

Proposition de thèse

Titre

Modélisation biomécanique des systèmes d'équilibre de l'oreille interne

Directeur de Thèse

Anne CHARPIOT – PU PH, HdR

Encadrant et personne à contacter

Daniel BAUMGARTNER – MCU

daniel.baumgartner@unistra.fr

Unité d'accueil

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICUBE)

UMR 7357

Département de Mécanique

Equipe de Matériaux Multi-échelles et Biomécanique (MMB)

2 rue Boussingault

67000 Strasbourg

Etablissement de rattachement

Université de Strasbourg

Descriptif du sujet

L'équilibre humain dans un environnement en mouvement correspond à un état de stabilité du corps et du regard. Il nécessite la mobilisation d'un ensemble de mécanismes qui modulent le tonus musculaire afin de permettre les adaptations posturales. Ce système de l'équilibre humain est principalement basé sur deux réflexes : le Réflexe Vestibulo-Occulomoteur (RVO) et le Réflexe Vestibulo-Spinal (RVS). Une altération de ces réflexes conduit à un état de déséquilibre communément appelé vertige. Une multitude de causes peuvent conduire à un vertige, induisant de ce fait un éventail large de traitements. Ainsi, pour bien identifier les causes d'un vertige dans l'optique de le traiter, il est nécessaire de connaître en détail le fonctionnement (normal), et donc le dysfonctionnement (pathologique ou traumatique), du système de l'équilibre dans ses zones centrales (neurologiques) et aussi périphériques (de mesure de l'information sensorielle).

Ce projet s'inscrit dans la connaissance du fonctionnement du principal capteur sensoriel périphérique du RVO : le labyrinthe de l'oreille interne, plus simplement appelé vestibule. Ce capteur est constitué de trois canaux semi-circulaires (CSC) et de deux poches : l'utricule et le saccule. Le « reste » de l'oreille interne est l'organe de l'audition : la cochlée. Bien qu'en lien avec le vestibule, cette dernière n'est pas directement abordée dans le cadre de ce projet. Il est admis que les canaux semi-circulaires mesurent l'accélération angulaire de la tête, alors que l'utricule et le saccule mesurent l'accélération linéaire de la tête. Ces deux composantes de l'accélération permettent, moyennant un traitement nerveux central complexe de l'information, d'asservir les trois paires de muscles oculaires par œil, de manière à pouvoir

conserver une image fixe sur la rétine d'un environnement en mouvement. Cette chaîne de traitement du signal constitue le RVO qui assure ainsi l'équilibre de l'individu à travers un suivi de cible stable. Lorsque ce capteur d'accélération dysfonctionne, la mesure est erronée et l'asservissement des muscles oculaires est de fait faussé : un état de vertige s'installe.

L'objectif premier de ce projet est de comprendre le fonctionnement de ce capteur d'accélération (CSC, utricule et saccule). Dans un deuxième temps, il s'agit également d'identifier tous les dysfonctionnements possibles de ce capteur, corrélés aux différents troubles de l'équilibre, c'est-à-dire aux différents vertiges dont peut souffrir un patient. Cette connaissance de la mécanique fine mènera à de meilleurs diagnostics et par conséquent permettra de mettre en place des traitements plus adaptés du vertige.

Pour y parvenir, une modélisation par éléments finis sera privilégiée. En effet, le vestibule dans son anatomie précise (géométrie exacte) et dans sa physiologie (fonctionnement) est relativement mal connu. Cela est dû à sa petite taille (une dizaine de millimètres) et à la difficulté d'y accéder car il est noyé en profondeur dans l'os de la base du crâne (rocher). Il est par ailleurs particulièrement fragile car très souple, ses membranes étant constituées d'une couche unique d'épithélium renfermant deux fluides : l'endolymphe et la périlymphe. Il est ainsi ardu de mettre en œuvre une expérimentation mécanique sur ce capteur pour identifier son comportement mécanique.

C'est pourquoi, pour approcher au mieux cette structure anatomique, ce projet utilise la méthode des éléments finis pour aboutir à une modélisation biomécanique du vestibule. Deux versants de modélisation seront envisagés : le fonctionnement normal et le dysfonctionnement pathologique. En d'autres termes, il s'agit de construire un modèle par éléments finis du vestibule humain de manière à simuler toutes sortes de situations de fonctionnements normaux et altérés de ce capteur d'accélération. Le modèle devra être validé par rapport à des observations cliniques.

