

Introduction

Une des pathologies de l'orbite les plus fréquentes est l'exophtalmie [Saraux *et al.*, 1987]. Celle-ci se caractérise par le fait que le globe est poussé en avant de son orbite (Figure I.1). Cliniquement, on parle de protrusion du globe oculaire. Son origine est, dans la plupart, des cas liée à une augmentation du volume du contenu orbitaire, c'est-à-dire des muscles ou de la graisse. Les conséquences esthétiques et psychologiques pour le patient sont évidentes au cours d'une telle pathologie. De plus, l'exophtalmie a des conséquences cliniques : une exposition anormale de la cornée et/ou un étirement du nerf optique et des vaisseaux sanguins orbitaires. En effet, la protrusion anormale du globe oculaire peut conduire à une rétraction palpébrale, *i.e.* une ouverture plus importante des paupières, qui empêche le patient de fermer normalement les yeux et implique donc une exposition aux rayons du soleil pouvant être dangereuse du globe, et en particulier de la cornée. La cornée peut, en conséquence, être altérée plus ou moins gravement ce qui conduit parfois à une réduction de la capacité visuelle du patient. Par ailleurs, il est possible que la protrusion induite par l'exophtalmie implique un étirement plus ou moins important du nerf optique et se traduise par une atteinte plus ou moins sévère de la vue du patient. La compression des vaisseaux sanguins peut, quant à elle, conduire à des inflammations des tissus intra-orbitaires à cause d'un mauvais drainage du flux sanguin.



Figure I.1 – A gauche, patient souffrant d'une exophtalmie due à une tumeur située dans l'orbite gauche et qui a pour conséquence une protrusion excessivement importante de l'œil. A droite, patient souffrant d'une exophtalmie dysthyroïdienne et conduisant à une protrusion des deux globes oculaires de façon symétrique.

Cinq causes peuvent engendrer une exophtalmie [Saraux *et al.*, 1987] :

- Premièrement, il peut s'agir d'une anomalie de la cavité orbitaire, qui ne peut contenir tous les tissus mous intra-orbitaires. La solution à ce problème est essentiellement chirurgicale et consiste à augmenter le volume orbitaire.
- Une exophtalmie peut aussi être provoquée par un traumatisme orbitaire. En effet, en produisant un hématome intra-orbitaire, ce traumatisme peut conduire à une augmentation de volume du contenu orbitaire et donc à une protrusion du globe. Par ailleurs, il peut provoquer la compression du nerf optique et la réduction des mouvements oculaires. Dans la plupart des cas, cet hématome se résorbe tout seul après quelques jours mais peut nécessiter une intervention chirurgicale. Par ailleurs les traumatismes impliquent souvent des fractures conduisant à une énoptalmie (recul excessif du globe) après résorption de l'hématome.

- Les infections orbitaires peuvent aussi être source d'exophtalmie. Elles sont très bien traitées avec des antibiotiques.
- Les tumeurs de l'orbite conduisent souvent à une exophtalmie (Figure I.1 gauche). Elles peuvent être localisées dans le cône orbitaire, pour les tumeurs du nerf optique ou des vaisseaux, ou hors du cône, pour les tumeurs des parois orbitaires, les lymphomes... Dans ce cas, l'exophtalmie est souvent unilatérale (c'est-à-dire dans une seule orbite) et peut réduire la mobilité du globe et comprimer le nerf optique. La solution aux exophtalmies tumorales vient en général de la radiothérapie mais une extraction chirurgicale de la tumeur peut être nécessaire.
- Finalement, la dernière cause d'exophtalmie, et c'est celle qui est la plus courante, est liée à un dysfonctionnement endocrinien. La protrusion du globe oculaire est souvent bilatérale et peut être associée à des complications au niveau des muscles oculomoteurs et à une perte de la vue partielle voire totale. Le traitement de ce genre d'exophtalmie est assez délicat. Il s'agit, dans un premier temps, d'un traitement endocrinien visant à stabiliser le dysfonctionnement à partir d'immunosuppresseurs et qui peut être accompagné de radiothérapie. Dans un deuxième temps, une réduction chirurgicale de l'exophtalmie peut être nécessaire, en particulier lorsque le nerf optique est comprimé.

Dans le cadre de cette thèse, dirigée par Yohan Payan et Jocelyne Troccaz et effectuée dans l'équipe GMCAO (Gestes Médicaux et Chirurgicaux Assistés par Ordinateur) du laboratoire TIMC, nous nous sommes intéressés à cette dernière cause d'exophtalmie et plus particulièrement aux exophtalmies dysthyroïdiennes. Nous avons travaillé en collaboration avec les cliniciens du service de Chirurgie Maxillo-Faciale de l'hôpital Purpan de Toulouse, et en particulier le Professeur Franck Boutault et l'interne en chirurgie Christophe Marécaux, et le laboratoire de biomécanique de Toulouse, et en particulier le Professeur Pascal Swider et les doctorants Annaïg Pédrone, Dominique Ambard et Fabien Audry.

