

Rapport de M Jacques-Olivier LACHAUD
sur le mémoire de thèse de doctorat
de M Jérôme VELUT intitulé :

**Segmentation par modèle déformable surfacique localement régularisé
par spline lissante**

Cette thèse porte sur la problématique générale de la segmentation et la reconstruction de composantes dans des images 2D et 3D. Plus précisément, l'auteur s'intéresse aux techniques de segmentation/reconstruction par modèles déformables, initiées par Kass *et al.* (1987), et à leur application à l'analyse d'images médicales. Les spécificités de la thèse sont d'adopter une approche signal pour déformer itérativement le contour ou la surface active, de voir la régularisation comme un lissage adaptatif des forces externes, et de montrer la faisabilité et l'efficacité de cette démarche pour des contours actifs dans les images 2D et pour des surfaces actives de topologie choisie dans les images 3D. Même si le domaine d'application visé est l'imagerie médicale et l'analyse quantitative pour la détection et le suivi de pathologie, M Velut privilégie dans sa thèse la technique de déformation plutôt que l'application envisagée. Les objectifs visés dans la thèse sont donc le caractère générique de l'approche, sa rapidité, la possibilité d'introduire de la connaissance *a priori*, et la robustesse vis-à-vis d'une dégradation de l'image. Concrètement, cette thèse a débouché sur une nouvelle méthode de segmentation "contour" par déformation itérative d'une forme initiale, qui exploite des techniques signal de filtres récursifs pour calculer rapidement une régularisation : la méthode proposée a été mise en œuvre et testée sur des images 2D et 3D, de synthèse ou issues d'IRM. De part l'origine de l'auteur et de part le laboratoire de travail, la thèse mélange des concepts issus du traitement du signal et de l'analyse d'images biomédicales.

Le manuscrit est découpé en cinq parties principales plus un appendice. La première partie décrit le contexte et les objectifs de la thèse. La deuxième partie dresse un état de l'art sur les techniques de modèles déformables, en se focalisant sur ceux qui se rapprochent de la technique proposée. La troisième partie décrit le modèle déformable proposé, dans le cas bidimensionnel d'un contour actif, en utilisant le filtrage par spline lissant. Les qualités du modèle sont testées par des expérimentations. La quatrième partie montre l'extension de ce modèle au cas tridimensionnel des surfaces actives, d'abord comme un simple produit tensoriel puis en l'adaptant à des surfaces plus générales. Ce modèle est ensuite validé par des expérimentations. La cinquième partie dresse le bilan de l'approche et ouvre des perspectives de travail. L'appendice montre la mise en œuvre des filtres régularisants utilisés dans la déformation de la forme. Le découpage du manuscrit est bien choisi et équilibré. Chaque partie est découpée en plusieurs chapitres, dont un d'introduction et un de conclusion. Même si la lecture de la thèse en est facilitée, un découpage aussi fin entraîne quelques redites. Je détaille maintenant la thèse partie par partie avant d'en faire la synthèse.

Dans la première partie, M Velut explique le besoin en imagerie médicale de techniques de segmentation et de reconstruction de composantes anatomiques, ainsi que

les contraintes pesant sur ces techniques dans ce contexte. Il rappelle que les modèles déformables forment une classe de techniques qui est réputée répondre en partie à ces besoins. Dans les images 3D, de telles techniques sont encore plus nécessaires, car le rendu volumique ne permet pas vraiment d'analyse quantitative. Les contraintes que se donnent l'auteur sont un modèle déformable robuste et rapide. L'auteur précise alors les concepts abordés au cours de sa thèse autour des modèles déformables : régularisation du problème, utilisation d'information *a priori*, représentation des contours et surfaces. Il est à noter que la connaissance *a priori* envisagée par l'auteur est essentiellement l'adaptabilité du terme de régularisation à la donnée image locale. Cette partie se termine par une présentation succincte de l'approche proposée et de l'organisation du document. Je note ici une certaine confusion entre objectifs et contribution, qui vient du fait que l'objectif à terme est bien la segmentation d'images médicales, mais que l'auteur cherche plutôt une réponse générique nouvelle au problème de la régularisation, ce qui est louable.

