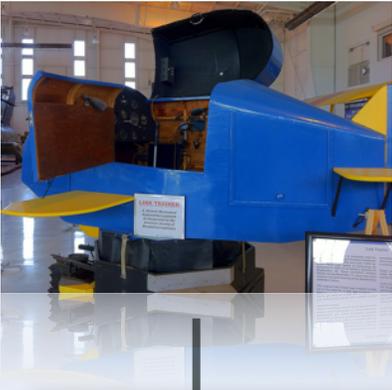


SIMULATION NUMÉRIQUE INTERACTIVE EN MÉDECINE

Stéphane Cotin



SIMULATION NUMÉRIQUE ET MÉDECINE



1929

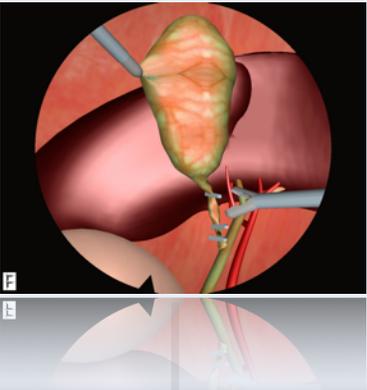
Premier simulateur de vol



1999

Simulateur de vol commercial très réaliste

Simulation rendue obligatoire par compagnies d'assurance



1999

Premier simulateur chirurgical

2000

Recommandations de la FDA



2002

Simulation de radiologie interventionnelle



2010

Simulation pour le robot DaVinci



SIMULATION NUMÉRIQUE ET MÉDECINE



1929

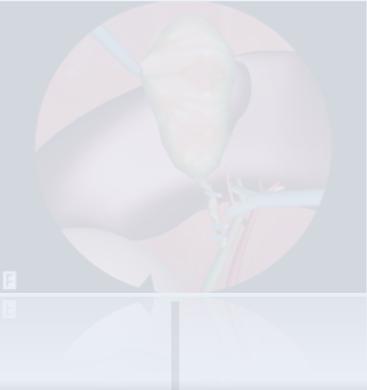
Premier simulateur de vol



1999

Simulateur de vol commercial très réaliste

Simulation rendue obligatoire par compagnies d'assurance



1999

Premier simulateur chirurgical

Recommandations de la FDA



2000

Simulation de radiologie interventionnelle



2010

Simulation pour le robot DaVinci



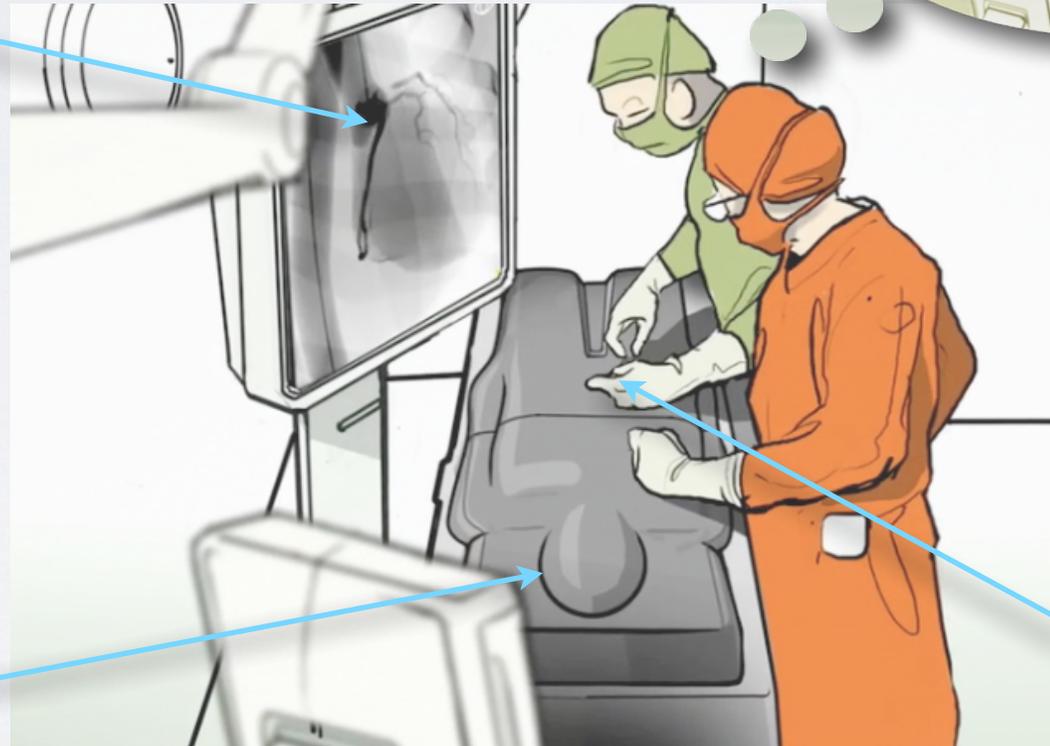
DE L'APPRENTISSAGE ...



