

La Simulation Médicale

Hervé Delingette

Projet Epidaure

INRIA Sophia-Antipolis

2004 Route des Lucioles

06902 Sophia-Antipolis BP 93

E-mail : Herve.Delingette@inria.fr

1 Introduction

Le développement rapide des technologies de l'information contribue largement à l'émergence de nouvelles méthodologies en médecine. L'impact de ces technologies informatiques dans le domaine de la santé est très vaste puisqu'il concerne aussi bien le format et le traitement des dossiers des patients que la pratique clinique pour la réalisation d'un diagnostic ou d'une thérapie. Parmi les développements attendus, ceux intégrant les concepts de la réalité virtuelle devraient avoir un grand rôle dans les années à venir. Les applications de la réalité virtuelle sont caractérisées par une très importante interaction entre l'utilisateur et la machine sous la forme d'un retour visuel, sonore, tactile ou haptique. Pour la plupart des applications médicales, le concept d'immersion de l'utilisateur dans un environnement virtuel n'est pas aussi important que dans la plupart des applications de la réalité virtuelle. C'est pourquoi on utilisera par la suite le terme de « simulation » au sens large plutôt que celui de « réalité virtuelle » qui fait bien souvent référence à ces contraintes d'immersion.

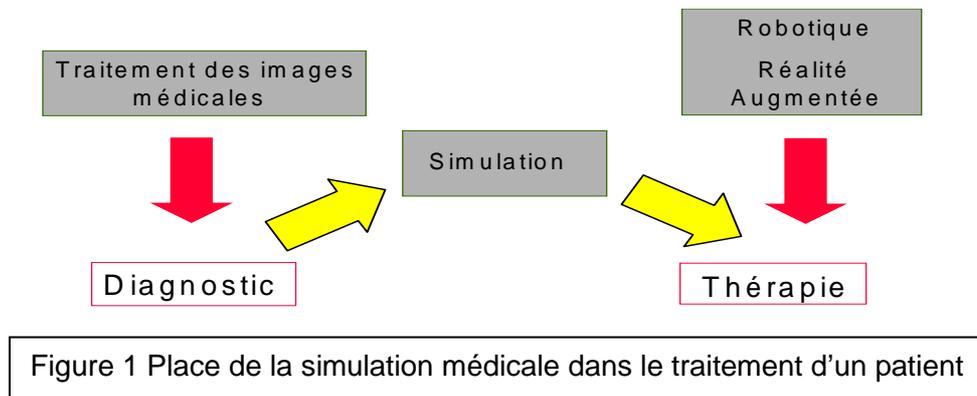


Figure 1 Place de la simulation médicale dans le traitement d'un patient

La figure 1 présente la place centrale que devrait occuper la simulation en médecine comme tâche intermédiaire entre l'établissement d'un diagnostic et l'application d'une thérapie. L'intérêt des techniques de simulation en médecine est lié à plusieurs facteurs[1] :

- ◆ **La complication croissante des procédures thérapeutiques.** La complexité des actes thérapeutiques est en général la conséquence de l'utilisation de nouvelles technologies qui bouleversent les pratiques traditionnellement enseignées. La simulation est alors un moyen essentiel pour la formation et le perfectionnement des thérapeutes : c'est le rôle par exemple de la simulation de la chirurgie mini-invasive.
- ◆ **La perception tridimensionnelle des structures anatomiques.** La compréhension des rapports entre les différentes structures anatomiques est facilitée par la visualisation en

trois dimensions. Ce mode de visualisation est souvent considéré comme étant complémentaire de la visualisation traditionnelle en imagerie médicale. Les domaines qui bénéficient le plus de cette perception tridimensionnelle concernent l'établissement d'un diagnostic ou à la planification de la thérapie.

- ◆ **Les problèmes éthiques en médecine.** La simulation permet en effet d'éviter des expérimentations de certaines procédures chez l'homme ou l'animal.
- ◆ **Le contrôle total de l'environnement de la simulation.** La spécification très précise de l'environnement de simulation permet d'obtenir une évaluation objective et répétable de la performance de l'utilisateur. Cette évaluation peut être appliquée au patient, par exemple dans le cas la thérapie de troubles physiques ou mentaux, ou au praticien, pour évaluer objectivement la précision de ses gestes.

2 Problématique de la Simulation

Pour réaliser une application de simulation en médecine il est nécessaire d'intégrer deux composantes essentielles : la réalisation d'une interface homme-machine performante et la modélisation réaliste de la procédure médicale. Ces 2 composantes ont des problématiques très différentes voire antagonistes.

2.1 Problématique de la modélisation

Lors que l'on veut simuler un acte médical, il est souvent indispensable de modéliser deux éléments distincts : les outils utilisés pour accomplir cet acte et le comportement du patient. Par exemple, lorsqu'il s'agit de simuler un acte chirurgical, il faut simuler d'une part la forme et l'action des instruments chirurgicaux et d'autre part, le comportement des organes et tissus du patient sous l'effet de l'application de ces instruments.