La deuxième partie dresse un état de l'art des techniques de modèle déformable en lien avec l'approche proposée. D'abord le modèle classique du *snake* est rappelé, dans sa forme résolution itérative d'une EDP, régularisée ou non. L'auteur présente ensuite des techniques proches du modèle déformable, qui éliminent le terme de régularisation en restreignant l'espace des formes à des splines lisses. L'auteur fait ensuite le lien entre points de contrôle d'une courbe B-spline et filtrage de la courbe par un filtre adapté. L'approche de déformation résultante de Precioso *et al.* (2005) est ainsi rappelée. Puis, l'auteur présente brièvement quelques techniques de surfaces actives, paramétriques, maille simplexe, et surface B-spline. Le chapitre se termine sur une présentation de modèles déformables qui intègrent une connaissance *a priori* sur la forme recherchée. L'auteur restreint cette notion à l'adaptabilité locale d'un modèle, par exemple une variabilité de son échantillonnage local. Sur cette partie, M Velut cible son état de l'art au plus près de sa contribution, ce qui permet au lecteur de ne se concentrer que sur l'essentiel. Il y a donc un certain parti pris puisque par exemple les méthodes par évolution de ligne de niveaux, les mailles triangulées ou les patrons déformables sont écartées de la discussion. Une conclusion apparaît sur le lien régularisation et échantillonnage. En fait, il s'agit plus d'un constat qu'un certain nombre de modèles déformables, formulés dans le domaine continu, sont discrétisés de manière incorrecte, ce qui induit un tel lien.

La troisième partie décrit le modèle proposé, dans sa version contour actif évoluant dans une image 2D. D'abord, l'auteur rappelle que l'évolution d'un *snake* classique s'apparente à un filtrage passe-bas de ses positions antérieures et des forces externes. Une étude similaire est donnée pour le contour actif régularisé par spline lissante. L'auteur montre que le contour subit un phénomène de convolutions successives, qui induisent un rétrécissement du contour et note l'analogie avec le terme d'élasticité du *snake*. M Velut rappelle alors la méthode signal du lissage par spline de Unser *et al.* (1993), qui permet d'approcher un signal par une spline minimisant son attache aux données et sa dérivée seconde au carré, balancée par un paramètre d'échelle λ . L'auteur explicite alors la fréquence de coupure du filtre obtenu en fonction de λ et de la fréquence d'échantillonnage. L'application de la méthode précédente au filtrage de contour est donnée,

simplement en considérant les coordonnées comme étant deux signaux indépendants. L'effet de l'échantillonnage sur le résultat est bien illustré. Le filtre précédent peut être calculé récursivement, en mettant en cascade deux filtres, l'un causal et l'autre anti-causal. En faisant varier la valeur de λ lors du calcul des filtres, l'auteur montre que le contour peut être lissé de manière adaptative sans surcoût en temps de calcul, si l'utilisateur spécifie au préalable les valeurs de λ sur chaque point du contour. Ensuite, M Velut présente son nouveau modèle déformable, dont le principe n'est pas de lisser le contour, mais plutôt de lisser les forces externes appliquées au contour selon la technique précédente. Cela se justifie en convoluant simplement l'équation d'évolution non régularisé d'un modèle déformable avec le filtre précédent. L'équation d'évolution relie alors contours régularisés aux temps t et $t+1$ en ajoutant seulement le filtrage des forces externes. Le modèle évolutif ainsi obtenu est donc facilement mis en œuvre, modulo un rééchantillonnage uniforme régulier du contour régularisé. Cette partie est conclue par un ensemble d'expérimentations de ce nouveau modèle, en réduisant les forces externes à une force ballon et une force d'attraction vers les forts gradients : capacité du modèle à résister au bruit gaussien ou à des trous dans les contours, influence de la fréquence de coupure, aide à la sélection, utilisation de la régularisation locale dans des processus semi-supervisés de segmentation d'images médicales. Dans cette partie, M Velut a développé un nouveau modèle évolutif de façon très astucieuse, qui exploite les propriétés des filtres récursifs pour implémenter un mécanisme de régularisation du second ordre, de paramètre variable selon la position (i.e. adaptatif), et qui est calculable en temps linéaire par rapport au nombre de points. Les résultats sont en plus à la hauteur, et le modèle a un bon comportement de régularisation. Le modèle proposé n'est cependant comparé ni théoriquement ni empiriquement aux *snakes* classiques, notamment sur sa régularisation du second ordre, sur les temps de calcul, etc. Il aurait été très intéressant de faire ce travail qui aurait sans doute confirmé les qualités de l'approche proposée.

Fort de ce succès, le chapitre 4 se consacre à l'extension du modèle précédent à des surfaces évolutives pour segmenter des images 3D. Après quelques rappels élémentaires de topologie des surfaces, l'auteur indique qu'il souhaite conserver une implantation monodimensionnelle du filtrage en filtrant successivement les deux directions. L'utilisation de cette propriété de séparabilité implique de pouvoir paramétrer la surface par deux coordonnées, et restreint ce modèle de surface active à des surfaces de genre 0. L'auteur montre donc comment adapter son modèle à un tore (l'extension la plus directe), à un cylindre et à un plan. L'auteur présente ensuite l'extension de sa méthode aux deux pôles d'une sphère, par le principe simple de choisir les voisins dans la direction du pôle en suivant le méridien en face. L'effectivité de ce filtre bidimensionnel pour le lissage de plan, cylindre, tore et sphère est ensuite clairement illustré. L'auteur se penche ensuite plus particulièrement sur le problème de la gestion des pôles, en notant que l'échantillonnage change forcément dans ces zones et devient beaucoup plus important. Au vu de la formulation du modèle, la régularisation y est donc beaucoup moins forte, ce qui rend le modèle anisotrope. Pour corriger cela, il propose d'utiliser d'une part le lien précédemment explicité entre fréquence de coupure, fréquence d'échantillonnage et paramètre λ , et d'autre part l'adaptabilité possible de ce dernier paramètre pour corriger ce défaut. Le paramètre de régularisation est alors une fonction de la densité

