques résultats du travail de normalisation

Nous avons donc proposé une traduction (lorsqu'elle est possible) en objets paramétriques à pôles afin de maîtriser les erreurs de calcul et d'adapter la précision de ceux-ci. Il est à noter que la description de l'objet de sortie pouvant être un autre paramètre, l'utilisation d'objets et d'opérations génériques nous permettait de couvrir les contraintes de sortie également. Nous avons proposé une formalisation des courbes et surfaces paramétriques utilisables, depuis l'interpolation linéaire de segments jusqu'aux surfaces Nurbs. Nous avons également proposé de ré-utiliser ces définitions pour l'aviation (dans le WG du même nom) dans le cadre de la gestion des trajectoires, par interpolation spline des points de passages (*waypoints*), ce qui va dans le sens de l'inter-opérabilité.

Les images de la figure 2.28 illustrent des productions effectuées pendant cette mission de normalisation. Les schémas de la première rangée ont été produits pour la modélisation de la norme. Les images suivantes sont des exemples d'applications de ces objets et méthodes, où toutes les descriptions et tous les traitements sont basés sur différentes normes (3D, échange de fichiers, re-projection des coordonnées géo-référencées), l'image de droite (2.28(d)) est une partie de l'application « Globe Virtuel » développée pendant la thèse.

Ces résultats sont également à rapprocher du projet « Repara » dans lequel nous avons effectué des travaux de recherche sur l'interpolation de points de passage de trajectoire, avec contraintes de la dynamique (vitesse, orientation) dans le cadre de vol de drones (cf. section 2.9.1 page 49).

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes :

- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Analyse et modélisation 3D pour des systèmes d'information géographique. In IRIT Presse, editor, *Journées du GTMG 2009*, 2009
- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS: ISO 19107 case study. In *5th International 3D GeoInfo Conference 2010*, 03 november 2010
- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. New curves proposal for GeoAPI. In *Frascati Technical Committee Meetings (OGC 2010)*. Open Geospatial Consortium, 05 march 2010
- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. 3D ISO analysis and modeling for GIS - first steps in the norm implementation. In *International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS)*, 23 july 2010
- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS: ISO 19107 case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-4/W1:115–120, 03 november 2010
- ▶ A. François. *Interopérabilité des modèles géométriques pour les systèmes d'information géographique : applications de la norme ISO 19107*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2011. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin
- ▶ A. François, R. Raffin, and M. Daniel. ISO 19107 new implementation and proposal in GeoAPI. In *Boulder (Colorado) Technical Committee Meetings (OGC 2011)*. Open Geospatial Consortium, 21 september 2011
- ▶ A. François, R. Raffin, M. Daniel, and J. Aryal. 3D modelling and analysis: ISO standard tools for air traffic. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2012*, WSCG 2012, pages 327–334, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-79-4

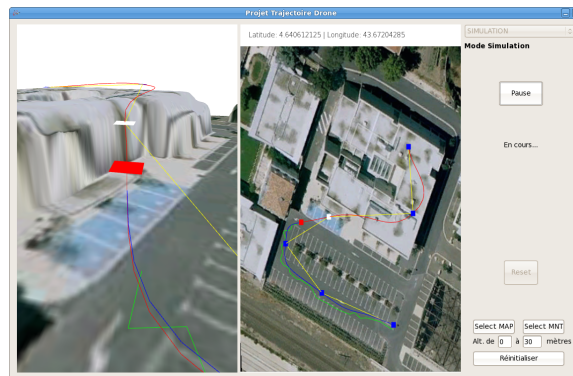
## 2.8 Conclusion intermédiaire

Cette partie présentant les travaux et résultats scientifiques s'achève, avant de passer aux projets et contrats nous dressons ici un bref récapitulatif des notions abordées. Mes travaux de recherche basés sur les déformations de formes libres, avec des contraintes de différentes dimensions sur le déplacement à obtenir, ont été étendus aux descriptions paramétriques, volumiques et multi-échelle (surface de subdivision). J'ai travaillé sur les modèles paramétriques (courbes et surfaces) et discrets (maillages) en gardant à l'esprit le passage d'un espace discret à un espace continu et inversement, afin de profiter des avantages de chacun ou de diminuer au moins les désavantages de certaines méthodes, de proposer des outils génériques et d'aider à dépasser ce problème dans la reconstruction d'objets. L'application normative a d'ailleurs été une très bonne occasion de se pencher sur cette conceptualisation. Les pages suivantes présentent les projets auxquels j'ai participé seul, pour des organisations scientifiques (CNRS, institut Carnot) ou territoriales (région PACA, ville d'Arles). Ces projets ont également permis un questionnement sur la reconstruction d'objets sans sémantique associée.

## 2.9 Projets et contrats

### 2.9.1 Projet Carnot Star « Repara », 2011

Le projet Repara est un projet innovant Carnot Star entre les équipes LSIS-Escodi pour les commandes et l'aérodynamique du vol, l'École Centrale de Marseille pour le diagnostic, l'Onera pour les commandes et la mécanique du vol et l'équipe LSIS-G-Mod pour la trajectographie. Ce projet a été dirigé par T. Raharijaona de l'équipe Escodi, son objectif était de modéliser les défauts critiques d'un appareil à voilure tournante, le diagnostic et la tolérance aux défauts et de fournir une réponse aux pannes de l'aéronef par la reconfiguration de la commande. Mon rôle a été de proposer un environnement virtuel de test et de définition des trajectoires, des changements de trajectoire dynamiques dans le respect des règles aéronautiques internationales (USAR pour les véhicules sans pilotes). Un prototype réel a été construit (hexa-rotor) dans lequel les lois de commandes ont été chargées. Le géo-positionnement du véhicule se fait grâce aux capteurs embarqués et la trajectoire réelle est comparée à la trajectoire prévue.



**Figure 2.29.** Interface de trajectographie et de validation du modèle d'évitement

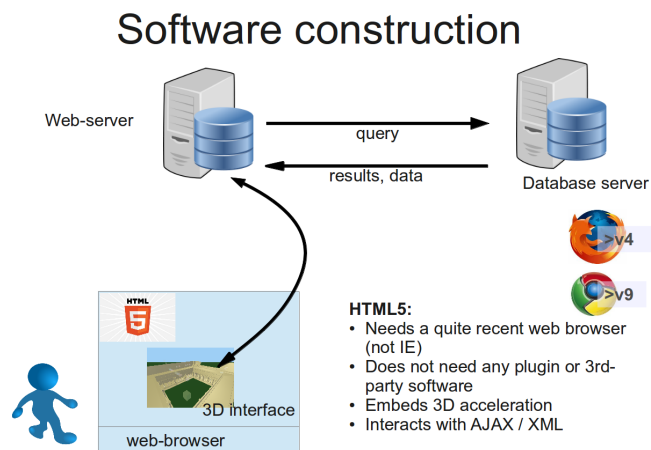
La réalisation d'un démonstrateur a permis la validation expérimentale des solutions proposées. Le travail bibliographique a été conséquent pour cette problématique spécifique du passage de l'espace discret (points de passage) au continu (courbes d'interpolation), sous contraintes cinématiques (consulter par exemple [NVM+03], [MDL+07], [TYB09]). La figure 2.29 présente l'interface mise en place afin de positionner des points de passage et des obstacles, utilisée pour la validation de la trajectographie et du contournement d'obstacles. La courte durée du projet n'a pas permis d'aborder les points suivants : différentiel trajectoire réelle / trajectoire simulée, analyse sur du court et long terme et interactions avec la commande (dérive en puissance d'un moteur, influence du vent, perturbations locales ou panne d'un capteur), traitement d'images ou de capteurs ultrason pour la détection de collision, difficulté de traiter la profondeur d'un obstacle pour déterminer la meilleure trajectoire d'évitement... Ce travail a néanmoins été repris dans le contexte des travaux de normalisation avec l'OGC du WG « Aviation » sur la définition des trajectoires (cf section 2.7).

### 2.9.2 Projet « Éphèbe », 2011-2012

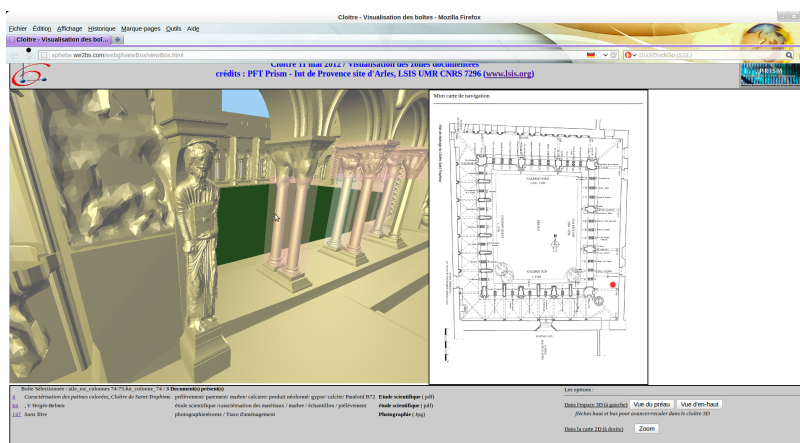
Ce projet initié par la Ville d'Arles et subventionné par l'appel à projet « E-Services et Territoires » de la Région PACA<sup>4</sup> a comme objectif global de faire un état des lieux

4. Provence-Alpes-Côte d'Azur

du Cloître Saint Trophime, bâtiment classé au Patrimoine Mondial de l'Unesco, avant sa rénovation. Le ville d'Arles cherche donc à sauvegarder numériquement le bâtiment existant ainsi qu'un moyen de conserver les documents afférant au cloître, en indexant spatialement le(s) lieu(x) couvert(s) par ceux-ci. Les travaux dans ce bâtiment qui appartient à la commune sont supervisés par la fondation internationale « *World Monument Fund* » (WMF) qui a mis en place une base de données des travaux effectués. Dans ce cadre une numérisation a été effectuée par la fondation internationale CyArk afin de sauvegarder numériquement (relevé laser et couleur des lieux) ce patrimoine historique. Le projet s'est donc structuré en deux lots, un lot multimédia pour l'utilisation des données 3D existantes dans le cadre d'un film de vulgarisation, un deuxième lot sur la constitution d'une base de données multimédia des documents techniques, scientifiques, métiers, iconographique liés au cloître, qui soit accessible par la communauté scientifique (archéologues, bâtiments de France, Unesco) et les maîtres d'œuvre des rénovations matérielles de l'édifice.



(a) Schéma de fonctionnement du projet Ephèbe



(b) Interface 3D de navigation

Figure 2.30. Éphèbe : schéma du projet et interface de navigation

La plate-forme Prism technologique de l'IUT a remporté ce deuxième lot, et a confié la sous-traitance de la gestion de la base de données à l'entreprise We2bs, et celle de la mise en place de l'indexation 3D au laboratoire LSIS. La plate-forme a encadré le projet « Intégration d'une base de données à caractère documentaire et scientifique au modèle 3D du Cloître Saint Trophime ». L'objectif de ce projet a été de construire une base de données documentaire attachée aux objets tri-dimensionnels du bâtiment. Le principe est donc de pouvoir indexer spatialement un document scientifique, un rapport de travaux ou un médium (photographique ou vidéo) à une zone géométrique 3D du bâtiment. Les informations devaient pouvoir être spécifiées et visualisées dans un client léger (navigateur Internet). En production, l'équipe projet a été composée d'une entreprise We2bs pour la conception/gestion/administration de la base de données, d'une association d'archéologues pour la caractérisation et l'indexation des documents (*ITHAC*<sup>5</sup>, hébergée par la Maison Méditerranéenne des Sciences de l'Homme) et du LSIS pour la partie visualisation de document dans un environnement 3D.

Le LSIS a collaboré avec la société « Arts Graphiques et Patrimoine » (AGP) sur la maquette numérique du cloître et son adaptation à un transport sur le réseau. Le service du patrimoine a ajouté aux données existantes une numérisation laser supplémentaire de 16 éléments distinctifs (statues, chapiteaux). L'application développée s'appuie sur les standards récents de l'HTML5, notamment la visualisation 3D dans le navigateur possible grâce au canevas WebGL. Le client est développé en langage Javascript pour les interactions, la construction et la visualisation de la scène 3D. Le serveur se décompose en un serveur web pour la communication HTTP et d'un serveur de données, une base de données PostGres/PostGIS avec une cartouche géospatiale (cf. fig. 2.9.2) et la description de géométries (en 2 dimensions). L'application présente la maquette numérique du cloître dans laquelle l'utilisateur peut naviguer et pointer des zones d'intérêts (représentées par des boîtes parallélépipédiques à l'image 2.30(b)). Une des difficultés de ce projet provient de l'absence de sémantique liée aux objets géométriques. La numérisation a perdu cette information bien qu'elle faciliterait l'indexation et la recherche documentaire. Dans cette phase du projet la définition de la sémantique liée à chaque objet (chapiteau, sculpture, voutain, ...) a été faite manuellement par la société AGP lorsqu'elle a conçu la maquette numérique.

Les documents sont donc rattachés à des zones d'intérêts. Plus facilement que dans une interface textuelle, l'utilisateur peut consulter les documents liés à une zone puis à sa voisine. Des zones supplémentaires peuvent être ajoutées via une interface 3D, où l'utilisateur déplace et positionne une boîte 3D sur une zone qui l'intéresse. La taille de ces boîtes n'est pas fixée, cela peut couvrir une aile entière, un chapiteau ou la surface d'une bande de papier japonais utilisée pour des tests physico-chimiques. Un deuxième challenge pour ce projet réside dans la transmission des données géométriques. En effet, si l'on considère les géométries du bâtiment, il y a 1 176 538 faces triangulaires et 684 686 points à transmettre (cf table 2.3). À ces données globales, on rajoute pour les 16 sculptures détaillées 2 444 293 faces et 1 227 719 points (cf table 2.4). La somme totale des données à transmettre sur le réseau IP est de 43,8 Mo pour le bâtiment et 157,6 Mo pour les sculptures. Afin de faciliter le cheminement de l'utilisateur dans cette maquette numérique, nous avons mis au point deux trajectoires dans le cloître, l'une pour un parcours dans les ailes et l'autre, depuis le préau, pour un parcours à l'extérieur. Pour chaque trajectoire une segmentation en zones est faite afin d'associer 2 ou 3 éléments détaillés par zone (voir l'image 2.31). Si un utilisateur entre

---

5. Institut Territoires, Histoires, Arts et Cultures, [www.ithac.org](http://www.ithac.org)

dans une zone, on supprime de la scène les éléments inutiles et on charge les éléments actifs. Grâce à cette construction l’empreinte mémoire varie peu et les communications réseau sont adaptées à la navigation.

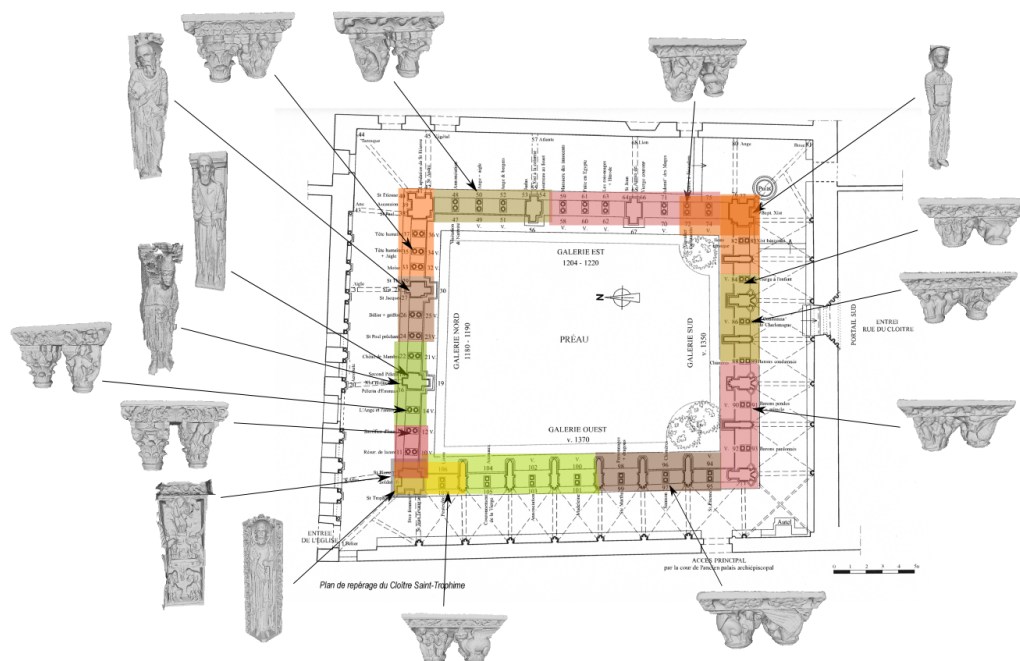


Figure 2.31. Parcours et zones d’activités des éléments détaillés

Partie du cloître	fichier JSON binaire (Mo)	nb. faces	nb. points
East Wing	4.8	140.308	74.706
North Wing	5.2	152.900	80.821
West Wing	12	289.079	208.191
South Wing	15	397.249	214.757
NortEast Corner	1.2	34.744	18.761
North West Corner	1.7	49.125	26.125
South East Corner	1.6	47.136	25.542
South West	2.3	65.997	35.783

TABLE 2.3. Taille des données et fichiers des parties du bâtiment

Ces travaux ont fait l’objet des publications suivantes :

- ▶ présentations au Comité Scientifique du Cloître Saint-Trophime (World Monument Fund, Ville d’Arles, Monuments et Bâtiments de France)
- ▶ R. Raffin and J. L. Rey. Couplage d’une base de données documentaire à une visualisation interactive 3D sur l’Internet. Iut de Corte, France, 2013. CNRIut

Détail	fichier JSON binaire (Mo)	nb. faces	nb. points
Capital 106-107	7.9	122.435	61.662
Soldiers	7.4	122.863	61.953
Capital 10-11	15	224.691	112.454
St Trophime	11	164.685	82.929
Capital 12-13	7.6	119.313	59.733
Emmaü Pilgrim	12	194.945	98.511
Christ	6.7	107.000	54.021
Capital 47-48	16	232.784	116.586
St John	2.8	42.411	21.494
Capital 98-99	14	204.622	102.434
Capital 70-71	9.5	147.202	74.076
Capital 72-73	10	156.068	78.036
St Gamaliel	6.3	103.947	52.502
Capital 88-89	9.9	164.386	82.195
Capital 90-91	16	245.425	123.373
Capital 92-93	5.5	91.516	45.760

TABLE 2.4. Taille des données et fichiers des 16 sculptures détaillées

- Romain Raffin. Indexation and visualization of documents in a 3D model of the st trophime cloister over the internet. In *Proceedings of 2013 Digital Heritage International Congress*, volume 1, pages 759–760, 28 Oct. - 01 Nov. 2013. fed. 19th Int’l VSMM, 10th Eurographics GCH and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, plus special sessinos from CAA, Aerquologica 2.0, Space2Place, ICOMOS ICIP & CIPA, EU Projects, et al

Le projet Éphèbe a permis de poser les questions de la communication des objets géométriques 3D sur un réseau IP asynchrone (via HTTP) et sur la reconstruction sémantique associée aux nuages de points ou aux reconstructions maillées. Outre une amélioration technologique utilisant les capacités de calcul 3D du client via les low-polys et une carte de normales, la question se pose d’un streaming géométrique et topologique.

## 2.10 Conclusion

Cette partie de présentation des activités de Recherche a listé les travaux effectués depuis le doctorat, leur application à des modèles géométriques différents et une orientation vers la reconstruction d'objets (CAO<sup>6</sup>, médicaux, patrimoniaux, dynamiques) induisant la maîtrise des contraintes de passage de modèles discrets à des modèles continus et inversement.

La réflexion sur les déformations de formes libres, par le biais des modèles successifs d'objets et les adaptations de la méthode de déformation à mettre en place, a permis de mener une recherche sur l'expression d'un objet géométrique selon plusieurs modèles de description. Nous avons voulu garder à l'esprit les pertes numériques, géométriques ou sémantiques, pendant ces transformations, ainsi que la caractérisation de leurs amplitudes.

Les applications de nos méthodes ont permis de voir ces contraintes sous un angle nouveau, par la reconstruction d'organes, la visualisation de données architecturales sur un client léger ou la transmission de données géométriques sur un canal de communication asynchrone. Dans le cadre de la reconstruction par surfaces paramétriques épaisses, la description discrète seule ne suffit pas (adéquation avec une courbure locale ou globale, avec la forme de l'objet) et l'utilisation de systèmes dynamiques (masses-ressorts) ne permet que la gestion de la tension locale de ces surfaces. Il faut donc faire bénéficier simultanément l'algorithme des représentations continues et discrètes. De la même façon les contraintes (offsets, déformations, trous, puits, bosses, arêtes vives) doivent être spécifiées dans les deux modèles. Ces problèmes existent également dans la reconstruction de surfaces de subdivisions. Le projet Éphebe a également montré l'importance du manque de sémantique associée à un objet géométrique. Cela permettrait de guider la reconstruction, l'indexation, la transmission et la visualisation d'un modèle complexe.

Cette démarche m'a permis d'établir les projets de Recherche développés dans le chapitre suivant.

---

6. Conception assistée par Ordinateur



## PROJETS DE RECHERCHE

Ce chapitre souhaite lister les suites à donner à mon travail de recherche décrit précédemment ainsi que les orientations de mes recherches à venir. Nous avons exploré pendant les travaux de recherche et encadrements auxquels j'ai participé différents thèmes de la modélisation géométrique. Les problèmes que nous avons abordés lors de ces travaux ont été mis à jour dans le cadre de chaque projet mais s'appliquent de manière plus générale. Certains sont des problèmes ouverts de la communauté scientifique d'autres plus orientés par l'évolution des technologies. Parallèlement certains sont des extensions des projets et nécessitent une réflexion immédiate spécifique à un besoin (description d'organes, reconstruction multi-échelle, traitement de données architectural, transmission de géométries) alors que d'autres sont des voies d'exploration de plus longues durées, de portées générales, nécessitant un investissement plus conséquent dans le cadre d'une équipe de scientifiques (surfaces épaisses, reconstruction à base de contraintes sémantiques, passage sous contrôle de modèles discrets à des modèles continus et inversement).

### 3.1 À court terme

Les projets que nous avons menés jusqu'à aujourd'hui ont levé les besoins à court terme suivant :

- spécification des contraintes de modélisation, puisque notre modèle continu le permet (trous, raccords),
- reconstruction d'objets par approximation d'une surface à pôles via des nuages de points épars, sous contraintes géométriques (arêtes vives, détails fins),
- traitement de données géométriques architecturales pour l'adaptation à une visualisation distante (niveaux de détails, maillages progressifs).

L'obtention d'un modèle « complet » des organes pelviens n'était pas dans les objectifs du projet Modype mais elle reste nécessaire. En effet les organes sont naturellement rattachés à d'autres, maintenus dans un fascia et par les muscles abdominaux. Pour exemple, la caractérisation et la segmentation de la vessie est suffisante pour sa reconstruction mais ne permet pas d'implanter les canaux amont et aval (urètre, uretère) qui participent au soutien. L'épaisseur réelle des organes n'est pas assez connue pour en tenir compte de manière non globale. Cela pose problème lorsque 2 organes sont caractérisés en même temps (cas de l'utérus-vagin du projet MoDyPe) mais devraient avoir des valeurs d'épaisseur différentes. Nous avons implémenté une carte des épaisseurs afin de répondre à cette demande des praticiens mais elle n'a pas pu être activée par manque d'éléments. Les raccords entre surfaces de différents organes se feront par restrictions dans l'espace paramétrique de chacune, avec des contraintes de continuité entre surfaces aux bords de ces restrictions. Dans le même esprit, la caractérisation physiologique des tissus et leur intégration dans notre modèle restent des problèmes ouverts. En effet lors de la création des hexaèdres de la simulation mécanique, nous pouvons lier la discrétisation de la surface reconstruite et les caractéristiques physiologiques. On peut penser que les zones planes sont moins épaisses, que les zones à fortes

courbures sont sujettes à écrasement, etc. Ces contraintes doivent être exprimées dans un modèle mathématique qui travaillerait dans l'espace paramétrique de la surface de reconstruction et profiterait de la carte de courbure implémentée.

Nous avons également montré dans ce travail que la reconstruction de surfaces CAO à partir de points épars (une numérisation bruitée) était possible bien qu'elle pose des problèmes de restrictions de continuité. Notre modèle cherche à reconstruire une surface isotrope en terme de tension et d'épaisseur. Il ne peut donc reconstruire des surfaces présentant des arêtes vives. Nous avons développé un modèle d'insertion de nœuds pour faciliter la reconstruction de parties très détaillées mais celui-ci est insuffisant si une continuité  $C^0$  seulement doit être maintenue. Une piste serait donc de passer à une représentation multi-carreaux en rejoignant les travaux de thèse de R. La Gréca vus plus avant ou en choisissant un modèle adaptatif comme les T-splines [SZBN03]. Une question qui peut également se poser réside dans l'appariement à un modèle fortement non convexe. Des travaux en amont existent dans l'équipe (voir les thèses de L. Astart [Ast04], J.L. Mari [Mar02] et E. Remy [Rem01]) sur la caractérisation d'axes médians et d'embranchements et ils constitueraient des points de départ immédiats.

Une des applications de ces outils développés pour les surfaces de subdivision dans le cadre d'un interfaçage avec les surfaces à pôles de la CAO sera la reconstruction automatique de surfaces issues de numérisation après usinage et la comparaison avec la surface initiale émise par le bureau d'études, à différentes échelles. Une application déjà mise en place au laboratoire CRePA du PFIEV de Danang (Vietnam) dans le cadre de la thèse de K.N. Tan, qui utilise le caractère contractant de la surface de subdivision obtenue par reconstruction pour définir des objets englobants de la surface d'une pièce. Ces objets, se concentrant au fur et à mesure vers la surface de l'objet physique, permettent de guider une machine à mesurer de manière adaptée : rapide si elle est éloignée de la surface, lente si elle s'en rapproche.

Spécifiquement pour le traitement de la géométrie de patrimoines bâtis, deux axes de recherches technique et scientifique sont à explorer : le traitement *out-of-core* des millions de faces ou de points obtenus par l'étape de numérisation afin de filtrer la géométrie, de la segmenter et de la caractériser (à piloter avec des règles de construction ou d'architecture), et la transmission de ces données sur un réseau IP pour en donner l'accès au plus grand nombre de matériels connectés, via un protocole de streaming géométrique et topologique, dépendant du point de vue. La question posée est alors de pouvoir envoyer depuis un serveur de données des informations de manière asynchrone, sans garantie de réception ni de séquence mais qui soient spatialement représentables. Le problème est plus complexe que le « classique » streaming de flux vidéo où la rémanence de l'œil humain « gomme » les erreurs de transmission. Des travaux existent dans le cadre de la norme MPEG2k notamment et cette problématique devient prépondérante dans le cadre des normes de l'OGC par exemple où un fichier de données géométriques d'une ville dépasse le giga-octet pour un niveau de détail (cf la construction du langage de description CityGML<sup>1</sup> pour l'inter-opérabilité des descriptions de bâtiments).

---

1. <http://www.citygml.org/>

## 3.2 À plus long terme

À partir des recherches effectuées et des points durs que nous avons mis en lumière, je dégagerai 3 thèmes principaux de Recherche à long terme :

- les offsets généralisés de surface discrètes ou continues, adaptables à des contraintes,
- le passage discret  $\leftrightarrow$  continu, sous contrôle de critères de qualité, via par exemple les surfaces de subdivision,
- l'intégration de la connaissance au modèle géométrique.

Le doctorat de T. Bay sur la reconstruction de surfaces épaisses a mis en avant la complexité de création des offsets continus ou discrets dans le cas d'une géométrie non-convexe. Les pistes envisagées durant la thèse (maillage masses-ressorts, offset continu de surfaces, offset géométrique de la discrétisation de la surface de reconstruction) ne concourent pas intrinsèquement à la résolution du problème des auto-intersections locales (sur un voisinage) ou globale de la surface qui se replie sur elle-même. La création de ces offsets sous contraintes géométriques, dans le cadre du processus d'approximation des données ponctuelles par une surface périodique continue, par exemple par des multiplicateurs de Lagrange permettrait de s'affranchir de la phase de post-traitement actuellement en place. En effet, celle-ci vérifie, lors de la construction des hexaèdres, les auto-intersections avec le voisinage et remonte l'information vers la discrétisation donc vers la surface continue. Cette phase a été concluante dans le cadre du projet MoDyPe sur des objets assez simples, mais elle est particulièrement coûteuse et non-exempte de défauts notamment parce qu'elle ne traite pas le cadre global et qu'elle peut diverger rapidement sous le poids des contraintes numériques (distances, paramétrisation inverse). Les contraintes géométriques peuvent être « de construction » : pas d'auto-intersection, pas de d'intersection globale, le respect de formes ou de volumes, mais également liées au métier : la densité de la discrétisation en accord avec les besoins d'une simulation par éléments finis, l'épaisseur des objets dépend de paramètres physiques ou physiologiques, etc.

Les surfaces de subdivision sont intéressantes pour le passage des surfaces discrètes à des surfaces continues et inversement. Elles ont des défauts connus (selon les cas : tension de la surface finale difficile à maîtriser, perte de volume/de position de contact liée à la contraction à chaque niveau). Les travaux que nous avons menés se rejoignent naturellement avec ceux du LE2I. Dans le cadre des objets complexes à bases de maillages de schémas différents, contenant des représentations mixtes triangles/quadrangles ou polygones gauches, la caractérisation des parties des maillages à subdiviser et l'obtention de morceaux de description uniforme touchent la théorie des modèles de subdivision ainsi que le *geometry processing*. Nous avons pour le moment implémenté des solutions géométriques, la plupart du temps discrètes. Il faut dorénavant porter ces méthodes dans l'espace continu et proposer les modifications théoriques correspondantes. Le travail effectué pour traduire une surface discrète en une surface continue a montré son intérêt. Une étude plus approfondie doit se faire sur le respect des courbures après reconstruction, conjointement à une analyse des maillages non-homogènes (à rapprocher des travaux de Y. Bouzaid [Bou12] au LE2I). L'analyse de la paramétrisation obtenue par rapport à l'initiale n'a pas été menée mais elle permettrait de mettre en évidence des efforts de tensions locales ou très disparates dont il faudrait tenir compte dans la reconstruction afin de pouvoir les équilibrer. La mise en place d'une méthode itérative sous contrainte d'énergie (à l'instar des travaux sur les surfaces à pôles de T. Bay) sera une piste de recherche pour améliorer la qualité de la surface résultat et minimiser les

erreurs de reconstruction. Le traitement des maillages gérés par des schémas de subdivision est également un travail important à continuer car, dans l'optique de la reconstruction de surface, il permet de traiter la reconstruction par patches de surface et de gérer la continuité entre ceux-ci. Les travaux effectués sur la jonction de surfaces de subdivision doivent également se prolonger pour permettre le suivi de la jonction d'un niveau à l'autre de la subdivision. Une première piste de travail serait de conserver les sommets et leurs projetés de niveau en niveau, de caractériser des fonctionnelles qui spécifieraient les contraintes de déformation, les transformations employées et d'en extraire un modèle générique. Cette analyse serait purement géométrique et permettrait de s'affranchir du modèle de subdivision employé.

Nous avons vu que la perte de sémantique liée à la numérisation ne permet plus de guider la reconstruction, ce qui implique une limitation de celle-ci. Un travail en amont est donc à effectuer sur la segmentation et la caractérisation des sous-ensembles géométriques d'un ensemble inorganisé. L'attribution d'une sémantique, l'appariement avec des objets ou des concepts/règles/contraintes de construction connus est ensuite à développer, pourquoi pas dans un processus bouclant de manière itérative jusqu'à obtention d'une solution stable.

La création d'un objet hybride contenant connaissance et géométrie est une piste de recherche à explorer. Cela permettrait de définir un objet mais aussi et surtout de le modifier, de le transformer, de l'agréger avec d'autres en s'appuyant sur ces connaissances. Par exemple le manche d'un outil peut obéir à des règles de construction (court/long, percé, avec une partie spécifique à la préhension), être formé d'un ou plusieurs matériau(x) (et de leurs propriétés : poids, densité, contraintes d'usinage, ...) en plus d'avoir des contraintes géométriques nécessaires à sa création (axe linéaire, surface B-spline fermée). On doit manipuler, lorsqu'une opération touche cet objet, les deux concepts qui le définissent (la géométrie/topologie et la connaissance), sans les altérer et profiter de l'un pour contraindre/améliorer l'autre.

Une synergie se dessine dans ce sens via le projet inter-Carnots « DECO » avec les métiers de la conception et de la production comme support ainsi que dans les projets « Ephebe » et « Peps HuMan » de M. Daniel sur le patrimoine bâti archéologique. L'apport de la sémantique dans la description d'un objet géométrique est un projet de recherche fédérateur pour le laboratoire, il est également nécessaire pour les infrastructures et voies de communication, pour la caractérisation de couvert végétal ou de cavités souterraines ou pour les affleurements géologiques.

Dans le cadre du bâtiment cette réflexion amène le cheminement scientifique vers la caractérisation de surfaces a posteriori, ce qui est un thème grandissant dans la communauté scientifique, ce que l'on peut voir notamment dans [LGZ<sup>+</sup>13] ou [BCLS13] notamment avec l'arrivée de la numérisation à grande échelle à faible coût. Nationalement ces travaux pourraient se rapprocher de ceux de P. Lienhart et D. Méneveux au XLIM-SIC pour la partie topologique des contraintes à mettre en place, du MAP<sup>2</sup> pour la numérisation et les connaissances architecturales, des approches-métiers du CSTB<sup>3</sup> ou de l'IGN<sup>4</sup> pour le bâtiment contemporain et des compétences de l'UMR Espace<sup>5</sup> pour une reconstitution

---

2. <http://www.map.archi.fr/>

3. <http://www.cstb.fr/>

4. [recherche.ign.fr/labos/cogit/](http://recherche.ign.fr/labos/cogit/)

5. <http://www.umrespace.org/>

archéologique. Au niveau mondial, les rapports privilégiés développés lors du projet Éphèbe avec les fondations CyArk et WMF permettent de penser à un soutien et à une campagne d'expérimentation sur plusieurs sites du patrimoine.

Ce manque de sémantique a également été un frein à la reconstruction d'organes du projet Modype ou de pièces CAO des projets de subdivision. Cette liaison géométrie-connaissance aurait été utile pour guider la subdivision, découper l'objet en patchs correspondant à une entrée sémantique et en effectuer l'analyse ou la reconstruction. Le projet DECO (2013-2014) permettra de poser les bases d'un travail à plus long terme sur cette thématique dans le domaine de la CAO. Nous serons accompagnés par des experts de la CAO/DAO, du process industriel et des métiers de la production. Nous construirons donc un moteur de satisfactions de contraintes dont le résultat pourra être géométrique. Ce projet sera le point de départ d'une recherche à plus long terme sur la définition et la caractérisation de contraintes pour la reconstruction.

### 3.3 Implication dans la Recherche

En m'appuyant sur mes expériences passées, qu'elles soient pédagogiques dans des formations professionnalisantes du Baccalauréat au Master 2 Recherche, administratives pour la composante ou le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche via la DRRT ou le CNU, ou scientifiques lors des encadrements de doctorants, de partie de projet ANR ou de projets personnels, ma projection dans le métier d'enseignant-chercheur et dans la communauté scientifique tient en 5 points :

- impulser une dynamique dans le domaine de la reconstruction appuyée sur la connaissance en fédérant des recherches parfois orthogonales de l'image et du signal : utiliser les connaissances du traitement du signal pour l'appliquer aux géométries (reconnaissance, caractérisation, filtrage) ce que l'on retrouve dans le « *Geometry Processing* » et les traitements « *Out-of-Core* », s'appuyer sur des espaces non-euclidiens pour avoir de nouvelles possibilités de calculs - espace sphérique de courbes et surfaces, paramétrisation et atlas de géométries, utiliser les propriétés des volumes discrets dans le cadre de la paramétrisation de surfaces épaisses, ...
- dans cette dynamique être un acteur du traitement multi-modèles des objets, en adaptant les données en entrées et sorties des processus aux contraintes de ceux-ci, en maintenant une qualité de la donnée qui soit la plus adaptée, et en créant de nouveaux algorithmes. Dans ce cadre les surfaces de subdivision peuvent être un modèle transitoire entre objets discrets et objets continus. Il faut donc développer des travaux théoriques dans ce sens par le biais de financements nationaux ou européens et une interaction avec d'autres équipes. Il faut notamment résoudre le passage d'un maillage non-homogène à une surface paramétrique interpolante, de mêmes propriétés locales ou globales.
- développer des méthodes géométriques basées sur les connaissances (architectural, de CAO, médical, ...) qui permettent d'adapter les algorithmes purement calculatoires aux métiers auxquels ils sont destinés, guider le passage d'un modèle à un autre, spécifier et adjoindre des règles aux objets. Cela nécessite la construction d'un dictionnaire métier, sa traduction en règles géométriques, la spécification des contraintes métiers, la résolution de ces contraintes et l'intégration des analyses métiers après production pour boucler le processus et critiquer/adapter/développer nos méthodes.

