
Rapport sur le manuscrit de thèse présenté par Maxime Sermesant intitulé "Modèle électromécanique du cœur pour l'analyse d'image et la simulation".

Le manuscrit comporte 10 chapitres et 4 annexes. Après 2 chapitres introductifs (1 et 2), Maxime Sermesant identifie 2 grandes parties dans ses travaux. La partie I (chapitres 3 - 4 - 5) concerne le "*Modèle électromécanique du cœur*" et la partie II (chapitres 6 - 7 - 8 - 9 - 10) intitulée "*Analyses d'images cardiaques*" traite de la segmentation des images médicales cardiaques par un modèle déformable bio-mécanique et un nouveau modèle électro-mécanique simplifié.

Le chapitre 1, très court, est une introduction sur l'intérêt du sujet de recherche lui-même et l'utilité que pourrait avoir un modèle électromécanique du cœur en médecine. Maxime Sermesant identifie ses contributions personnelles au sein de l'action de recherche coopérative Icema, de l'Inria, dédiée à la modélisation de l'activité électro-mécanique cardiaque.

Le chapitre 2 rappelle les principales notions d'anatomie et d'électrophysiologie cardiaque. Il est court et très concis.

Partie I : Modèle électromécanique du cœur

Maxime Sermesant débute son étude en se procurant les meilleures données disponibles ce jour dans le monde qui sont l'orientation des fibres cardiaques 3D issues de la dissection d'un cœur de chien par l'équipe de Auckland et le découpage anatomo fonctionnel du ventricule gauche récemment réalisé par l'équipe de Hamburg. Maxime Sermesant intègre cette connaissance a priori, représentée par un étiquetage local voxel par voxel, dans un modèle tétraédrique 3D bi-cavité que celui-ci génère en s'appuyant sur le logiciel GHS3D (chapitre 3).

Le chapitre 4 traite de la *modélisation de l'activité électrique cardiaque*. Maxime Sermesant présente un état de l'art bibliographique des principaux modèles de l'activité électrique cellulaire et des potentiels d'action qui en résultent. Il propose une simulation de propagation de l'onde électrique à travers le modèle bi-ventriculaire maillé décrit dans le chapitre 3. Maxime Sermesant s'appuie sur un modèle diffusif de type FitzHugh-Nagumo. Celui-ci compare, qualitativement la distribution (3D, t) des isochrones d'activation qu'il obtient avec les mesures de Durrer. Le logiciel réalisé par Maxime Sermesant lui permet de simuler diverses pathologies en modifiant les conditions limites et les propriétés locales de la conduction. Bien que purement qualitatif, ce modèle permet d'entrevoir les potentialités futures d'un tel outil.

Dans le chapitre 5, intitulé "*Modélisation du couplage électromécanique cardiaque*" Maxime Sermesant choisit un modèle de fibre contractile pour simuler le muscle cardiaque. Le modèle de Huxley & Miskin, sur lequel il s'appuie, présente l'avantage d'une certaine cohérence de point de vue à travers les échelles (nanoscopique au macroscopique). L'auteur présente un modèle relativement simple, donc mieux contrôlable, constitué d'un élément contractile et d'un élément élastique assurant la rigidité. La mise en oeuvre est

effectuée en pré-conditionnant la matrice de rigidité du maillage pour garantir des calculs rapides. Maxime Sermesant met en place un véritable couplage entre déformation et pression sanguine en découpant le cycle temporel selon les 4 phases de base du cycle cardiaque. Il applique ensuite un tenseur de contraction au maillage 3D doté de propriétés visco-élastiques linéaires par morceaux, ce qui lui permet de simuler qualitativement un cycle cardiaque complet. L'auteur trace la courbe de volume du ventricule gauche artificiel ainsi reconstruit, celle-ci a une forme très réaliste. Même si le modèle animé est encore assez simple, celui-ci fournit d'ores et déjà une base d'étude de la fonction cardiaque très intéressante. Le chapitre est rédigé de façon claire, précise et convaincante.

Partie II : Analyse d'images cardiaques

Dans le chapitre 6, Maxime Sermesant décrit brièvement le principe des 3 modalités d'imagerie sur lesquelles il appliquera ensuite son modèle. La simplification des éléments de la physique de base, en particulier des ultrasons, nuit à la justesse du discours. Ce chapitre doit être réécrit soigneusement afin de supprimer les inexacitudes, en utilisant les mots adaptés.