Retour visuel

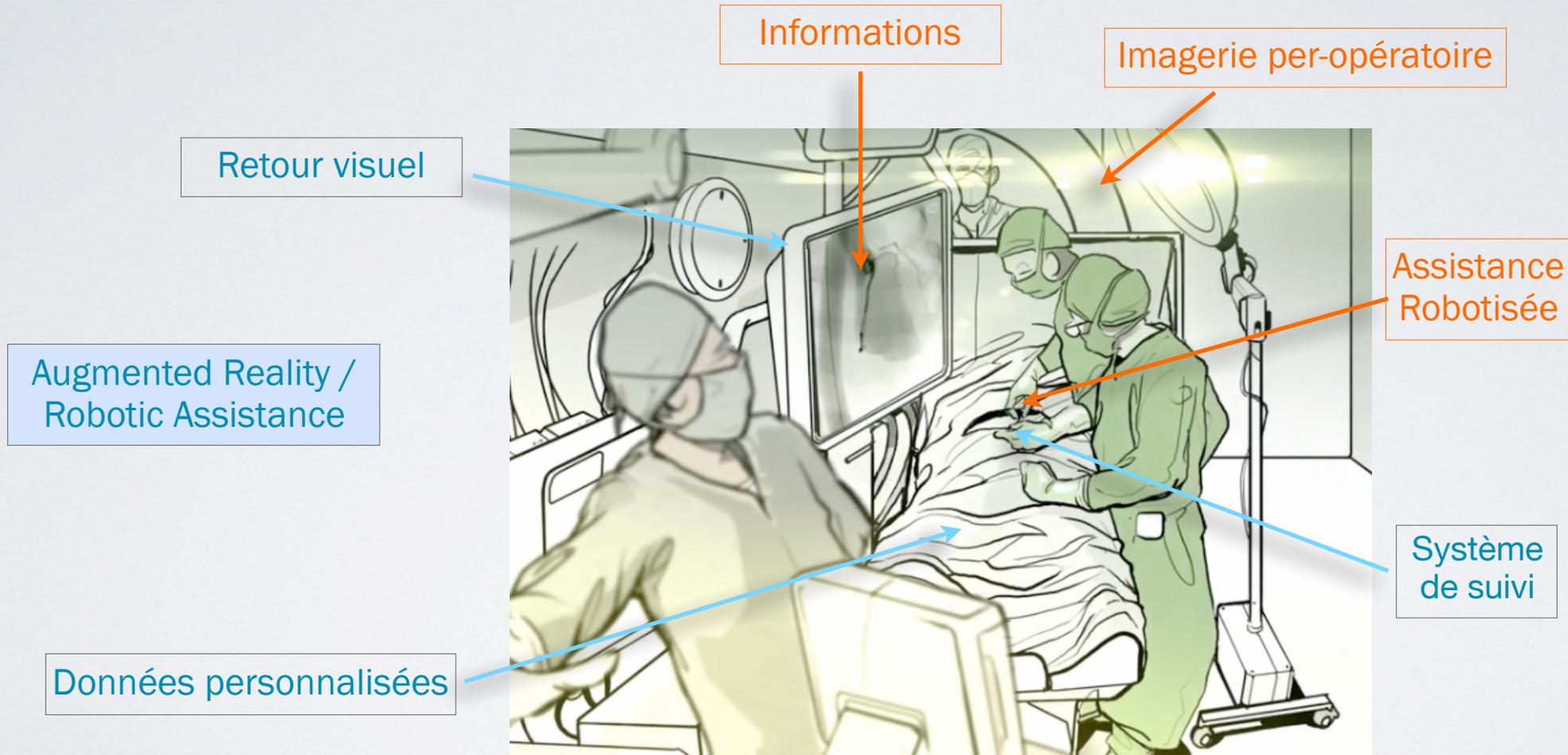
Apprentissage
et planification
pré-opératoire