- appliquer la Recherche (calculs de collision à grandes échelles, (re)construction sous contraintes, visualisation distante de grandes masses de données, ...) soit par le biais de projets ouverts (Meshlab <sup>6</sup>, CGAL <sup>7</sup>), soit par l'intermédiaire de services de valorisation. Cette phase est importante pour maintenir l'adéquation avec les technologies présentes, développer des partenariats avec l'industrie, ouvrir de nouvelles perspectives de Recherche.
- élargir les travaux scientifiques à la pluri-disciplinarité. Les projets auxquels j'ai participé (Éphèbe, Modype, Peps Geotrait 3D) ont été tous une expérience profitable du travail entre disciplines (patrimonial, architectural, médical, sociétal, ...). Les questionnements levés par les approches des uns et des autres m'ont permis d'orienter ma Recherche différemment, de changer de point de vue sur mes connaissances ou mes réflexions. Bien que ces thèmes soient difficiles à faire reconnaître par la communauté scientifique nationale c'est un dynamisant fort de la Recherche.

Dans les stratégies de recherche un choix peut être fait entre qualité des résultats numériques, temps de la réflexion ou de l'exécution, contraintes de l'industrialisation. L'équation n'est pas si simple, les projets de Recherche dépendent également d'opportunités politiques, financières, techniques ou humaines à toutes les échelles. Mon approche se veut pragmatique, l'industrialisation est un besoin car elle permet de lier la réflexion scientifique à des contraintes réelles mais la connaissance s'appuie également sur des essais théoriques, des explorations, des intuitions qui ne sont pas compatibles avec des plannings à 1, 2 ou 3 ans. Je chercherai donc à soutenir mon projet scientifique par des encadrements de doctorants financés par le biais de projets ANR, Cifre et contrats-régions, projets européens, par des partenariats industriels, en créant une équipe collaborative avec des chercheurs plus confirmés, post-doctoraux sur un thème particulier ou établis pour des visées à plus long terme. Le lien avec les étudiants est également important et la diffusion ou la participation à des projets de recherche à tous les niveaux est un vecteur important d'intéressement à l'innovation scientifique.

---

6. <http://meshlab.sourceforge.net/>

7. <http://www.cgal.org>

---

## PUBLICATIONS PERSONNELLES

Année	ACL	ACLN	ASCL	INV	ACTI	ACTN	COM	AFF	OS	OV	DO	AP	TH	Total
-2001	1				2	2							1	6
2002														0
2003														0
2004					2									2
2005					1	2								3
2006					4	1								5
2007		1			1	1						1		4
2008		1												1
2009				1	1	2								4
2010	2				2		1					1	1	7
2011					2	2						2	1	7
2012					5	1							1	7
2013					2		1		1				1	5
2002 et +	2	2		1	20	9	2		1			4	4	45
2008-2013	2	1		1	12	5	2		1			3	4	31

### Thèses (TH)

#### 2013

[Pha13] Anh-Cang Phan. *Crack removal and hole filling on composite subdivision meshes*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille, 2013. to be defended

#### 2012

[Bay12] T. Bay. *Modélisation de surfaces épaisses et fermées : application au cas des organes pelviens*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 11 2012. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin, Marc-Emmanuel Bellemare

#### 2011

[Fra11] A. François. *Interopérabilité des modèles géométriques pour les systèmes d'information géographique : applications de la norme ISO 19107*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2011. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin

#### 2010

[NT10] K. Nguyen Tan. *Surfaces polyédriques et surfaces paramétriques : une reconstruction par approximation via les surfaces de subdivision*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2010. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin

## 2000

[Raf00] R. Raffin. *Déformations sous contraintes généralisées*. PhD thesis, Université de Bourgogne, Dijon, 2000. Direction Marc Neveu

## Chapitres d'ouvrages (OS)

### 2013

[Raf13a] R. Raffin. *Free-Form deformations*, volume 7 of *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*. Springer-Verlag, 2013

## Conférences invités (INV)

### 2009

[Raf09] R. Raffin. Reconstruction de surfaces paramétriques à partir de surfaces maillées par des surfaces de subdivision. In invited speaker, editor, *Journée "Approximation, Géométrie et Image"*. SMAI-AFA, Association Française d'approximation, november 2009

## Reuves (ACL)

### 2010

[LRN10] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(Issues 3-4):189–199, february 2010

[FRD10c] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS: ISO 19107 case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-4/W1:115–120, 03 november 2010

### 1999

[RNJ99a] R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Curvilinear displacement of free-from based deformation. *The Visual Computer*, 16:38–46, 1999. Springer-Verlag Editions

## Communications internationales avec actes (ACTI)

### 2013

[PRD13] Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Joining meshes with a local approximation and a wavelet transform. In Vaclav Skala, editor, *The 21-st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2013*, WSCG 2013, Plzen, Czech Republic, 24-27 june 2013. ISBN 978-80-86943-79-4

[Raf13b] Romain Raffin. Indexation and visualization of documents in a 3D model of the st trophime cloister over the internet. In *Proceedings of 2013 Digital Heritage International Congress*, volume 1, pages 759–760, 28 Oct. - 01 Nov. 2013. fed. 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, plus special



sessinos from CAA, Aerquologica 2.0, Space2Place, ICOMOS ICIP & CIPA, EU Projects, et al

## 2012

[BZWR<sup>+</sup>12a] T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 82900I-1–82900I-14, Burlingame, Californie, USA, 2012

[BRD12b] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric modeling of pelvic organs with a discrete offset approach. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2012*, WSCG 2012, pages 27–30, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-80-0

[BRD12a] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Leszek J Chmielewski Bolc Leonard, Tadeusiewicz Ryszard, editor, *Computer Vision and Graphics: Proc. ICCVG 2012*, volume 7594 of *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 24 september 2012

[PRD12] Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform. In *Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology*, SoICT '12, pages 81–90, New York, NY, USA, 2012. ACM

[FRDA12] A. François, R. Raffin, M. Daniel, and J. Aryal. 3D modelling and analysis: ISO standard tools for air traffic. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2012*, WSCG 2012, pages 327–334, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-79-4

## 2011

[CRDG11] J.C. Chambelland, R. Raffin, B. Desbenoit, and G. Gesquière. SIMFOR: towards a collaborative software platform for urban crisis management. In *IADIS Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing (CGVCVIP'2011)*, Rome, Italy, 02 august 2011

[BCR<sup>+</sup>11] T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, M. Daniel, and M. E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs. In IEEE, editor, *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC2011*, pages 4329–4332, Boston, MA, USA, 30 august 2011

## 2010

[FRD10a] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. 3D ISO analysis and modeling for GIS - first steps in the norm implementation. In *International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS)*, 23 july 2010

[FRD10b] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS: ISO 19107 case study. In *5th International 3D GeoInfo Conference 2010*, 03 november 2010

## 2009

[NTRDL09a] K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *IEEE-RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies*, pages 336–339, VietNam, july 2009

## 2007

[LGRG07] R. La Gréca, R. Raffin, and G. Gesquière. Punctual constraint resolution and deformation path on nurbs. In *Graphicon*, 2007

## 2006

[RTG06] R. Raffin, G. Thibault, and G. Gesquière. Simple and efficient tools for virsculpt. In *GRAPP 2006, Proceedings of the first international conference on computer graphics theory and applications*, pages 436–440, Lisboa, february 2006

[LRN06] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Generalized SCODEF deformations on subdivision surfaces. In *Articulated motion and deformable objects*, LNCS 4069, pages 132–142, july 2006. proceedings of 4th International Conference AMDO

[RLGG06] R. Raffin, R. La Gréca, and G. Gesquière. Constrained Free Form Deformation of NURBS surfaces. In *Curves and Surfaces*, Avignon, France, july 2006

[TRRG06] S. Thon, E. Rémy, R. Raffin, and G. Gesquière. Combining gis and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management. In *3rd International conference on virtual city and territory*, october 2006

## 2005

[LRN05] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Constrained free-form deformation on subdivision surfaces. In *Advances in Computational Methods in Sciences and Engineering*, number ISSN 1573–4196, pages 311–314, 2005. Selected papers from the international conference of computational methods in sciences and engineering

## 2004

[RGRT04] R. Raffin, G. Gesquière, E. Rémy, and S. Thon. Virsculpt: a virtual sculpting environment. In *GraphiCon 2004*, pages 184–187, Moscou, september 2004

[TGR04] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. A low cost antialiased space filled voxelization of polygonal objects. In *GraphiCon 2004*, pages 71–78, Moscou, september 2004

## –2001

[RND98] R. Raffin, M. Neveu, and B. Derdouri. Constrained deformation for geometric modeling and object reconstruction. In *WSCG, 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization*, volume 2, pages 299–306, february 1998

[RNJ99b] R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Extended constrained deformations: a new sculpturing tool. *proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 219–224, 1999

## Communications nationales avec actes (ACTN)

### 2012

[BRD12c] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique d'organes pelviens par une approche offset. In *Journée du GTMG 2012*, pages 19–28, Strasbourg, France, 21 march 2012

### 2011

[BCRD11] T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique de la dynamique pelvienne. In *Journées du GTMG 2011*, pages 93–102, Grenoble, France, 30 march 2011

[BRD11] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation de surfaces épaisses d'organes pelviens. In *Journées de l'AFIG 2011*, pages 45–53, Bidart, France, 12 october 2011

### 2009

[FRD09] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Analyse et modélisation 3D pour des systèmes d'information géographique. In IRIT Presse, editor, *Journées du GTMG 2009*, 2009

[NTRDL09b] K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. Reconstruction de surface b-spline par subdivision non-uniforme inverse. In *Journées du GTMG 2009*, pages 67–76, Toulouse, France, march 2009

### 2007

[HRT07] X. Heurtebise, R. Raffin, and S. Thon. Sculpture virtuelle. In *132ème congrès national des Sociétés Historiques et Scientifiques*, Arles, april 2007

### 2006

[TGR06] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. Visualisation 3d de feux de forêts sur des modèles numériques de terrain de l'ign. In *Rencontre GEO-RISQUE 2006, La cartographie des risques naturels*, Montpellier, France, 2006

### 2005

[GR05] G. Gesquière and R. Raffin. Utilisation des IFC dans le cadre de l'aide à la décision et de la visualisation 2D/ 3D temps-réel. In *Actes de la conférence Mediaconstruct*, 2005

[LR05] S. Lanquetin and R. Raffin. Déformations libres de surfaces de subdivision. In *Actes des journées du GTMG'05*, pages 109–119, march 2005. Poitiers, France

### –2001

[RN97] R. Raffin and M. Neveu. Déformations avec contraintes pour la modélisation géométrique et la reconstruction d'objets. In *Actes des Vèmes Journées de l'AFIG*, pages 111–119, november 1997

[RN99] R. Raffin and M. Neveu. Déformations sous contraintes : modèle scodef étendu. In *Courbes, surfaces et algorithmes*, september 1999

## Revue non répertoriées (ACLN)

### 2008

[TGR08] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. *Visualisation 3D de feux de forêts sur des modèles numériques de terrains de l'IGN*, volume 2. 2008

### 2007

[Tho07] *Combining GIS and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management*, volume 2, june 2007. ISSN 1886-4805

## Rapports de Recherche et communications (AP)

### 2011

[FRD11] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. ISO 19107 new implementation and proposal in GeoAPI. In *Boulder (Colorado) Technical Committee Meetings (OGC 2011)*. Open Geospatial Consortium, 21 september 2011

[RFD11] R. Raffin, A. François, and M. Daniel. Implementing non-linear interpolation for aerial trajectories. In *Technical Committee Meetings (OGC 2011)*. Brussels (Belgium) Open Geospatial Consortium, 30 november 2011

### 2010

[FRD10d] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. New curves proposal for GeoAPI. In *Frascati Technical Committee Meetings (OGC 2010)*. Open Geospatial Consortium, 05 march 2010

### 2007

[RGLG07] R. Raffin, G. Gesquière, and R. La Gréca. Déformations de modèles géométriques. Technical Report LSIS.RR.2007.001, LSIS, 2007

## Communications orales (COM)

### 2013

[RR13] R. Raffin and J. L. Rey. Couplage d'une base de données documentaire à une visualisation interactive 3D sur l'Internet. Iut de Corte, France, 2013. CNRIut

### 2010

[RNTD10] R. Raffin, K. Nguyen Tan, and M. Daniel. Using geometry to help converting a discrete mesh to parametric surface via subdivision. In *Curves and Surfaces 2010*. SMAI-AFA, 28 june 2010

## Classement des publications

ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'AERES ou dans les bases de données internationales (ISI Web of Knowledge, Pub. Med,...). Exemple : [1] Auteurs. Titre de l'article Titre de la revue. Ref. Année. Impact Factor 0.474.

ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales. Exemple : [1] Auteurs. Titre de l'article Titre de la revue. Ref. Année.

ASCL : Articles dans des revues sans comité de lecture.

INV : Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national ou international.

ACTI : Communications avec actes dans un congrès international.

ACTN : Communications avec actes dans un congrès national.

COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national.

AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national.

OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages).

OV : Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres de ces ouvrages).

DO : Directions d'ouvrages ou de revues.

AP : Autres productions : bases de données, logiciels enregistrés, traductions, comptes rendus d'ouvrages, rapports de fouilles, guides techniques, catalogues d'exposition, rapports intermédiaires de grands projets internationaux, etc.

TH : Thèses soutenues.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [AB97] Fabrice Aubert and Dominique Bechmann. Volume-preserving space deformation. *Computers & Graphics*, 21(5) :625–639, September 1997. ISSN 0097-8493.
- [AB01] M. Alhanaty and M. Bercovier. Curve and surface fitting and design by optimal control methods. In *Computer-Aided Design*, volume 33, pages 167 – 182, 2001.
- [ABCO<sup>+</sup>01] Marc Alexa, Johannes Behr, Daniel Cohen-Or, Shachar Fleishman, David Levin, and Cláudio T. Silva. Point set surfaces : a survey. In Thomas Ertl, Kenneth I. Joy, and Amitabh Varshney, editors, *Proceedings of the conference on Visualization '01*, pages 21–28. IEEE Computer Society, 2001.
- [Aki70] H. Akima. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM*, 17 :589–602, 1970.
- [AM02] Jörg Ayasse and Heinrich Müller. Sculpturing on discrete displacement fields. *Computer Graphics Forum*, 21(3) :431–440, 2002.
- [Ast04] L. Astart. *Représentation de surfaces ayant un structure arborescente par un modèle paramétrique*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille 2, january 2004.
- [B86] Pierre Bézier. *Mathématiques et CAO 4 : Courbes et Surfaces*. Hermès, 1986.
- [Bar84] A.H. Barr. Global and local deformations of solid primitives. *Computer Graphics*, 18(3) :21–30, Juillet 1984.
- [Bay12] T. Bay. *Modélisation de surfaces épaisses et fermées : application au cas des organes pelviens*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 11 2012. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin, Marc-Emmanuel Bellemare.
- [BB91] P. Borrel and D. Bechmann. Deformation of n-dimensional objects. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 1(4) :427–453, 1991.
- [BB03] Martin D. Buhmann and M. D. Buhmann. *Radial Basis Functions*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2003.
- [BBT95] D. Bechmann, Y. Bertrand, and S. They. Déformation continue de forme libre, 1995. Rapport de recherche.
- [BCLS13] Y Bao, Manmohan Chandraker, Yuanqing Lin, and Silvio Savarese. Dense object reconstruction with semantic priors. In *Proc. CVPR*, 2013.
- [BCR<sup>+</sup>11] T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, M. Daniel, and M. E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs. In IEEE, editor, *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC2011*, pages 4329–4332, Boston, MA, USA, 30 august 2011.
- [BCRD11] T. Bay, J.C. Chambelland, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique de la dynamique pelvienne. In *Journées du GTMG 2011*, pages 93–102, Grenoble, France, 30 march 2011.

- [BD93] D. Bechmann and N. Dubreuil. Animation through space and time based on a space deformation model. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 4 :165–184, 1993.
- [BD95] D. Bechmann and N. Dubreuil. Order controlled free-form animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 6 :11–32, 1995.
- [Bou12] Y. Boumzaid. *Études et construction de schémas de subdivision quasi-linéaires sur des maillages bi-réguliers*. PhD thesis, Université de Bourgogne, december 2012. directeur : Marc Neveu.
- [BP07] Dominique Bechmann and Bernard Péroche. *Informatique graphique, modélisation géométrique et animation*. Hermes Science, 2007.
- [BR94] P. Borrel and A. Rappoport. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. *ACM Transactions on Graphics*, 13(2) :137–155, Avril 1994.
- [BRD11] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation de surfaces épaisses d’organes pelviens. In *Journées de l’AFIG 2011*, pages 45–53, Bidart, France, 12 october 2011.
- [BRD12a] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Leszek J Chmielewski Bolc Leonard, Tadeusiewicz Ryszard, editor, *Computer Vision and Graphics : Proc. ICCVG 2012*, volume 7594 of *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 24 september 2012.
- [BRD12b] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric modeling of pelvic organs with a discrete offset approach. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2012*, WSCG 2012, pages 27–30, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-80-0.
- [BRD12c] T. Bay, R. Raffin, and M. Daniel. Modélisation géométrique d’organes pelviens par une approche offset. In *Journée du GTMG 2012*, pages 19–28, Strasbourg, France, 21 march 2012.
- [BRD12d] Thierry Bay, Romain Raffin, and Marc Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Springer, editor, *International Conference on Computer Vision and Graphics*, volume 7594 of *ICCVG 2012, Lecture Notes in Computer Science*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 2012.
- [BZWR<sup>+</sup>12a] T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 8290I–1–8290I–14, Burlingame, California, USA, 2012.
- [BZWR<sup>+</sup>12b] T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 8290I–1–8290I–14, Burlingame, California, USA, 2012.
- [Bé87] Pierre Bézier. *Courbes et Surfaces mathématiques et CAO Tome 4*. Hermès, Paris, 1987.

- [CBC<sup>+</sup>01] J. C Carr, R. K Beatson, J. B Cherrie, T. J Mitchell, W. R Fright, B. C Mac Callum, and T. R Evans. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 67–76, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [CC78] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*, pages 350–355, 1978.
- [Cha74] G. M. Chaikin. An algorithm for high speed curve generation. *Computer Graphics Image Processing*, 3(12) :346–349, 1974.
- [Cha06a] J. C. Chambelland. *Reconstruction de surfaces à pôles pour la conversion et la simplification de modèles B-Rep*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2006.
- [Cha06b] Jean-Christophe Chambelland. *Reconstruction de surfaces à pôles pour la conversion et la simplification de modèles B-Rep*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2006.
- [Coq90] S. Coquillart. Extended free-form deformation : A sculpturing tool for 3D geometric modeling. *Computer Graphics*, 24(4) :187–196, Août 1990.
- [CRDG11] J.C. Chambelland, R. Raffin, B. Desbenoit, and G. Gesquière. SIMFOR : towards a collaborative software platform for urban crisis management. In *IADIS Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing (CGVCVIP'2011), Rome, Italy*, 02 august 2011.
- [Cre98] B. Crespin. *Modélisation et déformation de forme libre à base de surfaces implicites équipotentielles*. PhD thesis, Université de Bordeaux I, 1998.
- [Dan89] M. Daniel. *Modélisation de courbes et surfaces par des B-splines. Application à la conception et à la visualisation de formes*. PhD thesis, Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, 1989.
- [dB78] C. de Boor. *A Practical Guide to Splines*. Springer-Verlag, 1978.
- [Del06] Hervé Delingette. *Modélisation de structures déformables*. Habilitation à diriger des recherches, Université Nice Sophia-Antipolis, March 2006.
- [DLG90] Nira Dyn, David Levine, and John A. Gregory. A Butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Transactions on Graphics*, 9(2) :160–169, 1990.
- [Doo78] Donald Doo. A subdivision algorithm for smoothing down irregularly shaped polyhedrons. In *Proceedings on Interactive Techniques in Computer Aided Design*, pages 157–165, 1978.
- [DS78] Donald Doo and Malcom Sabin. Behaviour of recursive subdivision surfaces near extraordinary points. *Computer-Aided Design*, pages 356–360, 1978.
- [Ebe08] David Eberly. Least-squares fitting of data with B-spline surfaces. *Geometric Tools, LLC*, 2008.
- [Far02] G. Farin. *Curves and surfaces for CAGD. A practical guide*. Morgan Kaufmann, San Francisco, fifth edition edition, 2002.
- [FMP96] Jieqing Feng, Lizhuang Ma, and Qunsheng Peng. A new free-form deformation through the control of parametric surfaces. *Computers and Graphics*, 20(4) :531–539, July–August 1996.



- [FN89] Thomas A. Foley and Gregory M. Nielson. Knot selection for parametric spline interpolation. In Tom Lyche and Larry L. Schumaker, editors, *Mathematical methods in Computer Aided Geometric Design*, chapter Knot selection for parametric spline interpolation, pages 261–272. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1989.
- [Fra11] A. François. *Interopérabilité des modèles géométriques pour les systèmes d'information géographique : applications de la norme ISO 19107*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2011. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin.
- [FRD09] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Analyse et modélisation 3D pour des systèmes d'information géographique. In IRIT Presse, editor, *Journées du GTMG 2009*, 2009.
- [FRD10a] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. 3D ISO analysis and modeling for GIS - first steps in the norm implementation. In *International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning (DDSS)*, 23 july 2010.
- [FRD10b] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS : ISO 19107 case study. In *5th International 3D GeoInfo Conference 2010*, 03 november 2010.
- [FRD10c] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. Geometric data structures and analysis in GIS : ISO 19107 case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-4/W1 :115–120, 03 november 2010.
- [FRD10d] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. New curves proposal for GeoAPI. In *Frascati Technical Committee Meetings (OGC 2010)*. Open Geospatial Consortium, 05 march 2010.
- [FRD11] A. François, R. Raffin, and M. Daniel. ISO 19107 new implementation and proposal in GeoAPI. In *Boulder (Colorado) Technical Committee Meetings (OGC 2011)*. Open Geospatial Consortium, 21 september 2011.
- [FRDA12] A. François, R. Raffin, M. Daniel, and J. Aryal. 3D modelling and analysis : ISO standard tools for air traffic. In Vaclav Skala, editor, *The 20-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2012*, WSCG 2012, pages 327–334, Plzen, Czech Republic, 25 june 2012. ISBN 978-80-86943-79-4.
- [FvT97] Petros Faloutsos, Michiel van de Panne, and Demetri Terzopoulos. Dynamic free-form deformations for animation synthesis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(3) :201–214, 1997.
- [Ges00] G. Gesquière. *Calcul et Contrôle du Volume d'Objets Implicites*. PhD thesis, Université de Bourgogne, dec 2000.
- [GP89] Josef Griessmair and Werner Purgathofer. Deformation of solids with tri-variate B-splines. In W. Hansmann, F. R. A. Hopgood, and W. Strasser, editors, *Eurographics '89*, pages 137–148, sep 1989.
- [GPCP13] Francisco González García, Teresa Paradinas, Narcís Coll, and Gustavo Patow. \*cages : : A multilevel, multi-cage-based system for mesh deformation. *ACM Trans. Graph.*, 32(3) :24 :1–24 :13, July 2013.

- [GR05] G. Gesquière and R. Raffin. Utilisation des IFC dans le cadre de l'aide à la décision et de la visualisation 2D/ 3D temps-réel. In *Actes de la conférence Mediaconstruct*, 2005.
- [Had95] Jan Hadenfeld. Local energy fairing of b-spline surfaces. In M. Dæhlen, T. Lyche, and L.L. Schumaker, editors, *Mathematical Methods for Curves and Surfaces*, pages 203–212. Vanderbilt University Press, 1995.
- [Heu07] X. Heurtebise. *Représentation multirésolution et déformation d'objets définis par énumération spatiale*. PhD thesis, Université de Provence, 12 2007. direction S. Thon.
- [HHH92] W.M. Hsu, J.F. Hugues, and Kaufman H. Direct manipulation of free-form deformations. *Computer Graphics*, 26(2) :177–184, Juillet 1992.
- [HK06] Alexander Hornung and Leif Kobbelt. Robust reconstruction of watertight 3D models from non-uniformly sampled point clouds without normal information. In Alla Sheffer and Konrad Polthier, editors, *Symposium on geometry processing*, volume 256 of *ACM International Conference Proceeding Series*, pages 41–50. Eurographics Association, 2006.
- [Hos88] J. Hoschek. Intrinsic parameterization for approximation. *Computer Aided Geometric Design*, 5(1) :27–31, 1988.
- [HQ03] Jing Hua and Hong Qin. Free-form deformations via sketching and manipulating scalar fields. In *Proceedings of the Eighth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SPM)*, pages 328 – 333, June 2003.
- [HRT07] X. Heurtebise, R. Raffin, and S. Thon. Sculpture virtuelle. In *132ème congrès national des Sociétés Historiques et Scientifiques*, Arles, avril 2007.
- [JZvdP<sup>+</sup>08] Tao Ju, Qian-Yi Zhou, Michiel van de Panne, Daniel Cohen-Or, and Ulrich Neumann. Reusable skinning templates using cage-based deformations. *ACM Trans. Graph.*, 27(5) :122 :1–122 :10, December 2008.
- [KBH06] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe. Poisson surface reconstruction. In *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, SGP '06, pages 61–70, Aire-la-Ville, Switzerland, 2006. Eurographics Association.
- [KMTT92] P. Kalra, A. Mangili, N. M. Thalmann, and D. Thalmann. Simulation of facial muscle actions based on rational free form deformations. *Computer Graphics Forum*, 11(3) :C59–C69, C466, 1992.
- [Kob00] Leif Kobbelt.  $\sqrt{3}$ -subdivision. In *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 103–112, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [LaG05] R. LaGréca. *Approche déclarative de la modélisation de surfaces*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, october 2005.
- [Lan04] S. Lanquetin. *Étude des surfaces de subdivision : intersection, précision et profondeur de subdivision*. PhD thesis, Université de la Bourgogne, 2004.
- [LCJ93] F. Lazarus, S. Coquillart, and P. Jancène. *Interactive Axial Deformations*. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, 1993. Rapport de Recherche 1891.

- [Lee89] E.T.Y. Lee. Choosing nodes in parametric curve interpolation. In *Computer-Aided Design*, volume 21, pages 363 – 370, 1989.
- [Lev03] David Levin. *Geometric Modeling for Scientific Visualization*, chapter Mesh-independent surface interpolation, pages 37–49. Springer-Verlag, 2003.
- [LGRG07] R. La Gréca, R. Raffin, and G. Gesquière. Punctual constraint resolution and deformation path on nurbs. In *Graphicon*, 2007.
- [LGZ<sup>+</sup>13] Hui Lin, Jizhou Gao, Yu Zhou, Guiliang Lu, Mao Ye, Chenxi Zhang, Ligang Liu, and Ruigang Yang. Semantic decomposition and reconstruction of residential scenes from lidar data. *ACM Transactions on Graphics, (Proc. of SIGGRAPH 2013)*, 32(4), 2013.
- [LKH03] Aaron E. Lefohn, Joe Michael Kniss, Charles D. Hansen, and Ross T. Whitaker. Interactive deformation and visualization of level-set surfaces using graphics hardware. In Greg Turk, Jarke J. van Wijk, and Robert J. Moorhead II, editors, *IEEE Visualization*, pages 75–82. IEEE Computer Society, 2003.
- [LM00] Aaron Lee and Henry Moreton. Displaced subdivision surfaces. In *Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 85–94. ACM Press / ACM SIGGRAPH. Addison Wesley Longman, 2000.
- [Loo87] Charle Loop. Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master’s thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [LR05] S. Lanquetin and R. Raffin. Déformations libres de surfaces de subdivision. In *Actes des journées du GTMG’05*, pages 109–119, march 2005. Poitiers, France.
- [LRN05] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Constrained free-form deformation on subdivision surfaces. In *Advances in Computational Methods in Sciences and Engineering*, number ISSN 1573–4196, pages 311–314, 2005. Selected papers from the international conference of computational methods in sciences and engineering.
- [LRN06] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Generalized SCODEF deformations on subdivision surfaces. In *Articulated motion and deformable objects*, LNCS 4069, pages 132–142, july 2006. proceedings of 4th International Conference AMDO.
- [LRN10] S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(Issues 3-4) :189–199, february 2010.
- [LW94] H.J. Lamousin and W.N. Waggenspack. Nurbs-based free-form deformations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 59–65, 1994.
- [Ma05] Weiyin Ma. Subdivision surfaces for CAD - an overview. *Computer-Aided Design*, 37(7) :693–709, 2005.
- [Mar02] J. L. Mari. *Modélisation de formes complexes intégrant leurs caractéristiques globales et leurs spécificités locales*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 13 december 2002.
- [MDL<sup>+</sup>07] Guanjun Ma, Haibin Duan, Senqi Liu, Guanjun Ma, Haibin Duan, and Senqi Liu. Improved ant colony algorithm for global optimal trajectory planning of

- uav under complex environment. *International Journal of Computer Science & Applications*, 4(3) :57–68, 2007.
- [MJ96] R. MacCracken and K.I. Joy. Free-form deformations with lattices of arbitrary topology. *Computer Graphics*, pages 181–189, 1996.
- [MMK07] T. Maekawa, Y. Matsumotoa, and K.Namikia. Interpolation by geometric algorithm. *Computer-Aided Design*, 38 :313–323, 2007.
- [MMT97] L. Moccozet and N. Magnenat-Thalmann. Dirichlet free-form deformations and their application to hand simulation. *Proceedings Computer Animation 97, IEEE Computer Society*, pages 93–102, 1997.
- [MQ02] Kevin T. McDonnell and Hong Qin. Virtual clay : Haptics-based deformable solids of arbitrary topology. In *Proceedings of the Second International Workshop on Articulated Motion Deformable Objects*, pages 1–20. Springer-Verlag, 2002.
- [MRF06] Kerstin Müller, Lars Reusche, and Dieter Fellner. Extended subdivision surfaces : Building a bridge between nurbs and catmull-clark surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(2) :268–292, 2006.
- [Nie91] Zhigang Nie. *Utilisation des déformations pour la modélisation des solides de forme libre en synthèse d’images*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Octobre 1991.
- [NT10] K. Nguyen Tan. *Surfaces polyédriques et surfaces paramétriques : une reconstruction par approximation via les surfaces de subdivision*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2010. Co-direction Marc Daniel, Romain Raffin.
- [NTRDL09a] K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *IEEE-RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies*, pages 336–339, VietNam, july 2009.
- [NTRDL09b] K. Nguyen Tan, R. Raffin, M. Daniel, and C. Le. Reconstruction de surface b-spline par subdivision non-uniforme inverse. In *Journées du GTMG 2009*, pages 67–76, Toulouse, France, march 2009.
- [NTRDL09c] Khoi Nguyen-Tan, Romain Raffin, Marc Daniel, and Cung Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *Proc. International Conference on Computing and Communication Technologies RIVF ’09*, pages 1–4, July 13–17, 2009.
- [NVM<sup>+</sup>03] Ioannis K. Nikolos, Kimon P. Valavanis, Senior Member, Nikos C. Tsourveloudis, and Anargyros N. Kostaras. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for uav navigation. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, pages 898–912, 2003.
- [Par77] R.E. Parent. A system for sculpting 3D data. *Computer Graphics*, 11(2) :138–147, 1977.
- [PF01] Ronald N. Perry and Sarah F. Frisken. Kizamu : A system for sculpting digital characters. pages 47–56, 2001.
- [Pha13] Anh-Cang Phan. *Crack removal and hole filling on composite subdivision meshes*. PhD thesis, Université d’Aix-Marseille, 2013. to be defended.

- [PRD12] Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform. In *Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology, SoICT '12*, pages 81–90, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [PRD13] Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Joining meshes with a local approximation and a wavelet transform. In Vaclav Skala, editor, *The 21-st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2013, WSCG 2013*, Plzen, Czech Republic, 24-27 june 2013. ISBN 978-80-86943-79-4.
- [PT97] L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS book (2nd ed.)*. Springer-Verlag New York, Inc., 1997.
- [Raf96] Romain Raffin. Déformation  $nD$  libres sous contraintes. Master's thesis, Université de Bourgogne, 1996. Mémoire de DEA.
- [Raf00] R. Raffin. *Déformations sous contraintes généralisées*. PhD thesis, Université de Bourgogne, Dijon, 2000. Direction Marc Neveu.
- [Raf09] R. Raffin. Reconstruction de surfaces paramétriques à partir de surfaces maillées par des surfaces de subdivision. In invited speaker, editor, *Journée "Approximation, Géométrie et Image"*. SMAI-AFA, Association Française d'approximation, november 2009.
- [Raf13a] R. Raffin. *Free-Form deformations*, volume 7 of *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*. Springer-Verlag, 2013.
- [Raf13b] Romain Raffin. Indexation and visualization of documents in a 3D model of the st trophime cloister over the internet. In *Proceedings of 2013 Digital Heritage International Congress*, volume 1, pages 759–760, 28 Oct. - 01 Nov. 2013. fed. 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, plus special sessinos from CAA, Aerquologica 2.0, Space2Place, ICOMOS ICIP & CIPA, EU Projects, et al.
- [RB02] M. Randrianarivony and G. Brunnet. Approximation by NURBS curves with free knots. In *Vision, Modeling and Visualization*, pages 195–201, 2002.
- [Rem01] E. Remy. *Normes de chanfrein et axe médian dans le volume discret*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille 2, december 2001.
- [RFD11] R. Raffin, A. François, and M. Daniel. Implementing non-linear interpolation for aerial trajectories. In *Technical Committee Meetings (OGC 2011)*. Brussels (Belgium) Open Geospatial Consortium, 30 november 2011.
- [RGLG07] R. Raffin, G. Gesquière, and R. La Gréca. Déformations de modèles géométriques. Technical Report LSIS.RR.2007.001, LSIS, 2007.
- [RGRT04] R. Raffin, G. Gesquière, E. Rémy, and S. Thon. Virsculpt : a virtual sculpting environment. In *GraphiCon 2004*, pages 184–187, Moscou, september 2004.
- [RLGG06] R. Raffin, R. La Gréca, and G. Gesquière. Constrained Free Form Deformation of NURBS surfaces. In *Curves and Surfaces*, Avignon, France, july 2006.
- [RN97] R. Raffin and M. Neveu. Déformations avec contraintes pour la modélisation géométrique et la reconstruction d'objets. In *Actes des Vèmes Journées de l'AFIG*, pages 111–119, november 1997.

- [RN99] R. Raffin and M. Neveu. Déformations sous contraintes : modèle scodef étendu. In *Courbes, surfaces et algorithmes*, september 1999.
- [RND98] R. Raffin, M. Neveu, and B. Derdouri. Constrained deformation for geometric modeling and object reconstruction. In *WSCG, 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization*, volume 2, pages 299–306, february 1998.
- [RNJ99a] R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Curvilinear displacement of free-form based deformation. *The Visual Computer*, 16 :38–46, 1999. Springer-Verlag Editions.
- [RNJ99b] R. Raffin, M. Neveu, and F. Jaar. Extended constrained deformations : a new sculpturing tool. *proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 219–224, 1999.
- [RNTD10] R. Raffin, K. Nguyen Tan, and M. Daniel. Using geometry to help converting a discrete mesh to parametric surface via subdivision. In *Curves and Surfaces 2010*. SMAI-AFA, 28 june 2010.
- [RR13] R. Raffin and J. L. Rey. Couplage d’une base de données documentaire à une visualisation interactive 3D sur l’Internet. Iut de Corte, France, 2013. CNRIut.
- [RS82] D.F. Rogers and S.G. Satterfield. Dynamic B-splines surfaces. In *Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design IV*, pages 189–196, 1982.
- [RTG06] R. Raffin, G. Thibault, and G. Gesquière. Simple and efficient tools for virsculpt. In *GRAPP 2006, Proceedings of the first international conference on computer graphics theory and applications*, pages 436–440, Lisboa, february 2006.
- [SD03] Eric Saux and Marc Daniel. An improved Hoschek intrinsic parametrization. In *Computer Aided Geometric Design*, volume 20, pages 513–521, 2003.
- [Sed11] T. W. Sederberg. *Computer Aided Geometric Design - Course Notes*. Self-published, 2011.
- [SF98] Karan Singh and Eugene Fiume. Wires : A geometric deformation technique. *Computer Graphics*, pages 405–414, july 1998.
- [SG09] S. Schaefer and R. Goldman. Non-uniform subdivision for B-splines of arbitrary degree. *Computer Aided Geometric Design*, 26(1) :75–81, 2009.
- [SKH98] Thomas Speer, Markus Kuppe, and Josef Hoschek. Global reparametrization for curve approximation. In *Computer Aided Geometric Design*, volume 15, pages 869–877, 1998.
- [SLS<sup>+</sup>06] Andrei Sharf, Thomas Lewiner, Ariel Shamir, Leif Kobbelt, and Daniel Cohen-Or. Competing fronts for coarse-to-fine surface reconstruction. In *Eurographics 2006 (Computer Graphics Forum)*, volume 25, pages 389–398, Vienna, october 2006. Eurographics.
- [SP86] T.W. Sederberg and S.R. Parry. Free-form deformation of solid geometrics models. *ACM Transactions on Graphics*, 20(4) :151–160, Août 1986.
- [Sta01] Jos Stam. On subdivision schemes generalizing uniform B-spline surfaces of arbitrary degree. *Computer Aided Geometric Design*, 18(5) :383–396, 2001.

