



## Remerciements

Je remercie tout d'abord Patrick Chabrand et Jean-Paul Esquerré de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail et d'avoir contribué à ce manuscrit par leurs remarques et leurs commentaires constructifs.

Merci à Augustin Lux pour avoir accepté d'être le président du jury, ainsi que Pascal Swider et Franck Boutault pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et leur participation au jury.

Je tiens à remercier très sincèrement mes deux directeurs de thèse Jocelyne Troccaz et Yohan Payan. Jocelyne, pour m'avoir intégré à l'équipe GMCAO et m'avoir dirigé en me donnant de précieux conseils. Yohan, pour son encadrement, sa confiance, sa disponibilité à chaque instant (malgré la naissance de Léni) et son soutien durant les cinq années passées au laboratoire. Merci à tous les deux pour m'avoir tant apporté et de m'avoir amené là où je suis maintenant.

Merci au service de chirurgie maxillo-faciale de l'hôpital Purpan de Toulouse, et en particulier au Professeur Franck Boutault et à Christophe Marécaux, pour leur disponibilité, leur compréhension et leur grande efficacité pour répondre à toutes nos questions scientifiques et toutes nos demandes pour les applications cliniques, les manipulations au bloc opératoire et les mesures rhéologiques.

Je tiens à adresser un grand merci à toute l'équipe du laboratoire de biomécanique de Toulouse dirigée par le Professeur Pascal Swider. Merci à lui et aux doctorants Annaïg Pédrone, Dominique Ambard, Jérôme Briot, Fabien Audry et Béatrice Couteau pour m'avoir intégré aussi facilement dans leur équipe et pour avoir activement participé dans toute la partie biomécanique de ma thèse avec autant de gentillesse.

Milles merci à tous les membres de l'équipe GMCAO que j'ai croisé durant mes deux ans de stages et mes trois ans thèse pour leur accueil qui a permis ma rapide intégration, pour l'ambiance exceptionnelle qui règne dans le laboratoire, pour leur disponibilité qui a contribué à faire avancer mes travaux rapidement et efficacement, pour leur enthousiasme, pour les sorties et toutes les activités que nous avons partagé. Merci à Jocelyne et Yohan, bien sur, Joseph N'Guyen, Thomas Rodet, Matthieu Chabanas, Olivier Schneider, Markus Fleute, Adriana Vilchis, Emmanuel Promayon, Chantal Muller, Guy Bourrel, Antoine Leroy, Christophe Marmignon, Catherine Leverre, Anne Bilgot, Maud Marchal, Raphaël Martin, Vincent Daanen, José Vazquez, Franz Chouly, Corinne Meunier et Christophe Reynier.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué à ma thèse de milles et une façons que ce soit scientifiquement ou affectivement.

Merci à ma famille, mon frère Thomas, mon père Serge, et bien évidemment à ma mère Françoise, pour leur soutien sans faille, pour le repos que m'apportait chaque séjour passé chez eux et pour leur amour.

Merci à tous mes amis pour ce qu'ils m'ont permis de vivre à coté de la thèse et qui ont énormément contribué à ce que j'aie jusqu'au bout. Pour cela, je tiens à remercier, dans le désordre, Rémy Joseph, Loïc Forest, Eric Boidard, Mathieu Emily, Bruno Thibaut, Pierre Mozer, Marino Scandella, Guillaume Jouffroy, Mario Valderama, Anja Kuss, Peter Berkelmann, Elise Taillant, Sandrine Voros, Lynda Gaillard, Lan N'Guyen, Jean Baptiste

Pinzuti, Sonia Pujol, Gaetan Pluton, Kohji Masuda, Romain Leblanc, les joueurs de warcraft et de quake, les randonneurs, les habitués du Styx, des fêtes et des sorties, les emailleurs, Sylvain Brissot (bibli), Vincent Cauchepin (Coach), Jean-Marc Boedt (Jim), Matthieu Gaillard (Mat), Nicolas Eysseric (Mico), Philippe Gallay (McCoy), Yohan Cheilan (Yo), et les amis du lycée : Gabriel Emery, Arnaud Buffet, Christophe Bérard, Julien Petrizelli, Sébastien Petrizelli, Swann Collet et Olivier Finet.

Et enfin, un grand merci à Corine Giordani et à Marianne Julien pour leur soutien ô combien important dans la dernière ligne droite.

Encore merci à tous et à bientôt.