Données personnalisées



Système de suivi
& retour d'efforts

...À L'AIDE PER-OPÉRATOIRE

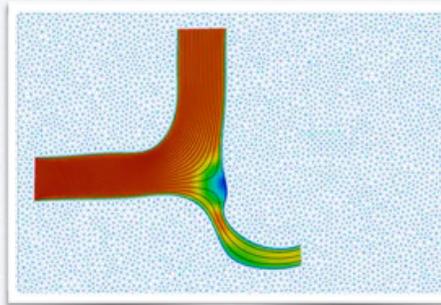
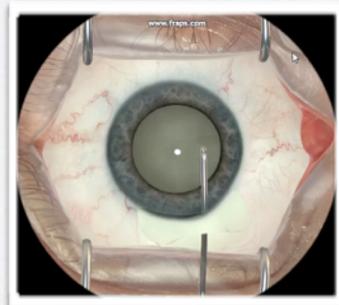
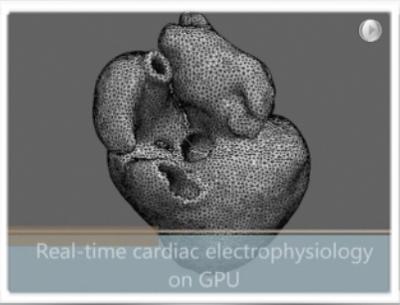
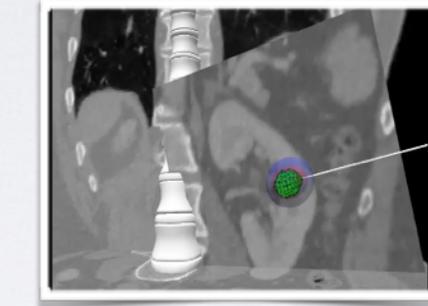
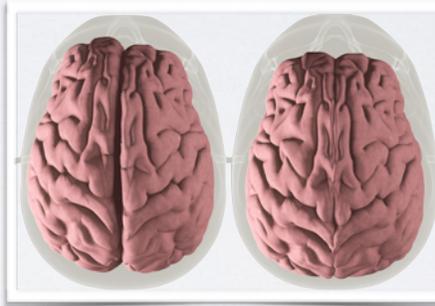
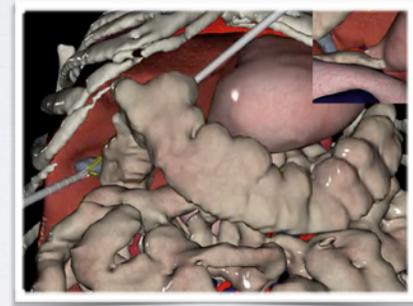
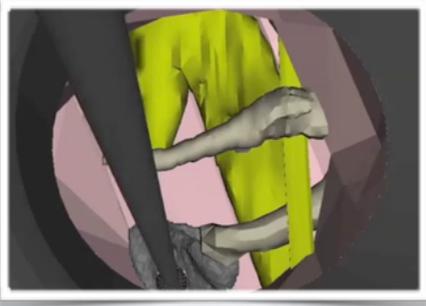
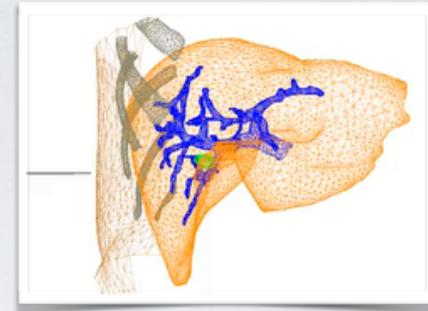
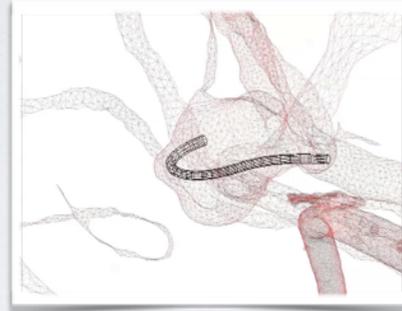
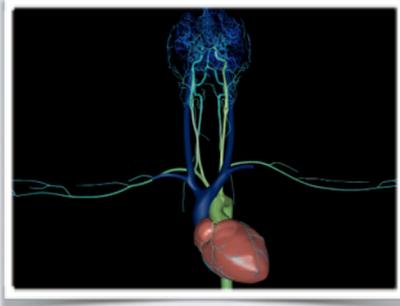


Formation

Planification pré-opératoire

Assistance per-opératoire

Calculs en temps-réel – moins de 50 ms



Modélisation "simple"

Modélisation patient-spécifique

Modélisation Complexe

EXAMPLES DE “SIMULATEURS D’APPRENTISSAGE”

