

Titre en français :

Comportements émergents dans les réseaux d'écoulements bio-inspirés pilotés par interactions fluide-structure actives.

Titre en anglais :

Emergent behavior in bio-inspired flow networks driven by active fluid-structure interactions.

Directrice et directeurs de thèse :

Cécile Baron (Directrice) / cecile.baron@univ-amu.fr

Simon Gsell (Co-directeur) / simon.gsell@univ-amu.fr

Martin Brandenbourger (Co-directeur) / martin.brandenbourger@univ-amu.fr

Laboratoire : IRPHE

Financement : demandé

Résumé en français : De nombreux systèmes biologiques s'appuient sur des réseaux d'écoulements fluides pour distribuer des ressources et des informations à l'échelle d'un organisme^{1,2} (Fig. 1(a,b)). Les écoulements sont généralement générés par la contraction des vaisseaux. Le transport fluide est assuré par la propagation de ces contractions (péristaltisme) ou par la présence de valves unidirectionnelles (feuilletts). Alors que ce processus a largement été étudié dans les systèmes basés sur une pompe centrale (par exemple le système cardiovasculaire), nous manquons encore de modèles pour comprendre les mécanismes de transport lorsqu'ils sont distribués le long des réseaux vasculaires. C'est le cas du système lymphatique, qui combine des ondes péristaltiques et des feuilletts répartis le long de ses vaisseaux (Fig. 1(c)). On observe que le réseau lymphatique est extrêmement résistant aux dysfonctionnements et qu'il est capable de s'adapter aux besoins du système lymphatique. Jusqu'à présent, nous ne comprenons pas comment cette adaptabilité et cette résilience émergent du couplage entre les contractions actives des vaisseaux et les déformations des feuilletts le long du réseau. Dans ce projet doctoral, nous (1) **identifierons les mécanismes d'interaction fluide-structure qui peuvent conduire à des comportements d'écoulement complexes à l'échelle du vaisseau**, et (2) **déterminerons la dynamique d'écoulement qui en résulte à l'échelle du réseau**. Nous développerons un outil CFD basé sur les méthodes de lattice-Boltzmann et de frontières immergées pour développer une caractérisation systématique et rapide des écoulements dans les vaisseaux déformables bio-inspirés interagissant avec des structures élastiques (Fig. 1 (d)). Cet outil sera combiné à des expériences modèles réalisées au laboratoire afin de caractériser la réponse non-linéaire de vaisseaux individuels et de petits réseaux modèles à des forçages externes (par exemple, un gradient de pression) et à des perturbations. Nous intégrerons ensuite les caractéristiques hydrauliques des vaisseaux dans un modèle phénoménologique de réseau afin de déterminer le comportement à grande échelle émergeant de ces propriétés locales³. Ce travail nous permettra de mieux **comprendre les principes physiques qui sous-tendent la dynamique des réseaux biologiques adaptatifs tels que le système lymphatique humain, les myxomycètes ou de *P. polycephalum* ("le blob")**, et guidera l'ingénierie des matériaux actifs intelligents basés sur les réseaux d'écoulement des fluides.

Résumé en anglais : *Many biological systems rely on flow in networks to distribute resources and information at the scale of an organism^{1,2} (Fig. 1(a,b)). Fluid flows are usually generated by the contraction of vessels containing liquid. Fluid transport is ensured by the propagation of these contractions (peristalsis) or by*

