

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
Valérie DEPLANO et José-Maria FULLANA	
<b>Chapitre 1. Hémodynamique et hémorhéologie</b> . . . . .	5
Thomas PODGORSKI	
1.1. Structure et fonction du système circulatoire . . . . .	5
1.2. Composition du sang . . . . .	9
1.3. Le globule rouge : structure et dynamique . . . . .	11
1.3.1. Propriétés du globule rouge . . . . .	11
1.3.2. Pathologies érythrocytaires . . . . .	14
1.3.3. Dynamique du globule rouge . . . . .	18
1.4. Rhéologie et dynamique . . . . .	21
1.4.1. Phénoménologie de la rhéologie sanguine . . . . .	21
1.4.2. Agrégation des globules rouges. . . . .	25
1.4.3. Dynamique de la microcirculation . . . . .	32
1.5. Conclusion . . . . .	35
1.6. Bibliographie. . . . .	36
<b>Chapitre 2. Simulations numériques de l'impact hémodynamique des interventions endovasculaires complexes</b> . . . . .	45
Sabrina BEN-AHMED, Jean-Noël ALBERTINI, Jean-Pierre FAVRE, C. Alberto FIGUEROA, Eugenio ROSSET, Francesca CONDEMI et Stéphane AVRIL	
2.1. Introduction. . . . .	45
2.2. Méthodes . . . . .	47
2.3. Résultats. . . . .	50
2.3.1. Modèle sans sténose . . . . .	52

2.3.2. Modèle avec une sténose de 40 % du diamètre . . . . .	54
2.3.3. Modèle avec une sténose de 70 % du diamètre . . . . .	57
2.4. Discussion . . . . .	60
2.4.1. Vitesse et débit . . . . .	61
2.4.2. Pression. . . . .	62
2.4.3. TAWSS. . . . .	63
2.4.4. PAS . . . . .	64
2.4.5. Contraintes. . . . .	65
2.5. Conclusion . . . . .	65
2.6. Remerciements. . . . .	66
2.7. Bibliographie. . . . .	66

### **Chapitre 3. Singularités géométriques vasculaires, marqueurs hémodynamiques et pathologies . . . . .**

Valérie DEPLANO et Carine GUIVIER-CURIEN

3.1. Introduction. . . . .	71
3.2. Caractéristiques générales des écoulements sanguins à l'échelle macroscopique . . . . .	72
3.3. Quelques singularités géométriques du système cardiovasculaire . . . . .	75
3.3.1. Courbures et bifurcations . . . . .	75
3.3.2. Rétrécissement de section . . . . .	79
3.3.3. Élargissement de section. . . . .	81
3.3.4. Les valves . . . . .	83
3.4. Marqueurs hémodynamiques . . . . .	85
3.4.1. Index dérivés du frottement pariétal . . . . .	86
3.4.2. Index décrivant les structures vorticales. . . . .	88
3.5. Corrélation entre les marqueurs hémodynamiques et les pathologies : quelques exemples . . . . .	90
3.5.1. WSS et pathologies . . . . .	92
3.5.2. Marqueurs hémodynamiques et thrombus . . . . .	94
3.6. Conclusion . . . . .	98
3.7. Bibliographie. . . . .	98

### **Chapitre 4. Le rôle du débit sanguin artériel dans l'athérosclérose . . . . .**

Guillermo VILAPLANA et Abdul I. BARAKAT

4.1. Introduction. . . . .	110
4.2. Rôle de la mécanique des fluides artériels dans l'athérosclérose . . . . .	110
4.2.1. Initiation et progression de l'athérosclérose . . . . .	110

4.2.2. Rôle du flux artériel dans l'athérosclérose . . . . .	113
4.3. Un exemple illustrant la complexité des champs d'écoulement artériels : interactions dynamiques fluides entre deux branches artérielles . . . . .	115
4.3.1. Le problème spécifique abordé . . . . .	115
4.3.2. Matériaux et méthodes . . . . .	116
4.3.3. Résultats . . . . .	119
4.3.4. Discussion . . . . .	134
4.4. Conclusion . . . . .	136
4.5. Bibliographie . . . . .	136

**Chapitre 5. Simulations hémodynamiques : paramétrage,  
données cliniques, planification d'interventions . . . . . 139**