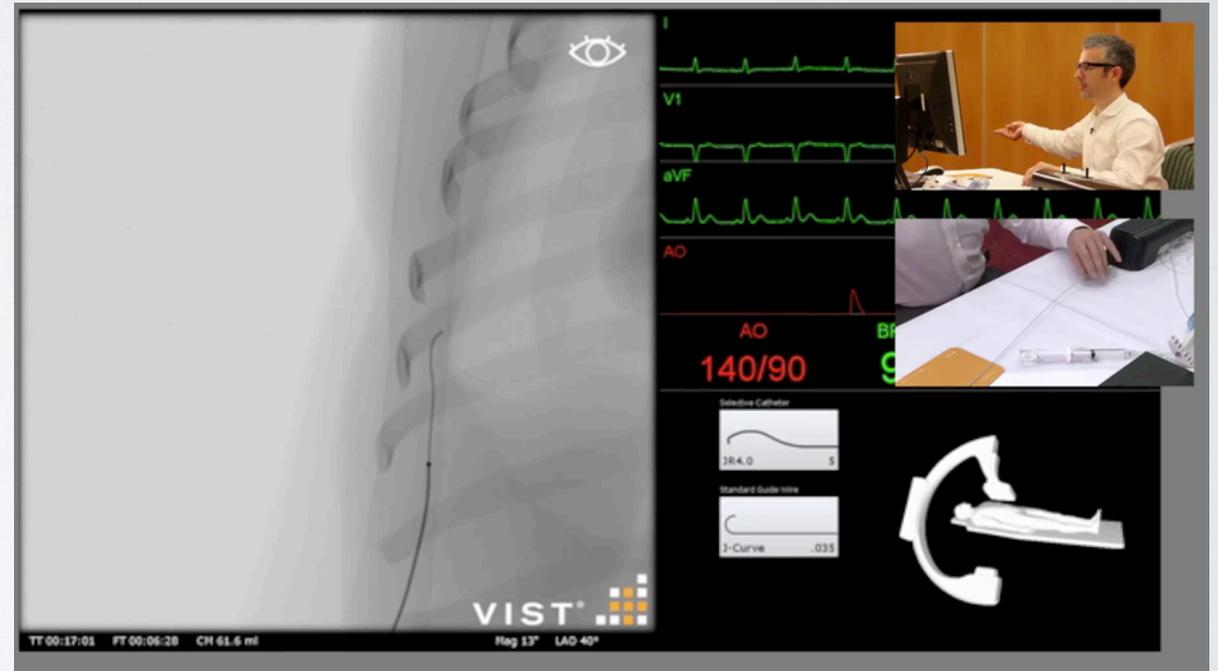
CHIRURGIE ARTHROSCOPIQUE

ArthroS
-
A new Arthroscopy Simulator

CHIRURGIE LAPAROSCOPIQUE

CAE LapVR™

RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE



OPHTHALMOLOGIE



NEURO-CHIRURGIE

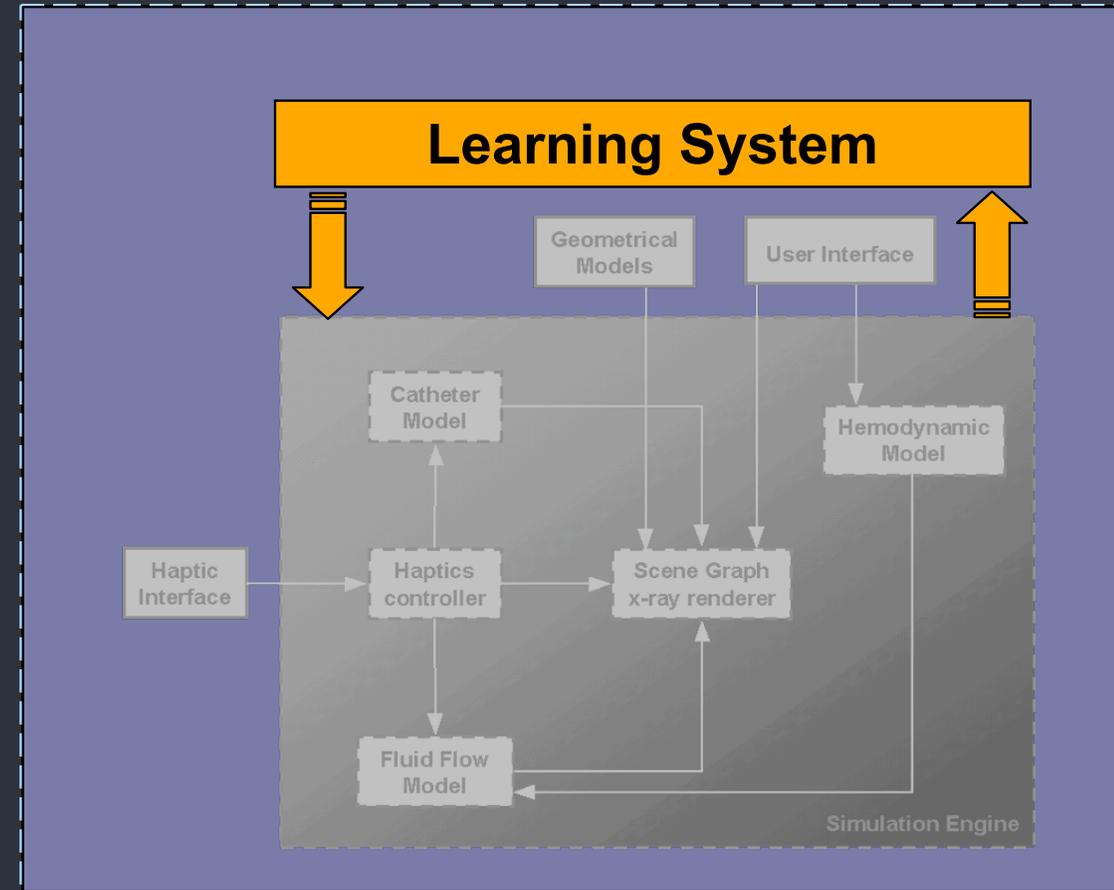
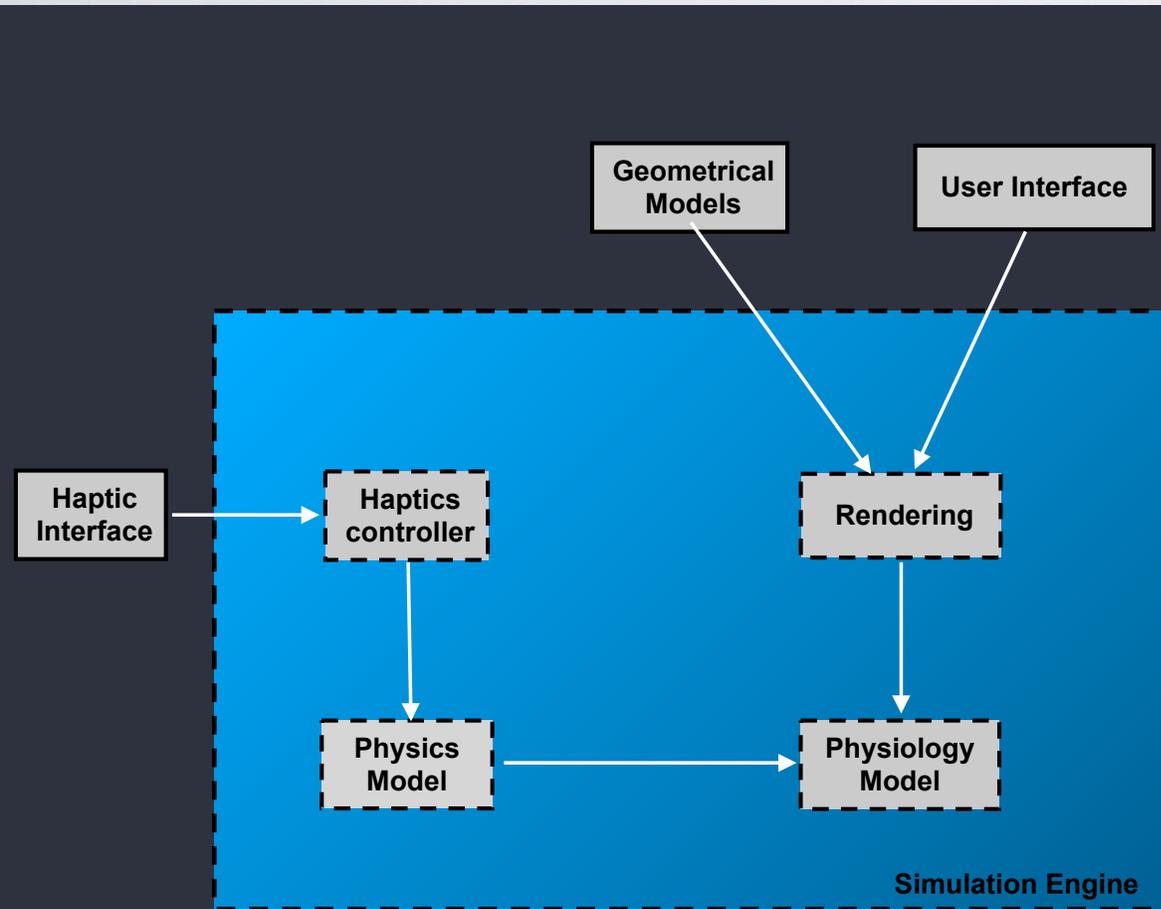