the presence of one-way valves (leaflets). While this has been widely studied in systems based on a central pump (e.g. the cardiovascular system), we still lack of models to understand transport mechanisms when they are distributed along vascular networks. This is the case for the lymphatic system, which combines peristaltic waves and leaflets distributed along its vessels (Fig. 1(c)). The lymphatic network is observed to be extremely resilient against malfunctions and highly adaptable to the need of the lymphatic system. So far, we do not understand how such adaptability and resilience emerge from the coupling between active vessel contractions and leaflet deformations along a vascular network. In this PhD project, we will (1) **identify fluid-structure interaction mechanisms that can drive complex flow behaviors at the vessel scale**, and (2) **determine the resulting emergent flow dynamics at the network scale**. We will develop a CFD framework based on the lattice-Boltzmann and immersed-boundary methods to develop systematic and fast characterization of flows in bio-inspired deformable vessels interacting with elastic soft structures (Fig. 1 (d)). This tool will be combined with model experiments to allow us to characterize the non-linear response of single vessels and small model networks to external forcing (e.g. pressure gradient) and perturbations. We will then integrate the vessel response characteristics into a phenomenological network model to determine the large-scale behavior emerging from the vessel properties³. This work will allow us to better **understand the physical principles underlying the dynamics of adaptive biological networks as the human lymphatic system, the slime mold or *P. polycephalum*** ("the blob"), and will guide the engineering of smart active materials based on fluid flow networks.

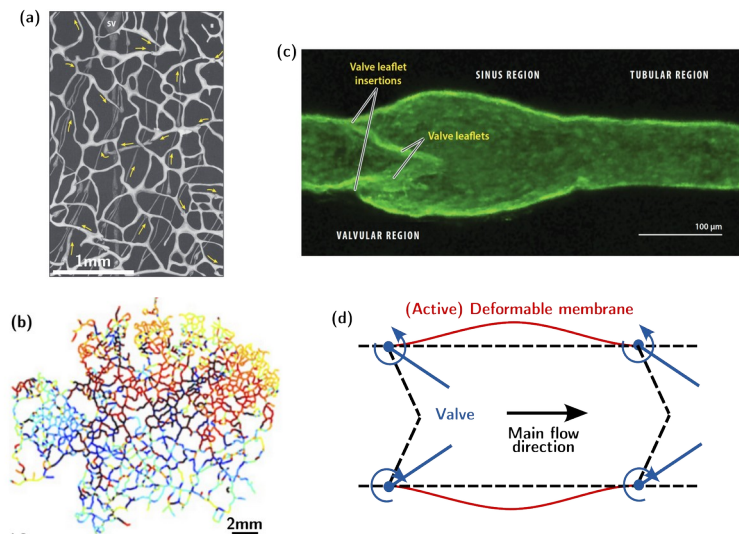


Fig. 1 - (a-b) Two examples of complex biological networks: (a) the human lymphatic system¹ and (b) *P. polycephalum*². (c) Lymphatic vessel with deformable valve leaflets driving non-linear flow response to external pressure gradient¹. (d) An example of minimal vessel model that will be studied during the project.

Fig. 1 - (a-b) Deux exemples de réseaux biologiques complexes: (a) le système lymphatique humain¹ and (b) *P. polycephalum*². (c) Vaisseau lymphatique présentant des valves en feuillets déformables conduisant à une réponse non-linéaire de l'écoulement à un gradient de pression externe¹. (d) Un exemple de vaisseau modèle qui sera étudié durant le projet.

We will then integrate the vessel response characteristics into a phenomenological network model to determine the large-scale behavior emerging from the vessel properties³. This work will allow us to better **understand the physical principles underlying the dynamics of adaptive biological networks as the human lymphatic system, the slime mold or *P. polycephalum*** ("the blob"), and will guide the engineering of smart active materials based on fluid flow networks.

Profil recherché : Nous recherchons une personne titulaire d'un master en mécanique, physique ou mathématiques appliquées, avec une expérience en modélisation et simulation numérique.

Expected profile: We look for a student with background in mechanics, physics or applied mathematics, with experience in modeling and numerical simulation.

Publications sur le sujet :

[1] Moore & Bertram, Annu. Rev. Fluid Mech., 2018. doi:[10.1146/annurev-fluid-122316-045259](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045259)

[2] Alim et al., PNAS, 2013. doi:[10.1073/pnas.1305049110](https://doi.org/10.1073/pnas.1305049110)

[3] Ruiz-García & Katifori, Phys. Rev. E, 2021. doi:[10.1103/PhysRevE.103.062301](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.062301)

Insertion professionnelle après thèse : publique et/ou privée