Pour répondre aux contraintes liées à la simulation, il est nécessaire de développer des modèles ayant les propriétés suivantes:

- ◆ **Modélisation quantitative.** Pour un traitement informatique, il est nécessaire de disposer de modèles numériques reposant sur des lois mathématiques.
- ◆ **Modélisation multi-échelle.** Il est nécessaire de pouvoir disposer de plusieurs modèles pour le même phénomène physique en fonction de la précision de la modélisation mais également en fonction du temps de calcul requis par la modélisation.

2.1.1 Modélisation des instruments utilisés en médecine

Les outils utilisés dans les actes médicaux étant manufacturés, il existe en général une modélisation minimale de leur fonctionnement. Cependant, dans certains cas, cette modélisation peut se révéler être d'une grande complexité. Par exemple, pour simuler l'introduction d'une endoscope flexible dans l'arbre bronchique, il est nécessaire de modéliser la friction et la collision de l'instrument flexible le long de la paroi. Même sans tenir compte de l'élasticité de la paroi, il est difficile de calculer les efforts et de la déformation de cet instrument dans un temps suffisamment court pour permettre une véritable simulation du geste chirurgical.

2.1.2 Modélisation du corps humain

La modélisation du corps humain représente assurément un grand défi scientifique qui devra être relevé dans les années à venir. On peut distinguer au moins 3 niveaux de modélisation du corps humain[2,3] (voir figure 2). Tout d'abord, la modélisation anatomique fait essentiellement appel à la représentation géométrique du corps, celle-ci pouvant être obtenue avec les différentes modalités d'imagerie médicale. Grâce aux récents progrès des technologies d'acquisition (IRM, Scanner, Ultrasons..), il est possible de connaître avec une précision millimétrique la géométrie d'un grand nombre de structures anatomiques.

La modélisation physique du corps prend en compte la nature déformable ou articulée des structures anatomiques et mesure également l'impact sur ces structures de paramètres physiques tels que la température ou la pression. Le domaine scientifique qui aborde cette modélisation est principalement la biomécanique. Si la mécanique de la peau, du squelette ou des muscles ont été beaucoup étudiées depuis de nombreuses années, le comportement physique de la plupart des structures anatomiques reste à caractériser. Une difficulté importante rencontrée en biomécanique est l'obtention de données expérimentales fiables et

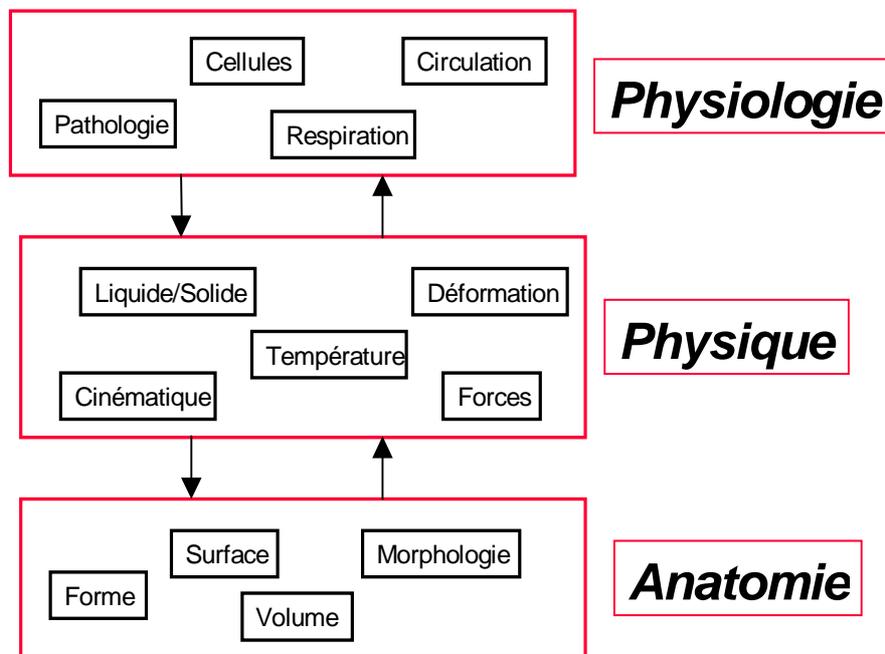


Figure 2 : Trois niveaux de modélisation du corps humain

reproductibles liée à la nature nécessairement invasive de la méthode.

Enfin le dernier niveau de modélisation concerne la physiologie et le caractère fonctionnel des organes du corps, incluant à la fois des phénomènes microscopiques (fonctionnement des cellules) et macroscopiques (la circulation sanguine). Ces trois niveaux de modélisation sont évidemment liés les uns aux autres : par exemple la présence de pathologies dans le foie modifie ses propriétés élastiques de même que la rupture d'une artère influence le système de circulation sanguine. Cette complémentarité implique qu'une collaboration entre plusieurs disciplines scientifiques est indispensable pour parvenir à une modélisation globale.