LES ELEMENTS ESSENTIELS D'UN SIMULATEUR

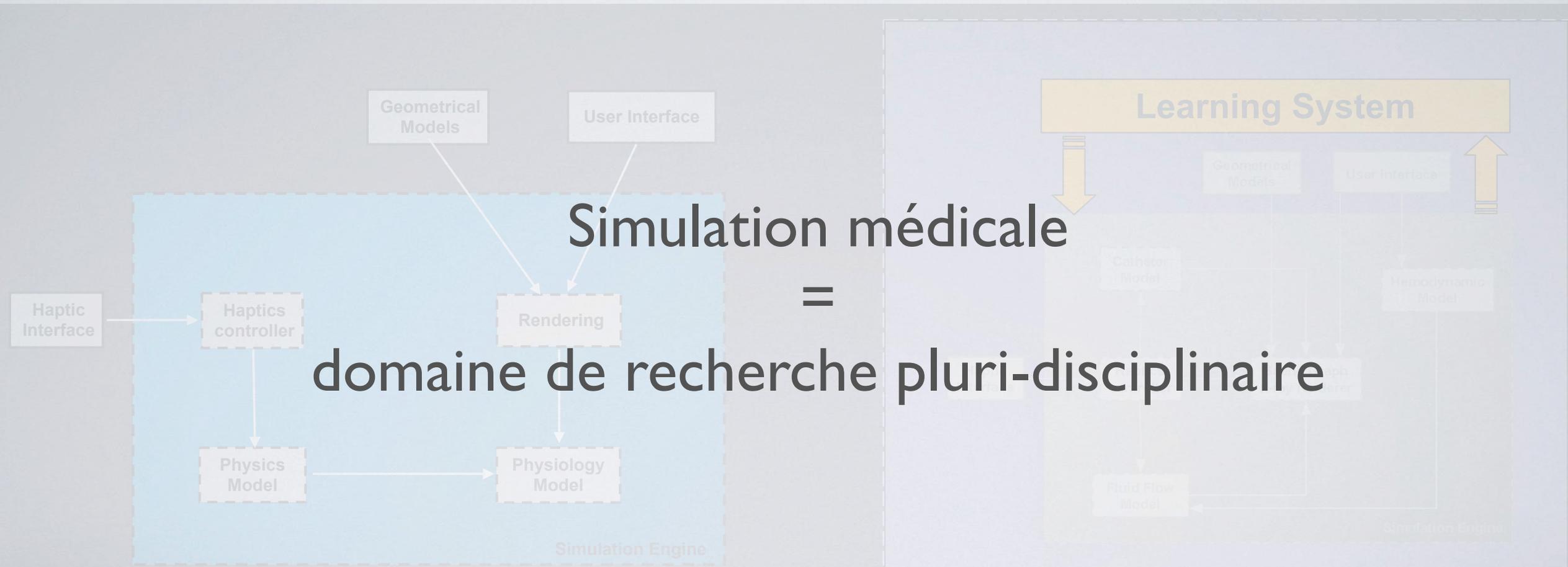
- Recréer l'anatomie cible (abdomen, oeil, jambe, etc)
- Simuler le comportement des “organes” (déformation, mouvements, ...)
- Mouvement des instruments et retour d'effort
- Interactions entre instruments et anatomie virtuels

- Valider les résultats
- Ajouter des variations anatomiques, prendre en compte les complications
- Créer des scénarios permettant un apprentissage “complet”

LES ELEMENTS ESSENTIELS D'UN SIMULATEUR



LES ELEMENTS ESSENTIELS D'UN SIMULATEUR



SIMULATION “TEMPS-RÉEL”