d'échantillonnage locale, ce qui permet d'obtenir une régularisation uniforme sur la surface, que l'on soit près ou loin des pôles. L'intérêt de ce filtrage variant est bien illustré sur la segmentation d'objets à topologie sphérique. Il empêche certes l'introduction de connaissance *a priori* dans le modèle 3D, mais il évite aussi le rééchantillonnage uniforme régulier de la surface, qui est un problème difficile. La surface active est ensuite testée sur des données médicales tridimensionnelles, comme l'aorte, les interfaces os/cartilages sur un genou de rongeur, ou les ventricules dans le cerveau. Pour conclure ce chapitre, je dirais que M Velut a proposé une extension 3D très naturelle de son modèle 2D, qui conserve notamment les qualités mises en avant en 2D : rapidité de calcul, robustesse au bruit. Cela se fait bien sûr au détriment de la diversité des surfaces représentables, mais l'auteur ouvre des pistes pour attaquer ce problème. La gestion de l'anisotropie de l'échantillonnage est aussi traitée intelligemment, même si certains lecteurs aurait aimé avoir quelques garanties théoriques sur la méthode. De plus, vu qu'un argument est la rapidité de l'algorithme, il aurait été utile d'avoir les temps de calcul par itération et nombre d'itération sur un ensemble représentatif de segmentations.

La partie 5 effectue le bilan des contributions de la thèse, et donne quelques perspectives de travail, notamment l'utilisation d'*a priori* géométriques pour paramétrer automatiquement le coefficient de régularisation et l'extension de la méthode à des surfaces de topologie arbitraire, pour faire du lissage de surface. Le suivi temps réel est aussi évoqué, et constitue une perspective intéressante de ce travail.

Pour résumer, la thèse de M Velut contient des idées intéressantes et originales, notamment une utilisation astucieuse de techniques signal pour régulariser un problème de segmentation. La démarche adoptée par l'auteur est clairement pragmatique. En suivant les contraintes de rapidité et de robustesse, elle le conduit à la mise au point d'une nouvelle technique de segmentation par modèle déformable, qui déporte la régularisation sur le terme d'attache aux données. Il s'agit donc d'une approche originale, différente de l'approche variationnelle des *snakes* mais aussi de l'espace des formes restreint aux courbes lisses des modèles type *B-snakes*. L'effectivité de la méthode est bien illustrée par l'auteur, dans les versions 2D et 3D. Au vu de la quantité de modèles déformables existants, il a donc réalisé un travail significatif, qui se démarque clairement du lot. Son travail permet ainsi théoriquement une régularisation adaptative en temps optimal, ce qui peut être un facteur déterminant en imagerie 3D.

J'ai cependant quelques critiques, qui ne remettent pas en question les qualités précédentes. Sur la forme, on aurait pu souhaiter un développement formel plus explicite des techniques de filtrage employées, afin de mieux convaincre le lecteur moins familier de techniques signal. De plus, le parti pris de l'auteur de ne se limiter qu'aux techniques proches ne permet pas de replacer facilement la méthode proposée dans le contexte plus général des techniques variationnelles de segmentation d'image. Sur le fond, l'auteur fait le choix de proposer une nouvelle technique de modèle déformable, qui n'est pas spécifique à une application et attend donc une validation non spécifique. Dans ce cadre, une comparaison plus poussée avec la technique classique du *snake* aurait été intéressante, à la fois du point de vue théorique (mis en évidence de certaines propriétés, lien avec une minimisation) et du point de vue pratique (comparaison avec une implémentation

du *snake*).

Pour conclure, M Velut a réussi à proposer une nouvelle formulation de la régularisation des modèles déformables pour segmenter des images 2D et 3D, et a su mettre en avant ses qualités. En conséquence, je porte un avis favorable pour que M Jérôme Velut présente son mémoire afin d'obtenir le grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, formation doctorale Sciences de l'information, des dispositifs et des systèmes.

Fait au Bourget-du-Lac, le 13 novembre 2007.

Jacques-Olivier LACHAUD
Professeur d'informatique
LAMA UMR CNRS 5127
Université de Savoie