

Méthodes numériques pour la tomographie par impédance électrique dans le cadre de l'électrocardiographie

Ce sujet de thèse a pour contexte la résolution du problème inverse en imagerie électrocardiographique, dans le but de permettre une reconstruction fiable de l'activité électrique du coeur. L'objectif est de développer des méthodes numériques pour estimer les conductivités des organes à l'intérieur du volume du torse, grâce à des techniques de tomographie par impédance électrique, et de les coupler avec la résolution du problème inverse électrocardiographique.

La fibrillation ventriculaire est responsable chaque année de 50 000 morts soudaines par arrêt cardiaque en France, soit une toutes les 10 minutes. Elle se caractérise par une désorganisation complète de l'activité électrique dans les ventricules qui empêche le coeur de se contracter efficacement, et se produit majoritairement chez des personnes dont le myocarde présente des pathologies structurales pré-existantes. Bien que des thérapies efficaces existent, elles sont en pratique encore peu utilisées car les mécanismes impliqués dans ces troubles du rythme cardiaque sont encore peu compris, et les pathologies associées sont incorrectement caractérisées ou ne peuvent être dépistées de manière préventive. Ces carences en terme de détection sont principalement dues aux limitations des techniques d'imagerie pour l'activité électrique cardiaque. En effet, les cathéters intra-cardiaques permettent une caractérisation détaillée de l'activité électrique du coeur, mais sont trop invasifs pour être utilisés à large échelle, et l'électrocardiogramme classique à 12 électrodes manque de précision.

L'imagerie électrocardiographique (ECGi) est une technologie prometteuse pour surmonter ces limitations. Cette approche non-invasive permet de reconstruire l'activité électrique du coeur à partir de séries de mesures électriques sur le torse, en résolvant un problème inverse dans le volume compris entre le torse et le coeur. Ce problème est représenté mathématiquement par un problème de Cauchy pour l'équation de Laplace, qui est notoirement mal-posé:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma \nabla u) = 0 \text{ dans le volume du torse,} \\ u = u_T \text{ et } \sigma \nabla u \cdot n = 0 \text{ sur la surface du torse,} \\ u = ? \text{ sur la surface du coeur,} \end{cases} \quad (1)$$

avec u le potentiel électrique et σ la conductivité dans le volume du torse. L'approche classique pour le résoudre consiste à minimiser au sens des moindres carrés une fonctionnelle comportant un terme de régularisation [4].

Les études expérimentales in-vivo montrent que l'ECGi peut reconstruire correctement des motifs d'activation électrique réguliers mais échoue dans des cas plus complexes, notamment pour des coeurs présentant des hétérogénéités des tissus [3]. Les erreurs dans la formulation du problème direct, notamment la méconnaissance des valeurs des conductivités des différents organes et du mouvement relatif de ces organes, contribuent pour une bonne part à ce manque de précision.

La tomographie par impédance électrique (TIE) pourrait permettre de réduire ces erreurs. Il s'agit d'une technique non-invasive de reconstruction de conductivités à partir de mesures électriques à la surface du corps: un courant alternatif est injecté au travers d'électrodes et le potentiel électrique qui en résulte est mesuré sur ces mêmes électrodes. Le problème direct consiste à calculer le potentiel électrique dans le domaine en fonction du courant injecté et de la distribution des conductivités dans le domaine:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma \nabla u) = 0 \text{ dans le volume du torse,} \\ \sigma \nabla u \cdot n = 0 \text{ sur la surface du torse,} \\ u + z_m \sigma \nabla u \cdot n = U_m \text{ sur chaque électrode,} \\ \int_{E_m} \sigma \nabla u \cdot n dS = I_m \text{ pour chaque électrode,} \end{cases} \quad (2)$$

avec I_m le courant électrique injecté dans l'électrode E_m . Le problème inverse consiste à estimer les conductivités à partir des mesures électriques à la surface du corps.