- [SZBN03] Thomas W. Sederberg, Jianmin Zheng, Almaz Bakenov, and Ahmad Nasri. T-splines and t-nurccs. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :477–484, July 2003.
- [SZSS98] Thomas Warren Sederberg, Jianmin Zheng, David Sewell, and Malcolm Sabin. Non-uniform recursive subdivision surfaces. In *Proceedings of SIGGRAPH'98*, pages 387–394, 1998.
- [TGR04] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. A low cost antialiased space filled voxelization of polygonal objects. In *GraphiCon 2004*, pages 71–78, Moscou, september 2004.
- [TGR06] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. Visualisation 3d de feux de forêts sur des modèles numériques de terrain de l'ign. In *Rencontre GEO-RISQUE 2006, La cartographie des risques naturels*, Montpellier, France, 2006.
- [TGR08] S. Thon, G. Gesquière, and R. Raffin. *Visualisation 3D de feux de forêts sur des modèles numériques de terrains de l'IGN*, volume 2. 2008.
- [Thi05] G. Thibault. Outils de déformation pour la sculpture virtuelle. Master's thesis, Université de la méditerranée, juin 2005. Mémoire de DEA.
- [Tho07] *Combining GIS and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management*, volume 2, june 2007. ISSN 1886–4805.
- [TO99] G. Turk and J.F. O'Brien. Variational implicit surfaces. Technical report, Graphics, Visualization, and Useability Center, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [TRRG06] S. Thon, E. Rémy, R. Raffin, and G. Gesquière. Combining gis and forest fire simulation in a virtual reality environment for environmental management. In *3rd International conference on virtual city and territory*, october 2006.
- [TYB09] Hiroyuki Takano Takeshi Yamasaki and Yoriaki Baba. Robust path-following for uav using pure pursuit guidance. *Aerial Vehicles*, 32 :671–690, 2009.
- [WW01] Joe Warren and Henrik Weime. *Subdivision methods for geometric design : A constructive approach*. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, 2001.
- [YPH<sup>+</sup>06] P.A. Yushkevich, J. Piven, H.C. Hazlett, R. Gimpel Smith, S. Ho, J.C. Gee, and G. Gerig. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures : Significantly improved efficiency and reliability. In *NeuroImage*, volume 31, pages 1116 – 1128, San Diego, CA, USA, 2006. Academic Press Inc Elsevier Science.
- [Zor00] Denis Zorin. A method for analysis of  $C^1$  - Continuity of subdivision surfaces. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 37(5) :1677–1708, 2000.
- [Zor06] Denis Zorin. Modeling with multiresolution subdivision surfaces. *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, pages 30–50, 2006.
- [ZS00a] Denis Zorin and Peter Schröder. Subdivision for Modeling and Animation. Technical report, SIGGRAPH 2000, 2000. Course Notes.
- [ZS00b] Denis Zorin and Peter Schröder. Subdivision for modeling and animation. In *SIGGRAPH Courses Notes*. ACM, 2000.
- [ZS01] Denis Zorin and Peter Schröder. A unified framework for primal/dual quadrilateral subdivision schemes. *Computer Aided Geometric Design*, pages 429–454, 2001.

## PUBLICATIONS REPRÉSENTATIVES

Cette partie présente quelques-unes des publications effectuées lors de mes travaux de recherche. Elles tentent de donner une vue assez large du travail effectué entre 2009 et 2012. Elles couvrent les travaux de collaboration avec S. Lanquetin du LE2I sur la déformation de surfaces de subdivision, la reconstruction de données médicales ponctuelles par des surfaces paramétriques épaisses (ANR MoDyPe, thèse de T. Bay), et les travaux sur le contrôle géométrique des surfaces de subdivision, du maillage à la surface limite (thèses de K. Nguyen Tan et C. Phan Anh). Elles sont classées par ordre décroissant d'ancienneté, de 2012 à 2009.

1. Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform. In *Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology, SoICT '12*, pages 81–90, New York, NY, USA, 2012. ACM
2. T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 82900I–1–82900I–14, Burlingame, Californie, USA, 2012
3. Thierry Bay, Romain Raffin, and Marc Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Springer, editor, *International Conference on Computer Vision and Graphics*, volume 7594 of *ICCVG 2012, Lecture Notes in Computer Science*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 2012
4. S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(Issues 3-4):189–199, february 2010
5. Khoi Nguyen-Tan, Romain Raffin, Marc Daniel, and Cung Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *Proc. International Conference on Computing and Communication Technologies RIVF '09*, pages 1–4, July 13–17, 2009



## Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform

Le doctorat de Cang Phan Anh (2010-2013) a porté sur la jointure de maillages de subdivision. Un des problèmes a été de créer le maillage manquant entre les bords de 2 maillages non-jointifs. La méthode que présente cette publication reconstruit l'espace entre les deux maillages en extrapolant les données géométriques manquantes par des fonctions de base radiales (RBF, cf [CBC<sup>+</sup>01]). L'algorithme incrémental se déroule en 4 étapes : 1) détection des bords de chacun des deux maillages à connecter, 2) appairage des sommets de chaque frontière et création de deux lignes-frontières par extrapolation RBF dans la direction du bord opposé, utilisation d'une transformée en ondelettes pour adapter le nombre de sommets d'un bord à l'autre, 3) connexion des lignes frontières et triangulation, 4) retour à l'étape 2 tant que les deux maillages ne sont pas connectés, lorsque les lignes-frontières se rejoignent on effectue la RBF sur les deux lignes les plus proches pour assurer la continuité d'un bord à l'autre.

Cette publication a été présentée en 2012 à la conférence *International Symposium on Information and Communication Technology*, Ha-Long, Vietnam.

Référence :

Anh-Cang Phan, Romain Raffin, and Marc Daniel. Mesh connection with RBF local interpolation and wavelet transform. In *Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology*, SoICT '12, pages 81–90, New York, NY, USA, 2012. ACM

# Mesh connection with RBF local interpolation and Wavelet transform

Anh-Cang PHAN  
Aix-Marseille University  
LSIS, UMR CNRS 7296  
Marseille, France  
anh-cang.phan@univ-amu.fr

Romain RAFFIN  
Aix-Marseille University  
LSIS, UMR CNRS 7296  
Marseille, France  
romain.raffin@univ-amu.fr

Marc DANIEL  
Aix-Marseille University  
LSIS, UMR CNRS 7296  
Marseille, France  
marc.daniel@univ-amu.fr

## ABSTRACT

We introduce a connection method between two mesh areas at different resolutions. The connecting mesh is based on a local interpolation with radial basis functions and a Lifted B-spline wavelet transform. This ensures that the continuity between these mesh areas is preserved and the connecting mesh is modified gradually in resolution between coarse and fine areas. This method could be expanded to applications related to filling holes, pasting subdivision meshes and composition of 3D objects.

## Keywords

Wavelet transform; triangular meshes; meshes connection; B-spline wavelets.

## 1. INTRODUCTION

In the past few years the theory of wavelets has been developed as a new analysis tool and formal framework in many areas of science and engineering. Mathematics and computer sciences have contributed to the development of wavelets.

Although wavelets have their roots in signal processing (time frequency analysis, sub-band filtering, etc.), they have been applied successfully to computer graphics problems as surface reconstruction, subdivision, hierarchical representation, multi-resolution analysis, etc. More incremental subdivision and analysis methods that apply wavelet-based multiresolution analysis to an arbitrary topology surface were proposed [13, 22, 23, 24]. Multiresolution approaches for arbitrary surfaces that are based on wavelets and the lifting method were proposed available in [30, 35]. This could be an interesting approach for CAD applications, like surface reconstruction or continuity between subdivision surface patches.

Complex shapes are generated by a set of assembled patches or separate mesh areas which could be at different resolution levels. Their surfaces could appear cracks, gaps or holes. It

leads to a problem about missing surfaces in CAD applications such as unwanted object shapes, cracks along the boundaries of the patches, or even incorrect connections between meshes. To overcome these problems, cracks must be removed. Our work aims at constructing a high quality connecting mesh between two selected mesh areas of a model using the RBF local interpolation and the wavelet transform so that we can preserve the continuity between these selected mesh areas to produce a smooth surface. Our main contributions are as follows:

- Provide an incremental subdivision method by constructing a high-quality connecting mesh (CM) between two subdivided mesh areas  $M_1^l$  and  $M_2^k$  which could be at different resolution levels and with different subdivision schemes. It ensures that the connecting mesh is changed gradually in resolution between coarse and fine areas.
- Generate a smooth surface with visually fair connectivity by refining only some selected areas of a mesh model.
- Solve the crack problem between two surfaces and allow filling holes, pasting meshes and composing of 3D objects.
- Apply the wavelet transform and the local interpolation method with radial basis functions for constructing a high quality connecting mesh. The continuity between the mesh areas is preserved.

The rest of the paper is organized as follows: section 2 and section 3 detail the related work and background for mesh connection. After reviewing the preceding related works, we introduce an overview of our basic algorithm for constructing a connecting mesh in section 4. Next, section 5 describe the algorithm details. We show and compare results of our algorithm in section 6. Finally, we draw the conclusion in section 7.

## 2. RELATED WORK

Subdivision surfaces is commonly applied in geometric modeling and image processing such as surface modeling, data compression, surface reconstruction, smoothing surfaces, etc. There are a lot of mesh subdivision methods in the computer graphics literature as Catmull Clark [8], Doo Sabin [9, 10], 4-8 scheme [11], Butterfly [12], Kobbelt [20], Loop [21], subdivision wavelets [3, 23, 31, 33, 35, 40], etc.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

Copyright 2012 ACM Ha Long - August 23-24, 2012.

In many cases, subdivision of the whole input mesh is not necessary, only some areas need to be subdivided to make them smoother. This is important to reduce the unnecessary subdivision process, and save the refinement time or the storage space. Some research [18, 25, 27, 28] are related to incremental subdivision methods with Butterfly, Loop and Catmull-Clark schemes. The main work of these methods is to generate a smooth surface by refining only some user selected areas of the mesh and then removes cracks with simple triangulation. However, these methods recommend subdividing the entire mesh first and then adaptively refining the areas of interest using the same subdivision scheme. In the most common case, the neighboring area outside of the adaptively subdivided area is also subdivided. Users need to compute and control over a number of subdivision steps. Furthermore, though the ideas of adaptive subdivision are simple, the handling of cracks and ensuring the connectivity of the mesh is no simple even complex and expensive in time and memory.

In addition, there have been also considerable research works relevant to connecting or pasting mesh in [1, 15, 39]. These methods consist in connecting the meshes of a surface at the same resolution level which adopt various criteria to compute the planar shape from a 3D surface patch by minimizing their differences. Their approaches are computationally expensive and memory consuming.

In this paper, we introduce a new incremental subdivision method for triangular meshes based on a mesh connection approach with the RBF local interpolation and the wavelet transform.

## 2.1 Wavelet multiresolution representation of curves and surfaces

Wavelet is a simple mathematical tool with a wide variety of applications in modeling environment [2, 24, 26]. Wavelet tool supports the multiresolution representations of curves and surfaces [13, 23]; curve smoothing at different resolution levels [16, 26]; overall form edition of a curve while preserving its details [34]; and curve approximation [19, 33]. Wavelet analysis provides a set of tools to represent functions hierarchically [32]. The coarse scaling function represents coarse curves or surfaces, encodes an approximation of the function. The wavelet function represents the difference between coarse and fine curves or surfaces, and encodes the missing details. These tools can efficiently facilitate geometric modeling operations.

Multiresolution (MR) settings based on wavelets have been proposed for many curve and surface subdivision types: Loop [3], B-splines [4], Doo subdivision [29] and Catmull-Clark [38]. The wavelet transform allows a decomposition of curves and surfaces at different resolutions while maintaining geometric details.

In our approach, we apply the Lifted B-spline wavelet transform for multiresolution representations of discrete boundary curves so that they approximate boundaries of selected mesh areas. We can expand to apply the other wavelets for the multiresolution representations of the discrete boundary curves.

The combination of B-splines and wavelets leads to the idea of B-spline wavelets [4]. B-spline wavelets form a hierarchical basis for the space of B-spline curves and surfaces in which every object has a unique representation. Taking advantage of the lifting scheme, Lifted B-spline wavelets

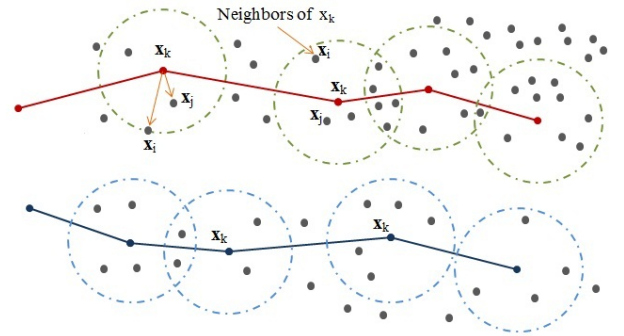
[36] are a fast computational tool for multiresolution analysis with a computational complexity linear in the number of control points for a given B-spline curve. They allow multiresolution analysis of B-spline curves, representing a curve at multiple resolution levels, editing curves, etc.

The Lifted B-spline wavelet transform includes two phases: the forward and the backward B-spline wavelet transforms. From a fine curve at the decomposition level  $j+1$ ,  $C^{j+1}$ , the forward B-spline wavelet transform decomposes  $C^{j+1}$  into a sequence of coarser approximations of the curve,  $C^k$  ( $0 \leq k \leq j$ ), and detail (error) vectors. The detail vectors are a set of wavelet coefficients containing the geometric differences with respect to the finer levels. The backward B-spline wavelet transform can be used to reconstruct fine resolution curves from a coarse curve and detail vectors. Given a curve at the decomposition level  $j$ ,  $C^j$ , the backward B-spline wavelet transform synthesis  $C^j$  and the detail vectors into the finer curves,  $C^k$  ( $k \geq j + 1$ ).

## 2.2 Radial Basis Function (RBF) local interpolation

To extrapolate local frames (tangents, curvatures) between two meshes we also need a local interpolation method. We choose Radial Basis Functions in order to operate on continuous spaces.

The Radial Basis Functions (RBFs) [6, 7, 37] allow interpolating given data points to construct an implicit surface. We can classify this method as either global or local approach. The RBF global interpolation methods consider a large dataset all the input data points as nodes of interpolation, and as control points (also called centers) of the RBF to compute implicit functions. The disadvantage of this is that the resulting system equations are dense and the computational complexity rapidly increases as the data set size increases. The interpolation matrix is dense and even large dataset can lead to very ill-conditioned linear system. Practical solutions on large point sets involve the local interpolation methods to the surface reconstruction such as RBF local interpolations [5, 7], adaptive RBF reduction and fast RBF methods [6], and plane fitting methods [17]. These methods consider subsets of nearest neighboring points at a time to compute the local interpolation functions on a surface as shown in Fig. 4.



**Figure 1: Selection of the nearest neighboring points to determine the set of control points for computing the interpolation function.**

The basic idea of the RBF local interpolation is to find

an implicit function  $s(x)$  by using a set of control points corresponding to a set of the signed distance function values. Given a set of  $N$  distinct control points (or centers)  $X = \{x_k = (x_k, y_k, z_k)\}_{k=1}^N \subset \mathbb{R}^3$  corresponding to a set of distance function values  $f = \{f_k\}_{k=1}^N \subset \mathbb{R}$ . For each  $x_k \in X, k = 1, \dots, N$ , we determine a subset of nearest neighboring points  $X_k = \{x_k\} \cup \{x_j \in X; x_j \in \text{Neighbors}(x_k)\}$  as shown in Fig. 4, where  $\text{Neighbors}(x_k)$  is the nearest neighboring points of  $x_k$ . Let  $I_k$  be the set of indexes of  $X_k$  and  $Nk = |X_k|$  be the number of the nearest neighbors of  $x_k$ .

We want to approximate the signed distance function  $f(x)$  by an interpolation  $s(x)$ . An RBF local interpolation function  $s: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  on  $X_k$  is determined by:

$$s_k(x) = \sum_{j \in I_k} \lambda_j \phi(\|x - x_j\|) \quad (1)$$

It requires satisfying the local interpolation constraints on  $X_k$ .

$$s_k(x_i) = f_i = \sum_{j \in I_k} \lambda_j \phi(\|x_i - x_j\|), i \in I_k \quad (2)$$

where  $\phi(\|x - x_j\|)$  are the radial basis functions (RBFs); the points  $x_j$  are referred as the control points of the RBF and are also the nearest neighboring points of  $x_k$ ;  $\lambda_j$  are the weights of the RBFs;  $\|x\|$  is the Euclidean norm. The basis function is normally chosen from the families of the spline functions of smoothing, such as the biharmonic  $\phi(r) = r$  ( $r = \|x - x_j\|$ ), the triharmonic  $\phi(r) = r^3$ , the Gaussian  $\phi(r) = e^{-(\frac{r}{h})^2}$ , and so on. In our approach, we choose the Gaussian basis function and  $h$  to be the average distance from  $x_k$  to the control points  $x_j$ . Combining (2) and (3) leads to:

$$\begin{pmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,Nk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{Nk,1} & \cdots & \phi_{Nk,Nk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_{Nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{Nk} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Equation 4 may be re-written in the matrix form:

$$\Phi_{X_k} \Lambda_{X_k} = F_{X_k} \quad (4)$$

where  $\phi_{i,j} = \phi(\|x_i - x_j\|)$ ,  $\Phi_{X_k} = (\phi_{i,j})$  with  $i, j \in I_k$ ,  $\Lambda_{X_k} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{Nk})^T$ ,  $F_{X_k} = (f_1, \dots, f_{Nk})^T$ .

After solving the linear system of (5) to compute the unknown weights  $\Lambda$  of the basis functions, a data set is simply reconstructed by computing the local interpolation function values  $s_k(x)$  at  $x \in X_k$  using (2).

### 3. ALGORITHM OVERVIEW

#### 3.1 Basic concepts and topology representation

Let  $M_1^l$  and  $M_2^k$  be two meshes and  $p_i, q_i$  their vertices. An edge connecting  $p_i$  to  $q_i$  is denoted  $e_i$  or  $p_i q_i$ . An edge is usually shared by two faces. If it is shared by only one, it corresponds to a boundary edge and its end vertices are called boundary vertices. We need to construct a connecting mesh CM between two meshes  $M_1^l$  and  $M_2^k$  so that it can preserve the continuity between them as illustrated in Fig. 5.

Let us introduce the notations used in the following:

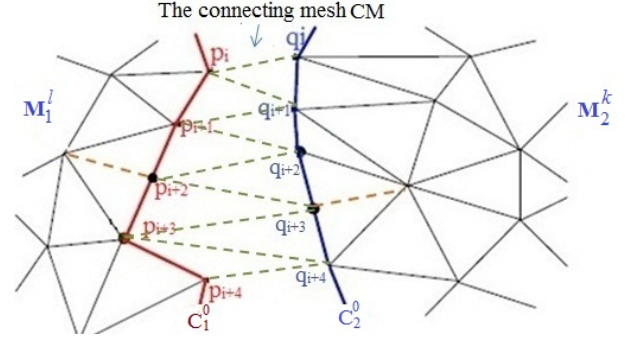


Figure 2: Basic concepts and topology representation related to the algorithm.

- $s$ : the number of intermediate discrete curves (also called the number of new created boundary curves) of CM created between  $M_1^l$  and  $M_2^k$  (see Fig. 7). It is a user defined threshold and it controls the resolution of CM.
- $j$ : the order number of the decomposition step to create intermediate discrete curves, also called decomposition level. Since two boundary curves between  $M_1^l$  and  $M_2^k$  will be created in each decomposition level  $j$ ,  $1 \leq j \leq \frac{s}{2}$ .
- $C_1^j$  and  $C_2^j$ : the two boundary curves of CM at level  $j$  which approximate the two original boundary curves  $C_1^0$  and  $C_2^0$  of meshes  $M_1^l$  and  $M_2^k$ .
- $N(C_1^j)$ : the number of vertices of boundary curve  $C_1^j$  at level  $j$ . It corresponds to the density of vertices of the boundary curve  $C_1^j$ .
- $p_i^j, q_i^j$ : the vertices  $i$  on boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$ . ( $p_i^0 = p_i$  and  $q_i^0 = q_i$ )
- $L_1^j$ : the list of the boundary vertex pairs  $(p_i^{j-1}, q_k^{j-1})$ . That means, the boundary vertices  $p_i^{j-1} \in C_1^{j-1}$  are paired with the boundary vertices  $q_k^{j-1} \in C_2^{j-1}$ .
- $L_2^j$ : the list of the boundary vertex pairs  $(q_k^{j-1}, p_i^{j-1})$ . That means, the boundary vertices  $q_k^{j-1} \in C_2^{j-1}$  are paired with the boundary vertices  $p_i^{j-1} \in C_1^{j-1}$ .

#### 3.2 CM2D-RBFW algorithm overview

The idea of our algorithm is to create the new boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$  between  $M_1^l$  and  $M_2^k$  based on the previously created boundary curves  $C_1^{j-1}$  and  $C_2^{j-1}$  using the RBF local interpolation and the Lifted B-spline wavelet transform. Then, we connect each new boundary curve  $C_1^j$  to  $C_1^{j-1}$ , and  $C_2^j$  to  $C_2^{j-1}$ .  $C_1^j$  is created in a direction from  $C_1^{j-1}$  to  $C_2^{j-1}$  and conversely for  $C_2^j$ . Therefore, **this algorithm is called the algorithm of connecting mesh in two directions based on the RBF local interpolation and the Wavelet transform** (CM2D-RBFW). The algorithm (Fig. 6) consists of the following main steps detailed in the next sections:

- **Step 1.** Boundary detection and preprocessing: read the input geometry model of two subdivided meshes

$M_1^l$  and  $M_2^k$  at different resolution levels. Detect and mark boundary vertices of the two boundaries  $C_1^0$  and  $C_2^0$  in  $M_1^l$  and  $M_2^k$  respectively. Pre-process two boundaries  $C_1^0$  and  $C_2^0$  to smooth these boundaries.

- **Step 2.** Boundary vertex pairs and boundary curve creation: pair the boundary vertices based on the distance of them before creating new boundary curves  $C_1^j, C_2^j$ . The boundary curve creation first produces vertices of two new boundary curves by the linear interpolation method and then project them onto the surface CM using the RBF local interpolation method. It finally refine or coarsen these new boundary curves applying the wavelet transforms and vertex insertion and deletion operations.
- **Step 3.** Boundary curve connection: perform a boundary triangulation for each boundary curve pair  $(C_1^{j-1}, C_1^j)$  and  $(C_2^{j-1}, C_2^j)$ .
- **Step 4.** Repeat steps 2 through 3 until two mesh areas  $M_1^l$  and  $M_2^k$  has been connected or patched by all newly created triangles.

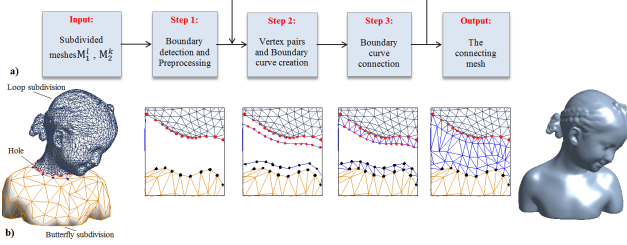


Figure 3: Algorithm flowchart and its illustration.

## 4. BOUNDARY CURVE CREATION AND CONNECTION

### 4.1 Boundary vertex pairs

In order to create boundary curves between two meshes  $M_1^l$  and  $M_2^k$  by interpolating previously created boundary curves, we pair the boundary vertices  $p_i^{j-1} \in C_1^{j-1}$  with  $q_k^{j-1} \in C_2^{j-1}$  and vice versa based on the distance of them. Since the number of vertices of the two boundary curves is different, we need to create two lists of the closest boundary vertex pairs  $L_1^j$  and  $L_2^j$ .  $L_1^j$  is the list of the closest boundary vertex pairs  $(p_i^{j-1}, q_k^{j-1})$ .  $L_2^j$  is the list of the closest boundary vertex pairs  $(q_k^{j-1}, p_i^{j-1})$ .

Assume that  $j$  is the current level, the list of boundary vertex pairs  $L_1^j$  is created as follows: for each of the boundary vertices  $p_i^{j-1} \in C_1^{j-1}$ , we search for and insert into  $L_1^j$  the corresponding paired vertices  $q_k^{j-1} \in C_2^{j-1}$  such that:  $(\forall q \in C_2^{j-1}, d(p_i^{j-1}, q_k^{j-1}) < d(p_i^{j-1}, q))$ , where the distance  $d(p_i^{j-1}, q_k^{j-1}) = \|p_i^{j-1} - q_k^{j-1}\|$  is the Euclidean distance between  $p_i^{j-1}$  and  $q_k^{j-1}$ . This shows that only vertex pairs which are closest are matched. The list of boundary vertex pairs  $L_2^j$  is also created similarly.

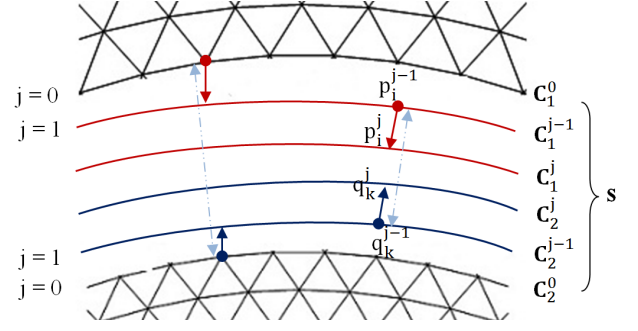


Figure 4: Create boundary curves in two directions based on two new boundaries.

### 4.2 Boundary curve creation

To connect  $B_0$  and  $B_1$  boundaries, the idea is to create two new boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$  from the paired vertices in each level  $j$ . Paired vertices are obtained by shortest distances between vertices of each boundary. That is, new boundary vertices  $p_i^j \in C_1^j$  and  $q_k^j \in C_2^j$  are created by boundary vertex pairs  $(p_i^{j-1}, q_k^{j-1}) \in L_1^j$  and  $(q_k^{j-1}, p_i^{j-1}) \in L_2^j$  respectively. A new boundary curve  $C_1^j$  is created in a direction from  $C_1^{j-1}$  to  $C_2^{j-1}$  and a new boundary curve  $C_2^j$  is created in a direction from  $C_2^{j-1}$  to  $C_1^{j-1}$  as shown in Fig. 7.

We assume  $N(C_1^0) \leq N(C_2^0)$  and let the density of vertices of the two boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$  be two functions  $N(C_1^j)$  and  $N(C_2^j)$  defined by:

$$\begin{aligned} N(C_1^j) &= N(C_1^0) + \frac{j}{s+1} [N(C_2^0) - N(C_1^0)] \\ N(C_2^j) &= N(C_2^0) - \frac{j}{s+1} [N(C_2^0) - N(C_1^0)] \end{aligned} \quad (5)$$

The boundary curve creation is computed in three phases as explained in the next sections.

#### 4.2.1 Phase 1: Create vertices of two new boundary curves with the linear interpolation.

- Create vertices of the discrete boundary curve  $C_1^j$  in a direction from  $C_1^{j-1}$  to  $C_2^{j-1}$  (see Fig. 7): for each boundary vertex pair  $(p_i^{j-1}, q_k^{j-1}) \in L_1^j$ , we apply the linear interpolation equation (7) to create new boundary vertices  $p_i^j \in C_1^j$ .

$$p_i^j = p_i^{j-1} + \frac{j}{s+1} (q_k^{j-1} - p_i^{j-1}) \quad (6)$$

Where  $i$  is the index of boundary vertices of  $C_1^j$ ,  $1 \leq i \leq N(C_1^{j-1})$  and  $k$  the index of boundary vertices of  $C_2^{j-1}$ ,  $1 \leq k \leq N(C_2^{j-1})$ .

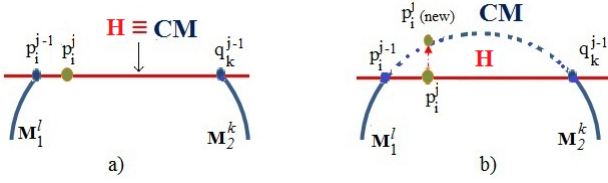
- In the same way, we create the new boundary vertices  $q_k^j \in C_2^j$  by (8).

$$q_k^j = q_k^{j-1} + \frac{j}{s+1} (p_i^{j-1} - q_k^{j-1}) \quad (7)$$

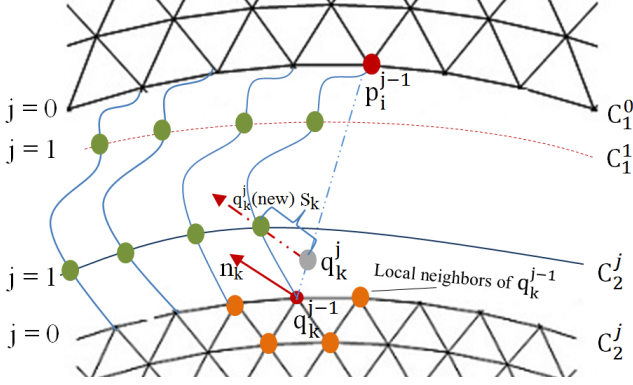
Where  $k$  is the index of a boundary vertex on  $C_2^j$ ,  $1 \leq k \leq N(C_2^{j-1})$  and  $i$  the index of the boundary vertex on  $C_1^{j-1}$ ,  $1 \leq i \leq N(C_1^{j-1})$ .

#### 4.2.2 Phase 2: Project created boundary vertices onto the surface CM using the RBF local interpolation.

The goal is to improve the result surface CM after applying phase 1. Since new boundary vertices  $p_i^j$  are created by the linear interpolation in phase 1, they can lie on a flat surface H producing a flat surface CM (as shown in Fig. 8a).



**Figure 5: The connecting mesh CM is created with and without using the RBF local interpolation.**



**Figure 6: Projecting the vertices of two new boundary curves onto the surface CM.**

New created boundary vertices  $p_i^j$  and  $q_k^j$  of curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$  do not lie on the surface CM as wanted because we use linear interpolation in phase 1 without considering informations of the surface curvature (see Fig. 8b and Fig. 9). As a result, the produced connecting mesh will not ensure the continuity between two meshes. To preserve the continuity between two mesh areas at the joined part, and avoid creating boundary vertices not on CM, we apply the method of the implicit surface reconstruction with RBF local interpolation. That is, we first apply phase 1, and then project the created boundary vertices onto surface CM along surface normals using RBF local interpolation to fit RBFs to surface CM as shown in Fig. 9.

Projecting the created vertices  $q_k^j \in C_2^j$  onto surface CM is performed as follows: we first choose a set of local control vertices of  $q_k^j$ , compute the weights of the RBFs (using (5)) and the local interpolation function values  $s_k$  for these vertices (using (2)). Then, we project them onto surface CM with the projection distances  $s_k$  along normals of vertices  $q_k^{j-1}$  and update the vertices of boundary curve  $C_2^j$  as their projected vertices. Similarly, we also apply the same for the created vertices  $p_i^j \in C_1^j$ .

In order to solve the trivial problem that the signed distance function  $f$  is zero everywhere, off-surface points (vertices inside/outside the surface) are introduced along with a signed distance function. Off-surface points are usually created by projecting the surface points along surface normal

direction with a signed projection distance  $d$ . In general, it is not necessary to use such a large number of off-surface vertices. Theoretically, a single off-surface vertex might be sufficient for the surface reconstruction. Therefore, we propose to introduce a set of local control vertices  $Q_k$  corresponding to each vertex  $q_k^j$  for the local reconstruction of the RBF interpolation function as follows:

- $Q_k = Q_1 \cup Q_2$ ,
- $Q_1 = \{q_k^{j-1}\} \cup \{q_1 \in Neighbors(q_k^{j-1})\}$ .  $Q_1$  is the local neighbors of  $q_k^{j-1}$  referred to as on-surface vertices (vertices on the surface),
- $Q_2 = \{q_2 = q_1 + d * n(q_1); q_1 \in Q_1\}$ ,  $d$  is the estimate of the signed distance to the surface (also called the signed projection distance) defined by user,  $n(q_1)$  is the normal of the vertex  $q_1$ .  $Q_2$  is referred to as off-surface vertices.

Hence, for each vertex  $q_k^j$ , we choose a set of local control vertices  $Q_k$  corresponding to a set of signed distance function values:  $f(q) = 0$  for  $q \in Q_1$  and  $f(q) = d$  for  $q \in Q_2$ .

#### 4.2.3 Phase 3: Refine or coarsen these new boundary curves with the wavelet transforms.

Since the number of vertices of  $C_1^j$  and  $C_2^j$  is now  $N(C_1^{j-1})$  and  $N(C_2^{j-1})$  respectively, we increase and reduce the number of vertices of  $C_1^j$  and  $C_2^j$  such that the density of vertices of  $C_1^j$  and  $C_2^j$  must be  $N(C_1^j)$  and  $N(C_2^j)$ . We apply the Lifted B-spline wavelet transform for the multiresolution representations of the boundary curve  $C_1^j$  and  $C_2^j$  to refine the boundary curve  $C_1^j$ , coarsen the boundary curve  $C_2^j$ , and displace the vertices of the created boundary curves where it is smooth. Then, we perform the vertex insertion or deletion operations to control the density of vertices of  $C_1^j$  and  $C_2^j$ . The result is to obtain two boundary curves  $C_1^j$  with the density of vertices  $N(C_1^j)$  and  $C_2^j$  with the density of vertices  $N(C_2^j)$ . The curve  $C_1^j$  is finer than  $C_1^{j-1}$  in the resolution because  $C_1^j$  approximates  $C_1^{j-1}$  and  $N(C_1^j) > N(C_1^{j-1})$  and the curve  $C_2^j$  is coarser than  $C_2^{j-1}$  because  $C_2^j$  approximates  $C_2^{j-1}$  and  $N(C_2^j) < N(C_2^{j-1})$ .

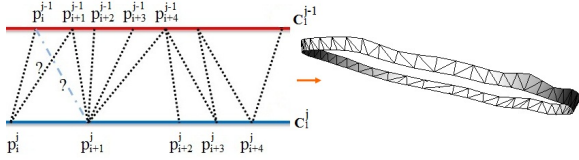
The Lifted B-spline wavelet transform and the vertex insertion or deletion operation smooth and control the resolutions of the created boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$  such that the connecting mesh CM is changed gradually in subdivision resolution from one area of the surface to another area.

### 4.3 Boundary curve connection

After creating two boundary curves  $C_1^j$  and  $C_2^j$ , we connect each new boundary curve to each previously created boundary curve:  $C_1^{j-1}$  to  $C_1^j$  and  $C_2^{j-1}$  to  $C_2^j$  based on the method of stitching the matching borders proposed by [1]. The basic idea is the implementation of the boundary triangulation based on the distance of boundary vertices. We consider the distance between three adjacent vertices of two boundaries before connecting them together to create a triangular face (see Fig. 5.3). This process terminates when we reach the last vertices of both boundaries.

## 5. RESULTS

Our algorithm has been implemented with Matlab. All experimental results in this paper were obtained on a PC



**Figure 7: Figure shows boundary curve connection.**

2.27GHz CPU Core i5 with 3GB Ram. We have applied the proposed algorithm to various types of 3D objects. First, we select and cut a mesh model into two mesh areas  $M_1^0$  and  $M_2^0$ . Next, we preprocess boundary curves. We then apply Loop subdivision scheme at level 2 for  $M_1^0$  and Butterfly subdivision scheme at level 1 for  $M_2^0$  to obtain  $M_1^1$  and  $M_2^1$ . Results are shown as in Fig. 11 and Fig. 12.