Le but de cette thèse est principalement de fournir une première étude du comportement des tissus mous intra-orbitaires avant et pendant l'intervention de décompression orbitaire. Elle est donc essentiellement tournée vers la deuxième partie du traitement des exophtalmies dysthyroïdiennes : le traitement chirurgical.

Le but de la chirurgie de décompression orbitaire est double : diminuer la protrusion orbitaire tout en réduisant les risques de lésions du nerf optique. Classiquement, il existe deux techniques de décompression orbitaire : l'extraction de tissus graisseux de l'orbite (Olivari, 2001), de façon à réduire le volume des tissus mous intra-orbitaires, ou la décompression d'une ou plusieurs parois osseuses de l'orbite (Wilson and Manke, 1991, Stanley *et al.*, 1989), dans le but d'augmenter le volume de l'orbite osseuse. Dans les deux cas, qui sont de plus en plus souvent combinés, l'effet escompté est atteint : la protrusion du globe est diminuée et le nerf est décompressé.

Le professeur Boutault pratique essentiellement la deuxième technique, visant à augmenter le volume de la cavité orbitaire, en lui adjoignant quelques extractions de tissus graisseux de façon à optimiser le résultat de l'intervention. De plus, il applique un effort sur le globe de façon à augmenter la vitesse du recul oculaire et à améliorer le résultat de la

décompression. C'est ce geste que nous visons à modéliser au cours de cette thèse. Le but essentiel est d'être capable d'estimer le plus précisément possible le recul oculaire optimal possible pour un patient donné et pour une taille et une position de décompression données. De plus, il serait intéressant de pouvoir évaluer le volume de tissus mous décompressés pendant l'intervention et l'effort à appliquer pour obtenir tel ou tel recul. Ces différents points paraissent tous intéressants dans le cadre d'une procédure d'aide à la planification d'une intervention de réduction d'une exophtalmie.

Actuellement, la phase de planning est basée sur l'étude de radiographies et d'un examen scanner du patient permettant de déterminer à l'avance où le chirurgien va effectuer son intervention. La précision de ce planning est hautement dépendante de l'expérience du clinicien. En étudiant le comportement des tissus mous intra-orbitaires au cours de cette intervention, nous aspirons à aider un clinicien, même inexpérimenté, à planifier son intervention le plus précisément possible en se basant sur les mêmes données dont il dispose actuellement (i.e. les radiographies et l'examen scanner).

Dans cette optique d'aide au planning, nous avons développé deux modèles. Le premier est un modèle analytique simple qui permet d'estimer le volume de tissus décompressés en fonction du recul oculaire souhaité. Ce modèle a permis d'effectuer une première étude du comportement de l'ensemble orbite/globe au cours d'une décompression, avant de passer à une modélisation plus complexe. Le deuxième modèle que nous avons développé est un modèle éléments finis permettant de simuler le comportement des tissus mous de l'orbite. Ceux-ci sont représentés par le biais d'un matériau poroélastique. La simulation de la décompression est plus complète et a conduit à une étude plus approfondie du recul oculaire, du volume décompressé, de la taille et de la position de la décompression et de l'effort exercé par le chirurgien. Les paramètres du matériau poroélastique ont dû être déterminés pour obtenir des simulations de bonne qualité. Pour cela, nous avons effectué une première étude recalant les résultats des simulations avec des résultats observés cliniquement. Par la suite, une seconde étude a été développée sur onze nouveaux patients dans le but d'estimer l'influence de la morphologie de l'orbite. Les paramètres éléments finis ont ensuite été affinés par le biais de travaux de mesures rhéologiques in vivo et in vitro.

Le plan de ce manuscrit est le suivant :

- Le premier chapitre est consacré à la description anatomique de l'orbite, de l'exophtalmie dysthyroïdienne et de la décompression orbitaire telle qu'elle est pratiquée à l'hôpital Purpan de Toulouse.
- Le deuxième chapitre présente la problématique qu'il nous a fallu résoudre dans cette thèse, par le biais de nos deux différents modèles.
- Une brève présentation des différentes modélisations physiques est effectuée dans le Chapitre 3.
- L'état de l'art des travaux de modélisation du globe et de l'orbite est présenté au cours du quatrième chapitre.
- Le cinquième chapitre est dédié à la présentation de notre modèle analytique et à ses résultats.

- Dans le sixième chapitre, nous faisons une introduction à la mécanique des milieux continus et en particulier aux matériaux élastique, fluide et poroélastique.
- Notre modèle éléments finis poroélastique est présenté dans le Chapitre 7, dans lequel nous détaillons sa conception, l'étude de ses paramètres et ses conditions limites.
- Les premiers résultats de ce modèle, suivis d'une étude de l'influence de la taille et de la position de la décompression, font l'objet du huitième chapitre.
- Le Chapitre 9 présente les travaux que nous avons effectués sur onze patients et qui étudient l'influence de la morphologie de l'orbite du patient.
- Enfin, le dixième chapitre introduit les travaux que nous avons entamés sur l'étude rhéologique des paramètres éléments finis des tissus mous de l'orbite.