Le programme de la thèse consiste à développer des méthodes numériques sur grille cartésienne pour résoudre le problème direct de la TIE, puis le problème inverse qui lui est associé. Les estimations

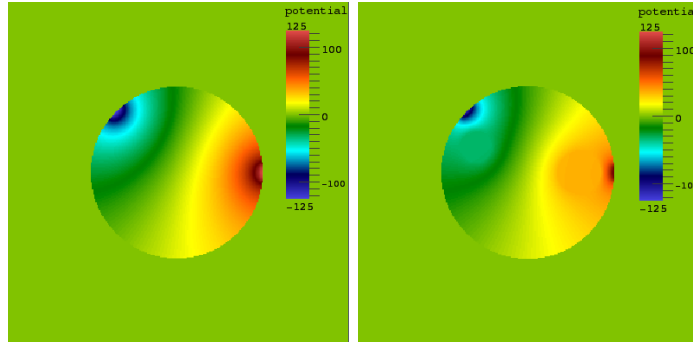


Figure 1: Problème direct pour la tomographie par impédance électrique avec une méthode sur grille cartésienne: potentiel électrique dans un domaine circulaire, courants opposés sur deux électrodes, sans et avec inclusions.

des conductivités ainsi obtenues seront utilisées pour la résolution du problème inverse électrocardiographique.

Une méthode numérique sur grille cartésienne de type frontières immergées sera développée pour la résolution du problème direct de la TIE. Des fonctions level-set seront utilisées pour représenter les géométries du torse et des différents organes. Les techniques de frontières immergées, semblables à celles développées dans [1], permettront de tenir compte de la présence de géométries complexes sur la grille cartésienne. L'utilisation de grilles cartésiennes plutôt que de maillages non-structurés a pour avantage de prendre en compte facilement les géométries mobiles, par exemple en cas d'incertitudes géométriques ou de mouvement des organes. Des résultats préliminaires en deux dimensions sont présentés sur la figure 1. La méthode devra être validée en deux dimensions, puis étendue en trois dimensions avec des techniques de calcul parallèle. L'analyse théorique de sa convergence pourra être effectuée en utilisant des techniques propres à ce type de méthodes de frontières immergées.

La TIE ne permet pas en général d'identifier avec une grande résolution spatiale les paramètres de conductivité. Mais dans le cadre de l'imagerie électrique cardiaque, le volume du torse peut être modélisé par un nombre assez faible de régions homogènes. Les inconnues sont alors réduites à quelques valeurs de conductivités et l'éventuel mouvement relatif des organes. Pour résoudre le problème inverse de la TIE, des techniques d'inférence Bayésienne similaires à celles développées dans [2] seront utilisées. Les conductivités ainsi obtenues seront ré-injectées dans la résolution du problème inverse de l'ECGi.

La thèse sera encadrée par Jérémie Dardé et Lisl Weynans, elle se déroulera à l'Institut de Mathématiques de Bordeaux, dans le cadre de l'équipe INRIA Carmen et de l'IHU Liryc (l'Institut de rythmologie et de modélisation cardiaque de Bordeaux), dédié à la compréhension des troubles du rythme cardiaque.

Contacts: Jérémie Dardé (Jeremi.Darde@math.univ-toulouse.fr) et Lisl Weynans (lisl.weynans@math.u-bordeaux.fr)

- [1] M. Cisternino and L. Weynans. Commun. Comput. Phys., vol 12, pp 1562-1587, 2012, link.
- [2] J. Dardé, N. Hyvönen, A. Seppänen, and S. Staboulis. SIAM J. Imaging Sci., vol 6, pp 176-198, 2013, link.
- [3] J. Duchateau, F. Sacher, and T. Pambrun. Heart Rhythm, p. 435-442, vol. 16, 2018, link.
- [4] A. Karoui, L. Bear, P. Migerditichan, and N. Zemzemi. Frontiers in physiology, p1708, vol 9, 2018, link.