

# Avant-propos

**Valérie DEPLANO<sup>1</sup> et José-Maria FULLANA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Irphé, CNRS, Aix-Marseille Université, École centrale Marseille, Marseille, France*

<sup>2</sup> *Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS, Sorbonne Université, Paris, France*

Lors du 44<sup>e</sup> congrès annuel de la Société de Biomécanique organisé à Poitiers en 2019, une session thématique s'est tenue sur l'état de l'art des modélisations biomécaniques appliquées aux écoulements sanguins dans les grands vaisseaux ainsi que sur les expérimentations *in vivo* associées, conduites à partir de données expérimentales issues d'imageries médicales. Lors de cette session, organisée conjointement avec le GDR Mécanique des matériaux et fluides biologiques (MecaBio), un focus particulier a été porté sur l'intérêt des interactions entre les équipes cliniques et biomécaniques ainsi que sur l'indispensable dialogue entre modélisations numériques et études expérimentales *in vitro* et *in vivo*.

Cet ouvrage, qui s'est nourri des présentations faites lors de cette session thématique, traite plus particulièrement de modélisations numériques en mécanique des fluides et des solides appliquées aux systèmes biologiques. Il apporte certains éléments de réponse à la question de l'intérêt de croiser les savoirs médicaux et biomécaniques pour traiter des problématiques cliniques. Les modélisations théoriques et numériques appliquées aux systèmes biologiques ont pour objectif de relier entre elles des variables dynamiques, biologiques ou mécaniques, qui peuvent être, ou pas, accessibles, aux mesures expérimentales (vitesses, contraintes ou pressions par exemple). Ces variables, qui sont utilisées pour construire une théorie, un modèle puis son pendant numérique, sont basées sur des hypothèses et nécessitent donc une vérification expérimentale sous forme de confrontation et validation avec des données *in vitro* ou *in vivo* existantes. Le modèle numérique peut alors être utilisé pour des calculs prédictifs.

Les récentes avancées en imagerie médicale, en particulier dans le domaine technique, et leur intégration dans les routines cliniques, ont été très importantes. Les essais cliniques fournissent aujourd'hui une grande quantité de données *in vivo* issues de techniques d'imagerie comme l'échographie, l'IRM, l'élastographie, l'endomicroscopie confocale ou la tomographie de cohérence optique qui donnent des informations précises sur la structure interne des systèmes biologiques et sur leur fonction physiologique. Face à ces données plusieurs questions se posent : comment extraire des informations cliniquement pertinentes ? Comment les traiter ? Comment prédire les évolutions des variables observées ?

Le lien entre le domaine médical et les recherches en mécanique pour le vivant, modélisation numérique et mathématiques, soit plus précisément entre des médecins et des chercheurs en médecine et des ingénieurs, des mécaniciens, et des mathématiciens appliqués, est devenu possible parce qu'un dialogue s'est établi entre des disciplines *a priori* éloignées ; des intérêts communs sont apparus, des approches complémentaires se sont croisées.

L'un des objectifs de cet ouvrage est d'éclairer les points d'accroche entre les équipes médicales traitant des pathologies où une composante mécanique est présente et des chercheurs en mécanique et en mathématique développant des modèles et outils numériques. Nous sommes partis du constat que toute recherche théorique/numérique se nourrit de données expérimentales qui évoluent avec les avancées technologiques, et que vice-versa les protocoles expérimentaux vont puiser souvent dans les prédictions théoriques/numériques.

Lors de la mise en place d'une telle interdisciplinarité la prise en compte de la complexité inhérente à chaque discipline est un point clé. Outre les questions de croissance, de remodelage, et des différentes échelles spatiotemporelles auxquelles les systèmes biologiques obéissent, une des complexités du vivant provient également du fait qu'une même cause peut donner des effets très variés. Ils dépendent, entre autres, de la pathologie, de son niveau d'évolution, du profil spécifique du patient, de facteurs environnementaux. Prenons le cas de la dissection aortique, un exemple de pathologie vasculaire typique d'interactions médecine et mécanique. Dans la dissection aortique une cause mécanique, le cisaillement à la paroi qui est une conséquence de l'écoulement pulsé sanguin, et une cause géométrique, la topologie de la crosse de l'aorte, peuvent conduire à la genèse de la pathologie ou à des événements délétères quant à son évolution. Toutefois si l'on considère les processus d'activation biologique dus aux *stimulus* mécaniques et/ou des conditions particuliers du protocole clinique, cisaillement pariétal et topologie peuvent engendrer des effets ou des « données expérimentales » différents voire contradictoires ; un cas d'école étant l'effet du cisaillement à la paroi dû à l'écoulement sur la croissance des athéromes. Cette complexité complique grandement la détermination des variables

pertinentes pour évaluer une pathologie et, *a posteriori*, l'établissement d'une théorie ou d'un modèle à partir des données disponibles.

La complexité des modèles numériques est multiple et apparaît à des niveaux différents : dans la modélisation par les-non-linéarités des modèles de la mécanique des fluides et des solides, dans les géométries complexes inhérentes au vivant où les modèles sont appliqués, dans l'implémentation numérique par l'utilisation de schémas numériques et techniques d'intégration sophistiquées, voire dans les techniques de parallélisations propres aux codes numériques pour l'accélération des calculs. Cet ouvrage montrera aussi que les modèles déployés peuvent être complets comme les équations de Navier-Stokes pour la mécanique des fluides ou réduits comme des modèles simples pour modéliser la mécanique de la paroi artérielle.

Dans tous les cas les deux disciplines poursuivent un rêve translationnel commun d'une médecine computationnelle où les simulations numériques rapides, dont les modèles ont été validés, se font au lit du patient, deviennent des outils d'aide à la décision et à la prédiction de l'évolution des pathologies, font partie intégrante du bloc opératoire et permettent de planifier des interventions personnalisées.

Cet ouvrage, parrainé par la Société de biomécanique francophone et par le GRD « MécaBio », abonde dans ce sens. Le premier chapitre propose un état de l'art sur la structure et les propriétés rhéologiques du sang indispensable à la compréhension de la dynamique circulatoire dans différentes conditions. Les sujets proposés dans les autres chapitres sont variés en passant par l'étude des paramètres et les marqueurs hydrodynamiques qui influencent les réparations endovasculaires, l'étude des écoulements dans certaines singularités géométriques du système cardiovasculaire (natives ou pathologiques) et de leur corrélation avec l'évolution des pathologies cardiovasculaires, le rôle de l'hémodynamique dans le développement de l'athérosclérose, jusqu'à la simulation d'objets flexibles dans des écoulements avec l'introduction d'outils numériques comme YALES, Basilisk ou Caps3D qui permettent des études spécifiques sur des systèmes biologiques, ainsi que la modélisation *via* la réduction de modèles utilisée pour avoir des outils numériques rapides et fiables.

Nous espérons que cet ouvrage donnera un éclairage nouveau sur les modélisations biomécaniques appliquées aux écoulements sanguins dans les vaisseaux et qu'il apportera des pistes pour poursuivre le développement et les applications des modèles numériques dans la recherche clinique et les protocoles expérimentaux.