Irène E. VIGNON-CLEMENTEL et Sanjay PANT

5.1. Introduction . . . . .	139
5.2. Modèles multi-échelles : besoin ou non de données spécifiques aux patients . . . . .	142
5.2.1. Évaluation de la fonction d'une nouvelle procédure/ d'un nouveau dispositif . . . . .	142
5.2.2. Optimisation de la procédure/dispositif pour un patient individuel . . . . .	143
5.2.3. Études de population . . . . .	143
5.3. Comment inclure les données spécifiques aux patients ? . . . . .	144
5.3.1. Type de données cliniques disponibles et défis associés . . . . .	145
5.3.2. Choix d'une méthode d'ajustement des paramètres en fonction de la résistance de la pièce 3D . . . . .	146
5.3.3. La résistance de la partie 3D non négligeable . . . . .	149
5.4. Des modèles ne répondant pas aux attentes : vers l'adaptation . . . . .	153
5.4.1. Hépatectomie du foie et perte de sang . . . . .	154
5.4.2. Atténuation de la sténose pulmonaire et adaptation vasculaire . . . . .	155
5.5. Conclusion . . . . .	157
5.6. Remerciements . . . . .	157
5.7. Bibliographie . . . . .	158

**Chapitre 6. Modèles d'ordre réduit du flux sanguin :  
application aux sténoses artérielles . . . . . 163**

Jeanne VENTRE, José-Maria FULLANA, Pierre-Yves LAGRÉE,

Francesca RAIMONDI et Nathalie BODDAERT

6.1. Introduction . . . . .	163
-----------------------------	-----

6.2. Modélisation du flux sanguin . . . . .	165
6.2.1. Modèle bidimensionnel axisymétrique . . . . .	166
6.2.2. Modèle multi-anneaux . . . . .	167
6.2.3. Modèle unidimensionnel. . . . .	169
6.2.4. Modèle zéro-dimensionnel . . . . .	169
6.3. Validation des modèles . . . . .	170
6.3.1. L'effet d'entrée . . . . .	170
6.3.2. La solution de Womersley dans une artère élastique . . . . .	171
6.4. Application aux sténoses artérielles . . . . .	174
6.5. Conclusion . . . . .	180
6.6. Bibliographie. . . . .	180

## **Chapitre 7. YALES2BIO : un solveur dédié aux écoulements sanguins . . . . .**

185

Simon MENDEZ, Alain BÉROD, Christophe CHNAFA, Morgane GARREAU,  
Étienne GIBAUD, Anthony LARROQUE, Stéphanie LINDSEY, Marco MARTINS  
AFONSO, Pascal MATTÉOLI, Rodrigo MENDEZ ROJANO, Dorian MIDOU,  
Thomas PUISEUX, Julien SIGÜENZA, Pierre TARACONAT,  
Vladeta ZMIJANOVIC et Franck NICLOUD

7.1. Méthodes et validation . . . . .	186
7.1.1. Configuration de validation de la Food and Drug Administration . . . . .	188
7.1.2. Pincés optiques . . . . .	188
7.1.3. L'auto-organisation des globules rouges . . . . .	191
7.2. La simulation comme soutien aux efforts de modélisation . . . . .	191
7.2.1. Dynamique d'une cellule unique . . . . .	192
7.2.2. Stents, <i>flow diverters</i> pour le traitement des anévrismes intracrâniens . . . . .	193
7.2.3. Échocardiographie . . . . .	194
7.3. Simulations pour les applications industrielles . . . . .	196
7.3.1. Débit dans le cœur artificiel Carmat . . . . .	196
7.3.2. Dynamique des globules rouges dans les analyseurs de sang d'HORIBA Medical . . . . .	197
7.4. Développements actuels . . . . .	197
7.4.1. Thrombose . . . . .	198
7.4.2. IRM <i>in silico</i> . . . . .	199
7.4.3. Multicellules . . . . .	201
7.5. Remerciements. . . . .	202
7.6. Bibliographie. . . . .	202

---

<b>Chapitre 8. Relaxation de capsules sous écoulement dans un tube.</b> . . . . .	209
Bruno SARKIS, Anne-Virginie SALSAC et José-Maria FULLANA	
8.1. Introduction. . . . .	209
8.2. Présentation du problème physique. . . . .	211
8.2.1. Solvateur fluide . . . . .	212
8.2.2. Solvateur solide . . . . .	214
8.2.3. Couplage fluide-structure par la méthode IBM . . . . .	215
8.3. Écoulement transitoire d'une microcapsule dans un canal microfluidique avec une marche . . . . .	216
8.3.1. Écoulement de la capsule en régime de Stokes. . . . .	217
8.3.2. Dynamique de la relaxation en régime de Stokes . . . . .	219
8.3.3. Dynamique de la relaxation en régime de Navier-Stokes . . . . .	223
8.4. Discussion et conclusion . . . . .	225
8.5. Bibliographie. . . . .	226
<b>Conclusion. Des mots et des choses</b> . . . . .	231
Valérie DEPLANO, José-Maria FULLANA et Claude VERDIER	
<b>Liste des auteurs.</b> . . . . .	235
<b>Index</b> . . . . .	239