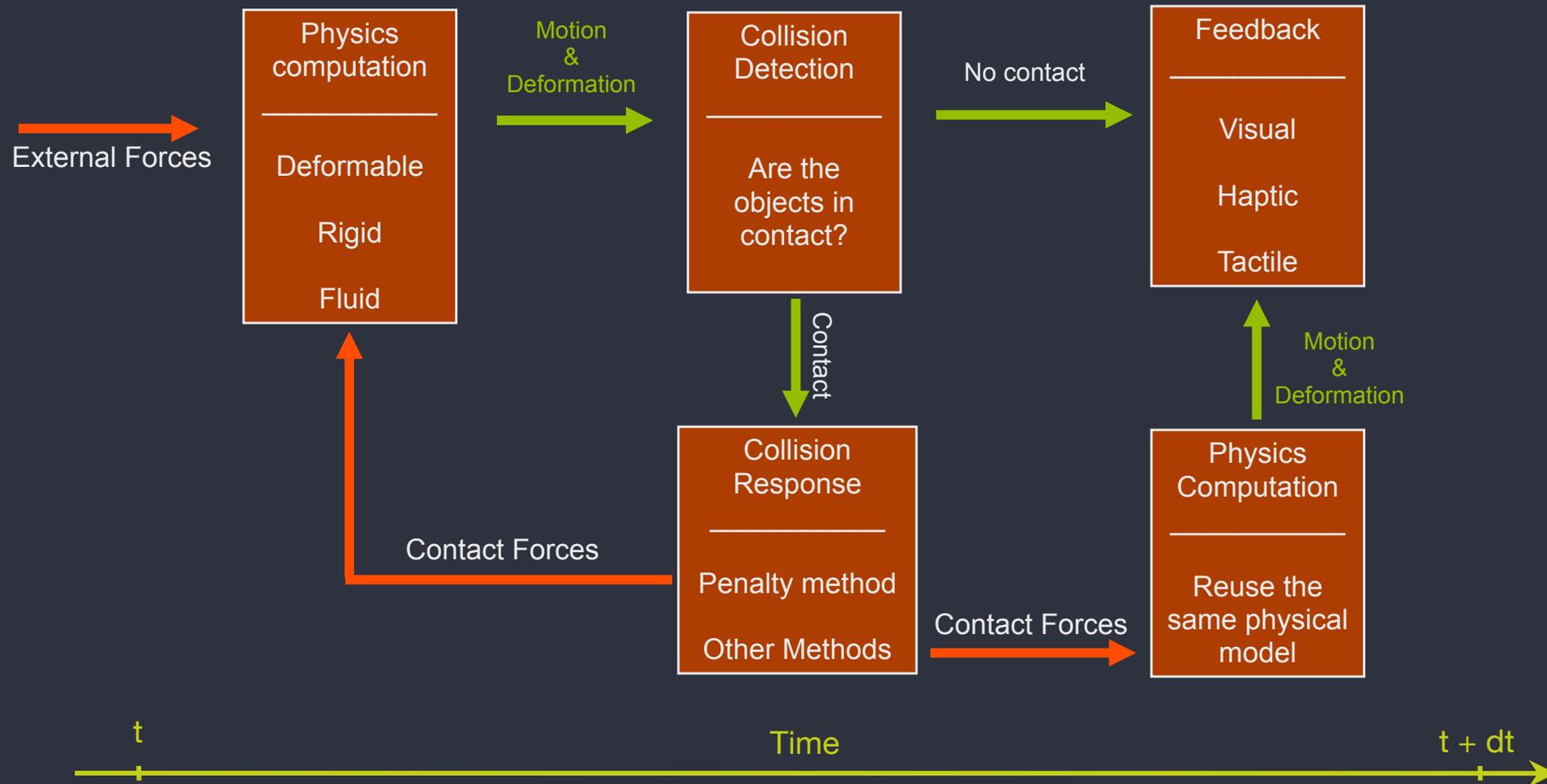
■ Définition de la notion de temps-réel

- ▶ Une simulation est temps-réel si la durée d'exécution de tous les calculs effectués dans 1 pas de temps est égale à la durée du pas de temps
- ▶ Pour une simulation fluide, on doit avoir entre 50 et 100 images / seconde
- ▶ Il faut donc que la totalité des calculs s'effectue en moins de 20 ms

■ Simulation avec retour d'effort

- ▶ Si on ajoute un système à retour d'effort dans la simulation, la fréquence de la simulation doit augmenter (plus grande sensibilité haptique que visuelle)
- ▶ La totalité des calculs doit s'effectuer entre 1 ms et 10 ms

BOUCLE DE SIMULATION



STRATÉGIES POUR LE TEMPS-RÉEL

- Choix du pas de temps
 - ▶ Intégration en temps
 - ▶ Méthodes implicites vs. explicites
- Influence du maillage
 - ▶ Lien entre temps de calcul et nombre de degrés de liberté
- Modélisation du comportement déformable
 - ▶ Lois de comportement simples (élasticité linéaire par exemple)
 - ▶ Lois de comportement complexes (hyperélasticité)
 - ▶ Méthodes approchées (shape matching, modèles masses-ressorts, ...)