The number of intermediate discrete curves  $s$  and the signed distance function value  $d$  are parameters determined by user. Fig. 13 and 14 illustrate the change of different values of  $s$  and  $d$ . The signed distance  $d$  (also called the signed projection distance) can be chosen with an appropriate value and the off-surface vertices do not intersect other parts of the surface. This figures show the effect of projecting on-surface vertices along surface normals with the different projection distance values to generate off-surface vertices for mesh models of the cylinder and the tiger. From the left column to the right column: an original coarse mesh model, figures of resulting meshes, surfaces, and the Gaussian curvatures. This figures show the reconstruction of the cylinder and the tiger with and without validation of the projection distance in magnitude. The resulting surfaces are distorted when taking invalid projection distance values  $d = -0.03; -0.009; -0.002; 0.005; 0.01; 0.1$  for the cylinder and  $d = -0.1; -0.002; 0.005; 0.03$  for the tiger. The surface of the cylinder and the tiger is visually smooth when choosing a valid projection distance value  $d = 0.0001$  and  $d = 0.0002$  respectively.

Fig. 15 shows a sphere cut into two meshes areas to subdivide and apply our CM2D-RBFW algorithm. From the left column to the right column: Fig. 15a) the original coarse mesh model. Fig. 15b) the result mesh and surface after applying phase 1 and phase 3 without applying the RBF local interpolation (phase 2) to project new created boundary vertices onto the surface CM in our CM2D-RBFW algorithm. The connecting mesh CM between two mesh areas is flat. It makes the curvature of the spherical surface be lost. Hence, the spherical surface is distorted at the joined part.

Fig. 15c-f) the result mesh and surface after applying phase 1, phase 2 and phase 3 of our CM2D-RBFW algorithm by projecting new created boundary vertices onto the surface CM using the RBF local interpolation. We illustrate the value of the number of intermediate discrete curves  $s = 3$  and the signed distance function value  $d = -0.1; -0.004; 0.004; 0.05$ . As a result, we obtain a high quality connecting mesh and a smooth spherical surface as shown in Fig. 15e) when choosing  $s = 3$  and  $d = 0.004$ .

The experimental results show that our approach works well and generate high quality connecting meshes.

## 6. CONCLUSIONS

We introduced a new incremental simple and efficient method

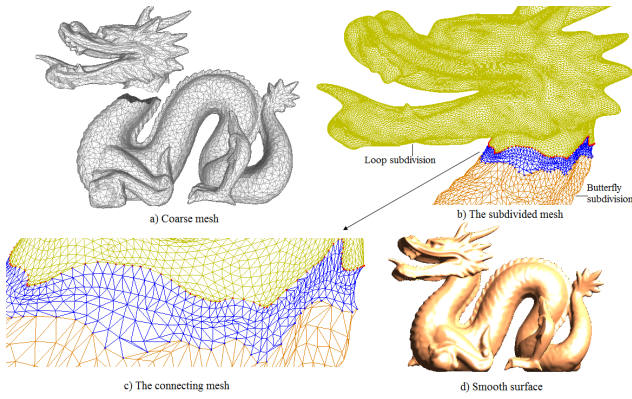
which generates a high quality connecting mesh and a smooth surface. The surface is changed gradually in resolution from one area of the surface to another area. The algorithm additionally doesn't subdivide the closest faces around selection areas of a mesh model. The results of our method show high quality connecting meshes and smooth surfaces.

In addition, smooth surfaces generated by our method have proper connectivity and geometry. Our method could be extended to applications related to pasting, connecting subdivision meshes and filling holes.

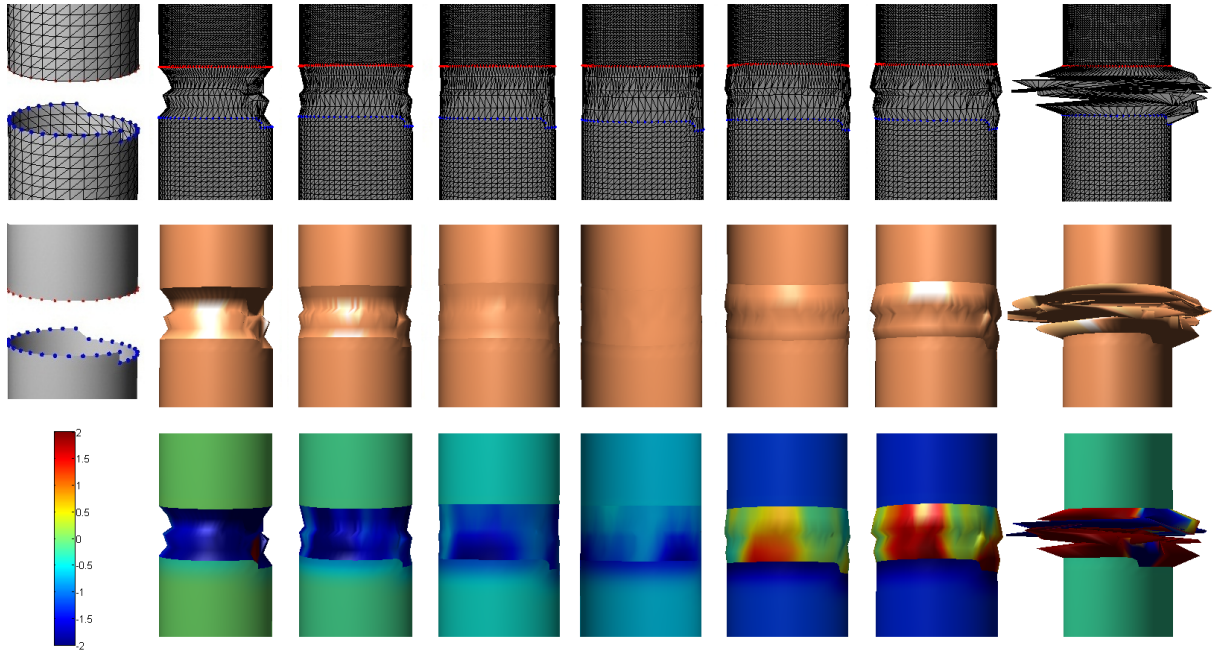
We are now working on a scheme to subdivide the connecting mesh when the two meshes are subdivided again so that the connection remains valid.

## 7. REFERENCES

- [1] G. Barequet and M. Sharir. Filling gaps in the boundary of a polyhedron. *Computer Aided Geometric Design*, 12(2):207–229, 1995.
- [2] M. Bertram. Biorthogonal wavelets for subdivision volumes. In *Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications*, SMA '02, pages 72–82, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [3] M. Bertram. Biorthogonal loop-subdivision wavelets. *Computing*, 72(1-2):29–39, 2004.
- [4] M. Bertram, M. A. Duchaineau, B. Hamann, and K. I. Joy. Generalized b-spline subdivision-surface wavelets for geometry compression. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10:326–338, 2004.
- [5] J. Branch, F. Prieto, and P. Boulanger. Automatic hole-filling of triangular meshes using local radial basis function. In *3DPVT*, pages 727–734, 2006.
- [6] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, and T. R. Evans. Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '01, pages 67–76, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [7] G. Casciola, D. Lazzaro, L. B. Montefusco, and S. Morigi. Fast surface reconstruction and hole filling using radial basis functions, numerical algorithms, 2005.
- [8] E. Catmull and J. Clark. *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*, pages 183–188. ACM, New York, NY, USA, 1998.
- [9] Doo. A subdivision algorithm for smoothing down irregularly shaped polyhedrons. In *Int'l Conf. Ineractive Techniques in Computer Aided Design*, pages 157–165, Bologna, Italy, 1978. IEEE Computer Soc.
- [10] D. Doo and M. Sabin. Behaviour of recursive subdivision surfaces near extraordinary points. *Computer Aided Design*, 10(6):356–360, 1978.
- [11] N. Dyn, D. Levin, and Gregory. A 4-point interpolatory subdivision scheme for curve design. *Computer Aided Geometric Design*, 4(4):257–268, 1987.
- [12] N. Dyn, D. Levin, and J. A. Gregory. A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Transactions on Graphics*, 9:160–169, 1990.



**Figure 8:** The Dragon mesh model is subdivided using the CM2D-RBFW algorithm: a) Two original coarse mesh areas of the model is selected and cut out; b) Perform the CM2D-RBFW algorithm after applying Loop subdivision at level 2 and Butterfly subdivision at level 1 for two selected mesh areas with  $s = 5$  and  $d = 0.0001$ ; c) The connecting mesh; d) Smooth surface.



**Figure 9:** Cylinder mesh subdivided with  $s = 4$  and  $d = -0.03; -0.009; -0.002; 0.0001; 0.005; 0.01; 0.1$ .

- [13] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, and W. Stuetzle. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '95*, pages 173–182, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [14] C. S. Edwards, H. A. Kim, and C. J. Budd. Smooth boundary based optimisation using fixed grid. *Optimization COEX Seoul Korea*, 07, 2007.
- [15] H. Fu, C.-L. Tai, and H. Zhang. Topology-free cut-and-paste editing over meshes. In *GMP*, pages 173–184, 2004.
- [16] I. Guskov, W. Sweldens, and P. Schröder. Multiresolution signal processing for meshes. In A. Rockwood, editor, *Proceedings of the Conference on Computer Graphics (Siggraph99)*, pages 325–334. ACM Press, Aug. 8–13 1999.
- [17] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. Surface reconstruction from unorganized points. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26:71–78, July 1992.
- [18] N. A. Husain, A. Bade, R. Kumoi, and M. S. M.



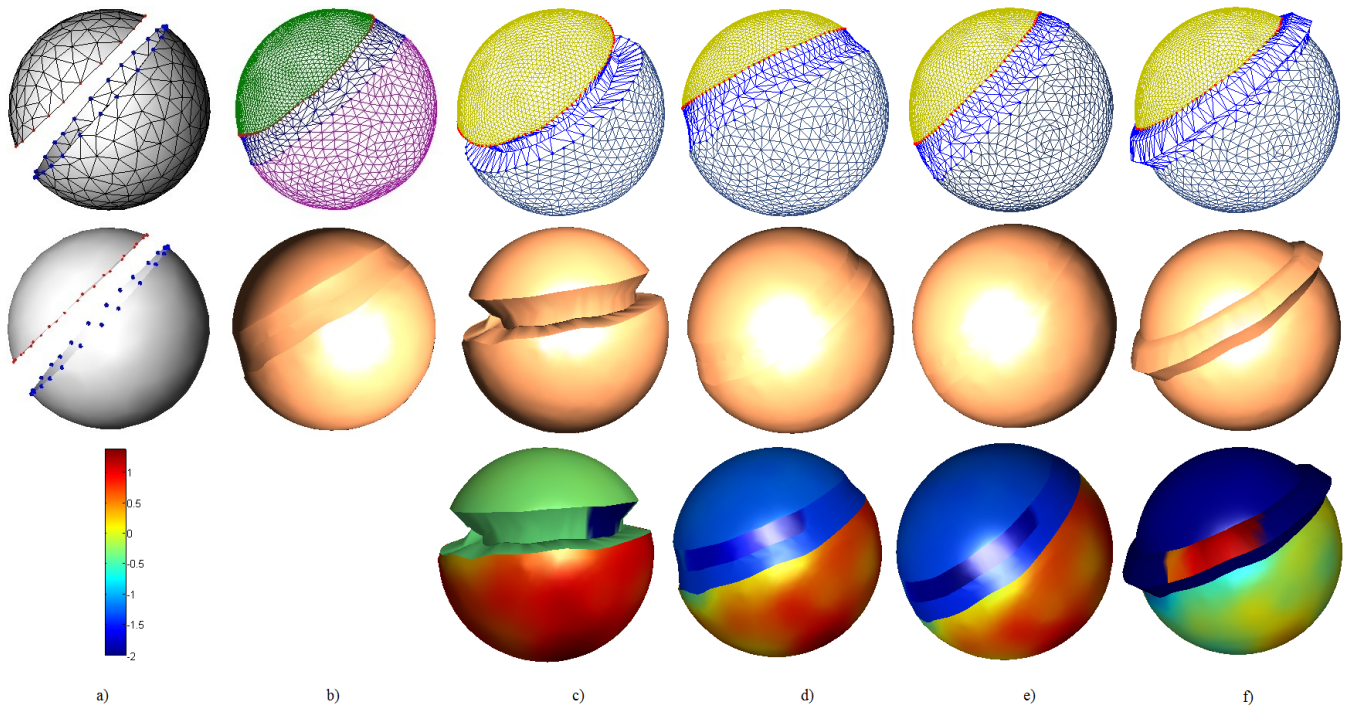


Figure 10: a) Sphere coarse mesh; b) Sphere mesh subdivided after applying Phase 1 and Phase 3; c)-f) Sphere mesh subdivided after applying Phase 1, 2 and 3 with  $s = 3$  and  $d = -0.1; -0.004; 0.004; 0.05$ .

- Rahim. Iterative selection criteria to improve simple adaptive subdivision surfaces method in handling cracks for triangular meshes. In *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, VRCAI '10*, pages 207–210, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [19] A. Khodakovsky, P. Schröder, and W. Sweldens. Progressive geometry compression. In *Proceedings of the Computer Graphics Conference 2000 (SIGGRAPH-00)*, pages 271–278, New York, July 23–28 2000. ACM Press.
- [20] L. Kobbelt, S. Campagna, J. Vorsatz, and H.-P. Seidel. Interactive multi-resolution modeling on arbitrary meshes. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '98*, pages 105–114, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [21] C. Loop. Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master's thesis, University of Utah, 1987.
- [22] J. Lounsbery. *Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type*. PhD thesis, Department of Mathematics, University of Washington, 1994.
- [23] M. Lounsbery, T. DeRose, and J. D. Warren. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. *ACM Trans. Graph.*, pages 34–73, 1997.
- [24] S. G. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1998.
- [25] M. S. M. R. Noor Asma Husain and A. Bade. Iterative process to improve simple adaptive subdivision surfaces method with butterfly scheme. In *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pages 622–626, 2011.
- [26] L. J. Olsen and F. F. Samavati. A discrete approach to multiresolution curves and surfaces. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Computational Sciences and Its Applications*, pages 468–477, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [27] H.-R. Pakdel and F. F. Samavati. Incremental adaptive loop subdivision. In *Proceedings of the International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2004)*, volume 3045 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 237–246. Springer, May 14–17 2004.
- [28] H.-R. Pakdel and F. F. Samavati. Incremental catmull-clark subdivision. In *Proceedings of the 5th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2005)*, pages 95–102. IEEE Computer Society, Jun 13–16 2005.
- [29] F. F. Samavati, N. Mahdavi-Amiri, and R. M. Bartels. Multiresolution surfaces having arbitrary topologies by a reverse doo subdivision method. *Comput. Graph. Forum*, 21(2):121–136, 2002.
- [30] P. Schröder and W. Sweldens. Spherical wavelets: Efficiently representing functions on the sphere. *Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH 95)*, pages 161–172, 1995.
- [31] J. Stam. On subdivision schemes generalizing uniform b-spline surfaces of arbitrary degree. *Computer Aided Geometric Design*, 18(5):383–396, 2001.
- [32] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose, and D. H. Salesin. Wavelets for computer graphics: A primer, part 1. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 15:76–84, May 1995.
- [33] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose, and D. H. Salesin.

*Wavelets for Computer Graphics: Theory and Applications*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1996.

- [34] N. Suciati and K. Harada. Wavelets-based multiresolution surface as framework for editing the global and local shapes. *International Journal of Computer Science and Network Security*, number 5:77–83, 2009.
- [35] W. Sweldens. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets. *SIAM J. Math. Anal.*, 29:511–546, March 1998.
- [36] W. Sweldens and P. Schröder. Building your own wavelets at home. In *IN WAVELETS IN COMPUTER GRAPHICS*, pages 15–87, 1996.
- [37] G. Turk and J. F. O'brien. Modelling with implicit surfaces that interpolate. *ACM Trans. Graph.*, 21:855–873, October 2002.
- [38] H. Wang, K. Qin, and K. Tang. Efficient wavelet construction with catmull-clark subdivision. *Vis. Comput.*, 22:874–884, September 2006.
- [39] J. Zhang, C. Wu, J. Cai, J. Zheng, and X. cheng Tai. Mesh snapping: Robust interactive mesh cutting using fast geodesic curvature flow. In *Computer Graphics Forum (In Proc. of Eurographics 2010)*, volume 29, pages 517–526, 2010.
- [40] D. Zorin and P. Schröder. Subdivision for Modeling and Animation. Technical report, SIGGRAPH 2000, 2000. Course Notes.

## Geometric modeling of pelvic organs with thickness

Le projet ANR MoDyPe pour lequel j'étais responsable du WP2 « Modélisation géométrique » consiste à faire travailler dans un processus commun quatre équipes scientifiques (expertise médicale, image, modélisation géométrique et mécanique). L'objectif de ce projet était de proposer un modèle virtuel d'organes mous pour la simulation chirurgicale. Comme les propriétés physiques et dynamiques des organes considérés sont pour l'instant inaccessibles, le projet propose de les déduire d'une boucle d'apprentissage : une fois la modélisation statique des organes au repos effectuées, on ajoute de la dynamique au système, que l'on compare ensuite à la vérité-terrain. Le système (ou la modélisation) est ensuite modifié et une autre comparaison s'effectue, pour que de proche en proche les paramètres mécaniques puissent être déduits.

Cette publication a été présentée en 2012 à la conférence SPIE *3DIP ImageProcessing and Applications*, elle établit justement la mise en place de ce procédé d'un point de vue géométrique et mécanique.

Référence :

T. Bay, C. Zhuo Wei, R. Raffin, M. Daniel, P. Joli, F. Zhi-Qiang, and M.E. Bellemare. Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In A.M. Baskurt and R. Sitnik, editors, *3D Image Processing (3DIP) and Applications 2012*, volume 8290 of *3DIP 2012*, pages 82900I-1–82900I-14, Burlingame, Californie, USA, 2012

# Geometric modeling of pelvic organs with thickness

T. Bay<sup>1</sup>, Z.-W. Chen<sup>2</sup>, R. Raffin<sup>1</sup>, M. Daniel<sup>1</sup>, P. Joli<sup>2</sup>, Z.-Q. Feng<sup>2</sup> and M.-E. Bellemare<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aix-Marseille University, LSIS UMR CNRS 6168, Domaine Universitaire de Saint-Jérôme,  
Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 MARSEILLE CEDEX 20, France

<sup>2</sup>Evry Val d'Essonne University, LMEE, 91020 EVRY CEDEX, France

## ABSTRACT

Physiological changes in the spatial configuration of the internal organs in the abdomen can induce different disorders that need surgery. Following the complexity of the surgical procedure, mechanical simulations are necessary but the *in vivo* factor makes complicate the study of pelvic organs. In order to determine a realistic behavior of these organs, an accurate geometric model associated with a physical modeling is therefore required. Our approach is integrated in the partnership between a geometric and physical module. The Geometric Modeling seeks to build a continuous geometric model: from a dataset of 3D points provided by a Segmentation step, surfaces are created through a B-spline fitting process. An energy function is built to measure the bidirectional distance between surface and data. This energy is minimized with an alternate iterative Hoschek-like method. A thickness is added with an offset formulation, and the geometric model is finally exported in a hexahedral mesh. Afterward, the Physical Modeling tries to calculate the properties of the soft tissues to simulate the organs displacements. The physical parameters attached to the data are determined with a feedback loop between finite-elements deformations and ground-truth acquisition (dynamic MRI).

**Keywords:** surface fitting, thickness model, mechanical model, periodic B-spline, soft tissues, finite elements, offsets, constitutive laws.

## 1. INTRODUCTION

The problem related in this paper refers to the pelvic floor and the following organs: the bladder, the rectum, the uterus and the vagina. As a matter of fact, the organs of the caudal area of the basin are subject to a specific balance that depends on their spatial configuration. If this disposition is disturbed, it can interfere with the functional system of the organs, or even seriously damaged it. Although surgery can restore the balance of their initial layout, estimating the functional impact of a surgical operation is a difficult problem (many parameters must be taken into account, like complex behaviors or soft tissues) .

Surgery is one of the most complex medical disciplines in a technical point of view. It requires a deep analysis of the disease, often specific to each patient. The procedures require skills of the surgeon, based on his training and experience. However, this experience depends on the cases that have been encountered. In addition, it was estimated that through operational performance, decision making takes 75% of the skills against 25% for dexterity.<sup>1</sup> It is natural to consider that the improvement of the surgical gesture makes it possible to reduce the risks for the patient health, by reducing medical errors.<sup>2</sup> Thanks to the advances in scientific modeling and simulation, experience and surgical planning can have support through mechanical simulators. Several factors motivate these developments, such as preoperative preparation and the increased complexity of operations.

Many simulators have been introduced on the market since the second half of last century. They can be classified according to the depth of transcribed realism,<sup>3</sup> or the invasiveness of the operation.<sup>4</sup> The encountered constraints in this field still remain duality between realism/accuracy of the calculations, and the costs (in time) of the simulation. The nature of the computational models in the simulators characterizes them according to the privileged needs. Two different orientations emerge from the current work: approaches merging geometric and mechanical/physical modeling, and the ones that work independently of one another. They are presented through

---

Further author information:

(thierry.bay, romain.raffin, marc.daniel, marc-emmanuel.bellemare)@lsis.org  
(Zhuowei.Chen, Pierre.Joli, feng)@iup.univ-evry.fr

a state of the art in the section 3. However, the geometric modeling of the organs is generally underestimated in order to meet real time constraints at the expense of *in vivo* behaviors, or to make up for non-realistic movements only with physical parameters.

MoDyPe project\* (“ANR-09-SYSC-008”, Pelvis Dynamics Modeling) intends to develop a specific-patient decision support software in order to evaluate the surgical gesture and the invasive procedures to be used. The methodology developed in this project relaxes the real-time constraint to remain faithful to physiological reality. It involves firstly a geometric support to each organ (section 5), by constructing the organs meshes as thick surfaces. Then a dynamic behavior is simulated (section 6) through constitutive laws associated to the geometric model and validated by a ground truth (dynamic MRI).

## 2. NEEDS OF THE MODEL

From static MRI of a patient, the “Segmentation Module” generates a set of 3D points (based on open-source software ITK-SNAP, [www.itksnap.org](http://www.itksnap.org)). These points must belong to the surface of the organs of interest (without taking into account noise and erroneous points) and are provided as is to the “Geometric Modeling”. This last module provides meshes to the “Physical Modeling” to simulate the movements of the organs.

The problem of building a patient-specific geometry is recurrent in medical applications, where the available images are generally partial and mid-quality ( $\simeq 1$  mm for 100 mm). This makes it difficult to automate and systematize these operations, mainly because of the large inter-patient mismatch. Therefore, the best approach has to compensate for the problem of accuracy while respecting the constraints of the model: build closed organs with smooth surfaces. The idea behind this geometric modeling is to remain faithful to the physiological reality, namely to work on thick surfaces. Indeed, for an organ like the bladder, purely volumetric models cannot consider the differences in density between the inside (urine) and outside (bladder wall). In addition, the thickness of the membrane can reach the non-negligible value of 10% of the dimensions of the organ. Thus, we need to define a geometric approach to control the distribution of points in the output mesh (homogeneous elements), modify the surface depending on the mechanical characteristics (accuracy in areas of greatest curvature for example), and control the thickness. The mechanical model applied on this mesh must meet particular needs as well, to be able to manage organs self-movements (keeping the same volume, thinning the thickness upon stretching, avoiding inter-penetration) and global organs configuration (sliding, colliding, twisting).

## 3. STATE OF THE ART

In the last few decades, the simulation technology market is rapidly expanding, integrating more and more knowledge in the modeling process. Most of them are restricted to local investigations. Endoscopic, arthroscopic, radiological interventions have received helps with such simulators:<sup>5,6,7,8,9</sup> these works require mathematical, IT, mechanical and biological knowledges. Quality of simulations are related to two modules that emulate these fields, both geometric and mechanical considerations are necessary to meet the requirements. On the one hand the choices of the problem representation define the most adapted approach to build the mesh of the objects, and on the other hand the constitutive laws simulate their movements according to their physical properties.

**The geometric part** Three main guidelines can be put forward: continuous approach with the parametric methods (B-spline<sup>10,11</sup>) and implicit (extraction of isosurface corresponding to the objects outlines<sup>12</sup>) or discrete (simplex meshes,<sup>13</sup> triangulation<sup>14</sup> and subdivision schemes<sup>15</sup>). The next paragraphs present approaches developed to build 3D organs from clouds of points.

In medical setting, acquisitions are often made layer by layer. From a sequence of slices, we can mention the methods of triangulation between adjacent slices,<sup>14</sup> or 3D Delaunay triangulation.<sup>16</sup> However, the use of such methods is expensive to get hexaedrizations of the surface. Some methods rely on implicit representation,<sup>17</sup> but require as an additional step to build a mesh, implying erosion of data quality; besides direct control over the surface is difficult because no parametrization is possible. We can also highlight the work of Jaillet<sup>18</sup> who rebuilt femur heads with a parametric approach: the surface continuity is controlled, but this method suggests

---

\*<http://modype.lsis.org>

that the data are acquired by plane, without noise and orderly (the data parametrization is therefore intrinsic to the order of acquisition of the points). The acquisition step may often facilitate the process of reconstruction, but its not always met. However, most existing methods do not make assumptions about the presence of noise and considers that each data point belongs to the surface. Kazhdan and al. present in<sup>19</sup> Poisson reconstruction, an implicit method robust to noise. However, this method has neither direct control over the continuity of the surface, nor parametrization of the output to locally refine the hexahedra.

If we compare the approaches with our constraints, we can point out that the discrete approaches (simplex meshes,<sup>20</sup> subdivision<sup>21</sup>) do not allow an evaluation at any point. The surface modification is possible by varying the energy terms, but do not specifically change the topology (as an inclusion of a hole after construction). Besides, the addition of a layer with subdivision schemes is possible, but difficult to control locally. The same problems arise with the implicit approach. *A contrario*, the parametric approach allows us to meet those needs: the sampling of the surface can be controlled with a parametric map; the same map can be modified to restrict the parametric domain to take into account areas to delineate. Finally, the thickness is computable with an offset approach.<sup>22</sup> As a result, the B-spline surfaces<sup>23,24,25</sup> are chosen to rebuild the organ.

**The mechanical part** Biological soft tissues such as pelvic organs, ligaments, tendons or arterial walls are usually subjected to large deformations with negligible volume change and show a highly non-linear anisotropic mechanical properties.<sup>26,27,28,29</sup>

To determine the strain and stress in the biological soft tissues, Spencer<sup>30</sup> firstly developed the framework of continuum mechanics by means of the definition of a strain energy density function expressed in terms of kinematic invariants to model the purely elastic response of these tissues. This approach was further adapted to finite element formulations of soft collagenous biological tissues (see for example<sup>26</sup> for ligaments and<sup>31</sup> for arteries). Several constitutive models have been proposed based on Spencer's theoretical approach for fiber reinforced composites.<sup>32,33</sup> Most energy densities used to model transversely isotropic and orthotropic soft tissues take a power law form<sup>34</sup> or present an exponential behavior.<sup>31,35</sup> Although there might be some distinctions between quadrupedal and bipedal, the mechanical anisotropy properties of ewe vaginal tissue was highlighted in the tests of Rubod et al.<sup>36</sup> Uniaxial tension tests were performed on the vaginal tissue of patients with pelvic organ prolapse (POP) and cadavers without prolapse (nPOP).<sup>37</sup> It shows that POP is significantly stiffer than nPOP organ prolapse tissue. Biomechanical properties of the vagina, aponeurosis and skin were compared,<sup>38</sup> it turns out that the aponeurosis was much more rigid and less extendible than the vagina and skin, vaginal tissue was less rigid but more extendible than skin.

Among the different strain energy density functions available in the literature, Mooney-Rivlin<sup>39,40</sup> is chosen in the simulation of soft tissues.<sup>41,42,43</sup> Many attempts have been made to develop a theoretical stress-strain relation that fits experimental and numerical results for hyperelastic materials.<sup>44,45,46,47</sup>

#### 4. GLOBAL PROCESS WITH FEEDBACK LOOP

Our method is integrated in a process divided into four modules. Each module interoperates with the others through specific interfaces (see figure 1). From a static MRI of the patient, the first module takes care of the segmentation that generates a set of 3D points which belong to the surface of the organs of interest. This step interacts directly with the geometric modeling by providing the input data. The second module reconstructs the surfaces of the outer membranes, and builds the thickness for each organ (agreeing with medical knowledge). A closed, hollow, and thick-surfaced volume is then created and discretized in order to provide a hexahedral mesh. The third module is physical modeling. The mesh is retrieved and sought to replicate the movements of organs under stress by determining the underlying laws of behavior through simulations. A sequence of images is then produced by projecting the outputs of the simulations in a sagittal plane. The characterization step realigns and characterizes the simulated movements of organs and compares the results with a ground-truth (dynamic MRI).

The feedback loop takes action if the characterization step is not satisfied according to the consistency of results. Two possible returns are available. A control of geometric modeling is added after the simulations to assess the geometric consistency of hexahedral elements, and thus to detect the possible presence of degenerate elements (the study of variation in the shape of hexahedron). Local operations of decimation and refinement are

then applied, to improve the accuracy of the calculations and avoid erroneous results. The second return is linked to the law of behavior which is modified in case of inconclusive results, in terms of non realistic movements. This loop is repeated until the accuracy (criteria set by the characterization step) is reached. It divides the process into three distinct roles: segmentation and geometric modeling are used to support the model, the physical modeling creates a dynamic mesh of organs, and the realignment of the characterization step monitors the results compliancy. This paper put forward a description of the geometric and mechanical work afterward.

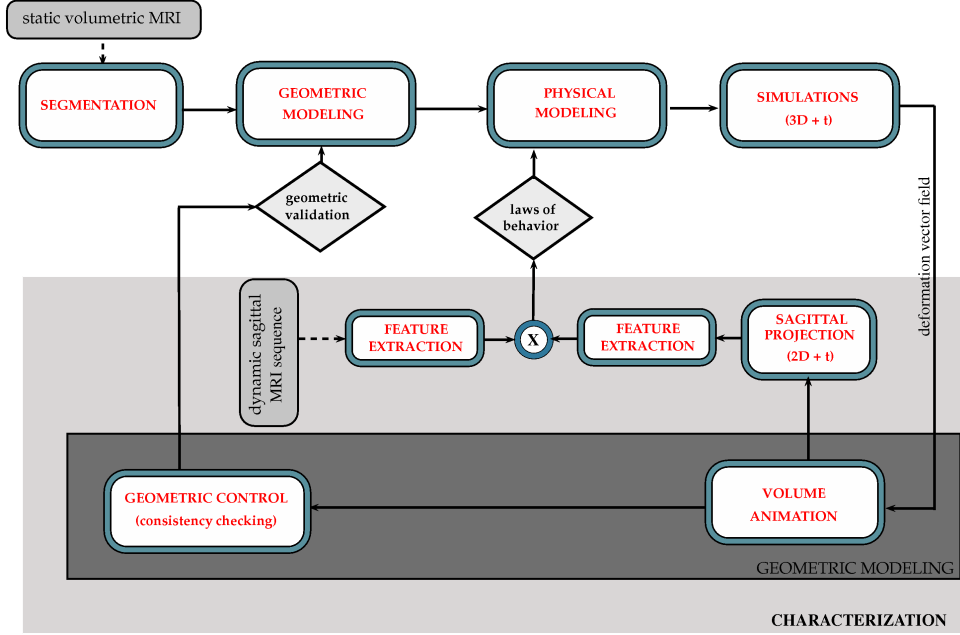


Figure 1. Steps of MoDyPe process.

## 5. GEOMETRIC MODELING

### 5.1 The iterative initialization

This section describe our initialization algorithm. As we require patient-specific reconstruction, this step is processed for each points dataset. Due to organs shape, we don't based our method only on a traditional PCA,<sup>48</sup> which calculates the principal axes of inertia for a given dataset. We improve it with an iterative approach, which builds a curve that characterizes more faithfully the general form of data since it takes into account the dataset torsions. We put forward the construction of guidelines to construct and place the initial surface. We present firstly the definition of the surface. All the properties of the approximation surface should be taken into account during this step, necessary to satisfy the output constraints: the surface has to be closed and smooth. A periodic B-spline is used for this purpose. The periodicity of a B-spline ensures the continuity of the tangents and curvatures on the entire parametric domain. For a  $k$ -order curve, the  $k - 1$  first control points and parametric intervals are overlapped on the  $k - 1$  last ones. This principle is transposable to the surface, by changing the nodal vectors and control network.<sup>18</sup>

Let  $S$  be a biparametric and periodic B-spline surface in  $\mathbb{R}^3$ , of order  $p$  in  $u$  direction and order  $q$  in  $v$  direction. We define  $\{P_{ij}\}_{i,j=0,0}^{m,n}$  the  $(m + 1) \times (n + 1)$  different control points,  $\{N_{i,p}(u)\}_{i=0}^m$  and  $\{N_{j,q}(v)\}_{j=0}^n$  the basis functions. Though, if we apply this principle of periodicity in both parametric directions, we would get a toric surface. The solution is to define periodicity in the  $u$  direction to get a  $C^{p-1}$ -continuity, and add constraints on the control network and nodal vector  $\mathcal{V}$  in the  $v$  direction. The formulation of the surface can be written as follows:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{m+p-1} \sum_{j=0}^{n+q-1} P_{i[m+1],j} N_{i[m+1],p}(u) N_{j,q}(v)$$

with  $(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$ . The nodal vectors are written such as:

$$\begin{aligned} \mathcal{U} &= \left\{ \underbrace{u_{-p+1}, \dots, u_{-1}}_{p-1}, \underbrace{u_0, \dots, u_m}_{m+1}, \underbrace{u_{m+1}, \dots, u_{m+p-1}}_{p-1} \right\} \\ \mathcal{V} &= \left\{ \underbrace{v_{-q+1}, \dots, v_{-1}}_{q-1}, \underbrace{v_0, \dots, v_{n-q+1}}_{n-q+2}, \underbrace{v_{n-q+2}, \dots, v_n}_{q-1} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

For example, we set the nodal vector  $\mathcal{U}$  as follows, with  $i = \{1, \dots, p-1\}$ :

$$\begin{cases} u_0 = 0 \text{ and } u_m = 1 \\ u_{-i} = u_{-i+1} - (u_{m-i+1} - u_{m-i}) \\ u_{m+i} = u_{m+i-1} + (u_i - u_{i-1}) \end{cases} \quad (2)$$

Since our surface is closed in one direction, we must close our two openings (named “hats” from this point) in the  $v$  direction in order to have a 0-genus shape. The control network has to be modified in that direction, for each control isocurve. The hats are created by adding enough control lines at both sides of each isocurve to get a  $C^{q-1}$ -continuity. The nodal vector  $\mathcal{V}$  is also different, since the  $q-1$  first and last terms are transformed. For all value  $u$ ,  $S(u, 0)$  return the first pole of the surface and  $S(u, 1)$  returns the second one (we are talking about poles in terms of singular points of the surface homeomorphic to a sphere). A “mirror effect” is defined at the ends of  $\mathcal{V}$ , so that the parametric intervals are identical on both sides of the pole, on the whole hats. The principle is the same at the end of the vector  $\mathcal{V}$  that becomes, for  $i = \{1, \dots, q-1\}$ :

$$\begin{cases} v_0 = 0 \text{ and } v_{n-q+1} = 1 \\ v_{-i} = v_{-i+1} - (v_i - v_{i-1}) \\ v_{n-q+1+i} = v_{n-q+i} + (v_{n-q+2-i} - v_{n-q+1-i}) \end{cases} \quad (3)$$

The general form of the organs is identical from one patient to another. All the pelvic organs have an elongated shape, making it possible to determine two extremities and a main direction to cross the form. But for modeling, this information is not sufficient to determine a “reference shape”. Even though all patients adopt the same position during data acquisition, a wide range of forms is obtained from their different physiological configuration (twists of the organs, pathology, quality acquisition, ...). A patient-specific initialization is therefore essential.

The initial surface of reconstruction is constructed in three steps: locate the extremities of a linear median axis (PCA applied on dataset); create a curve from this axis to follow dataset inertia; define the control points network by successive planes along this trajectory. The method to create the curvilinear median axis is substantially equivalent to the approach presented in section 5.2 for the construction of surfaces. It processes an iterative fitting of an initial curve minimizing distances between dataset and points evaluated on curve.