## Table des matières

Introduction.....	7
Chapitre 1 : Présentation clinique de l'exophtalmie.....	11
1. Anatomie.....	11
a. Les parois orbitaires.....	11
b. Le contenu orbitaire.....	12
2. Les causes d'exophtalmie.....	15
3. Les différents modes opératoires.....	18
Chapitre 2 : La problématique.....	22
1. Les risques cliniques.....	22
2. Les besoins du clinicien en termes de GMCAO.....	24
Chapitre 3 : Les différentes formes de modélisation physique.....	26
1. Les modèles analytiques.....	27
2. Les modèles discrets (les systèmes masses-ressorts).....	28
3. Les modèles continus (la méthode éléments finis).....	29
Chapitre 4 : Etat de l'art en modélisation du globe et du contenu orbitaire.....	33
1. Les travaux de modélisation de l'œil.....	33
2. Etat de l'art de la modélisation de l'orbite.....	34
a. Les modèles analytiques.....	34
b. Outils d'aide au planning et d'aide peropératoire.....	35
c. Les modèles d'aide au planning.....	37
Chapitre 5 : Première étude de modélisation : le modèle analytique.....	41
1. Description du modèle.....	41
2. Etude de sensibilité des paramètres du modèle.....	43
3. Résultats.....	45
4. Discussion.....	46
Chapitre 6 : Approfondissement de la modélisation : la mécanique des milieux continus.....	48
1. L'approche élastique.....	48
2. L'approche fluide.....	50
3. L'approche poroélastique.....	51
Chapitre 7 : Description du modèle éléments finis d'orbite.....	55
1. Description du modèle.....	55
a. Création de la géométrie du modèle.....	55
b. Construction du maillage éléments finis.....	57
2. Choix du matériau et définition des paramètres rhéologiques.....	57
a. Choix du milieu poroélastique.....	58
b. Définition des paramètres poroélastiques.....	59
3. Définition des conditions limites pour la décompression orbitaire.....	61
Chapitre 8 : Simulation avec le modèle poroélastique sur le patient de référence.....	66
1. Première simulation sur le patient de référence.....	66

a.	Résultats de la simulation.....	66
b.	Comparaison par rapport aux résultats chirurgicaux.....	68
2.	Intérêt de la simulation en grandes déformations.....	68
3.	Etude d'une autre technique chirurgicale.....	70
4.	Etude de l'influence de la taille et de la position de l'ostéotomie.....	72
a.	Définition des différentes ostéotomies.....	72
b.	Résultats des simulations.....	73
5.	Intérêt des modèles.....	74
Chapitre 9 : Evaluation de l'influence de la géométrie patient.....		78
1.	Introduction au Mesh Matching et à la correction de maillage.....	78
a.	L'algorithme du Mesh-Matching.....	79
b.	La régularisation de maillage.....	83
c.	Evaluation de la méthode de génération automatique de maillage.....	86
2.	Résultats des simulations poroélastiques sur douze patients.....	87
a.	Création des onze nouveaux maillages.....	89
b.	Résultats des simulations éléments finis.....	91
Chapitre 10 : Amélioration du modèle poroélastique : affinement des paramètres matériau...98		
1.	Etude rhéologique de la graisse.....	98
a.	Matériel utilisé.....	99
b.	Le modèle analytique mis en place.....	101
c.	Résultats de la caractérisation.....	106
d.	Améliorations de la méthode de caractérisation.....	108
2.	Tests in vivo de la raideur des tissus intra-orbitaires.....	109
a.	Présentation du capteur.....	110
b.	Premiers tests in vivo.....	113
Conclusion et Perspectives.....		117
Annexe A : Les parois orbitaires.....		121
Annexe B : Le complexe aponévrotique orbitaire.....		124
Annexe C : Les autres origines de l'exophtalmie.....		125
Annexe D : Les traitements des orbithopathies dysthyroïdiennes.....		128
1.	Les traitements médicaux.....	128
2.	Les chirurgies palpébrale et oculomotrice.....	129
Annexe E : Historique des différentes techniques de décompression et présentation de leur modes opératoires.....		130
Annexe F : Formulations des milieux élastique et poreux.....		136
1.	L'approche élastique.....	136
a.	Déformation du corps élastique.....	136
b.	Contraintes à l'intérieur du corps élastique.....	138
c.	Loi de comportement du milieu.....	139
2.	L'approche biphasique des milieux poroélastiques.....	141

Annexe G : Les 12 maillages patients créés avec le Mesh-Matching.....	144
Annexe H : Plans du capteur d'effort et de déplacement pour les tissus in-vivo.....	146
Références.....	151