Maxime Sermesant propose, chapitre 7, un prétraitement des images ultrasonores cardiaques par diffusion anisotrope. Après avoir rappelé le principe de la diffusion celui-ci décrit l'application de la méthode aux images en intégrant la dimension temporelle. L'application de la diffusion anisotrope aux images ultrasonores n'est pas nouvelle en soi, en revanche la mise en œuvre 4D du filtre est intéressante. Les résultats qualitatifs proposés par Maxime Sermesant sont satisfaisants. Il manque une évaluation quantitative du gain apporté par le filtrage sur la segmentation du ventricule gauche qui doit figurer dans le manuscrit (et non exclusivement dans un article mis en référence).

Le chapitre 8 traite de la segmentation de séquences d'images TEP et IRM par un modèle bi-ventriculaire cardiaque. Le modèle maillé surfacique est déformé sous l'effet de forces internes (garantissant la rigidité du maillage) et de forces externes issues des données à savoir une mise en correspondance, par blocs au voisinage des noeuds du maillage à déplacer. Maxime Sermesant effectue la segmentation de quelques images tests de rein et de cerveaux. Le résultat visuel permet d'apprécier globalement la méthode mais Maxime Sermesant observe que cette méthode n'est pas suffisamment robuste pour segmenter des données cardiaques IRM. Il effectue alors une première segmentation à l'aide du modèle volumique maillé qui reste cependant assez approchée. La mise en œuvre d'un modèle biomécanique déformable (sans appariement de régions) sur les données cardiaques 4D fournit des résultats visuellement acceptables et Maxime Sermesant se propose de calculer la courbe de volume à partir du cœur segmenté. Ceci s'avère assez difficile car les séquences temporelles dont il dispose ont un échantillonnage temporel insuffisant et la segmentation est encore grossière. Les informations de déformations obtenues grâce au modèle ne sont pas interprétables.

Dans le chapitre 9, Maxime Sermesant, présente la segmentation d'une séquence cardiaque 4D à l'aide d'un modèle biomécanique initial choisi en télé-diastole, qui est ensuite déformé de façon continue à travers toute la séquence temporelle sans convergence du modèle à chaque instant. Dans un second temps, Maxime Sermesant réalise une segmentation "expérimentale" avec le modèle électro-mécanique qu'il a développé. Ceci le contraint à sacrifier des éléments qui font la richesse et l'originalité de

ce modèle en particulier la rigidité de l'anneau fibreux et la contrainte iso-volumique. Maxime Sermesant conclue que l'introduction d'une loi de mouvement, parfaitement compatible avec son modèle, facilitera la segmentation en permettant de mieux approcher la forme du cœur à chaque instant du cycle et donc de diminuer les corrections à apporter pour mieux "coller" aux images. Il n'y a pas d'évaluation quantitative du résultat.

Le manuscrit se termine par une conclusion/perspectives dans laquelle Maxime Sermesant résume ses contributions, les limitations du modèle électro-mécanique actuel et les voies de recherche, nombreuses, qui s'ouvrent à l'issue de son travail.

En résumé, Maxime Sermesant, a effectué un travail de thèse novateur et particulièrement intéressant par son approche intégrée d'un modèle actif électro-mécanique du cœur. La partie I, centrée sur la synthèse est excellente et très prometteuse. La partie II, d'analyse d'images, gagnerait à avoir un titre différent plutôt "Interaction entre modèle bio-mécanique et électro-mécanique du cœur et imagerie cardiaque" car l'analyse d'image a proprement parler est réduite. La partie originale concerne la mise en œuvre à travers la séquence 4D du modèle simplifié électro-mécanique du cœur. En revanche cette partie souffre d'un manque de validation des résultats, autre que visuelle, sur plusieurs séquences d'images. Il aurait été également utile de préciser, concrètement la valeur des paramètres utilisés dans chaque cas, ainsi que la sensibilité du résultat à leur variations. Le chapitre sur l'imagerie médicale est à revoir, car il contient beaucoup d'inexactitudes dues à une simplification extrême des principes physiques sous-jacents à l'imagerie, en particulier en US et en IRM. Les premiers résultats de segmentation spatio-temporelle avec le modèle actif présentés en fin de document sont très encourageants et constituent une voie nouvelle potentiellement très riche que propose Maxime Sermesant.

En conclusion, Maxime Sermesant a apporté un éclairage nouveau sur la modélisation active par modèle simplifié électro-mécanique du cœur qui constitue une nouvelle étape vers l'analyse du comportement dynamique du cœur. Le manuscrit laisse transparaître sa parfaite maîtrise du formalisme mathématique et de l'implantation informatique des modèles qu'il propose et je considère que les qualités de ce travail justifient amplement sa présentation comme thèse de Doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis dans la spécialité Automatique, Traitement du Signal et de l'Image.

Fait à Villeurbanne, le 12 mai 2003

Isabelle Magnin
Directeur de Recherche INSERM
Directeur de CREATIS.