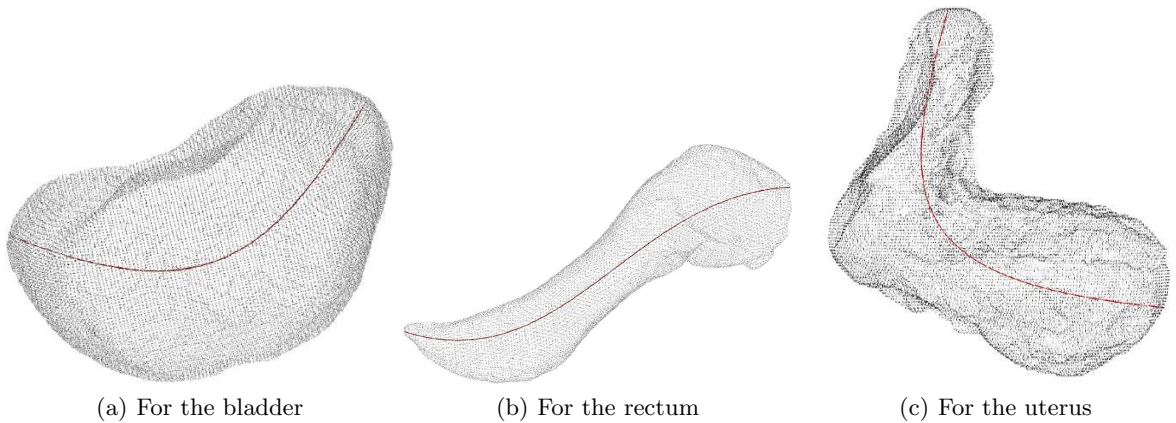


Figure 2. Bézier curves (in red) that guide the placement of the initial surface.



Bézier curves axis obtained by the iterative algorithm are shown on figures 2(a), 2(b) and 2(c). These trajectories are followed by the initial surface for the initialization of the construction of the surfaces.

Figures 3(a) and 3(b) show the initial surface built from uterus data (47 000 points) after the initialization step. The average of the initial mean square errors (MSE, in mm) is 10.13 with the PCA only and 5.9 with the iterative initialization. Cranklings of the surface are visible after application of the construction process with the PCA (see figure 3(c)). This initialization is not satisfactory for data including a torsion. However, the placement of the initial surface with the trajectory of the average inertia seems to reduce this problem (see figure 3(d)).

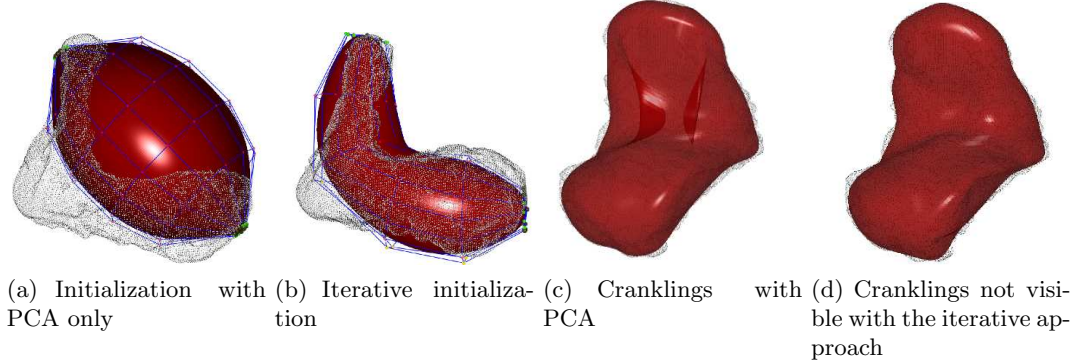


Figure 3. Two types of initialization for the construction of the uterus with the method described in section 5.2.

## 5.2 The surface construction

As described previously, we wish to construct a closed periodic B-spline of order  $k$ , with a  $C^{k-2}$ -continuity. The optimization method chosen is an alternate iterative technique,<sup>49,50</sup> compromise between complexity and accuracy. The energy function  $f$  characterizes the distance between the parametric surface  $S$  and the  $N + 1$  data points  $\{D_s\}_{s=0}^N$ . Let  $E$  be the set of  $M + 1$  points evaluated on the surface from a uniform parametric map. The cardinalities of  $E$  and  $D$  are similar (empirical choice made at the end of simulations). As in the case of curves, it is necessary to locate each data point on  $S$  with the parameterization step. A pair of parameters  $(u., v.)_s$  is associated with the  $s^{\text{th}}$  sample, since the surface can be crossed in two parametric directions  $u$  and  $v$ .

In conventional methods,<sup>49</sup> the energy characterizes only the gap from the data to the surface. Their association is obtained by projecting the data  $D$  on the approximation surface (see figure 4(a)). A first order iterative algorithm using the tangent plane of the surface is set up (we will use the term “1-order projection”). With  $S_u((u., v.)_s)$  and  $S_v((u., v.)_s)$  the two partial derivatives of the surface at the point  $S((u., v.)_s)$ , this step consists in solving for each data point  $D_s$  the following nonlinear problem:

$$\begin{cases} E_s \cdot S_u((u., v.)_s) = 0 \\ E_s \cdot S_v((u., v.)_s) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

with:  $E_s = D_s - S((u., v.)_s)$ . However, this method has several drawbacks such as false projections (mainly for closed surfaces), or an important computation time due to the iterative resolution of the system in equation 4. To overcome these problems, we use an approximation of the parametric pair  $(u., v.)$ . The parametric map used for the discretization contains all the candidates as parameter pairs. For each data point, we search the nearest evaluated point belonging to  $E$  on the surface (“0-order projection”). The vectors containing the values of parametrization are noted  $U$  and  $V$ . The error function (see equation 5) is again split into two sub-functions as we can see in figure 4(b). The first one, noted  $f_{D \rightarrow E}$  (equation 6), reflects the dissimilarity of  $D$  over the sampling  $E$  of the surface and the second one  $f_{E \rightarrow D}$  (equation 7) characterizes the one of  $E$  over  $D$ :

$$f = f_{D \rightarrow E}(P, U, V) + f_{E \rightarrow D}(P, U, V) \quad (5)$$

The sub-function  $f_{D \rightarrow E}$  maps each point of  $D$  with its 0-order projection:

$$f_{D \rightarrow E}(P, U, V) = \frac{1}{N + 1} \sum_{s=0}^N \left\| D_s - S((u., v.)_s) \right\|^2 \quad (6)$$

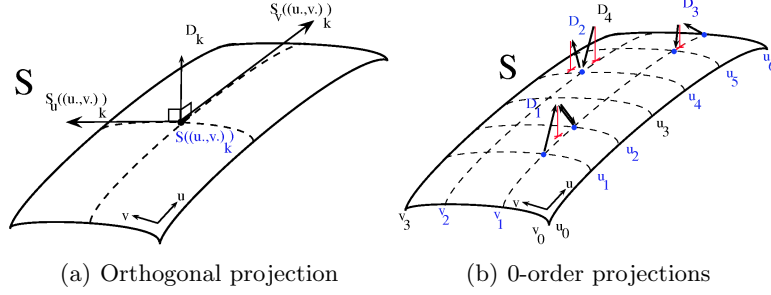


Figure 4. Projections (in blue) between of the data points on the approximation surface.

where:  $\|D_s - S((u, v)_s)\|^2 = \min_j \|D_s - S((u, v)_j)\|^2$ . Similarly, for  $f_{E \rightarrow D}$  we have:

$$f_{E \rightarrow D}(P, U, V) = \frac{1}{M+1} \sum_{k=0}^M \|S((u, v)_k) - D_{(u,v)_k}\|^2 \quad (7)$$

where:  $\|S((u, v)_k) - D_{(u,v)_k}\|^2 = \min_l \|S((u, v)_k) - D_l\|^2$ .

The iterative reduction follows the same alternate steps as described in paragraph 5.1. It stops when the values of the MSE for each sub-function reaches the threshold according to the accuracy set by the data acquisition module.

The simulations were performed with an Intel Core i7 M620 (2.67 GHz, 4 GB RAM). The initial parametric surface is a B-spline of order 4 in both directions. The following results concern the fitting of a bladder (45 000 points). They put forward the computation time (in seconds) and the MSE (in mm) for each method. The average initial values of the MSE is 8 mm. Table 1 references the results. The data acquisition phase set a 1 mm accuracy (maximum dimension of a voxel in the static MRI). The results after 10 iterations show that this accuracy is respected on average in the two sub-functions. The maximum error shows that areas still require the application of the algorithm. We should however be careful, because parasites (clusters of erroneous points, probably coming from the segmentation step) can be placed in the data and distort this value. We can also highlight the significant difference in time between the use of connection graphs and orthogonal projections.

Table 1. Comparison of methods to build a vesical surface, with MSE, relative errors according to the dimension of the bladder, and computation time.

	Construction with 10 iterations	
	0-order projection	1-order projection
Time (s)	39	323
MSE: D $\rightarrow$ E (mm)	0.61 - 0.55%	0.56 - 0.51%
MSE: E $\rightarrow$ D (mm)	0.55 - 0.50%	-
Max. error (mm)	1.97 - 1.80%	3.22 - 2.92%

The construction of the detailed surface in section 5.2 is applied to the data of the organs of interest. Figures 5(a), 5(c) and 5(b) illustrate the pelvic organs after the fitting process.

The formulation of  $f$  intends to use the information in the dataset and in the approximation surface to take into account the high curvatures that can be generated during the fitting. A shape without sharp angle and corner is created. The application of connection graphs to update the energy function avoids cranklings problems occasioned by the use of a first-order resolution. The calculation of global connection graphs is expensive in terms of computation time. But combining these graphs with an organized structure of points like the *kd-tree* for the sets  $D$  and  $E$ , makes it possible to speed up the algorithms compared with 1-order projections. The structure used is a balanced tree in  $O(n \log n)$ , allowing a search for neighbors in  $O(n^{2/3+k})$  with  $n$  the number of points in the tree and  $k$  the number of sought points.

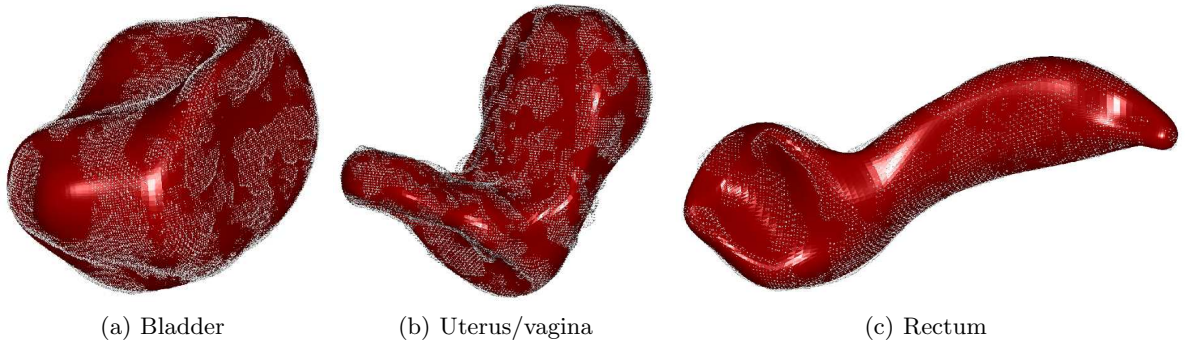


Figure 5. Reconstruction of the pelvic organs.

Once these buildings are completed, the next step is the addition of the thickness to the membranes of the organs.

### 5.3 The addition of the thickness

The fitting method used in paragraph 5.2 makes it possible to work on the thickness of the organ with an offset approach.<sup>22,51</sup> The offset  $S_o$  of a surface  $S$  at a distance  $d$  of  $S$  is written as follows:

$$S_o(u, v) = S(u, v) + d \frac{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v}}{\left\| \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} \right\|}$$

Kulczycki shows in his work<sup>22</sup> that only approximation methods are resistant to the surfaces of variable curvature, while not requiring excessive addition of control points. The method used herein is based on least squares. The thickness is controlled by four distinct parameters: the offset-direction controlled by the orientation of the normal vectors, the offset-distance  $d$  (thickness considered for the membrane), the number of layers  $N_{lay}$  in thickness, and a coefficient  $a$  to manage the distribution of layers.

The construction of the offset consists mainly of three steps. The first one is the uniform discretization of the surface  $S$ . Then the normal vectors are computed to the sampled points  $E$  of  $S$ . An offset cloud is created by moving each discrete point of  $E$  along the normal on a distance  $d$ . This offset cloud is then interpolated to create a new parametric surface  $S_o$ . Since we know the interpolated points (the offset points) and their parametrization (parametric map for the discretization of the surface  $S$ ), we only have to calculate the control network of the offset surface  $S_o$  by solving a linear system, described in the work of Piegl and Tiller.<sup>11</sup> However, the creation of a single offset surface may not be sufficient for the required precision in the calculations. We have to keep in mind that finite element calculations will be applied to the mesh, requiring the most regular possible hexaedra. A distribution function is used to obtain the thicknesses between the layers. The nature of the progression (linear, geometric, ...) controls the mesh refinement at the desired levels in the thickness. The choice of the distribution function will depend on the results from the interaction between the physical and the geometric modeling.

We present then an example of a distribution function with a geometric progression. With this distribution, a set of surfaces  $\{S_i\}_{i=1}^{N_{lay}}$  is created. We have then, with  $S_1 = S$  and  $\forall i \in \{1, \dots, N_{lay} - 1\}$ :

$$S_{i+1}(u, v) = S_i(u, v) + h_i \frac{\frac{\partial S_i}{\partial u} \times \frac{\partial S_i}{\partial v}}{\left\| \frac{\partial S_i}{\partial u} \times \frac{\partial S_i}{\partial v} \right\|} \quad (8)$$

We can build the offset inward or outward from the base surface by changing the orientation of the normal (depends on the input data, whether they belong to the inner or the outer membrane). For a parametric map

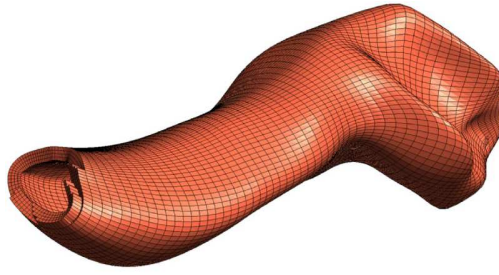


Figure 6. Construction of a rectum thickness with 4 layers of hexaedra - GMSH viewer ([geuz.org/gmsh](http://geuz.org/gmsh)).

set, a uniform discretization is applied to the surfaces. The immediate correspondence from one layer to another allows us to design a structured mesh with hexahedra.

The major problem is visible when the offset distance is too large compared to the curvature of the surface, which generates self-intersections (figure 7). This drawback is well-known with the offset formulation,<sup>51</sup> but poorly managed. One solution would be to apply the principle for the construction of the surface on the offset cloud. However, an effort should be made on the mesh compliance after discretization.

Organs more realistic are obtained thanks to the offset approach, considering the non-negligible thickness (up to 10% of the organs dimensions). By defining a procedure that controls the distribution of thicknesses, Geometric and Physical Modeling work in a close relationship with the possibility to keep up with their needs for the finite elements.

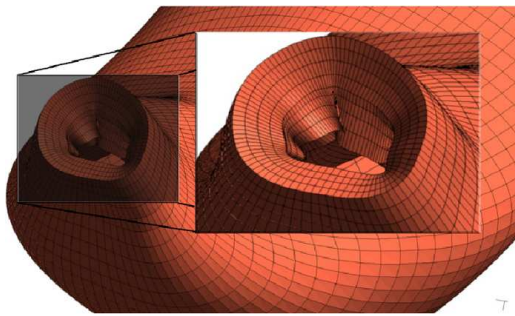


Figure 7. Cut of a rectum: self-intersections in the area with high curvatures.

## 6. PHYSICAL MODELING

### 6.1 Finite element method

The finite element method (FEM) is a numerical technique for finding approximate solutions of partial differential equations as well as integral equations. It is based on a simple idea: subdivide a complex shape into a large number of basic simple geometric shapes (finite elements) which interconnected at nodes. We consider the mechanical behavior of each element separately and then we assemble these elements such that the balance of forces and compatibility of displacements are satisfied at each node.

In general, the finite element method is characterized by the following steps:

- create the mesh of the geometry, define the nodes and elements,
- for each element, determine the elementary stiffness matrix  $[\mathbf{k}^e]$  connecting the degrees of freedom (displacements) of nodes  $\mathbf{u}^e$  and nodal forces  $\{\mathbf{f}^e\}$ :  $[\mathbf{k}^e]\{\mathbf{u}^e\} = \{\mathbf{f}^e\}$
- assemble matrices and vectors in a global system  $[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\}$  to satisfy the equilibrium conditions at each node,

- modify the whole system by taking into account the boundary conditions,
- solve the system  $[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\}$  to obtain the displacements at nodes  $\{\mathbf{U}\}$ ,
- calculate the gradients (strains and stresses) in the elements and reactions at nodes on which the boundary conditions are imposed.

## 6.2 Hyperelastic model

To determine the strain and stress in the biological soft tissues, hyperelastic constitutive laws are often used in the context of finite element analysis. In this case, the stiffness matrix  $[\mathbf{K}]$  is not constant due to geometrical and material non-linearities. In order to describe the geometrical transformation problems, the deformation gradient tensor  $\mathbf{F}$  and the right Cauchy-Green deformation tensor  $\mathbf{C}$  are defined by:

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \quad (9)$$

where  $\mathbf{I}$  is the unity tensor and  $\mathbf{u}$  the displacement vector. Because of large displacements and rotations, Green-Lagrangian strain is adopted for the nonlinear relationships between strains and displacements. We note  $\mathbf{C}$  the stretch tensor or the right Cauchy-Green strain tensor. The Green-Lagrangian strain tensor  $\mathbf{E}$  is defined by:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - \mathbf{I}) \quad (10)$$

The Mooney-Rivlin model is often chosen in the literature to model the behavior of the soft tissue materials.<sup>41,42</sup> The strain energy density  $W$  is given by:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2 \quad (11)$$

where  $C_{10}$  and  $C_{01}$  are the material constants.  $K$  is user-defined parameter which can be interpreted as the bulk modulus of the material.  $J = \det(\mathbf{F})$  represents the volume change of the material. It is noted that if  $J$  approaches to unity, the last term of equation (11) will approach to zero, which corresponds to an incompressible Mooney-Rivlin material.  $I_1$  and  $I_2$  denote respectively the first and second invariants of the right Cauchy-Green deformation tensor  $\mathbf{C}$ :

$$I_1 = \text{tr}(\mathbf{C}); \quad I_2 = [I_1^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2)]/2 \quad (12)$$

The second Piola-Kirchhoff stress tensor  $\mathbf{S}$  can be obtained as follows:

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}} = 2 [C_{10} \mathbf{I} + C_{01} (I_1 \mathbf{I} - \mathbf{C})] + K(J - 1) J \mathbf{C}^{-1} \quad (13)$$

The Cauchy stress (or true stress) tensor  $\boldsymbol{\sigma}$  is calculated from  $\mathbf{S}$  as follows:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{1}{J} \mathbf{F} \mathbf{S} \mathbf{F}^T \quad (14)$$

The total Lagrangian formulation was selected in this work to describe nonlinear behavior. In the context of the finite element method and with equation (9) and equation (10), the Green-Lagrangian strain can be formally written with linear and nonlinear terms in function of nodal displacements:<sup>52</sup>

$$\mathbf{E} = \left( \mathbf{B}_L + \frac{1}{2} \mathbf{B}_{NL}(\mathbf{u}) \right) \mathbf{u} \quad (15)$$

where  $\mathbf{B}_L$  is the matrix which relates the linear strain term to the nodal displacements, and  $\mathbf{B}_{NL}(\mathbf{u})$ , the matrix which relates the nonlinear strain term to the nodal displacements. From equation (15), the incremental form of the strain-displacement relationship is:

$$\delta \mathbf{E} = (\mathbf{B}_L + \mathbf{B}_{NL}(\mathbf{u})) \delta \mathbf{u} \quad (16)$$

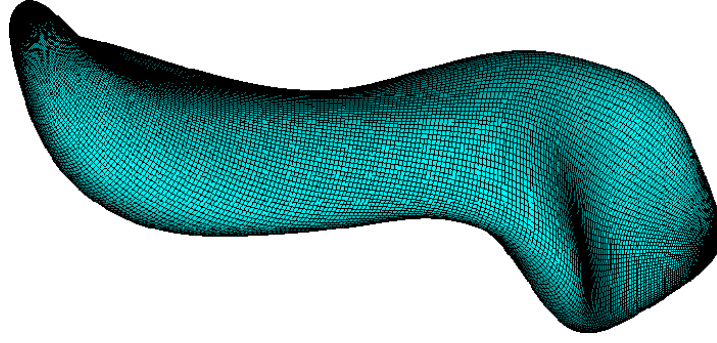


Figure 8. Finite element mesh of the rectum.

Using the principle of virtual displacement, the virtual work equation is given as:

$$\int_{V_0} \mathbf{S} \delta \mathbf{E} dV - \mathbf{F}_{ext} \delta \mathbf{u} = 0 \quad (17)$$

where  $V_0$  is the volume of the initial configuration,  $\mathbf{F}_{ext}$  the vector of external loads. Using equation (16), the incremental stress  $\delta \mathbf{S}$  can be linked to the incremental strain  $\delta \mathbf{E}$  as follows:

$$\delta \mathbf{S} = \frac{\partial^2 W}{\partial \mathbf{E}^2} = \mathbf{D} : \delta \mathbf{E} = \mathbf{D} : (\mathbf{B}_L + \mathbf{B}_{NL}(\mathbf{u})) \delta \mathbf{u} \quad (18)$$

where  $\mathbf{D}$  denotes the constitutive tangent matrix. This fourth-order tensor is obtained from the derivative of  $\mathbf{S}$  with respect to  $\mathbf{E}$ . Substituting  $\delta \mathbf{E}$  from equation (16) into equation (17) results in:

$$\mathbf{F}_{int} \delta \mathbf{u} - \mathbf{F}_{ext} \delta \mathbf{u} = 0 \quad (19)$$

The vector of internal forces is defined by:

$$\mathbf{F}_{int} = \int_{V_0} (\mathbf{B}_L + \mathbf{B}_{NL}(\mathbf{u}))^T \mathbf{S} dV \quad (20)$$

Since  $\delta \mathbf{u}$  is arbitrary, a set of nonlinear equations can be obtained as:

$$\mathbf{F}_{int} - \mathbf{F}_{ext} = 0 \quad (21)$$

Solution of equation 21 is usually achieved by the Newton-Raphson iterative method.

### 6.3 Numerical tests

Different hyperelastic laws such as the Ogden law and the Mooney Rivlin law described above have been implemented and tested in our own finite element code FER. This code is developed using C++ object-oriented programming technique. Interested readers could have more details about the implementation of these laws in the general context of nonlinear mechanics (see<sup>53,54</sup>). As we can not obtain the real physical behavior of the organs undergoing real loadings, we tend to evaluate the robustness of the pelvic organ mesh generated by the techniques mentioned above. Undergoing large deformations, the question is: how much the mesh could be deformed without creating any forbidden distortions cutting off the simulation?

As a first result, we present the simulation of the rectum deformation (see figure 8). We have chosen the rectum because its geometry is quite complex and flexible.

Boundary conditions are applied to one side of the rectum and the another side is given a displacement. Three successive deformed shapes together with the distribution of the von Mises stress are shown in figures 9(a), 9(b) and 9(c).

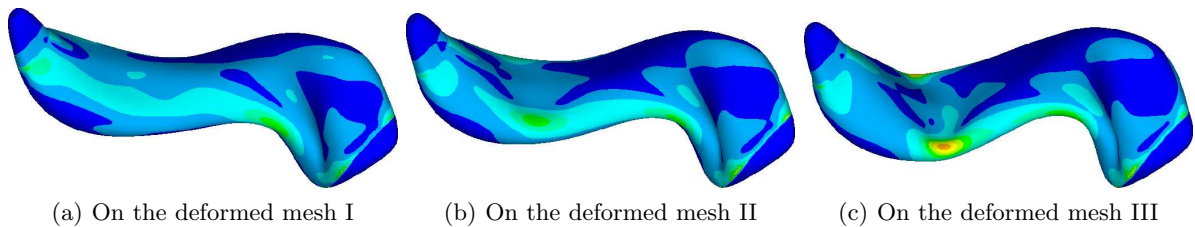


Figure 9. Von Mises stresses.

## 7. CONCLUSIONS AND PROSPECTS

We have presented a process to build organs in the pelvic area with thick surfaces. The search for realism in the models is often attributed to physical modeling that defines the constitutive laws. In our method, the same goal has been set for geometric modeling. Rather than compensate with physical parameters the lack of realism of the meshes, the model took into account the significant features such as the membrane thickness. The choices are made to meet the output constraints, such as the absence of sharp angles with the use of a continuous periodic parametric surface.

The developed iterative initialization has been able to approximate more faithfully the dataset, facilitating the reconstruction process. The method is general and is applied to a submanifold of higher dimension for the membrane surface. The bidirectional energy function uses the data information but also the shape of the approximation surface, regularizing the function without the addition of empirical parameters (usually present in the energy function to weight internal and external forces). In addition, the connections graphs get rid of the projections on the tangent planes, thus avoiding the bad projections associated with high costs in computation time.

It remains to solve the problems of local cranking of the surface in case of high curvature. However, the addition of a control procedure on the movement of control points, as well as the use of an approximation algorithm for offsets surfaces should solve problems and ensure the consistency of results. The impact of a non-uniform parameterization would also be interesting to quantify, particularly to better address areas of high curvature and study its relationship for the connections graphs. The thick surface meshes created are finally provided to the Physical Modeling, to compare the method with approaches based on the expertise of this team in the field of finite elements, such as thin plate elements. Firsts results confirm our choice of the geometric model.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the French National Research Agency, under reference “ANR-09-SYSC-008”.

## REFERENCES

- [1] Spencer, F., “Teaching and measuring surgical techniques: the technical evaluation of competence,” *Bulletin of the American College of Surgeons* **63**, 9–12 (1978).
- [2] Kohn, L., Corrigan, J., and Donaldson, M., [*To Err Is Human: Building a Safer Health System*], National academy press (2000).
- [3] Satava, R., “Medical virtual reality: the current status of the future,” in [*Medicine Meets Virtual Reality (MMVR IV)*], **29**, 100–106 (1996).
- [4] Liu, A., Tendick, F., Cleary, K., and Kaufmann, C., “A survey of surgical simulation: applications, technology, and education,” *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* **12**, 599–614 (2003).
- [5] Székely, G., Brechbühler, C., Hutter, R., Rhomberg, A., Ironmonger, N., and Schmid, P., “Modelling of soft tissue deformation for laparoscopic surgery simulation,” in [*In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*], 550–561 (1999).
- [6] Røtnes, J., Kaasa, J., Westgaard, G., Eriksen, E. M., Hvidsten, P. Ø., Strøm, K., V.S., Halbwachs, Y., Elle, O. J., and Fosse, E., “Realism in surgical simulators with free-form geometric modeling,” in [*CARS*], 1032–1037 (2001).

- [7] Denninger, J.-M. S. M., Rancourt, D., Moisan, C., and Laurendeau, D., “Modelling liver tissue properties using a non-linear visco-elastic model for surgery simulation.,” *Medical Image Analysis* **9**(2), 103–112 (2005).
- [8] Sierra, R., Zsemlye, G., Székely, G., and Bajka, M., “Generation of variable anatomical models for surgical training simulators.,” *Med Image Anal* **10**(2), 275–285 (2006).
- [9] Bellemare, M., Pirro, N., Marsac, L., and Durieux, O., “Toward the simulation of the strain of female pelvic organs,” in [*EMBC07, 29th IEEE EMBS Annual International Conference*], 2756–2759 (2007).
- [10] Hoschek, J., Schneider, F.-J., and Wassum, P., “Optimal approximate conversion of spline surfaces,” *Computer Aided Geometric Design* **6**(4), 293 – 306 (1989).
- [11] Piegl, L. and Tiller, W., [*The NURBS book (2nd ed.)*], Springer-Verlag New York, Inc. (1997).
- [12] Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G., and Seidel, H.-P., [*Multi-level Partition of Unity Implicit*], 463–470, ACM, New York, USA (2003).
- [13] Delingette, H., [*General Objects Reconstruction based on Simplex Meshes*], vol. 32, 111–142, Kluwer Academic Publishers (1998).
- [14] Klein, R., Schilling, A., and Straer, W., “Reconstruction and simplification of surfaces from contours,” *Graphical Models* **62**(6), 429 – 443 (2000).
- [15] Zorin, D. and Schröder, P., “Subdivision for modeling and animation,” tech. rep., Siggraph 1998 (1998).
- [16] Boissonnat, J.-D. and Cazals, F., “Smooth surface reconstruction via natural neighbour interpolation of distance functions,” *Computational Geometry* **22**(1-3), 185 – 203 (2002).
- [17] Tsai, A., Yezzi, A., Wells, W., Tempany, C., Tucker, D., Fan, A., Grimson, W., and Willsky, A., “A shape-based approach to the segmentation of medical imagery using level sets.,” *IEEE transactions on medical imaging* **22**(2), 137–154 (2003).
- [18] Jaillet, F., Shariat, B., and Vandorpe, D., “Periodic b-spline surface skinning of anatomic shapes,” in [*9th Canadian Conference on Computational Geometry*], 119–210 (1997).
- [19] Kazhdan, M., Bolitho, M., and Hoppe, H., “Poisson surface reconstruction,” in [*Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*], *SGP '06*, 61–70, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland (2006).
- [20] Delingette, H. and Ayache, N., “Hepatic surgery simulation,” *Communications of the ACM* **48**, 31–36 (February 2005).
- [21] Loop, C. T., *Smooth subdivision surfaces based on triangles*, PhD thesis, Department of Mathematics, University of Utah (1987).
- [22] Kulczycka, M. A. and Nachman, L. J., “Qualitative and quantitative comparisons of B-spline offset surface approximation methods,” *Computer-Aided Design* **34**(1), 19–26 (2002).
- [23] Faux, I. D. and Pratt, M. J., [*Computational Geometry for Design and Manufacture*], Halsted Press, New York, NY, USA (1979).
- [24] Hoschek, J. and Lasser, D., [*Fundamentals of computer aided geometric design*], A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA (1993). Translator-Schumaker, Larry L.
- [25] Farin, G., [*Curves and surfaces for computer aided geometric design: a practicalguide*], Academic Press Professional, Inc. (2002).
- [26] Weiss, J., Maker, B., and Govindjee, S., “Finite element implementation of incompressible, transversely isotropic hyperelasticity,” *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng* **135**, 107–128 (1996).
- [27] Almeida, E. and Spilker, R., “Finite element formulation for hyperelastic transversely isotropic biphasic soft tissues,” *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.* **151**, 513–538 (1998).
- [28] Rüter, M. and Stein, E., “Analysis, finite element computation and error estimation in transversely isotropic nearly incompressible finite elasticity,” *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.* **190**, 519–541 (2000).
- [29] Holzapfel, G., [*Mechanics of biological tissue*], Springer (2006).
- [30] Spencer, A., “Theory of invariants,” *Continuum Physics, Academic Press, New York* , 239–253 (1954).
- [31] Holzapfel, G., Gasser, T., and Ogden, R., “A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models,” *Journal of Elasticity* **61**, 1–48 (2000).
- [32] Spencer, A., [*Deformations of fiber-reinforced materials*], Oxford Science, NY (1972).
- [33] Spencer, A., [*Continuum theory of the mechanics of fiber-reinforced composites*], Oxford Science, NY (1984).



- [34] Schröder, J., Neff, P., and Balzani, D., “A variational approach for materially stable anisotropic hyperelasticity,” *Int. J. Solids. Struct.* **42**, 4352–4371 (2005).
- [35] Fung, Y., Fronek, K., and Patitucci, P., “Pseudoelasticity of arteries and the choice of its mathematical expression,” *Am. J. Physiol.* **237**, H620–H631 (1979).
- [36] Rubod, C., Boukerrou, M., Brieu, M., Dubois, P., and Cosson, M., “Biomechanical properties of vaginal tissue. part 1: New experimental protocol,” *Journal of Urology* **178**, 320–325 (2006).
- [37] Jean-Charles, C., Rubod, C., Brieu, M., Boukerrou, M., Fasel, J., and Cosson, M., “Biomechanical properties of prolapsed or non-prolapsed vaginal tissue: impact on genital prolapse surgery,” *Int Urogynecol J* **21**, 1535–1538 (2010).
- [38] Gabriel, B., Rubod, C., Brieu, M., Dedet, B., Landsheere, L., Delmas, V., and Cosson, M., “Vagina, abdominal skin, and aponeurosis: do they have similar biomechanical properties?,” *Int Urogynecol J* **21**, 23–27 (2011).
- [39] Mooney, M., “A theory of large elastic deformation,” *Journal of Applied Physics* **11(9)**, 582–592 (1940).
- [40] Rivlin, R., “Large elastic deformations of isotropic materials. iv. further developments of the general theory,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **241(835)**, 379–397 (1948).
- [41] Majumder, S., Roychowdhury, A., and Pal, S., “Effects of trochanteric soft tissue thickness and hip impact velocity on hip fracture in sideways fall through 3d finite element simulations,” *Journal of Biomechanics* **41**, 2834–2842 (2008).
- [42] Rao, G. V., Rubod, C., Brieu, M., Bhatnagar, N., and Cosson, M., “Experiments and finite element modelling for the study of prolapse in the pelvic floor system,” *Comput. Meth. Biomech. Biomed. Eng.* **13**, 349–357 (2010).
- [43] Noakes, K., Pullan, A., Bissett, I., and Cheng, L., “Subject specific finite elasticity simulations of the pelvic floor,” *Journal of Biomechanics* **41**, 3060–3065 (2008).
- [44] Charlton, D. and Yang, J., “A review of methods to characterize rubber elastic behaviour for use in finite element analysis,” *Rubber Chemistry and Technology* **67**, 481–503 (1994).
- [45] Boyce, M. and Arruda, E., “Constitutive models of rubber elasticity: a review,” *Rubber Chemistry and Technology* **73**, 504–523 (2000).
- [46] Miehe, C., Göktepe, S., and Lulei, F., “A micro-macro approach to rubber-like materials part i: The non-affine micro-sphere model of rubber elasticity,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **52**, 2617–2660 (2004).
- [47] Peyraut, F., Feng, Z.-Q., Laped, N., and Renaud, C., “A closed form solution for the uniaxial tension test of biological soft tissues,” *International Journal of Non-Linear Mechanics* **45**, 535–541 (2010).
- [48] Jolliffe, I., [*Principal Component Analysis*], Springer, second ed. (2002).
- [49] Hoschek, J., “Intrinsic parametrization for approximation,” *Computer Aided Geometric Design* **5(1)**, 27–31 (1988).
- [50] Chambelland, J. and Daniel, M., “An iterative method for rational pole curve fitting,” in [*WSCG 2006 conference proceedings*], 39–46 (2006).
- [51] Maekawa, T., “An overview of offset curves and surfaces,” *Computer-Aided Design* **31(3)**, 165–173 (1999).
- [52] Simo, J. C. and Hughes, T. J. R., [*Computational inelasticity*], Springer-Verlag, New York (1998).
- [53] Feng, Z.-Q., Peyraut, F., and He, Q.-C., “Finite deformations of Ogden’s materials under impact loading,” *Int. J. Non-linear Mech.* **41**, 575–585 (2006).
- [54] Feng, Z.-Q., Zei, M., and Joli, P., “An elasto-plastic contact model applied to nanoindentation,” *Computational Materials Science* **38**, 807–813 (2007).

## Discrete Geometric Modeling of Thick Pelvic Organs with a Medial Axis

Dans le cadre de l'ANR MoDyPe sur la reconstruction d'organes mous par des surfaces paramétriques épaisses, une fois la surface approximante des points de données obtenue, un point dur a été de créer un maillage d'hexaèdres sans intersection locales (d'un hexaèdre avec lui-même) ou globale (deux hexaèdres non voisins au moins). Nous voulons également créer des couches successives d'hexaèdres afin de paramétrer plus finement la modélisation mécanique. Une première méthode naïve basée seulement sur un axe médian curviligne et une croissance géométrique radiale à partir de cette axe n'a pas donné de bons résultats sur des objets tels que le rectum ou le couple utérus-vagin (où l'épaisseur a été fixée alors qu'elle varie d'un organe plus fin à un autre plutôt bombée). Il est évident que, la courbure locale n'étant pas prise en compte, cette méthode purement géométrique ne peut satisfaire toutes les contraintes de modélisation. Nous avons donc mis en place une méthode de relaxation de la tension du volume par un système de masses-ressorts qui est le propos de cet article. L'objet à déformer est initialisé grâce à l'axe médian. Nous avons choisi une configuration de ressorts qui nous permette de maintenir les faces internes et externes des hexaèdres (pas d'étirement, pas de configuration en papillon), ainsi que la liaison interne-externe, par distance entre les centres et par projection (pour éviter le glissement des faces les unes par rapport aux autres). La méthode est comparée numériquement à la précédente.

Cette publication a été présentée en 2012 à la conférence *International Conference on Computer Vision and Graphics*, Varsovie, Pologne.