STRATÉGIES POUR LE TEMPS-RÉEL

- Solveurs linéaires

- ▶ Solveurs directs (solution exacte)
- ▶ Solveurs itératifs (solution approchée)

- Détection de collision et réponse au contact

- ▶ De nombreuses approches sont possibles, mais cette étape est en général coûteuse lorsque les objets sont déformables

- Et bien entendu

- ▶ L'optimisation du code peut faire une différence importante
- ▶ Et le parallélisme aussi (en particulier sur GPU)

INTEGRATION EN TEMPS

- Deux approches possibles

- ▶ Méthodes explicites, conditionnellement stables
- ▶ Méthodes implicites, inconditionnellement stables

- Idées principales

- ▶ Seconde loi de Newton : $\mathbf{f} = m \ddot{\mathbf{x}}$
- ▶ On parle d'intégration puisque l'idée est de passer de l'accélération $\ddot{\mathbf{x}}$ à la vitesse $\dot{\mathbf{x}}$, puis à la position \mathbf{x}

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(0) + \int_0^t \mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) dt$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(0) + \int_0^t \mathbf{v}(t) dt$$

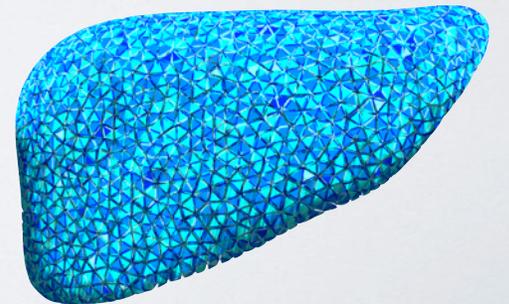
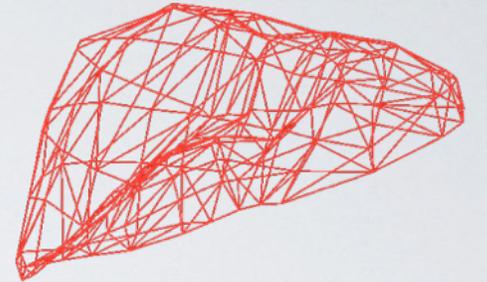
INFLUENCE DU MAILLAGE

- Le maillage représente

- ▶ Une représentation discrète du domaine réel (continu)
- ▶ Une distribution spatiale des degrés de liberté
- ▶ Une relation entre ces degrés de liberté

- Le maillage influence

- ▶ Les temps de calcul
- ▶ La précision du résultat



CHOIX DE LA LOI DE COMPORTEMENT

- Deux grandes catégories de modèles physiques
 - ▶ Les modèles dérivés de la mécanique des milieux continus
 - ▶ Exemple : modélisation par éléments finis
 - ▶ Les autres, par exemple : shape matching, masses-ressorts, ...
- Dans tous les cas
 - ▶ Des degrés de libertés (noeuds) échantillonnés dans le volume de l'objet
 - ▶ Des forces internes liant ces degrés de liberté
 - ▶ C'est le calcul de ces forces internes qui est central et qui peut prendre énormément de temps, ou très peu...

EN RÉSUMÉ

- Une simulation temps-réel nécessite
 - ▶ Un schéma d'intégration optimal pour décrire la dynamique du système
 - ▶ De choisir une discrétisation (maillage) adaptée au niveau de détail souhaité tout en restant la plus grossière possible pour rester rapide à calculer
 - ▶ D'adapter le choix de la loi de comportement au problème (linéaire si petites déformations, non-linéaire sinon)

UN OUTIL POUR FACILITER LE DÉVELOPPEMENT DE SIMULATEURS



SOFA

■ Objectifs

- ▶ Créer des simulations complexes par combinaison de composants “simples”
- ▶ Offrir une architecture très modulaire et très optimisée

■ Plusieurs niveaux d'abstraction

- ▶ Décomposition de la représentation d'un objet simulé
- ▶ Approche par “composant” de la simulation physique

■ SOFA est un projet collaboratif Open Source

- ▶ Principalement Inria mais toute contribution est la bienvenue !
- ▶ La communauté aujourd'hui : environ 50 groupes de recherche et 20 sociétés