2.2 Problématique de l'interface homme-machine

Dans la plupart des simulations en médecine, l'utilisateur interagit avec le simulateur par l'intermédiaire d'un écran, d'un clavier et d'une souris. Si ce mode d'interaction est familier aux informaticiens, il n'est pas adapté lorsqu'il s'agit de simuler des gestes thérapeutiques comme des interventions chirurgicales. C'est pourquoi depuis une décennie ont été développées des interfaces pour la simulation calquées sur les véritables outils utilisés par les praticiens. Le développement de ces interfaces plus proches de l'environnement médical pose tout d'abord des problèmes d'ordre technologique. Par exemple la restitution des effets visuels, tactiles dans le cas de la chirurgie laparoscopique est d'une grande complexité en partie en raison des contraintes de calcul temps-réel. En effet, à chaque modalité de perception sensorielle est associée une fréquence d'interaction qui doit être respectée lors de cette simulation. De plus, la réalisation d'un simulateur requiert l'intégration de plusieurs composantes informatiques de nature très différentes : calcul numérique, synthèse d'images,

robotique, interface utilisateur... Il ne faut donc pas oublier de souligner la complexité de l'ingénierie logicielle qui est associée à la mise en œuvre des simulateurs médicaux.

3 Les thèmes de recherche à développer

Nous avons évoqué dans la section précédente les principales problématiques de la simulation en médecine. Comme nous l'avons déjà souligné, la réalisation d'un simulateur médical fait appel à plusieurs disciplines interdépendantes. Cependant, le développement de la simulation en médecine semble être dépendant des progrès qui seront réalisés dans quelques domaines scientifiques et technologiques clés:

- ◆ **La modélisation physiologique et biomécanique** du corps humain. Alors que des progrès considérables ont été effectués dans la modélisation géométrique des structures anatomiques, la connaissance de leur propriétés physiques et physiologiques reste très partielle. Dans ce domaine, il est important de construire une base de connaissance globale qui prenne en compte la présence de pathologies ainsi que les variations statistiques inter-individus.
- ◆ **L'analyse numérique.** En raison des contraintes liées à la perception sensorielle de l'utilisateur, il est nécessaire de mettre à jour l'état du simulateur avec une fréquence très élevée (au moins 25 Hertz pour le rendu visuel). Si l'on utilise un simulateur incluant une modélisation physiologique et biomécanique, cette fréquence requiert une optimisation drastique des calculs reposant sur des techniques avancées d'analyse numérique (approche multi-échelle, multi-résolution, parallélisme...).
- ◆ **L'imagerie médicale.** L'obtention des données nécessaires à la création de modèles physiologiques et biomécaniques reposera sans doute sur des nouvelles techniques d'imagerie médicale. Tout d'abord, le développement de nouvelles modalités d'imagerie fonctionnelle (Echographie Doppler) et physique (élastographie par IRM) devraient permettre d'obtenir des mesures de manière non-invasive et donc à grande échelle. De plus, la comparaison de ces images par des techniques de recalage autorisera l'établissement d'information statistique sur ces quantités physiques et physiologiques.
- ◆ **La synthèse d'images.** Pour de nombreuses applications de simulation, il est nécessaire de synthétiser avec un grand réalisme l'environnement de la simulation. Malgré une amélioration constante des performances des systèmes d'accélération graphique, la simulation de nombreux phénomènes visuels restent encore hors d'atteinte à l'heure actuelle. Le développement de nouveaux algorithmes utilisant le rendu surfacique et volumique est ainsi nécessaire afin d'augmenter la crédibilité visuelle des simulateurs médicaux.

Enfin la compréhension de la pratique médicale ainsi que du contexte dans lequel il intervient est absolument essentiel si l'on veut concevoir un véritable outil pédagogique et efficace. Bien que l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques et technologiques doivent contribuer au développement des simulateurs médicaux, leur large utilisation et l'acceptation par la communauté médicale reste conditionnée par des facteurs humains.

[1] Actes de la conf. Intern. Robotics and Computer Assisted Medical Interventions, 23-26 Juin, 1996, Bristol

[2] H. Delingette, « Réalité Virtuelle et Médecine », Revue de l'électricité et de l'électronique, No 8, Sept. 1997, pp 43-45

[3] R. Satava, « Medical Virtual Reality : The current status of the future », Actes de la conf. Intern. Medicine Meets Virtual Reality, 1996, pp 100-106

[4] J. Waterworth, « Virtual Reality in Medicine : a survey of the state of the art », URL : <http://www.informatik.umu.se/~jwworth/medpage.html>, Juillet 1999.