Référence :

Thierry Bay, Romain Raffin, and Marc Daniel. Discrete geometric modeling of thick pelvic organs with a medial axis. In Springer, editor, *International Conference on Computer Vision and Graphics*, volume 7594 of *ICCVG 2012, Lecture Notes in Computer Science*, pages 14–21, Warsaw, Poland, 2012

# Discrete Geometric Modeling of Thick Pelvic Organs with a Medial Axis

Thierry Bay, Romain Raffin, and Marc Daniel

Aix-Marseille University, LSIS UMR 7296,  
Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex, France  
{thierry.bay, romain.raffin, marc.daniel}@lsis.org

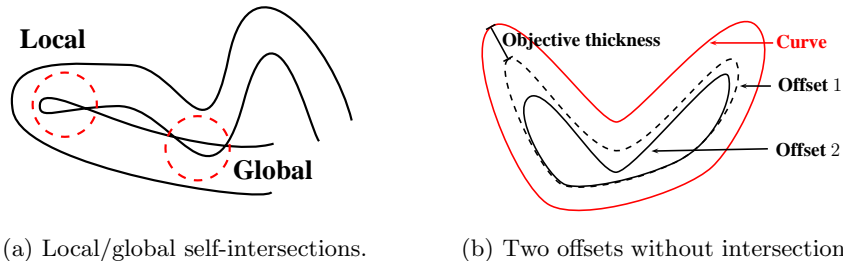
**Abstract.** Modeling of soft pelvic organs and their thicknesses is a difficult task, especially when inputs are noisy and scattered. In order to define the geometric step for a global pelvic surgery simulator, we define a new method based only on geometry while considering the problem of error transfer between outer and inner organ surfaces. We compare this approach with a parametric formulation and a mass-spring system.

**Keywords:** Offset, parametric surface, discrete mesh, medial axis.

## 1 Introduction and Motivations

Our work is part of the construction of a realistic simulator for pelvic surgery, to evaluate mechanically the consequences of the surgical gesture. The starting point of our study is a series of medium quality and noisy MRI images. A first step, which does not concern this paper, consists in segmenting the image to outline the organs of interest. All these organs have a thickness, like the uterus whose internal walls are nearly into contact, or the bladder which has a large cavity. After our geometric reconstruction, a finite element calculation (in charge of the organs deformation) has to take into account this thickness (possibly variable) and can not just consider a homogeneous mesh describing the organs.

Our goal is to generate a volume mesh which describes geometrically the thick wall of the pelvic organs (with hexahedra), but can not be comprehended from the current state of the input images. Obtaining *in vivo* this information is currently not realistic, and depends therefore on clinical data [8]. We work with a fixed thickness, but we will see later that variable ones do not raise problems. The segmentation of the input data allowed us to obtain a reliable external model, built from  $C^2$  closed B-splines [1]. Our first approach was to offset the data to the desired thickness and to reconstruct the same model [2]. However, keeping the parametric representation to build an *offset surface* leads to two major problems. On the one hand, local and even global self-intersections are created if the *offset distance* between the two surfaces is too large regarding the radii of curvature (cf. Figure 1(a)). On the other hand, modifying a mesh to avoid intersections could require to increase locally the thickness to ensure a value superior to the *offset distance* everywhere (cf. Figure 1(b)). Different



**Fig. 1.** Problems raised by offset constructions.

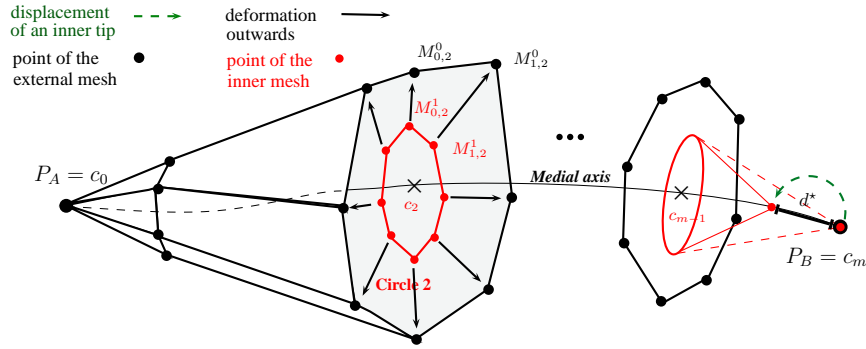
modifications will lead to different offsets, which makes it difficult to obtain an internal cavity faithful to a physiological reality.

First, related work, presented in Section 2, describe solutions to build internal offsets. We propose a new geometric method in Section 3 from a non-linear medial axis. We compare our results in Section 4 and conclude in Section 5.

## 2 Related Work

We aim at building a mesh of hexahedra without *flat or crossed elements*. The management of self-intersections is clearly considered in parametric methods, according to a direct control on the surface: continuity, parameterization, projections on the tangent plane [3–5]. Some methods exist to deal with the self-intersections: removing the loops by working on each line and column [6] (for ordered datasets), curvature reduction by an iterative repositioning of the control points [11], or parametric restriction [9]. A common drawback of these methods is that they may not detect small self-intersections, such as in Figure 1.

Models based on active contours could also be used [13]. The parameterization of a B-spline surface makes it possible to control easily the discretization density, so that a quality conformal mesh is created. However, the usage of active contours is to make a seed evolve with a set of forces, without considering the connections with the external mesh. The drawback in our specific context comes from automatic feedbacks of the physical step that requires modifications in the surface sampling (local density change, holes, ...) when high deformations are performed. This involves an expensive update of the mesh connections with the internal non-parameterized mesh to avoid crossed hexahedra. Finally, the discrete representation can directly use a conformal mesh and correct the self-intersections. The mesh tension can be managed with the elastic forces of a MSS for example. Its principle consists in a lattice for the configuration of the springs network [7], forces that interoperate and a numerical scheme to solve the equations of Newtonian dynamics [10, 12]. Besides, a particle-centered method would facilitate the use of variable thicknesses on the same organ, without complexifying the model unlike parametric and implicit approaches.



**Fig. 2.** Example of an inner mesh construction around the medial axis.

The above methods have in common that they dismiss noise or non-described parts of the data. An offset construction based on the external mesh would transfer the errors towards the internal mesh. The method we propose in Section 3 is based on a medial axis (organs shape are 0-genus) to preserve a relation between the outer surface and the inner layers. A qualitative and quantitative comparison between our new approach and other methods is then achieved.

### 3 Geometric Approach from a Parametric Medial Axis

Our requirement is to acquire an internal mesh located at an *offset distance*, to avoid *self-intersections* and to position *properly the inner cavity*. We introduce a Medial Axis Approach (MAA) estimating an initial cavity evolving outwards.

Further to the dataset acquisition by the segmentation step with Itk-Snap [13], the clinician highlights erroneous parts in the shape of the organs. Although the general distribution should be used as a guideline, the use of high frequencies amounts to consider artifacts for the internal mesh. To overcome this issue, the model is based on a curvilinear medial axis of the initial point cloud  $D$ . An inner mesh initialized as a basic extrusion generalized cylinder embedded in the dataset is positioned along this axis, and will evolve outwards to build the internal cavity (cf. Figure 2). The following four steps process details its construction.

**The first step** is the construction of the curvilinear medial axis, computed as described in [2]: a parametric fitting is applied on the dataset with a Bézier curve  $C$ . The curve has two tips ( $P_A$  and  $P_B$ ) which belongs to  $D$ . The axis  $P_A P_B$  describes the main direction (obtained by a PCA) of the point cloud.

**The second step** positions circles along this axis to initialize the inner mesh. To know how many circles we need, we consider the sampling of the parametric surface  $S$ . Let  $\{M_{i,j}^0\}_{i,j=0}^{n,m}$  be the external mesh (a uniform discretization of  $C^2$  surface  $S$ ). One of the parametric direction starts from one tip  $P_A$  to the second tip  $P_B$ . The second sampling direction can be considered *orthogonal* to the travel

direction of the organ. We will build therefore  $(m+1)$  circles, orthogonally to the medial axis (the normal to each circle is parallel to the tangent vector where the circle is positioned). In order to build a conformal mesh, each circle will have  $(n+1)$  points like the mesh  $M^0$ . A 1 mm radius is applied for each circle (threshold chosen to define a minimum value for the thickness of the internal cavity of the organs). We first need to calculate the  $(m+1)$  centers. Let  $\{M_{i,j}^1\}_{i,j=0}^{n,m}$  be the internal mesh to compute and  $\{c_j\}_{j=0}^m$  the centers. For  $0 < j < m$ , the center  $c_j$  is determined as the projection of the isocurve barycenter created from the points  $M_{\cdot,j}^0$  on the curve  $C$ , calculated with Equation 1:

$$c_j = C \left( \arg \min_s \left( \left\| \frac{\sum_{i=0}^n M_{i,j}^0}{n+1} - C(s) \right\|^2 \right) \right). \quad (1)$$

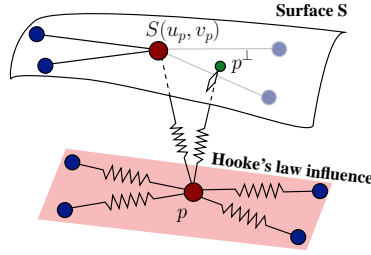
The parameter value  $s_j$  associated to each center  $c_j$  positions the  $j^{th}$  circle on the curve. A special case concerns the centers  $c_0$  and  $c_m$ . Indeed, to close the external mesh, the set  $\{M_{i,0}^0\}_{i=0}^n$  is degenerated in a point  $C(0) = P_A$ . Similarly,  $\{M_{i,m}^0\}_{i=0}^n$  is degenerated in a point  $C(1) = P_B$ . The solution of Equation 1 for  $c_0$  is obviously  $s = 0$ , i.e.  $\{M_{i,0}^1\}_{i=0}^n = C(s=0) = P_A$ . In the same way, the solution for  $c_m$  is  $s = 1$ , i.e.  $\{M_{i,m}^1\}_{i=0}^n = C(s=1) = P_B$ . The two sets  $\{M_{i,0}^1\}_{i=0}^n$  and  $\{M_{i,m}^1\}_{i=0}^n$  are respectively replaced at a distance  $d^*$  from  $P_A$  and  $P_B$  on the curvilinear medial axis ( $d^*$  is determined such that  $d^* \leq d_o$ , with  $d_o$  the *offset distance*). Without this operation, the meshes  $M^0$  and  $M^1$  would be into contact at the tips  $P_A$  and  $P_B$ . This mandatory modification is transmitted to the other centers  $c_j$  so that the sequence  $(c_i)_{i=0}^m$  remains ordered along the medial axis.

**The third step** consists in moving the points  $\{M_{i,j}^1\}_{i=0}^n$  of each circle  $j$  to avoid a crossed mesh between  $M_0$  and  $M_1$ . For the  $j^{th}$  circle, we initialize uniformly the points  $\{M_{i,j}^1\}_{i=0}^n$ . We orientate the circle to have the shortest Euclidean distance between  $M_{0,j}^0$  and  $M_{0,j}^1$ , then we calculate the total length between each segment of  $M_{\cdot,j}^0$ . Each point of  $M_{i,j}^1$  with  $i \geq 1$  is repositioned so that to the length  $\|M_{i,j}^1 M_{i+1,j}^1\|$  is proportional to  $\|M_{i,j}^0 M_{i+1,j}^0\|$  regarding the total length of  $M_{\cdot,j}^0$ .

**The fourth step** is finally the iterative deformation of the initialized inner mesh outwards. The system is governed by the satisfaction of the following constraints to authorize the displacement of a point according to Equation 2. If one condition is not satisfied, the displacement of  $M_{i,j}^1$  is rejected:

1. *Local intersection*: quadrangles associated with  $M_{i,j}^1$  are not crossed;
2. *Global intersection*: segment  $[M_{i,j}^0 M_{i,j}^1]$  does not cross quadrangle of  $M^1$ ;
3. *Test of distance*: distance from  $M_{i,j}^1$  to its projection on  $S$  is inferior to  $d_o$ .

Newton-type orthogonal projection method is used. The process ends when all vertices are stationary. The new position at time  $t + \Delta t$  for  $M_{i,j}^1$  is computed



**Fig. 3.** The six-springs lattice of the MSS.

as follows, with  $\Delta x > 0$  the displacement step:

$$M_{i,j}^1(t + \Delta t) = M_{i,j}^1(t) + \Delta x \frac{\overrightarrow{M_{i,j}^1(t)M_{i,j}^0(t)}}{\|M_{i,j}^1(t)M_{i,j}^0(t)\|}. \quad (2)$$

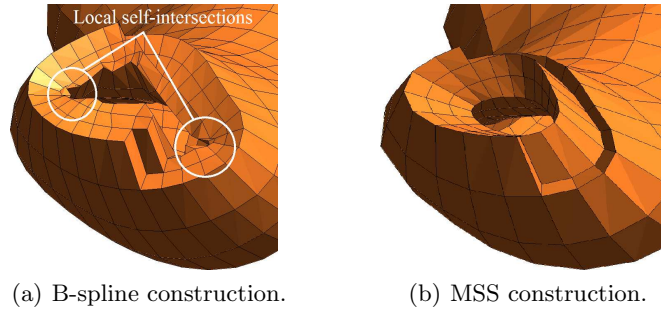
A volume mesh without boundaries and with an internal cavity is therefore created. According to FEM experts, deformation calculations would be more accurate with nearly uniform hexaedral elements like cubes in the mesh. Since the thickness is not neglected, the distance between the outer and the inner meshes is too large compared to the constant discretization step. Several layers are generated by cutting the connections between the two meshes according to a used-defined distribution function.

According to Equation 2, the thickness is used as stopping criterion, implying that a thickness map could be integrated easily in the process. We could thus obtain a generalized offset.

## 4 Results and Comparisons

We compare results of B-spline, MSS and MAA constructions of offsets. The simulations were performed with an Intel Core i7 M620 (2.67 GHz, 4 GB RAM). The chosen thickness is 5.5 mm for the bladder and the rectum [8]. The point clouds describing the bladder and the rectum have respectively 45K points and 21K points. To evaluate our approach, we propose first to compare it with a B-spline parametric offset obtained by surface fitting of *offset points* [2] (each sample point of the outer B-spline surface is shifted of the *offset distance* along the normal vector and the new set of points is smoothed with a  $C^2$  closed B-spline surface) and second to work on a full discrete method with a MSS [7] (whose lattice is given Figure 3).

**Comparison 1** highlights the difference of reconstruction quality between the parametric approach and the MSS to build a rectum. The first one is based on the least squares, which enables us to average the errors between the approximating surface and the *offset points* to fit. However, a proper offset can not be built due to overlaps of the hexaedra in case of high curvature (cf. Figure 4(a)).



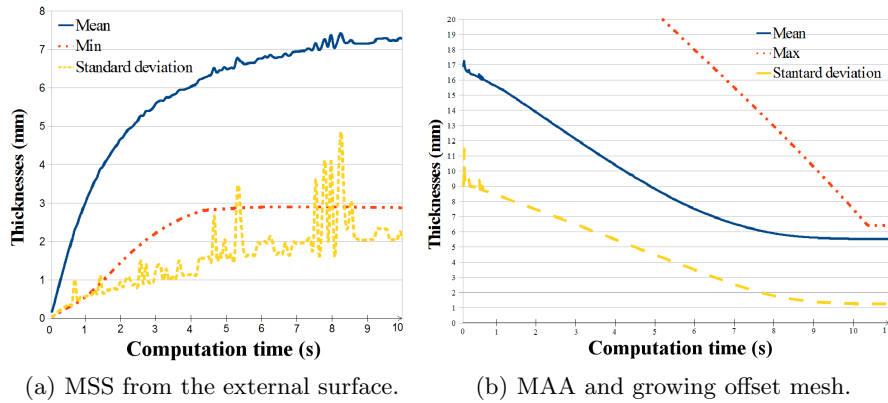
**Fig. 4.** Volume mesh of a rectum with three layers.

The MSS is based on an elastic regularization for each sampled point  $p$  of the inner mesh through a six-springs lattice and three internal forces: a stretching force defined from the Hooke's law is represented by four springs between  $p$  and its 1-neighborhood on the inner mesh; a linking force moderates the *sliding* of the internal mesh inside the shape, by associating each point  $p$  and the point on  $S$  with the same parametric location  $(u_p, v_p)$ ; an orthogonal force pulls the internal mesh in an orthogonal direction in spite of the *sliding*, and corresponds to an orthogonal projection  $p^\perp$  of  $p$  on  $S$  (dynamically modified). In the MSS case, poor quality quadrangles are corrected easily by increasing locally the tension with the springs stiffness (the increase is thresholded to avoid degeneration of the whole mesh). The inner mesh contracts and a mesh without self-intersections is obtained (cf. Figure 4(b)). Finally, the B-spline approach is more time-consuming with 34 seconds, while the MSS performs in 10 seconds.

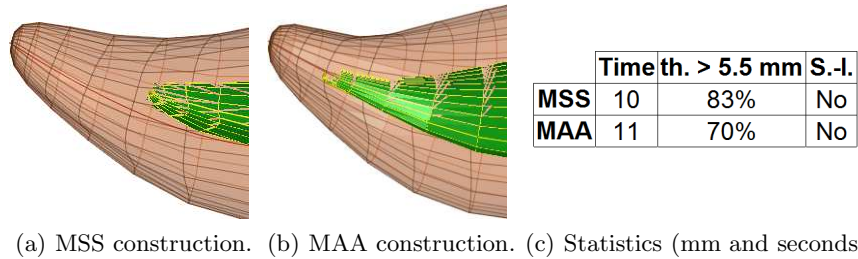
**Comparison 2** insists on the difference of robustness and stability between the MSS and the MAA to build a bladder (which has a shape which is relatively near to a sphere). Figures 5(a) and 5(b) show the evolution of the thickness of the inner mesh over computation time. We can notice that the MAA is very stable all along the iterations. *A contrario*, the standard deviation for the MSS fluctuates a lot, even for this simple shape. MSS systems are difficult to control. With the lattice described in Figure 3, we have  $12(n+1) \times (m+1) + 3$  parameters for a set of  $(n+1) \times (m+1)$  particles (mainly coming from stiffness and rest length of the springs). As a consequence, the thickness for the MSS is farther from the 5.5 mm objective thickness than the MAA.

**Comparison 3** emphasizes the difference of reconstruction quality between the MSS and the MAA with a rectum. Indeed, the MSS in Figure 6(a) manages the self-intersections by contracting the inner mesh with the springs stiffness. Figure 6(b) illustrates the fact that the organs have a direction of travel (associated with their physiological function). We consider that the cavity has to cover the maximum of the travel, and does not have to be too far from the ends. This distance can be managed with  $d^*$  in the MAA, but such a control is not





**Fig. 5.** Evolution of the thickness over time for a 5.5 mm thick bladder construction.



**Fig. 6.** Extremity of two rectum meshes and quantitative comparison between the MSS and the MAA (S.-I.: self-intersections, th.: thickness).

possible with the MSS. Figure 6(c) indicates that more elements have reached the expected thickness with the MSS than with the MAA. But our medial axis method maximizes the travel in the organ and goes therefore in narrower areas (implying a lower percentage of elements that have reached the objective thickness) so that it is closer to physiological reality.

## 5 Conclusions and Future Works

In our method, we have avoided errors transfers inwards from the surface describing the organs by building the inner cavity directly from the point cloud. The method is not based on *a priori* knowledge. The cavity expands without self-intersections until it reaches the appropriate volume. Our MAA approach estimates the positioning of the cavity, which yields a necessary but not sufficient heuristic to overcome the lack of knowledge about the inside of the organs.

About the future works, the first improvement would transform the process into a variational approach to have a convergent method. The second one would

be to obtain a thickness map in order to improve our physiological accuracy. We could then build the set uterus/vagina (very different in terms of thickness and indissociable in the MRI images), and evaluate the results on all pelvic organs.

## Acknowledgements

This work is supported by the French National Research Agency, under reference “ANR-09-SYSC-008”.

## References

1. Bay, T., Chambelland, J.C., Raffin, R., Daniel, M., Bellemare, M.E.: Geometric modeling of pelvic organs. In: IEEE EMBS (ed.) 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. pp. 4329–4332. Boston, USA (2011)
2. Bay, T., Chen, Z.W., Raffin, R., Daniel, M., Joli, P., Feng, Z.Q., Bellemare, M.E.: Geometric modeling of pelvic organs with thickness. In: Baskurt, A.M., Sitnik, R. (eds.) Three-Dimensional Image Processing and Applications II. vol. 8290, pp. 82900I–1–82900I–14. Burlingame, USA (2012)
3. Farouki, R.: The approximation of non-degenerate offset surfaces. In: CAGD. vol. 3, pp. 15–43. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands (1986)
4. Hoschek, J., Schneider, F.J., Wassum, P.: Optimal approximate conversion of spline surfaces. In: CAGD. vol. 6, pp. 293–306. Elsevier Science Publishers B. V. (1989)
5. Kulczycka, M.A., Nachman, L.J.: Qualitative and quantitative comparisons of B-spline offset surface approximation methods. In: CAD. vol. 34, pp. 19–26. Elsevier Science Publishers B. V. (2002)
6. Kumar, G.V.V.R., Shastry, K.G., Prakash, B.G.: Computing non-self-intersecting offsets of NURBS surfaces. In: CAD. vol. 34, pp. 209 – 228 (2002)
7. Provot, X.: Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior. In: Graphics Interface. pp. 147–154 (1996)
8. Schuenke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M., Wesker, K.: Neck and Internal Organs, vol. 20, chap. 2. Thieme Medical Publishers (2010)
9. Seong, J.K., Elber, G., Kim, M.S.: Trimming local and global self-intersections in offset curves/surfaces using distance maps. In: CAD. vol. 38, pp. 183–193. Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA (2006)
10. Shinya, M.: Theories for Mass-Spring Simulation in Computer Graphics: Stability, Costs and Improvements. In: IEICE - Transactions on Information and Systems. vol. E88-D, pp. 767–774. Oxford University Press (2005)
11. Sun, Y.F., Nee, A.Y.C., Lee, K.S.: Modifying free-formed NURBS curves and surfaces for offsetting without local self-intersection. In: CAD. vol. 36, pp. 1161–1169 (2004)
12. Volino, P., Magnenat-Thalmann, N.: Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation. In: Ip, H.H.S., Magnenat-Thalmann, N., Lau, R.W.H., Chua, T.S. (eds.) Computer Graphics International Proceedings. pp. 265–274. IEEE Computer Society (2001)
13. Yushkevich, P., Piven, J., Hazlett, H., Smith, R.G., Ho, S., Gee, J., Gerig, G.: User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: Significantly improved efficiency and reliability. In: NeuroImage. vol. 31, pp. 1116 – 1128. Academic Press Inc Elsevier Science, San Diego, CA, USA (2006)

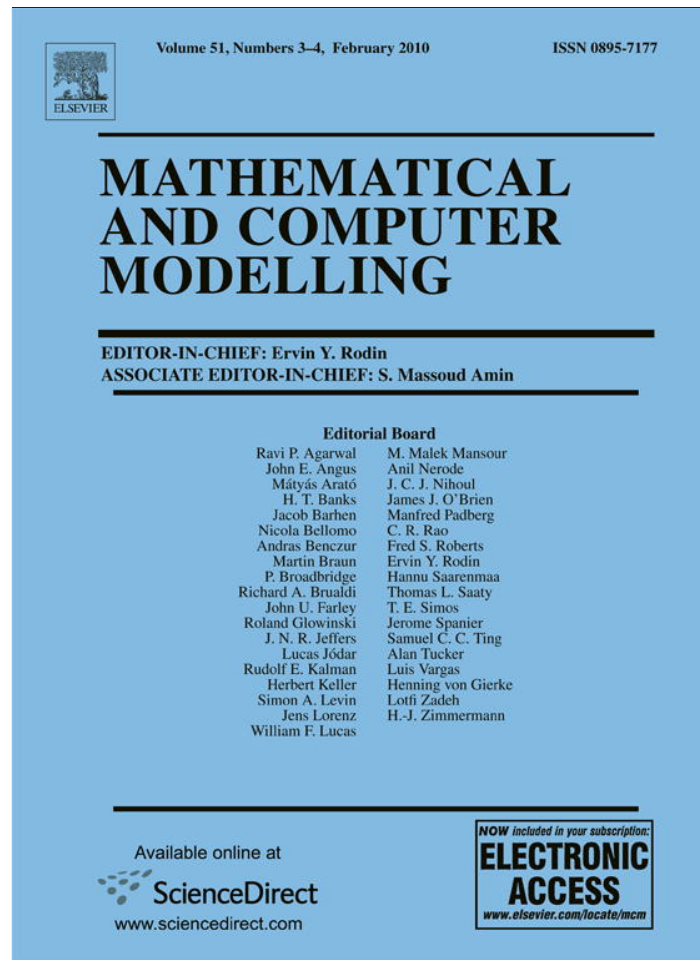
## Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces

Cette publication illustre le travail effectué avec le LE2I (S. Lanquetin, M. Neveu) sur la déformation géométrique de surfaces de subdivision. Nous y expliquons comment utiliser une déformation de type (*Free-Form Deformation* (FFD, cf. [SP86]) sur un maillage de subdivision. L'extension de la méthode SCODEF proposée ([BD93] [BR94] [Raf00]) pendant mon travail de doctorat peut s'appliquer sur des objets de descriptions variées. Nous avons utilisé les travaux de thèse de S. Lanquetin [Lan04] pour suivre la déformation tout au long des étapes de subdivision. De nouveaux outils sont donc mis à disposition des infographistes pour la déformation de surfaces de subdivision, en posant des points ou des lignes de contraintes (courbes de Bézier dans l'exemple de l'article) et en spécifiant un lieu géométrique à atteindre après déformation. Les contraintes d'enveloppe d'influence (pour diffuser la déformation du point de contrainte à son voisinage) sont prises en compte comme dans le cas classique d'un maillage statique.

Cette publication a été faite dans la revue *Mathematical and Computer Modelling* en 2010.

Référence :

S. Lanquetin, R. Raffin, and M. Neveu. Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(Issues 3-4):189–199, february 2010



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

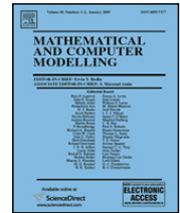
In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

# Mathematical and Computer Modelling

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/mcm](http://www.elsevier.com/locate/mcm)

## Curvilinear constraints for free form deformations on subdivision surfaces

Sandrine Lanquetin<sup>a,\*</sup>, Romain Raffin<sup>b</sup>, Marc Neveu<sup>a</sup><sup>a</sup> LE2I, UMR CNRS 5158, UFR des Sciences et Techniques, Université de Bourgogne, BP 47870 21078 DIJON Cedex, France<sup>b</sup> LSIS, UMR CNRS 6168, Université de Provence, rue raoul Follereau 13200 Arles, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Subdivision surfaces  
Free form deformation  
Curvilinear constraint  
Deformation  
Adaptive subdivision

### ABSTRACT

This paper presents a method to deform a subdivision surface with curvilinear constraints. It combines an intuitive free form deformation with a Loop subdivision algorithm. The main advantage of this method of deformation is that it uses only vertices of an object and satisfies the geometrical constraints provided by the user. It permits us to control the final shape of the deformed object, defining the range (i.e. the impact) of the deformation before applying it. The deformation takes into account the Loop properties to follow the subdivision scheme, allowing the user to fix some curvilinear constraints at the subdivision level he works on and to render the final object at the level he wants to. As the deformation uses an influence area defined by the user, we have implemented an adaptive object subdivision driven by the deformation influence.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

Subdivision surfaces were introduced in 1978 by Catmull–Clark [1] and Doo–Sabin [2] as an extension of the Chaikin algorithm [3]. These surfaces are now widely used in computer graphics. They enable us to generate smooth surfaces, either in geometric modelers, CAD applications or animation movies. The subdivision process easily generates a smooth surface from arbitrary meshes but the control of the mesh is more difficult because meshes are often computed from one level of subdivision to the next one by approximating subdivision rules. Large parts of modeling actions are made by the user, implying up and down changeover from the modeling subdivision level to the smooth rendering one. Thus, in this paper, we focus on tools to define deformations on subdivision surfaces, guaranteeing the deformation given by the user, whatever the level of subdivision.

Among the existing methods to modify or deform subdivision surfaces, Schweitzer [4] proposes a mathematical formulation for the subdivision surfaces and the displacement of mesh vertices. This method generates the wished surface but the user cannot use it because of the lack of interactivity. Indeed, the user has to modify the subdivision matrix which is not intuitive at all. Lee defines a deformation of the surface normals whereas Ehmann and Khodakovsky use methods based respectively on weights linked to the surface vertices or on a perturbation curve which modifies the successive subdivision process [5–7]. However, these methods are based on the mathematical expression of the subdivision surfaces which is not trivial for a common user.

Free Form Deformation (FFD) is widely used in modeling software [8]. The principle is to embed an object into a grid of controls points. Thus the object vertices are described in the grid referential, and any control point displacement modifies the underlying object. Agron [9] works on FFD of subdivision surfaces. He gives an easy way to interact with the subdivision mesh

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [slanquet@u-bourgogne.fr](mailto:slanquet@u-bourgogne.fr) (S. Lanquetin), [romain.raffin@up.univ-mrs.fr](mailto:romain.raffin@up.univ-mrs.fr) (R. Raffin), [mneveu@u-bourgogne.fr](mailto:mneveu@u-bourgogne.fr) (M. Neveu).

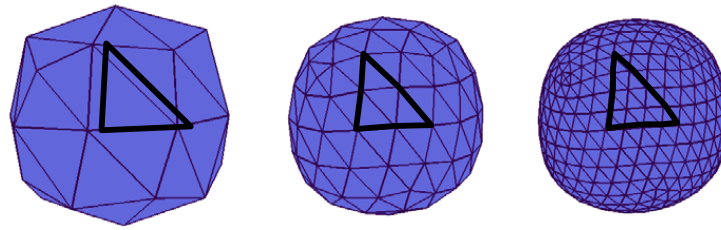


Fig. 1. Example of subdivision surface with the Loop scheme.

since the FFD hides the description of the surface. Some methods more user-friendly, based on FFD, can be used [10–12]. Their common principle is that the user chooses a point to be deformed, if possible an influence area for the deformation or a displacement path, and the deformation model ensures the satisfaction of these constraints. The *a priori* perception of the resulting object is very intuitive and the computation of the resulting object is very fast.

After a brief recall on the subdivision surfaces and on the deformation model we use, we define in this paper the process to deform a subdivision surface with an intuitive deformation method. This deformation is based on a constraint, a path of deformation and an influence area. The constraint can be a point or a polygonal curve; we focus on the point constraint in Section 3 and on the polygonal curve constraint in Section 4. In Section 5, some significant results are presented. We use simultaneously this deformation process and an adaptive subdivision to generate more faces in the influence area.

## 2. Loop subdivision surfaces and deformation methods

### 2.1. Subdivision surfaces

Subdivision surfaces are widely used in character animation (such as Geri's Game<sup>®</sup> or Finding Nemo<sup>®</sup>) to smooth models. Indeed, from a coarse mesh, successive refinements give finer meshes. A sequence of subdivided meshes converges towards a smooth surface called the *limit surface*. Since the beginning of subdivision surfaces, many subdivision schemes were proposed: some are approximating and others are interpolating (i.e. control vertices of successive meshes belong to the limit surface).

Subdivision surfaces are among the easiest ways to generate smooth surfaces. They preserve both advantages of NURBS and polygonal meshes. We choose the Loop scheme [13] to apply our results because most of the meshes are currently triangular (triangular meshes provided by geometric modelers, triangulated meshes reconstructed from laser range images...). We will discuss in Section 5.1 the reasons why we do not use an interpolating scheme (such as the butterfly scheme). Even if an approximating scheme involves some problems (that we will have to solve in Section 3 and Section 4, we will see that it produces nicer results. An example of Loop subdivision is shown at Fig. 1. The Loop scheme generalizes quadratic triangular B-splines and the limit surface obtained is a quartic Box-spline. This scheme is based on splitting faces: each face of the control mesh at the refinement level  $n$  is subdivided into four new triangular faces at the level  $n + 1$ . This first step is illustrated in Fig. 1. Consider the face surrounded in black (Fig. 1, left): new vertices – named *odd vertices* – are inserted in the middle of each edge (Fig. 1, middle), and those of the initial face are named *even vertices*. In the second step, all vertices are displaced by computing a weighted average of the vertex and its neighbouring vertices [13]. The subdivision process can be iterated an infinite number of times.

### 2.2. Deformation model

If many deformation methods exist, the major parts of them are linked to the representation of the object to be modified. The Free Form Deformations model on which we base our work wish to be independent of representation models. It consists of a space deformation as in Barr [14], acting only on points without taking into account topology, geometry or neighbourhood information. A frequently used method, Sederberg's FFD [8], embeds the object to be deformed in a parallelepipedal lattice of control points, expressing any object point in the lattice referential and allowing the user to deform the initial object by modifying this control grid. The deformation can be local if the lattice is just surrounded a part of the object. An extension has been made to support lattices of arbitrary topology by Coquillart [15].

The same general principle exists in the DOGME model where punctual deformation constraints are defined [10]. The initial object is embedded in a space of higher dimension to solve the constraints set and then projected in 3D or 4D space to obtain the deformed object. This method has been made more practical by the definition of a radius of influence surrounding a constraint point and a deformation function  $\tilde{f}$  (SCODEF, [16]). The closest an object point is to the deformation constraint and the more it is deformed (see Fig. 2). If a mesh vertex corresponds to the constraint point, it is deformed by the constraint vector, conversely if it lies outside the influence, it is not deformed. To follow the decreasing deformation from the constraint point to the influence boundary, the authors use a nonlinear function  $\tilde{f}$  (B-spline basis).

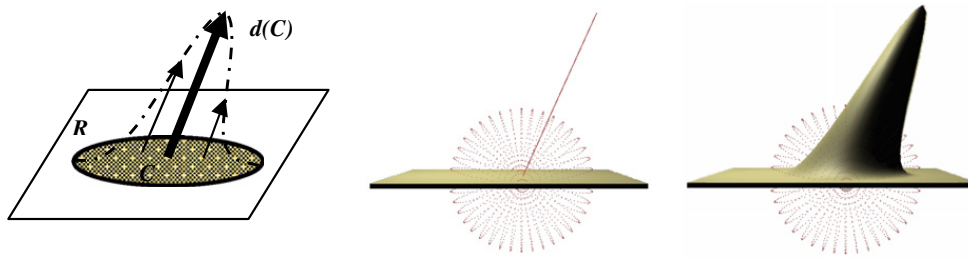


Fig. 2. The SCODEF method in action: a constraint  $C$  with an influence radius  $R$  is applied on a plane.

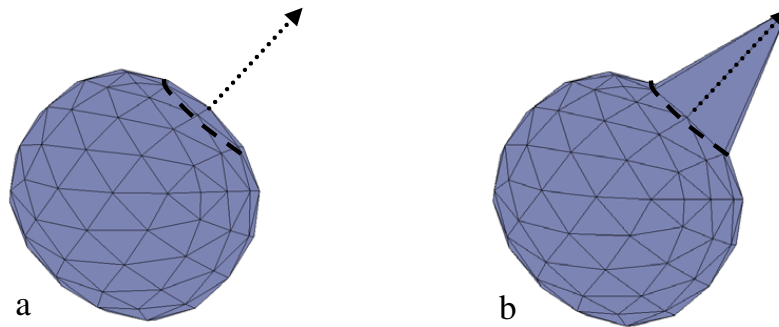


Fig. 3. Control mesh deformation by a SCODEF constraint at a given level (the influence area is highlighted with a dashed line and the path of the deformation is a vector represented by a dotted line).

Raffin extends in [11] this deformation model with the definition of constraint curves; various influence sets (star-shaped solids) called influence hulls and paths of deformation that replace the initial vector between the constraint point and its deformed location. The following work is based on this method and applied on subdivision surfaces.

### 3. Point constraint for free form deformation on subdivision surfaces

In this section, we apply the deformation method on subdivision surfaces, taking into account some interesting properties of these surfaces. We describe our work on the Loop scheme but it can be also applied in the same way on any triangular scheme. Actually, our method cannot be performed on other schemes (non-triangular). The chosen deformation is a constrained free form deformation. Whatever the subdivision level, the user defines a constraint, an influence area and a path of deformation. From these constraints, two methods of deformation are possible. The first method consists in deforming the mesh at a given level of subdivision and then subdividing the deformed mesh. The second method ensures that the deformation set by the user is respected for any subdivision level.

#### 3.1. Two ways to perform punctual constraint deformations

The first method is straightforward. Free form deformations can be applied to any object since the point coordinates, the constraint point, the path of deformation and the influence area are known. Indeed, once the constraint is defined, every point of the mesh is treated as shown in Fig. 3. The initial object (Fig. 3a) is deformed to obtain the resulting mesh of the Fig. 3b.

In the simple example shown on Fig. 3, only the constraint point belongs to the influence area. It is the only point to be moved when the deformation is applied. Fig. 4 shows the deformation obtained on a more complex example. According to the definition of the constrained free form deformation, the constraint point undergoes the deformation imposed by the user. The displacement of the points in the influence area is larger when the points are close to the constraint point. The points lying out of the influence area are not moved.