Il n'existe que très peu de modèles biomécaniques du vestibule de l'oreille interne, et encore moins de modèles par éléments finis. Ces derniers sont en général des modèles 2D ou adressant une question spécifique. Dans ce projet, il s'agit de construire un modèle 3D complet du vestibule, c'est-à-dire des trois CSC, de l'utricule et du saccule dans leur environnement osseux. Un tel modèle n'existe pas à l'heure actuelle. Ce modèle doit être bio-fidèle ce qui signifie que :

- Sa géométrie devra correspondre à l'anatomie exacte du vestibule. Pour cela, les progrès récents (2015 – implémentation de séquence spécifique et augmentation de la résolution spatiale) en IRM seront exploités de manière à distinguer le labyrinthe osseux, des membranes et des deux fluides (endolymphe et périlymphe) de cette structure. Cette connaissance géométrique reposera sur une segmentation fine d'images médicales ainsi que sur diverses planches anatomiques disponibles au sein des **Hôpitaux Universitaires de Strasbourg (HUS)**.
- Son comportement mécanique nécessitera, quant à lui, la mise en œuvre d'expérimentations « classiques » de micro-fluidique. Ces expérimentations se feront au sein même du Laboratoire **ICUBE** en collaboration avec l'équipe de **Mécanique des Fluides (MécaFlu)**. Il s'agira de bien identifier la nature des écoulements de fluides (endolymphe et périlymphe) au sein des CSC principalement. Il s'agira également

d'effectuer des tests de traction ou d'indentation sur les membranes du vestibule afin d'identifier leur rigidité.

Ces données, géométriques et comportementales, permettront de construire le modèle par éléments finis 3D du vestibule humain. Ce dernier sera alors utilisé pour mimer son comportement normal et altéré par toute une série de pathologies (Maladie de Ménière, Hydrops, Vertiges Positionnels Paroxystiques Bénins, ...).

Outre l'enjeu de santé publique que constitue ce projet, il s'articule avec quelques acteurs institutionnels et privés :

- Ce projet s'intègre dans une des thématiques du **GDR Vertige** du CNRS. Le laboratoire **ICUBE** et les **HUS** sont membres de ce GDR. Dans ce même cadre, une collaboration est en cours de montage entre le laboratoire **ICUBE** et le **Laboratoire des Neurosciences Intégratives et Adaptatives (UMR 7260 – CNRS et Université d'Aix Marseille)**. Il s'agit ici de modéliser les équilibres pressionnels au sein des fluides du vestibule. Le modèle par éléments finis développé permettra de simuler ces contraintes mécaniques induites. Il sera enrichi de connaissances en biochimie sur la composition électrolytique des fluides et des échanges ioniques.
- Une autre collaboration est d'ores et déjà active avec la **Société SYNAPSYS** basée à Marseille. Cette Société commercialise divers outils de diagnostics médicaux. Il s'agit ici de valoriser les outils numériques développés (modèle par éléments finis) avec l'appui de la **SATT CONECTUS**. Cette collaboration existe historiquement au sein de l'équipe de recherche et un premier transfert de technologie a déjà eu lieu en janvier 2017.
- Un partenariat avec le **CEA LETI** et son **Département de Micro-Technologies pour la Biologie et la Santé** est à l'étude et en attente de concrétisation. L'objectif de cette potentielle collaboration est de mettre en œuvre une technique de mesure de forces et de déplacements. Le milieu investigué est la membrane souple présente au niveau du vestibule.

Références

Modélisation 3D et biomécanique du vestibule : quels apports en physiologie et en pratique clinique ?, A. Charpiot, D. Baumgartner, M. Lamy, H. Vuong, 1^{er} Colloque du GDR Vertige, Marseille, France, Septembre 2015

Modélisation 3D de l'oreille interne humaine par éléments finis appliquée à l'étude de la physiologie vestibulaire, H. Vuong, M. Lamy, D. Baumgartner, F. Veillon, A. Charpiot, 123^{ème} Congrès de la Société Française d'ORL, Paris, France, Octobre 2016

VPPB typiques et moins typiques : importance de l'anatomie de l'oreille interne, A. Charpiot, H. Vuong-Chaney, D. Rohmer, M. Lamy, F. Veillon, D. Baumgartner, 5^{ème} Congrès de la Société Française de Kinésithérapie Vestibulaire, Marne-la Vallée, France, Avril 2017

Le vertige positionnel paroxystique bénin : formes cliniques moins classiques et importance de l'anatomie de l'oreille interne, A. Charpiot, H. Vuong-Chaney, L. Fath, D. Rohmer, M. Lamy, F. Veillon, D. Baumgartner, 52^{ème} Symposium de la Société Internationale d'Otoneurologie, Toulouse, France, Mai 2018

Development of a finite element model of a human lateral semicircular canal of the inner ear, D. Baumgartner, A. Charpiot, M. Lamy, H. Vuong-Chaney, 2018 Conference of the International Research Council on the Biomechanics of Injury, Athènes, Grèce, Septembre 2018