

## Homogénéisation périodique pour la modélisation tissulaire de l'ablation cardiaque par champ électrique pulsé

**Simon BIHOREAU**, Inria, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMB & IHU Liryc - Bordeaux  
**Annabelle COLLIN**, Laboratoire de Mathématique Jean Leray, Nantes Université - Nantes  
**Michael LEGUEBE**, Inria, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMB & IHU Liryc - Bordeaux  
**Clair POIGNARD**, Centre Inria de l'Université de Rennes - Rennes

L'ablation cardiaque par cathéter est une procédure minimalement invasive pour traiter les arrhythmies en détruisant ou isolant les zones pathogènes. L'ablation par champ pulsé – **pulsed field ablation (PFA)** – est une technique émergente non thermique qui utilise de courtes impulsions électriques à haute tension pour ablater le tissu sans endommager les structures adjacentes [1]. Le phénomène micro-biologique sous-jacent est l'**électroporation irréversible**, également exploité en oncologie.

La **modélisation tissulaire** de la PFA est un défi, du fait de l'hétérogénéité du tissu, de l'orientation des fibres cardiaques et de la complexité de l'électroporation, qui affectent la distribution du champ électrique. Des modèles plus ou moins détaillés à l'échelle cellulaire existent et caractérisent l'électroporation en fonction de la tension transmembranaire  $v_m$  [4], mais sont trop coûteux en calcul pour une simulation à grande échelle. Les modèles existants à l'échelle tissulaire ont une approche phénoménologique et caractérisent usuellement l'ablation en fonction de l'intensité du champ électrique.

D'autre part, le modèle bidomaine, largement utilisé en électrophysiologie cardiaque, est issu d'un procédé d'homogénéisation périodique d'équations cellulaires [2], ce qui lui permet de décrire à l'échelle du tissu la propagation du courant électrique responsable de la contraction du cœur, à partir de quantités microscopiques homogénéisées telle la tension transmembranaire  $v_m$ . Le travail présenté ici consiste donc à utiliser la même technique mathématique d'homogénéisation dans le contexte différent de l'électroporation pour déduire un modèle tissulaire à partir d'un modèle cellulaire d'électroporation. L'**homogénéisation périodique** permet d'approcher un problème contenant des variations d'échelle  $\varepsilon$  – le ratio entre les échelles microscopique et macroscopique – par des problèmes homogénéisés couplés à des problèmes dits « cellules ». L'approximation peut être poussée à des ordres plus ou moins élevés au besoin. Dans notre cas, l'approximation d'ordre 0 correspond à la version linéaire du modèle standard d'électroporation [3] et la correction à l'ordre 1 fait apparaître la conductivité surfacique membranaire  $S_m$ , qui caractérise l'électroporation de manière non linéaire en fonction du champ électrique  $E$  et de la tension transmembranaire homogénéisée  $v_m$ . Nous donnons la preuve d'un théorème d'**estimation d'erreur** à tout ordre  $n$  pour des conditions de bord périodiques et l'illustrons numériquement aux ordres 0 et 1.

Nous proposons différentes quantités pour caractériser la **zone effective d'ablation**, que nous comparons mathématiquement et numériquement au critère des modèles existants, basé sur  $|E|$ . Enfin, nous appliquons notre modèle sur des **géométries réelles** de cœurs de brebis, provenant d'expériences réalisant en collaboration avec l'IHU Liryc.

- [1] G. Caluori, E. Odehnaeva, T. J. et al. *AC pulsed field ablation is feasible and safe in atrial and ventricular settings : A proof-of-concept chronic animal study*. Front Bioeng Biotechnol, 2020.
- [2] A. Collin, S. Imperiale. *Mathematical Analysis and 2-Scale Convergence of a Heterogeneous Microscopic Bidomain Model*. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2018.
- [3] G. Jankowiak, C. Taing, C. Poignard, A. Collin. *Comparison and calibration of different electroporation models. Application to rabbit livers experiments*. ESAIM : Proc. and Surveys, 2020.
- [4] O. Kaviani, M. Leguèbe, C. Poignard, L. Weynans. *"Classical" Electroporation Modeling at the Cell Scale*. Journal of Mathematical Biology, 2014.