Figs. 3 and 4 show a deformation which is not followed by any subdivision. In Fig. 5 we subdivide three times the deformed mesh and thus we loose the constraint satisfaction. As the Loop scheme is approximating, the deformation is gradually “eroded”. The achieved deformation does not correspond any more to the constraint set by the user; it is much less significant.

This deformation can be sufficient if the user does not want to ensure that the mesh interpolates one point. On the contrary, if the size of the deformation must absolutely correspond to the deformation fixed by the user, it is necessary to proceed differently. We have to keep the deformation constraints settings (constraint point, displacement, influence) along the successive subdivision levels. A solution consists in performing the deformation on each subdivision level. This will preserve the displacement amplitude but the constraint point is not lying anymore on the mesh due to the Loop subdivision (the constraint point is moved of its initial position).

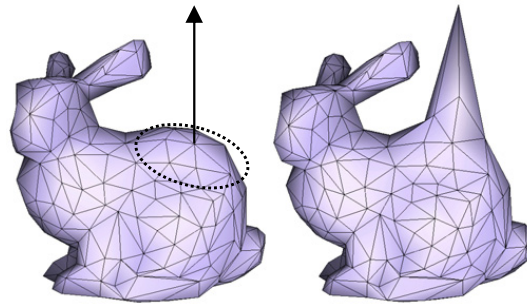


Fig. 4. Deformation of the bunny model.

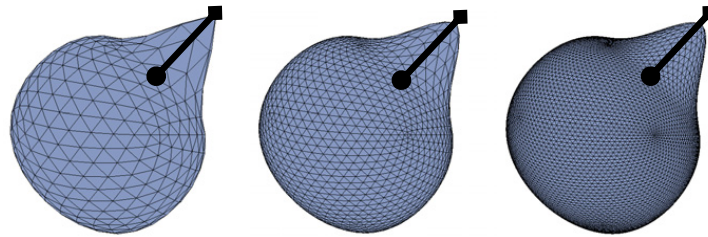


Fig. 5. Successive subdivisions of the mesh deformed in Fig. 3: the constraint is no more satisfied.

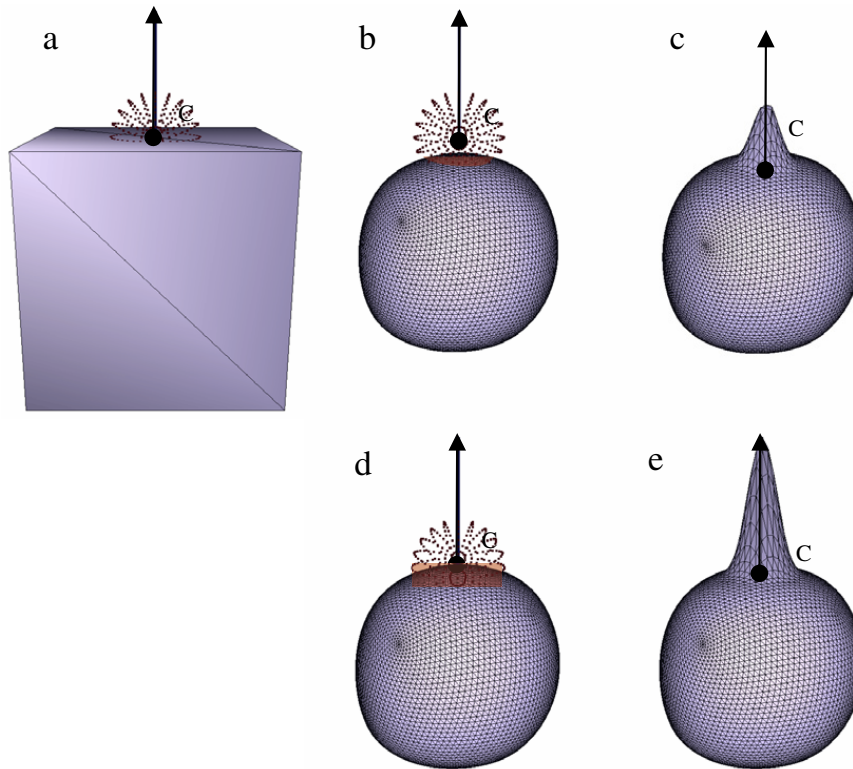
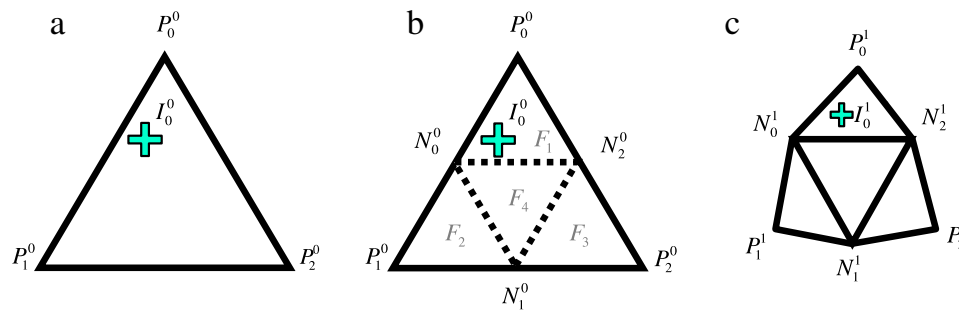


Fig. 6. (a) Initial mesh and deformation constraint. (b) Subdivided mesh keeping the constraint location. (c) Result of the deformation defined in (b). (d) Subdivided mesh, the constraint is stuck to the mesh. (e) Result of the deformation defined in (d).

Fig. 6a shows the initial mesh (a cube) and the deformation constraint. After five subdivisions, the mesh is eroded by subdivision and we can notice that the influence area is not centered any more on the mesh. Consequently, the number of vertices influenced by the deformation is much less significant (only the vertices in the red area in Fig. 6b are influenced). Even if the deformation can be performed, the resulting mesh does not satisfy the constraint (Fig. 6c).

To avoid this unwanted displacement of the constraint point, we need to “stick” the constraint point on the mesh along the subdivision process (Fig. 6d). The influence area (in red) keeps roughly the same size as in Fig. 6a. So we compute the image of the constraint point at any level of the subdivided mesh. Then we will use this image as the new constraint point and the initial displacement constraint will be preserved (Fig. 6e).





**Fig. 7.** (a) Step 1: determination of the face  $F$  containing  $I_0^0$ . (b) Step 2: splitting the face  $F$ , inserting the new vertices:  $N_0^0, N_1^0, N_2^0$ . (c) Step 3: image  $I_1^1$  of  $I_0^0$  in the next subdivision level.

### 3.2. Image of the constraint point at successive subdivision levels

The method presented in [17,18], based on the Loop scheme [13], permits the follow-up of a point lying on the surface from one subdivision level to the next one.

If we consider any point  $I_0^0$  on the mesh surface (i.e.  $I_0^0$  belongs to a face but is not necessarily a mesh vertex), we have first to determine the face of the control mesh the point  $I_0^0$  belongs to (Fig. 7a). For this purpose, we use the classical area property of triangles.<sup>1</sup> Then we subdivide the face  $(P_0^0, P_1^0, P_2^0)$  into sub-faces, adding the middle-point of edges  $N_0^0, N_1^0, N_2^0$  (Fig. 7b). The triangle surface property is again applied to determine the sub-face containing the constraint point  $I_0^0$ . We can find the barycentric coordinates of  $I_0^0$  in the sub-face,  $F_i \in \llbracket 1, 4 \rrbracket$ . For the example of Fig. 7b, the point  $I_0^0$  belongs to the face, and it depends on  $P_0^0, N_0^0, N_2^0$ . Finally, we compute the new coordinates  $P_1^1, N_0^1, N_2^1$  of  $P_0^0, N_0^0, N_2^0$  with Loop masks. Then the point  $I_1^1$  is obtained with the barycentric coefficients previously found. The result is a new point,  $I_1^1$  (image of  $I_0^0$ ), which lies on the mesh (Fig. 7c).

The process can be iterated on successive subdivision levels to follow any point on the mesh. From this, the user can define a deformation at a given level, and this deformation will stick on the successive meshes obtained by subdivision. The resulting shape thus corresponds to the user's request. See, for instance, Figs. 17, 19 and 20.

## 4. Curve constraints for free form deformations on subdivision surfaces

In this section, we generalize the free form deformation from a point constraint explained in the previous section to a polygonal curve constraint. To apply this deformation, we again have to take into account some interesting properties of subdivision surfaces. In a way similar to the point constraint free form deformation, the user defines a polygonal curve constraint, an influence area and a path of deformation. From these constraints, two methods of deformation are possible. The first method consists in deforming the mesh at a given level of subdivision and then subdividing the deformed mesh. The second method requires respecting the deformation fixed by the user for any subdivision level. It implies to follow the constraint polygonal curve from a level to the next one.

### 4.1. Two ways to perform curve constraint deformations

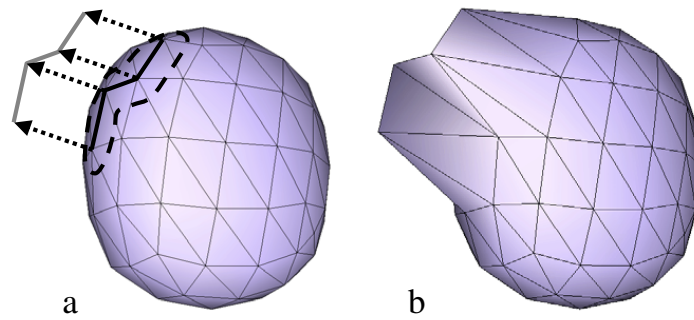
The first method is straightforward. As for the constraint point deformation, free form deformations can be applied to any object since the point coordinates, the constraint polygonal curve, the path of deformation and the influence area are known. Indeed, once the constraint is defined, every point of the mesh is treated as shown in Fig. 2. The initial object (Fig. 8a) is deformed to obtain the resulting mesh of the Fig. 8b. Fig. 9 illustrates meshes obtained by subdividing three times the deformed mesh and the loss of the constraint satisfaction. As the Loop scheme is approximating, the deformation is gradually eroded as in Section 3.

As in the previous section, the closest a point is to the curve and the more it is deformed. Conversely, when a point exceeds the influence area, it is not deformed.

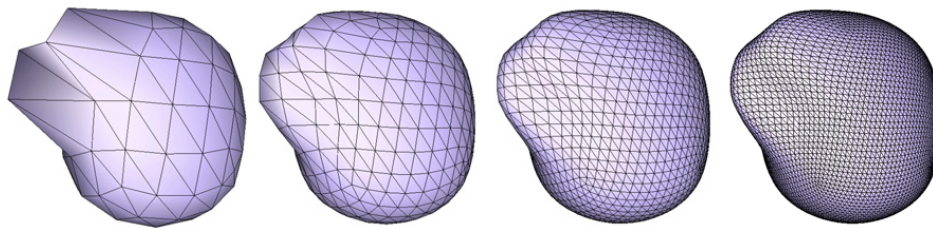
Fig. 10 illustrates a curve constraint deformation on a more complex model.

To provide an intuitive deformation method, as in Section 3, we have to keep the deformation constraints (constraint polygonal curve location on the mesh, displacement, influence) along the successive subdivision levels. So, we need to compute the image of the constraint polygonal curve at any level of the subdivided mesh to avoid the “escape” of the constraint polygonal curve. Then we will use this image as the new constraint polygonal curve and the initial displacement constraint will be preserved.

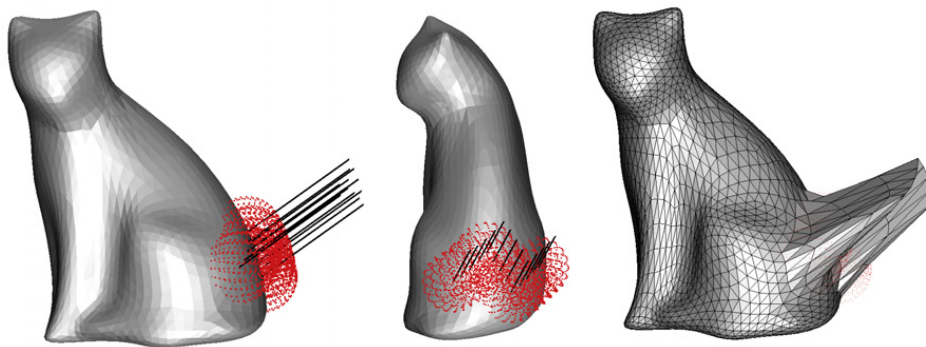
<sup>1</sup>  $P \in (ABC)$  if and only if  $Area(ABP) + Area(BCP) + Area(CAP) = Area(ABC)$ .



**Fig. 8.** Control mesh deformation by a SCODEF constraint at a given level (the constraint polygonal curve is in black, the influence area is highlighted with a dashed line, the path of the deformation is a vector represented by a dotted line and the polygonal curve corresponding to the maximum deformation is in grey).



**Fig. 9.** Successive subdivisions of the mesh deformed in Fig. 8.



**Fig. 10.** Deformation of the cat model.

4.2. Image of the constraint polygonal curve at successive subdivision levels

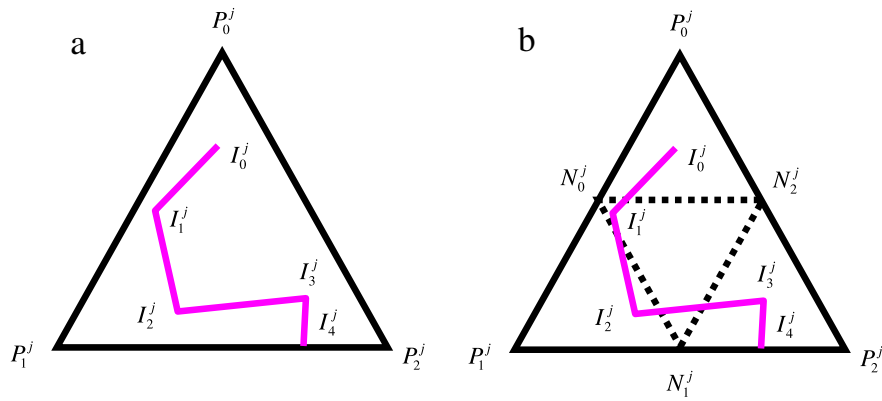
As in Section 3.2, we have to follow a point on the surface from one level to the next one. We just extend the method to a polygonal curve lying on a subdivision surface.

Let  $C_j$  be a polygonal curve at level  $j$  defined by the  $k$  points  $I_i^j, i \in \llbracket 0, k \rrbracket, k \in \mathbb{N}$ . The first step consists in finding for each point  $I_i^j$  of  $C_j$  the face it belongs to. After this, let  $I_i^j$  and  $I_{i+1}^j$  be two consecutive points of the polygonal curve  $C_j$ , we have to determine the face common to these two points. The problem is now reduced to compute the image of the polygonal curve from a face to the sub-faces of this face at the next level (Fig. 11a).

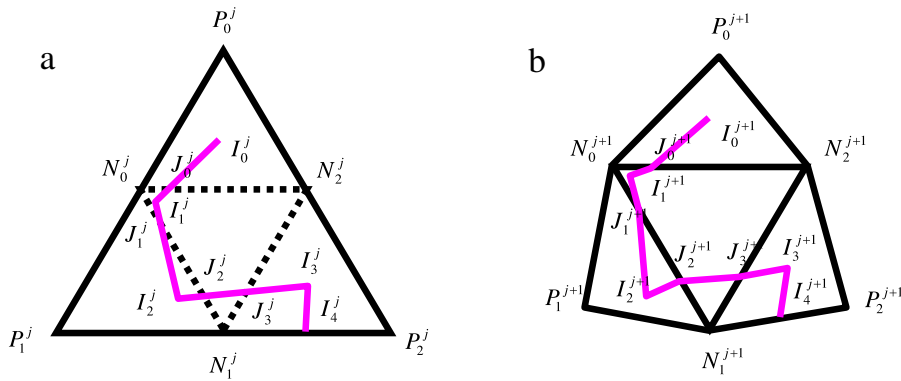
Then we subdivide this face  $(P_0^j, P_1^j, P_2^j)$  into sub-faces, adding the middle-point of edges  $N_0^j, N_1^j, N_2^j$  (Fig. 11b). To the points of the polygonal curve we add the intersection points  $J_l^j$  between the edges  $[I_i^j, I_{i+1}^j]$  and  $[N_l^j, N_{(l+1) \bmod 3}^j], l \in \llbracket 0, 2 \rrbracket$ . The new polygonal curve obtained is shown in Fig. 12a. The new points  $P_l^{j+1}$  and  $N_l^{j+1}$  can now be computed by applying the Loop masks on every points  $P_l^j$  and  $N_l^j$  respectively,  $l \in \llbracket 0, 2 \rrbracket$ . Moreover, the new points  $I_i^{j+1}$  and  $J_l^{j+1}$  are computed with the barycentric method explained in Section 3.2. The result is a new polygonal curve  $C_{j+1}$  which lies on the mesh (Fig. 12b).

The process can be iterated on successive subdivision levels to follow any polygonal curve on the mesh. From this, the user can define a deformation at a given level, and this deformation will stick on the successive meshes obtained by subdivision. The resulting shape will thus correspond to the user’s request. For instance, Fig. 13 shows several deformations on the cat model.

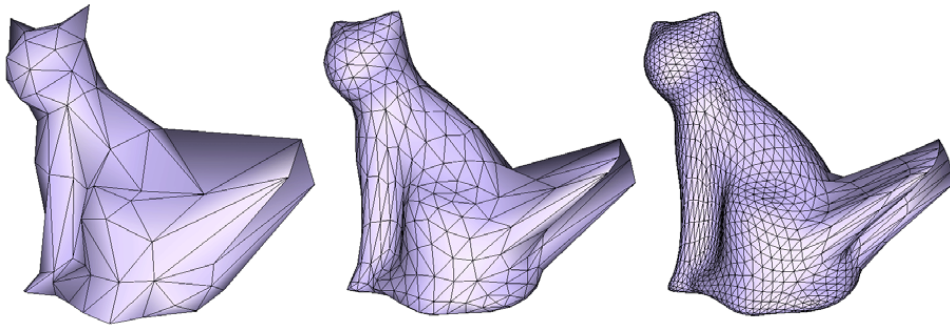
With this process the user can also choose a closed polygonal curve as constraint as shown in Fig. 14.



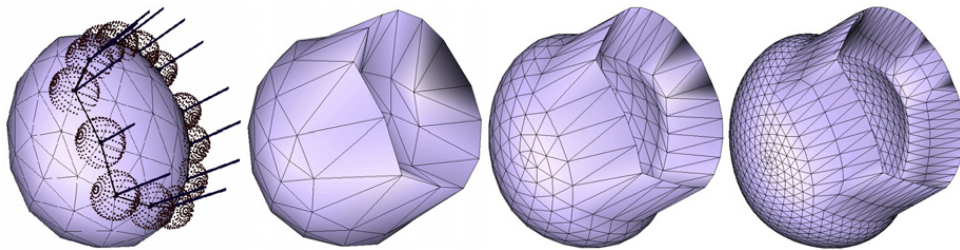
**Fig. 11.** (a) Determination of the face  $F$  containing the curve  $C_j$ . (b) Splitting the face, inserting the new vertices:  $N_0^j, N_1^j, N_2^j$ .



**Fig. 12.** (a) Introduction of the intersection points  $J_i^j$  between the edges  $[I_i^j, I_{i+1}^j]$  and  $[N_l^j, N_{(l+1) \bmod 3}^j]$ . (b) Image  $C_{j+1}$  of the polygonal curve  $C_j$  on the next subdivision level.



**Fig. 13.** Successive subdivisions with a curve constraint deformation.



**Fig. 14.** Successive deformations of an egg model.

### 4.3. Location problem of the curve constraint

We focus the reader's attention on the artefacts that the deformation can raise (see Fig. 16). If the curvilinear constraint is not composed with vertices of the object (which is the most likely configuration) the deformation cannot be ensured. This

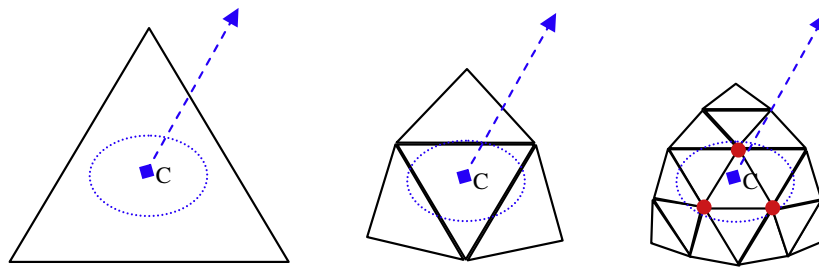


Fig. 15. Example of an unused deformation, which can be useful at a higher level of subdivision.

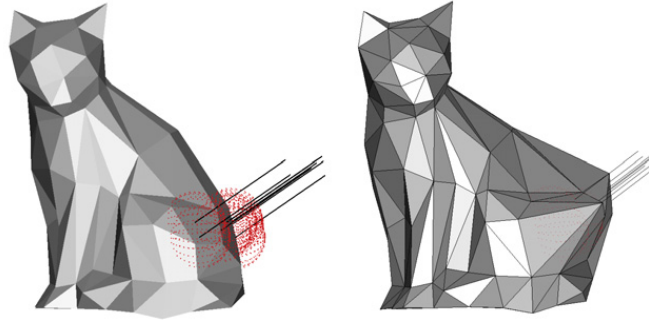


Fig. 16. Example of a deformation which is never maximal.

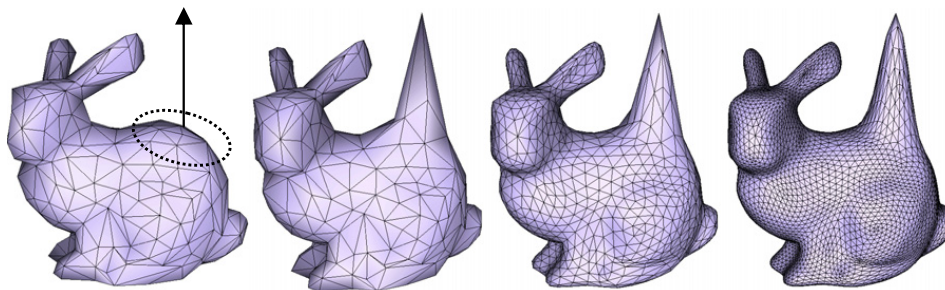


Fig. 17. Three deformed meshes obtained by following the constraint point on successive subdivisions of the bunny model.

is due to the deformation process: it works on a finite set of object points. If a point of the object does not lie within the influence area of the constraint (punctual or curvilinear), it is not deformed. If a constraint influences some points of the object, but if there is no point that exactly corresponds to the constraint, then the deformation is achieved on the object points but never with a maximal displacement. The mesh of the object needs to be refined (mainly in the neighbourhood of the constraint) to provide more points to the deformation process in order to ensure the satisfaction of the displacement constraint.

As seen in Fig. 15, for a punctual constraint, if the constraint is not chosen among the vertices of the mesh, the user needs to subdivide the initial object to perceive the deformation.

Moreover, if the constraint polygonal curve is composed of vertices which do not belong to the mesh, the displacement can be much less significant than what was initially foreseen as shown in Fig. 16. As the constraint points are not mesh vertices, their displacement is computed as linear combination of the vertices of faces to which they belong. However, these points are far away from the constraint, their displacement is thus not maximal.

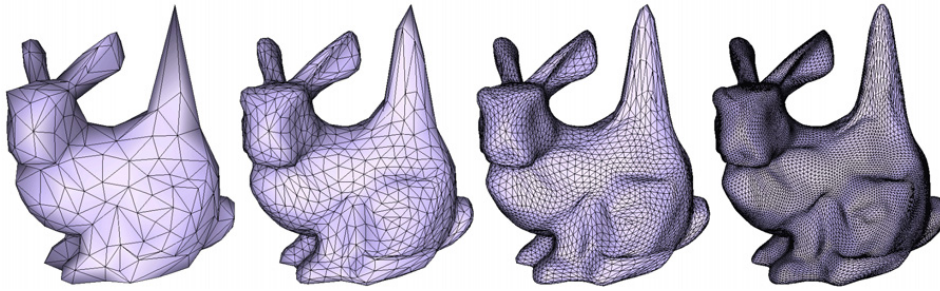
## 5. Discussion and results

### 5.1. Replacement of the successive deformations by an interpolating scheme

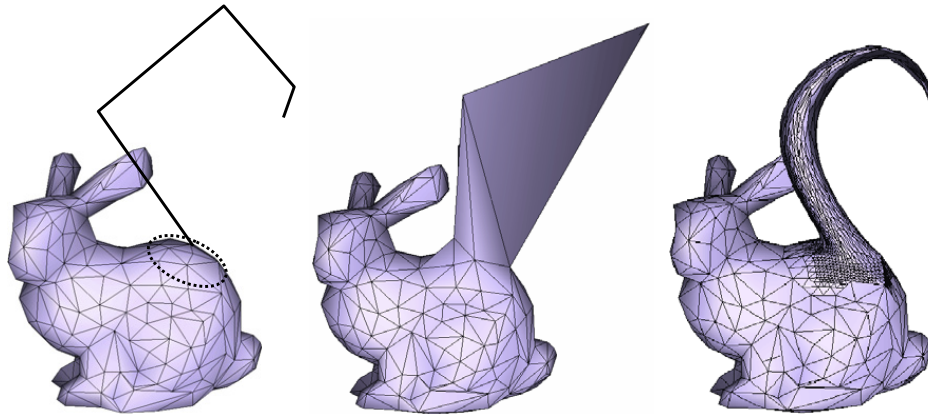
Once the method to track the constraint point from a level to the next one is defined, we can easily deform a subdivision surface. Let us consider the example introduced in Fig. 4. Now a deformation which follows every level of subdivision can be performed. Thus, Fig. 17 shows deformed meshes obtained at three different levels of subdivision.

With our method, deformations are carried out at each level of subdivision. Could this be avoided by using an interpolating subdivision scheme after deformation?

We have to distinguish between two levels of interpolations. The first one takes place in the deformation process. The second one concerns the subdivision process.



**Fig. 18.** From the bunny model deformed Fig. 4, the interpolating butterfly scheme is applied twice.



**Fig. 19.** A complex deformation on a bunny mesh. The deformation is defined by a constraint point and a curvilinear path of displacement. The influence area (dotted circle on the left image) is a superellipsoid.

As far as the deformation process is concerned, the constraint free form deformation can be performed at the initial level. Then the mesh can be subdivided as many times as needed. Performing a deformation at each subdivision level is heavy but really uses the deformation function  $\tilde{f}$  giving the exact result. Due to the non-commutativity of interpolation and deformation, interpolation at successive levels after only one deformation using  $\tilde{f}$  cannot give the true result (although both methods give the same deformation amplitude).

Concerning the subdivision process, the problem comes from the interpolating scheme itself: interpolating schemes create well known artefacts (bulges, bumps...) as illustrated in Fig. 18. Some interpolating schemes avoid these artefacts and are used in hierarchical deformations [19]. But they need a vertex of the mesh to be selected to perform the deformation. There is no more the notion of influence area. Moreover, the constraint cannot be located elsewhere than on a mesh vertex.

Despite of this, this interpolating solution can be appropriate in particular cases according to the wish of the user.

### 5.2. Punctual deformations with curve displacement

The displacement of the deformed vertices can be more complex, as shown in Fig. 19(left) and can follow a displacement path. This result is obtained by using properties of the deformation model [11]. In this example, the displaced points of the mesh follow a 3D curve (Bezier) determined by its control points. Faces in the influence area are first geometrically refined (this is not a subdivision) because of the important number of vertices needed to draw the curved shape. Finally, the deformation is performed as previously. Fig. 19 illustrates the deformation without refinement (middle) and with refinement (right).

This method can create cracks in the mesh, and the surface cannot be subdivided anymore because the topology of the mesh is not conformal. Indeed, some interior edges are not shared by only two faces. The use of adaptive subdivision avoids this drawback.

### 5.3. Adaptive subdivision for complex deformations

Instead of refining the faces of the influence area, the user can choose to subdivide only these faces by using a local scheme. Fig. 20 illustrates a Bezier deformation where faces in the influence area are subdivided in the non-uniform Loop scheme introduced in [20]. Contrary to the preceding case, the topology of the mesh is conformal.

When the constraint is a polygonal curve, the subdivision can be also performed to generate more faces in the influence area.

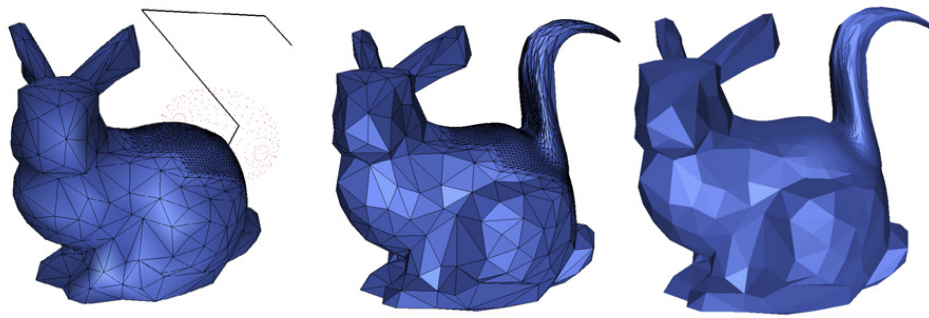


Fig. 20. An adaptive subdivision is performed on the faces of the influence area before applying the deformation on the bunny model.

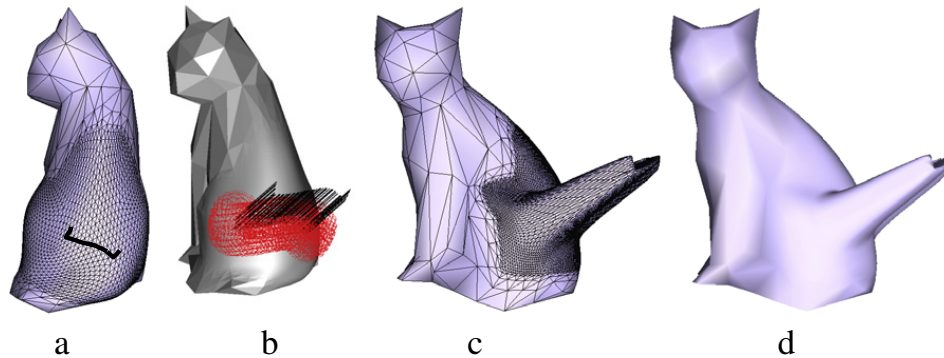


Fig. 21. An adaptive subdivision is performed on the faces of the influence area before applying the deformation on the cat model.

Table 1

Time costs for the cat deformation (polygonal curve constraint).

Subdivision level	Number of triangles	Number of constraints	Subdivision time (s)	Deformation time (s)
0	114	8		0.031
1	896	16	0.032	0.094
2	3584	34	0.093	0.312
3	14336	60	0.36	1.234
4	57344	120	1.937	4.875
Local subdivision (level 3)	2928	34	1.302	3.986

Fig. 21 illustrates this case on the cat model for which the constraint is an arbitrary polygonal curve on the mesh and the path of deformation is rectilinear. From left to right, the figure illustrates the constraint polygonal curve on the mesh adaptively subdivided (a), the path of deformation and the influence area (b), the deformed mesh with faces drawn (c) or not (d). A local subdivision of the deformation influence area permits to minimize the problem of constraints not lying on object vertices. It also gives a finest resulting object with a low computational and memory cost (compared to a very fine global subdivision).

#### 5.4. Time cost

Table 1 shows the processing time for the deformation of the cat model with direct punctual constraints (as in Fig. 10). The test platform is an Intel Pentium 4, 3 GHz, 1 Go RAM. The first four lines are given for a global Loop subdivision scheme. The total cost is the summation of the subdivision cost and of the deformation cost. Globally, the subdivision cost is roughly exponential and depends on the number of faces  $n^i$  generated at any subdivision level  $i$  ( $n^{i+1} = 4 * n^i$ ). For the deformation step, the number of constraint points increases from one subdivision level to the next one (approximately with a factor of two). But the cost is still related to the number of faces because we need to compute the distance from any point within the influence area to the constraint curve and then displace points.

Table 2 illustrates another example: the Bezier deformation of the bunny with a punctual constraint (Fig. 20). We notice a better performance both for the subdivision step and for the deformation with an adaptive subdivision.

## 6. Conclusion and future works

In this paper, we proposed a new deformation tool to model complex objects with subdivision surfaces. This method is easy to perform and provides a wide range of deformations by combining the constraints (point or curve) and the path of

**Table 2**

Time costs for the bunny deformation (punctual constraint).

Level	Loop			Adaptive loop		
	Number of faces	Subdivision time (s)	Deformation time (s)	Number of faces	Subdivision time (s)	Deformation time (s)
0	592		0.032	710		0.032
1	2368	0.048	0.094	1076	0.032	0.063
2	9472	0.188	0.312	2402	0.047	0.156
3	37888	1.032	1.094	7458	0.078	0.578
4	151552	5.719	4.547	27310	0.187	2.219

deformation. Indeed, the curvilinear constraints can be arbitrarily chosen on the mesh and the path can be any curve. The deformation enables to set geometric deformation constraints that are satisfied after computation and exactly kept along the subdivision levels. Finally, we can use a better deformed mesh, which can be first locally subdivided in the influence area of the constraint point. If the user wishes the deformation to reach a given point, the solution is to perform the deformation at each subdivision level. Our method is not time consuming since the deformation only acts on points of the mesh. This process has a very low time cost comparing to the subdivision process.

A future improvement concerns the “object to constraint” distance. This distance is used in the computation of the amount of deformation for every point in the influence area. We use a Euclidean distance for the moment, but a geodesic distance (or an approximate geodesic distance) would probably be more suitable on subdivision surfaces.

A second important improvement would be the manipulation of parametric curves on the mesh surface instead of polygonal curve constraints (see [21]). The main problem is to ensure the curve to lie on the surface. Moreover, the constraint can be extended to a surface constraint, involving surface to surface deformation.

## References

- [1] E. Catmull, J. Clark, Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes, *Computer Aided Design* 9 (6) (1978) 350–355.
- [2] D. Doo, M. Sabin, Behaviour of recursive subdivision surfaces near extraordinary points, *Computer Aided Design* 9 (6) (1978) 356–360.
- [3] G. Chaikin, An algorithm for high speed curve generation, *CGIP* 3, 1974, pp. 346–349.
- [4] J.E. Schweitzer, Analysis and application of subdivision surfaces, Ph.D. Thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1996.
- [5] A. Lee, H. Moreton, H. Hoppe, Displaced subdivision surfaces, in: *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, 2000, pp. 85–94.
- [6] S. Ehmman, A. Gregory, M. Lin, A touch-enabled system for multiresolution modeling and 3D painting, *Journal of Visualization and Computer Animation* (2001).
- [7] A. Khodakovsky, P. Schröder, Fine level feature editing for subdivision surfaces, in: *Symposium on Solid Modeling and Applications*, 1999, pp. 203–211.
- [8] T.W. Sederberg, S.R. Parry, Free-form deformation of solid geometric models, in: *Proceedings of Siggraph'86*, vol. 20, no. 4, 1986.
- [9] P. Agron, Free form deformation of subdivision surfaces, Course paper; Spring 2002, SUNY Stony Brook.
- [10] P. Borrel, D. Bechmann, Deformations of  $n$ -dimensional objects, Research Report, IBM Research Division, 1990.
- [11] R. Raffin, M. Neveu, F. Jaar, Curvilinear Displacement of Free-From Based Deformation, in: *The Visual Computer*, vol. 16, Springer-Verlag Editions, 1999, pp. 38–46.
- [12] H. Shi-Min, Z. Hui, T. Chiew-Lan, S. Jia-Guang, Direct manipulation of FFD: Efficient explicit solutions and decomposable multiple point constraints, *The Visual Computer* 17 (2001) 370–379.
- [13] C. Loop, Smooth subdivision surfaces based on triangles, Department of Mathematics: Master's Thesis, University of Utah, 1987.
- [14] A.H. Barr, Global and local deformations of solid primitives, *Computer Graphics* 18 (3) (1984) 21–30.
- [15] S. Coquillart, Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling, *ACM Computer Graphics* 24 (4) (1990).
- [16] P. Borrel, A. Rappoport, Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design, *ACM Transactions on Graphics* 13 (2) (1994) 137–155.
- [17] S. Lanquetin, Study of subdivision surfaces: Intersection, accuracy and depth of subdivision, Ph.D. Thesis, University of Burgundy, France, 2004 (in French).
- [18] S. Lanquetin, R. Raffin, Constrained free form deformation on subdivision surfaces, in: *Advances in Computational Methods in Sciences and Engineering 2005*, Selected papers from the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Volume 4A, Theodore Simos, Loutraki, Greece, 2005, pp. 311–314.
- [19] A. Yvart, S. Hahmann, G.P. Bonneau, Hierarchical triangular splines, *ACM Transactions on Graphics* 24 (4) (2005) 1374–1391.
- [20] S. Lanquetin, M. Neveu, A new non-uniform Loop scheme, in: *International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)*, Setúbal, Portugal, 2006 (in press).
- [21] J. Loviscach, H. Thole, Creating and editing curves on subdivision surfaces, *sibgrapi*, in: *XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAP'03*, 2003, p. 75.

## B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions

Les recherches accomplies pendant la thèse de Khoi Nguyen Tan portaient sur la liaison discret-continu dans les surfaces de subdivision. Dans le cadre de la CAO et de la métrologie (après production d'une pièce) il est intéressant de comparer la surface initiale (obtenue par une modélisation paramétrique) et la surface produite (obtenue par numérisation par palpeur mécanique). Notre idée fût donc de partir du maillage quadrangulaire de la numérisation et de remonter à une surface de subdivision par subdivisions inverses. Si le procédé est connu et bien que le maillage obtenu par subdivision inverse permette de décrire le maillage numérisé, la surface limite (B-spline) ne peut être comparée à la surface initiale, de même que les deux surfaces de subdivision initiales. Cette perte est due à la contraction de la subdivision choisie (schéma de Catmull-Clark). Cet article présente donc une méthode géométrique de compensation de la contraction, en calculant l'écart dû à la contraction et en le réintégrant dans le maillage quadrangulaire numérisé. La méthode est comparée numériquement à un algorithme de reconstruction aux moindres carrés (Least-squares fitting, [Ebe08]).

Cette publication a été présentée en 2009 à la conférence *IEEE International Conference on Computing and Communication Technologies, RIVF* à Da Nang, Vietnam.

Référence :

Khoi Nguyen-Tan, Romain Raffin, Marc Daniel, and Cung Le. B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions. In *Proc. International Conference on Computing and Communication Technologies RIVF '09*, pages 1–4, July 13–17, 2009



# B-spline surface reconstruction by inverse subdivisions

Khoi NGUYEN-TAN<sup>a</sup>, Romain RAFFIN<sup>b</sup>, Marc DANIEL<sup>c</sup>  
 LSIS, UMR CNRS 6168, 13288 Marseille cedex 09 – (France)  
<sup>a</sup>khoi.nguyen-tan@univmed.fr, <sup>b</sup>romain.raffin@lsis.org  
<sup>c</sup>marc.daniel@esil.univmed.fr

Cung LE  
 CRePA, PFIEV, DaNang University  
 DaNang, VietNam  
 k.spkt@ud.edu.vn

**Abstract** - This paper presents a method to reconstruct a B-spline surface from a quadrangular mesh, using an inverse Catmull-Clark subdivision. We want to minimize the surface contraction due to the approximating subdivision scheme. We introduce geometrical operations which minimize the impact of the subdivision approximation and can be used in the parametric surface reconstruction. The quality of the method is evaluated by criteria of distances, curvatures or computing time on experimental results.

**Keywords** : Reconstruction, B-spline surface, Catmull-Clark, inverse subdivision, Data compression.

## I. INTRODUCTION

In this paper we present a method to reconstruct an uniform bicubic B-spline surface [7] from a quadrangular mesh using an inverse Catmull-Clark subdivision. As the inverse subdivision can be stopped after each step, different surfaces can be obtained. The higher the number of steps, the better the data reduction, but the larger the reconstruction error.

The two main contributions in this paper is an efficient method to reconstruct an uniform bicubic B-spline surface using an inverse Catmull-Clark subdivision scheme (UISS) is exposed, and the criteria to evaluate the surface reconstruction quality are introduced.

## II. RELATED WORKS IN SURFACE RECONSTRUCTION

Reconstructing a parametric surface is a well-known problem. [6] proposes an approximation algorithm using the Catmull-Clark method for a NURBS surface. Based on this work, [8] proposes a method to convert a Catmull-Clark subdivision surface into a Bézier surface. In [9], the authors apply the method in [6] to convert a surface into a NURBS representation.

Our method is based on an inverse subdivision to reconstruct an uniform bicubic B-spline surface from a quadrangular initial mesh. As we consider the Catmull-Clark subdivision scheme [1], it converges by definition towards an uniform bicubic B-spline surface (called the limit surface). The control polyhedron of this limit surface is the initial subdivision mesh [2][5].

## III. CATMULL-CLARK SUBDIVISION AND INVERSION

The main idea of the subdivision scheme is to define a continuous surface (the limit surface) by successive steps on a

mesh. As the Catmull-Clark scheme is invertible, one can restore recursively all the previous coarser meshes by using the inverse subdivision scheme. We present here the inverse Catmull-Clark subdivision scheme introduced in [4]. It proposes the formulas to exactly reconstruct vertices of the inverse mesh  $M^k$  deduced from the vertices of mesh  $M^{k+1}$ . At each inverse subdivision, three distinguishable classes of points are generated (see Figure 1), namely, the vertex points located in the centre of four old face points, the edge points at the position corresponding of the old edge points and the corner points in place corresponding of the face points.

### 1) Rules of inverse subdivision scheme

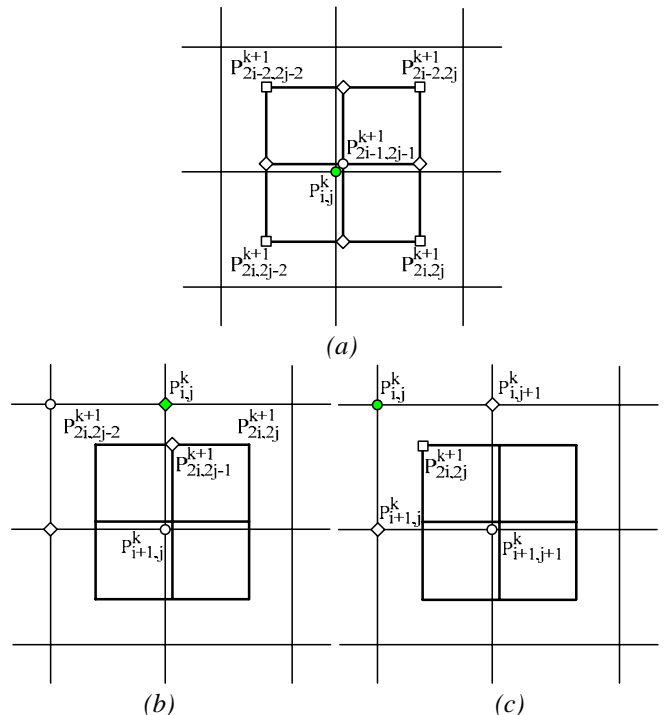


Figure 1. Compute the points  $P_{i,j}^k$  of the mesh inverse subdivision  $M^k$ .

Considering the vertex points, the face points and the edge points of quadrangular mesh  $M^{k+1}$ , the relationship between the vertices of quadrangular mesh  $M^k$  and the corresponding vertices of quadrangular mesh  $M^{k+1}$  are deduced from the previous equations.

The inverse vertex points of mesh  $M^k$  are computed based on formulas in [4] (Figure 1a):

$$P_{i,j}^k = 4P_{2i-1,2j-1}^{k+1} - \left( P_{2i-1,2j-2}^{k+1} + P_{2i,2j-1}^{k+1} + P_{2i-1,2j}^{k+1} + P_{2i-2,2j-1}^{k+1} \right) + \frac{P_{2i-2,2j-2}^{k+1} + P_{2i,2j-2}^{k+1} + P_{2i,2j}^{k+1} + P_{2i-2,2j}^{k+1}}{4} \quad (1)$$

with  $i=1\dots m-2, j=1\dots n-2$ , where  $m=(h+3)\%2, n=(l+3)\%2$ .

The inverse edge points on the top border of mesh  $M^k$  (except the corner points):

$$P_{i,j}^k = 4P_{2i,2j-1}^{k+1} - P_{2i,2j-2}^{k+1} - P_{2i,2j}^{k+1} - P_{i+1,j}^k \quad (2)$$

avec  $i=0, j=1\dots n-2$ ; with  $n=(l+3)\%2$ . Other point's edges of mesh  $M^k$  are compute similarly.

The inverse corner points: For four corner points  $P_{00}, P_{0,m-l}, P_{m-1,0}, P_{m-1,n-1}$  of the mesh  $M^k$  have a valence 2. They are computed based on formula in [4]. Point  $P_{00}$  is computed as follows:

$$P_{i,j}^k = 4P_{2i,2j}^{k+1} - P_{i,j+1}^k - P_{i+1,j+1}^k - P_{i+1,j}^k \quad \text{with } i=0, j=0 \quad (3)$$

Other points are computed in the same way.

To take into account the size of the inverse subdivision mesh for the inverse subdivision process, we propose in the next section formulas to compute the quadrangular mesh size after  $k$  steps of inverse subdivision.

## 2) Finding the mesh size after $k$ inverse subdivision iterations

Let us consider an initial subdivision mesh  $M^k(h, l)$  with  $h$  rows and  $l$  columns. After  $k$  ( $k \geq 1$ ) steps of inverse Catmull-Clark iterations, we have a new coarse mesh  $M^0(m, n)$ ,  $m$  being its number of rows, and  $n$  its number of columns. The number  $k$  of subdivision steps is determined in the following interval:

$$0 < k \leq \min(\lfloor \log_2(h-3) \rfloor, \lfloor \log_2(l-3) \rfloor) \quad (4)$$

with  $(h-3)\%2^k = 0, (l-3)\%2^k = 0$

We can now determine values  $m, n$  depending on a given  $k$ :

$$m = (h-3)/2^k + 3; \quad n = (l-3)/2^k + 3; \quad (5)$$

Considering the quadrangular subdivision mesh  $M^k(h, l)$ , we then apply  $k$  steps of inverse subdivision UISS to quadrangular mesh  $M^k$ . We obtain the coarsest mesh  $M^0(m, n)$  considered as a control polyhedron of an uniform bi-cubic B-spline surface  $S(u, v)$ . However, the borders of parametric surface  $S(u, v)$  are always inside the borders of initial mesh  $M^k$ . To prevent the contraction of surface  $S(u, v)$ , we propose in section 4 an algorithm to extend initial mesh  $M^k$ .

## IV. PROPOSED METHOD

The general overview of our method contains four steps to reconstruct a B-spline surface from an initial quadrangular mesh is shown in Figure 2.

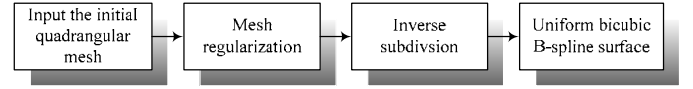


Figure 2. Overview of the reconstruction process.

Step 1: Taking a quadrangular mesh as input.

Step 2: Adjustment of the quadrangular mesh.

Step 3: Inverse subdivision for the regularized mesh

The main steps of our method are the regularization process of the quadrangular mesh and the process of inverse subdivision.

The necessary and sufficient condition for a quadrangular mesh to be used in the inverse subdivision is the mesh size must satisfy the Catmull-Clark scheme. In this step, in order to map the surface boundary curves with the initial mesh borders, we propose to extend the initial mesh to satisfy the condition of the inverse Catmull-Clark subdivision scheme.

- Regularization of the original quadrangular mesh :

Let a quadrangular mesh  $M^k(n, m)$  be defined by  $n$  rows and  $m$  columns (Figure 3a). The extension of this mesh is made by inserting four lines around  $M^k$  borders. The resulting mesh is called "remesh" (Figure 3b, 3c). Re-meshed  $M_{ext}^k$  consists in  $(n+2) \times (m+2)$  points. Starting with the method of reverse Catmull-Clark subdivision scheme, we propose formulas acting with vertices of  $M^k$  to compute the new vertices of the re-meshed  $M_{ext}^k$  borders:

### a. Computation of new vertices on the boundary edges

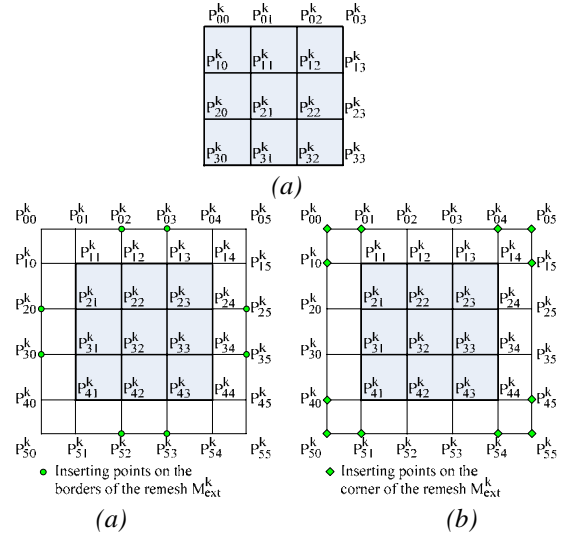


Figure 3. Mesh extension by insertion of new border points.

The inner points  $P_{02}^k, P_{03}^k$  are computed based on the neighboring points (Figure 3b):

$$P_{02}^k = 4P_{12}^k - P_{11}^k - P_{13}^k - P_{22}^k; \quad P_{03}^k = 4P_{13}^k - P_{12}^k - P_{23}^k - P_{14}^k,$$

Other inner points of the boundary edges are calculated in the same way.

#### b. Computation of the four new corner points

Considering the three corner points  $P_{00}^k$ ,  $P_{10}^k$  and  $P_{01}^k$  on the top left corner of re-meshed  $M_{ext}^k$ , we must determine the positions of these points. The relationships between these points are given by the following formulas:

- Points  $P_{10}^k, P_{01}^k$  are computed based on existing points  $P_{11}^k, P_{12}^k, P_{21}^k$ . Suppose that point  $P_{11}^k$  is the average of neighboring points  $P_{01}^k, P_{21}^k, P_{10}^k, P_{12}^k$  (Figure 3c). We have:

$$P_{11}^k = (P_{10}^k + P_{12}^k + P_{01}^k + P_{21}^k) / 4 \quad (5)$$

- $P_{01}^k$  is the average of  $P_{00}^k, P_{02}^k$  and  $P_{10}^k$  is the average of  $P_{00}^k, P_{20}^k$ :

$$P_{01}^k = (P_{00}^k + P_{02}^k) / 2 \quad (6)$$

$$P_{10}^k = (P_{00}^k + P_{20}^k) / 2 \quad (7)$$

Solving (5), (6) and (7), we find the formulas for the new vertices  $P_{00}^k, P_{01}^k, P_{10}^k$  in the top left corner of re-meshed  $M_{ext}^k$ .

Repeating this algorithm for other corner points of re-meshed  $M_{ext}^k$ , we construct the new expanded mesh. The parametric surface reconstruction is evidently dependent on formulas (5), (6) and (7), and also depends on the initial quadrangular mesh density.

## V. EVALUATION OF THE RECONSTRUCTION METHOD

As our initial mesh is a sampling of a B-spline surface, we have the opportunity to introduce specific criteria: the distances from the reconstructed parametric surface to the initial parametric surface and a curvature comparison of the two surfaces. Our method provides a fitting of the initial mesh by a B-spline surface. We can also compare our result with the well-known least squares fitting approximation of a B-spline surface [3][7]. The computing times are compared.

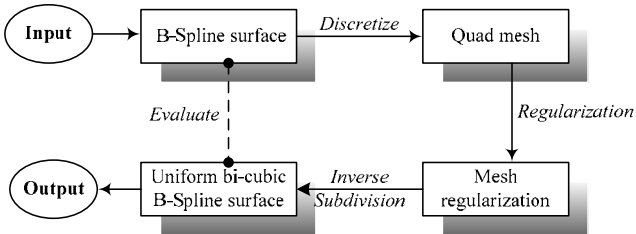


Figure 4. Evaluation process of our inverse Catmull-Clark subdivision method.

Steps to evaluate our method are illustrated in Figure 4. It is important to note that this process has been set up to accurately evaluate our method.

We note  $S(u, v)$  the initial B-spline surface;  $M(m, n)$  is the mesh discretization obtained by the discretization of surface  $S(u, v)$ , and  $S'(u, v)$  an uniform bi-cubic B-spline reconstructed surface. We evaluate our reconstruction method with:

- The minimum and maximum distances between surfaces  $S$  and  $S'$ .
- The curvature comparison of surfaces  $S$  and  $S'$ .
- The comparison of the computing time between our method and a least square surface approximation.

#### 1) Distances between both surfaces

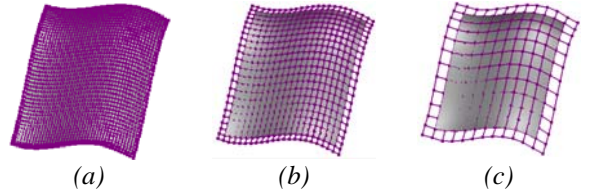


Figure 5. Surface reconstruction after  $k = 1, 2$  or  $3$  steps of inverse Catmull-Clark subdivision.

We use an initial quadrangular mesh  $M$  of size  $81 \times 81$  points. The size of the expanded mesh is  $83 \times 83$  points. We have to choose a limit value  $k$  ( $k=1, 2, 3$ ), number of steps of the inverse Catmull-Clark subdivision. Based on formulas (4) and (5), we can determine the size of the coarsest mesh  $M^0$  after  $k$  steps of inverse subdivision. Figure 5 illustrates the resulting B-spline surface after  $k$  steps of inverse Catmull-Clark subdivision: in Figure 5a,  $k = 1$ ; in Figure 5b,  $k = 2$ ; in Figure 5c,  $k = 3$ ; the sizes of coarsest meshes  $M^0$  corresponding to values of  $k$  are respectively  $(43 \times 43)$  points,  $(23 \times 23)$  and  $(13 \times 13)$  points.

k	$D_{max}$	$D_{aver}$
1	0.0216	0.0108
2	0.0680	0.0340
3	0.1937	0.0968

TABLE I. DISTANCE FROM INITIAL SURFACE  $S$  TO SURFACE  $S'$ .

In order to compute the distance between the two surfaces, we discretize the surface  $S'(u, v)$  with a dense mesh  $M_d$ , then we compute the maximum, minimum et average distances  $D_{max}$ ,  $D_{min}$  and  $D_{aver}$  between the sample point meshes  $M_d$  and the initial surface  $S(u, v)$ . The results are presented in Table 1 (the  $D_{min}$  are always 0 whatever the step value and are not shown).

Figure 6 shows surface  $S'$  for an initial mesh ( $161 \times 161$  points) which has a more complex curvature distribution after  $k=1, 2, 3$  inverse subdivision steps.

As expected, the higher the number of inverse Catmull-Clark subdivisions, the greater the maximum distance. On the other hand, the number of control points is reduced. A compromise has to be found.

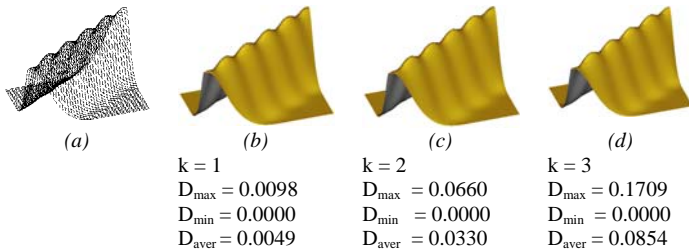


Figure 6. Distances between (a): the initial parametric surface  $S$  and the parametric reconstructed surfaces  $S'$ .

### 2) Curvature comparison

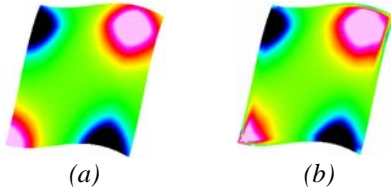


Figure 7. Comparison of the Gaussian curvature: (a) initial surface  $S$  and (b) reconstructed surface  $S'$ .

Figure 7 shows the Gaussian curvature of the surface proposed in Figure 5: initial surface  $S$  and its approximation after  $k=2$  steps of inverse Catmull-Clark subdivision. Even without the color scale, one can clearly see the quality of our reconstructing method, as the couple of curvature images are strongly similar. Figures 8a, 8b show the mean curvature of surface  $S$  and  $S'$ . Figures 8c, 8d show the absolute curvature of these surfaces. As in Figure 7, the images show that the surface shape is well approximated.

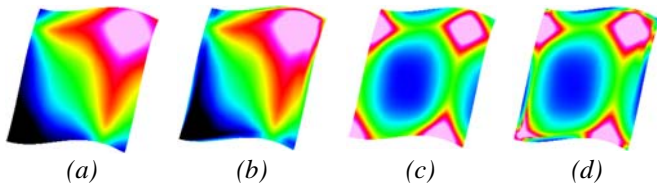


Figure 8. Comparison of the mean curvature and the absolute curvature of surfaces. (a)(c)- initial surface  $S$  and (b)(d)- its reconstruction  $S'$ .

### 3) Computing time comparison

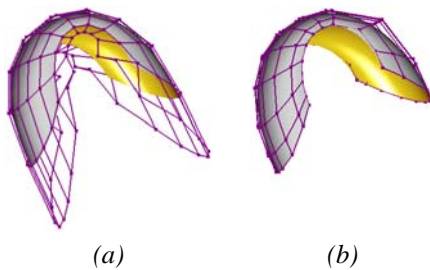


Figure 9. The computing time for the reconstruction methods (a): inverse subdivision inverse  $T=16\text{ms}$ ; (b) Least square surface approximation method  $T=1281\text{ ms}$ .

We consider an initial quadrangular mesh  $M$  defined by  $(129 \times 129)$  discretized points on parametric surface  $S$ . The computing times of the least square surface approximation

method [7], [19] and those of our inverse subdivision method are compared for the same B-spline surface. The size of the resulting control polyhedron obtained by inverse subdivision is  $(11 \times 11)$  (Figure 9). Times indicated in Figure 9 have been measured on a desktop 1.60 GHz dual core with 1GB RAM. As a least square fitting needs a linear system resolution, computing times are evidently largely different.

## VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

We have presented a new method to reconstruct an uniform bicubic B-spline surface from an initial quadrangular mesh. The proposed method consists in two principal steps. One step expands the borders of the initial mesh to overcome the contraction of the subdivision scheme, the other applies an inverse Catmull-Clark subdivision to reconstruct the parametric surface approximation. Experimental results demonstrate the efficiency of our method. The quality of the surface reconstruction is still dependent on the number of inverse subdivision steps, which is an important parameter leading to a fixed number of points on the control polyhedron. The computing time for this approach is far better than those for least square approximation methods. We can finally receive very easily an approximation surface which can be defined by a variable number of control points. The errors are controlled so that we have an efficient data reduction strategy. As we extend the mesh borders, the different meshes have not the same borders and it introduces slight curvature distortions on the borders.

Future works will examine additional methods to regularize and expand the initial quadrangular mesh. We can particularly think of a method that displace vertices of the reconstructed control polyhedron to match, once subdivided, the initial surface. We will also develop this method for initial triangular or irregular (mixed) meshes.

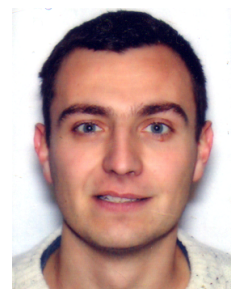
## REFERENCES

- [1] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer Aided Design*, pages 350-355, 1978.
- [2] F. Cheng and J. Yong. Subdivision Depth Computation for Catmull-Clark Subdivision Surfaces. *Computer Aided Design & Applications*, 1-4, pages 485-494, 2006.
- [3] D. Eberly. Least-squares fitting of data with B-spline surfaces. Geometric Tools, LLC, 2008.
- [4] S. Lanquetin and M. Neveu. Reverse Catmull-Clark Subdivision. The 14-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision WSCG, Czech Republic, 2006.
- [5] W. Ma. Subdivision surfaces for CAD - an overview, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pages 693-709, 2005.
- [6] J. Peters. Patching Catmull-Clark meshes. In *SIGGRAPH 2000: Computer Graphics Proceedings*, pages 255-258, 2000.
- [7] L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS Book*. Springer Verlag Berlin, 1997.
- [8] E.J. Stollnitz, R.E. Rice. Approximation of Catmull-Clark subdivision surfaces by Bezier patches. US Patent 6950099, 2005.
- [9] S. Teodosiadis, M. Lounsbery. Conversion of a hierarchical subdivision surface to NURBS. US Patent 6859202, 2005.
- [10] Internationales Symposium Geometrisches Modellieren Visualisieren und Bildverarbeitung, June 28-29, 2007, HfT Stuttgart, Germany.

---

## CURRICULUM VITÆ

# Curriculum vitæ détaillé



Romain RAFFIN

Né le 17 juillet 1971 à Sens (89)  
Marié, 2 enfants  
Maître de conférences en Informatique  
(+33) 413 552 174 / (+33) 674 066 509

## Enseignement

---

IUT de Provence, site d'Arles, Aix-  
Marseille Université  
Département Informatique,  
2 rue R. Follereau,  
BP 90178, 13637 Arles Cedex

## Recherche

---

LSIS - UMR CNRS 7296,  
ESIL - Case 925,  
163, Avenue de Luminy,  
13288 Marseille Cedex 9

Liens :

LSIS UMR 7296 [http://www.lsis.org/~romain\\_raffin.html](http://www.lsis.org/~romain_raffin.html)

IUT Aix-Marseille <http://iut-arles.univ-provence.fr/web/romain-raffin>

Réseau LinkedIn <http://www.linkedin.com/in/romainraffin>

## Formation

1996–2000, Doctorat ès Informatique, « Déformations de formes libres sous contraintes »  
Directeur de thèse Marc Neveu  
Université de Bourgogne, laboratoire LE2I, Dijon.

1993–1994, D.E.A. 3I *Informatique, Instrumentation et Image*, sujet du stage « Déformations de formes libres », tuteur Marc Neveu, Université de Bourgogne, Dijon.

1992–1993, Maîtrise d'Informatique, projet « Surface paramétrique par révolution d'un profil », Synthèse d'images, Base de données, Université de Bourgogne, Dijon.

## Activités Professionnelles

2001– Maître de conférence Informatique, section CNU 27  
IUT de Provence, site d'Arles, département Informatique

2002– Enseignant-chercheur, section CNU 27, CNRS 07  
Modélisation géométrique, courbes et surfaces, maillages, surfaces de subdivision, passage

continu / discret, inter-opérabilité  
Laboratoire LSIS, UMR CNRS 7296, Image/ équipe G-Mod  
1999–2001 ATER Informatique temps plein  
Université de Bourgogne, laboratoire LE2I, Dijon

## Formations dispensées annuellement

- \* dans le **DUT**<sup>1</sup> **Informatique** de l'Iut de Provence, site d'Arles, avec responsabilité des modules :
  - 1<sup>ère</sup> année, Systèmes d'exploitations1, CM/TD/TP/projet, 34h
  - 1<sup>ère</sup> année, Systèmes d'exploitations2, CM/TD/TP/projet, 30h
  - 2<sup>ème</sup> année, Synthèse d'images, CM/TD/TP, 60h
- \* dans la **Licence professionnelle, SIL**<sup>2</sup> « **Imagerie numérique** », avec responsabilité des modules :
  - Systèmes d'exploitation, CM/TD/TP, 25h
  - Synthèse d'images, CM/TD/TP/projets, 65h
- \* dans le **Master2 « Réseaux et multimedia »** de l'Université d'Avignon :
  - M2 pro., « Traitement de données multimedia et transmission », semestre 3, CM/TP/projets, 30h
- \* dans le **Master « SIS » d'Aix-Marseille Université**, avec responsabilités des modules :
  - M2 pro., Im14-2, semestre 3 , « Modèles pour la production d'images : traitement et visualisation de données géométriques à haute-performance », CM/TP/projet, 30h
  - M2 pro., Im9, semestre 1, « Modèles géométriques continus et discrets », CM/TP/projet, 30h

## Encadrements et jurys

Chaque année dans le DUT informatique 5 stagiaires en entreprise (10 semaines), et 2 stagiaires en entreprise de la LP SIL IN (14 semaines). Chaque année également 2 à 3 groupes de Projet tuteur en DUT Informatique et LP SIL IN (3 à 6 étudiants sur 1 à 2 ans). Jury de soutenances de stage et de projets tuteurés (env. 20 par an en DUT, LP, M2). Jurys de semestre, d'année et de diplôme, jury de poursuite d'études (Informatique 2<sup>ème</sup> année).

## Administration, l'IUT DE PROVENCE

2013– Directeur des Études

Dépt. Informatique, Licence Professionnelle SIL « Imagerie numérique », IUT de Provence

2011–2013 Participation à l'élaboration du PPN<sup>3</sup> Informatique 2003, pour « Architecture, Systèmes et Réseaux »

Proposition de 2 modules de Systèmes d'exploitation.

2007–2013 Responsable de matières

Dépt. Informatique, IUT de Provence

« Architecture, Systèmes et Réseaux » A1 A2 LP - respect des consignes, planning, gestion des vacataires

---

1. DUT : Diplôme Universitaire de Technologie

2. SIL : Systèmes Informatiques et Logiciels

3. PPN : Programme Pédagogique National

2011–2012 Membre du GW<sup>4</sup> de fusion « Recherche » des IUT d’Aix-Marseille Université.  
 2007–2011 Responsable de matières  
 Dépt. Informatique, IUT de Provence  
 « Algorithmique et Programmation » - respect des consignes, planning, gestion des vacataires  
 2009–2013 Directeur des Études  
 Dépt. Informatique, 2<sup>ème</sup> année, IUT de Provence  
 Promotions de 35 à 45 étudiants  
 2008 Renouvellement de Licence Professionnelle SIL « Ingénierie 3D », IUT de Provence  
 2004–2008 Directeur des Études  
 Dépt. Informatique, Licence Professionnelle SIL « Ingénierie 3D », IUT de Provence  
 2002–2004 Chargé de mission pour le montage de la Licence Professionnelle SIL « Ingénierie 3D », IUT de Provence  
 2001–2003 Participation au PPN Informatique 2003, groupe de travail de l’option « Imagerie Numérique »

## Recherche et Valorisation

2011–2015 Membre nommé du CNU 27<sup>ème</sup> section  
 2011– Expert AERES pour l’évaluation des licences professionnelles, vagues C, D et E  
 2010– Membre nommé au Conseil de Laboratoire du LSIS  
 2010– Expert TIC<sup>5</sup>  
 DRRT<sup>6</sup> de la Région PACA - Ministère des Finances / MENR, Marseille (en moyenne 3 dossiers CIR<sup>7</sup> par an)  
 2010– Expert Métiers  
 Observatoire des métiers et de l’emploi scientifique (OMES), DRH, CNRS  
 2002– Membre LSIS du Conseil d’Administration, collège « Recherche »  
 PRIDES<sup>8</sup> « Industries Culturelles et Patrimoine »  
 2011– Correspondant de l’IUT de Provence à la CNRIUT, Commission Nationale Recherche des IUT  
 1995– Membre du groupe de travail « Modélisation géométrique »  
 CNRS - GDR Informatique et Mathématiques  
 2007– Membre de l’Association Française d’Informatique Graphique (AFIG)  
 2002– Participations récurrentes à des comités de sélection MCF depuis 2002 Université P. Cézanne, Université de la Méditerranée, Université de Provence, Université de Bourgogne  
 2004 Examineur de la thèse de L. Astart (LSIS, équipe LXAO) « Représentation de surfaces ayant une structure arborescente par un modèle paramétrique », Université de la Méditerranée

---

4. GW : Groupe de travail

5. TIC : Technologies de l’Information et de la Communication

6. DRRT : Direction Régionale de la Recherche et de la Technologie

7. CIR : Crédit Impôt Recherche

8. PRIDES : Pôle Régional d’Innovation et de Développement Économique Solidaire



2008–2013 Membre de l’Open Geospatial Consortium (OGC)  
Membre du chapitre français de l’OGC  
OGC, [www.opengeospatial.org](http://www.opengeospatial.org), observer WorkingGroups « Geometry », « GeoAPI », « CityGML »

2002–2012 Membre nommé « Recherche »  
Conseil d’IUT de l’IUT de Provence

---

2011–2013 Projet « Ephèbe », phase I, AAP « e-services et territoires », ville d’Arles, partenaires : Arts Graphiques et Patrimoine - AGP (numérisation, maquette numérique), Web2s (services Web et base de données), PFT<sup>9</sup> PRISM Aix-Marseille Université (gestion de projet), LSIS (navigation 3D, gestion des modèles géométriques). Collaboration avec le « World Monument Fund » et la « Cyark Foundation » pour la numérisation et la conservation du patrimoine bâti.

Publications : [RR13], soumission à la conférence Digital Heritage 2013 en cours.

2011–2012 Collaboration avec l’Université de Tasmanie « School of Geography and Environmental Studies », Australie. Traitements de données géométriques dans un contexte d’interopérabilité.

Publications : [FRDA12]

2010–2013 Projet ANR ANR-09-SYSC-008 « Motype », responsable scientifique de la tâche « modèle géométrique » (WP2).

Publications : cf. thèse T. Bay

2011 Projet Carnot Star « Repara », avec l’équipe Escodi du LSIS (porteuse du projet), l’Onera et l’Ecole de l’Air de Salon de Provence, REalisation d’un Pilote Automatique Robuste pour un Aéronef dans des conditions de vol difficiles.

Publications : [RFD11]

2010–2011 Collaboration CNRS INS2I-SHS, avec l’UMR Espace 6012. Porteur de projet PEPS (2010-2012) « GeoTrait3D » sur l’analyse de micro-déformations de sols et la caractérisation des objets géographiques (sol, sous-sol, cavité, fractures).

2007–2011 M. Daniel, R. Raffin, contrat avec la société Geomatys (2009-2011) pour l’étude de la norme ISO 19107 « Information géographique, schéma spatial » pour les Systèmes d’Information Géographique (en parallèle à une bourse de thèse Région PACA).

Publications : cf. thèse A. François

2006 R. Raffin, G Gesquière, contrat d’accompagnement pour la réalisation d’un produit innovant de la société Geomatys (aide à la faisabilité OSEO/ ANVAR).

## Encadrements de travaux scientifiques

### Doctorats

- Khoi Nguyen Tan, 2006-2010, co-encadrement 50% avec Marc Daniel, équipe G-Mod LSIS.  
Publications : [NTRDL09b] [Raf09] [NTRDL09a] [NT10] [RNTD10]
- Axel François, 2007-2011, co-encadrement 50% avec Marc Daniel, équipe G-Mod LSIS.  
Publications : [FRD09] [FRD10b] [FRD10d] [FRD10a] [FRD10c] [Fra11] [FRD11] [FRDA12]

---

9. Plate-Forme Technologique

- Thierry Bay, 2010-2012, co-encadrement 40% avec Marc Daniel, équipe G-Mod LSIS et Marc-emmanuel Bellemare, équipe I&M LSIS.  
Publications : [BCR<sup>+</sup>11] [BCRD11] [BRD11] [Bay12] [BRD12a] [BRD12b] [BRD12c] [BZWR<sup>+</sup>12]
- Cang Phan Anh, 2010-2013, co-encadrement 50% avec Marc Daniel, équipe G-Mod LSIS.  
Publications : [Pha13] [PRD12] [PRD13]

## Masters

- 2009, G. Thibault, stage de M2R SIS, « Outils de déformation pour la sculpture virtuelle »  
Publications [Thi05] [RTG06]
- 2013, P. Poublang, stage de M2R SIS, « Chargement de maillages progressifs sur client léger »

## Organisation de conférences

- 2013 Participation au comité local d'organisation de la conférence internationale Digital Heritage, 28 octobre - 1<sup>er</sup> novembre 2013, Marseille  
<http://www.digitalheritage2013.org/>.
- 2013 Organisation des journées du GTMG, Marseille, 27-28 mars 2013 (organisation collective de l'équipe G-Mod).
- 2010 Participation à l'organisation de la conférence *Shape Modelling International*, Aix-en-Provence (organisation collective INSM, G-Mod du LSIS).
- 2009 Organisation des 22<sup>ème</sup> journées de l'AFIG à Arles, 25-27 novembre 2009 (organisation collective G-Mod). Responsabilité du symposium au Musée Départemental de l'Arles Antique.

## Évaluations de publications

- 2013 rapporteur de la conférence internationale Digital Heritage 2013.
- 2011– rapporteur de la Revue Électronique Francophone d'Informatique Graphique (REFIG).
- 2010– rapporteur aux journées de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG).

## Langues

- Anglais courant et technique,
- Espagnol courant,
- Portugais courant,
- Russe, faibles notions.

## Compétences en informatique

- API 3D : OpenGL, GLSL, WebGL, OpenCL, JoGL, Delta3D
- Systèmes d'exploitation : Linux, Microsoft Windows, Sun Solaris
- Architecture : assembleur x86
- Langues : Pascal, C, Java, C++, javascript