SOFA

- SOFA est gratuit

- ▶ www.sofa-framework.org

- ▶ Open source

- ▶ License LGPL

- SOFA peut être utilisé pour

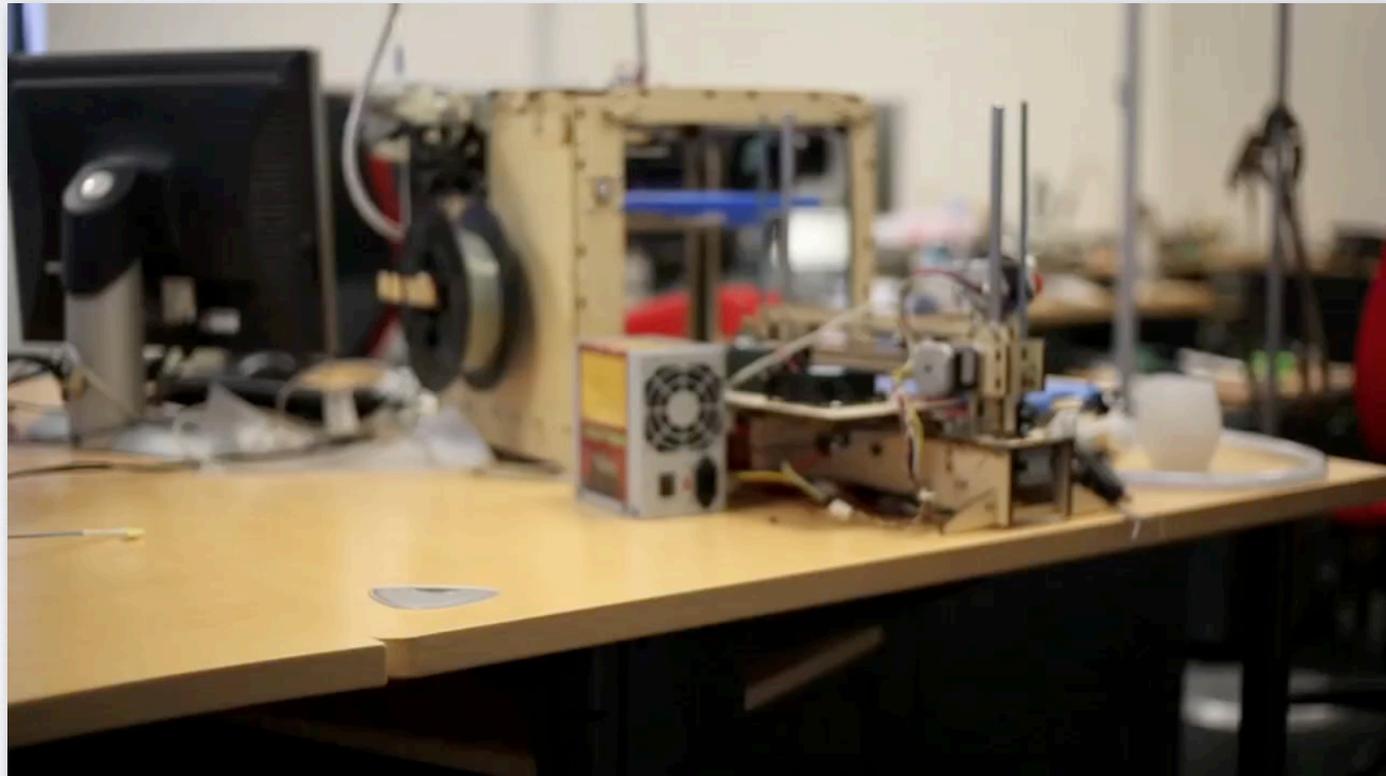
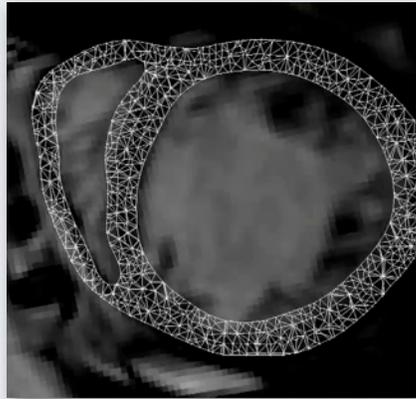
- ▶ de petits projects

- ▶ de grands projets de recherche

- ▶ le développement de produits commerciaux

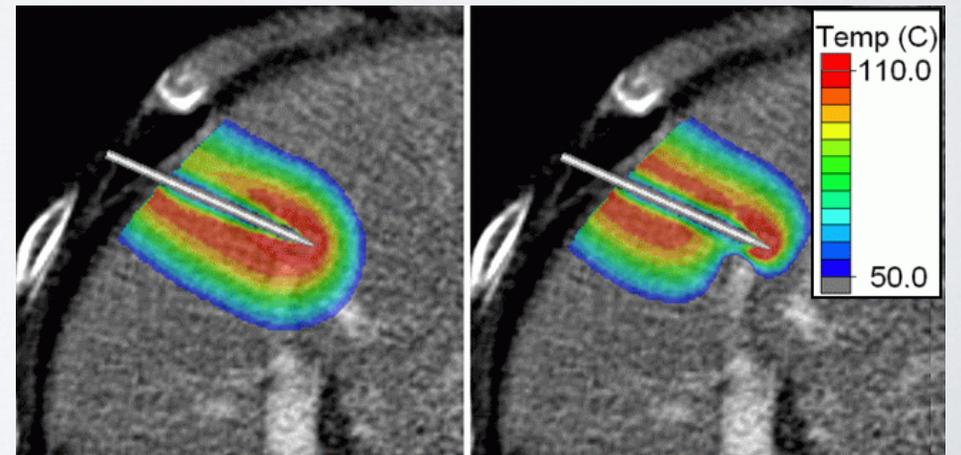
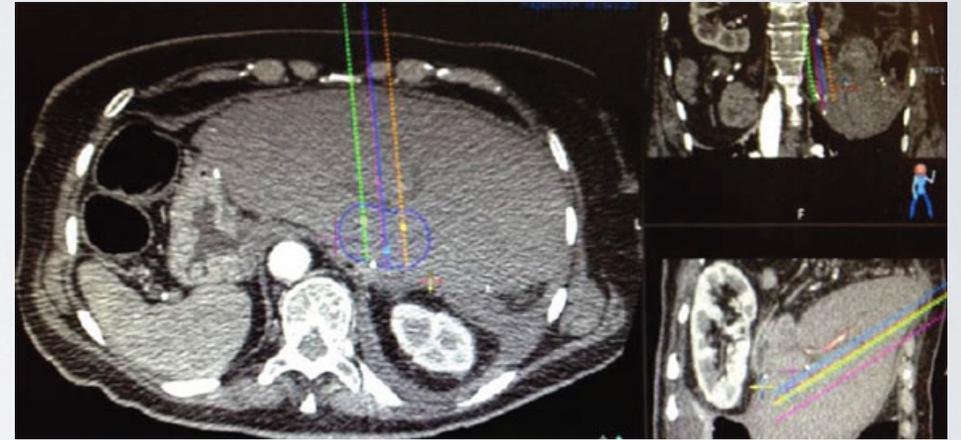
SOFA – QUELQUES EXEMPLES

- Simulation cardiaque (electrophysiologie)
 - ▶ Collaboration avec King's College et Asclepios



SIMULATION DE CRYOTHÉRAPIE

Interactive Simulation
Framework of Cryotherapy
for Clinical Planning

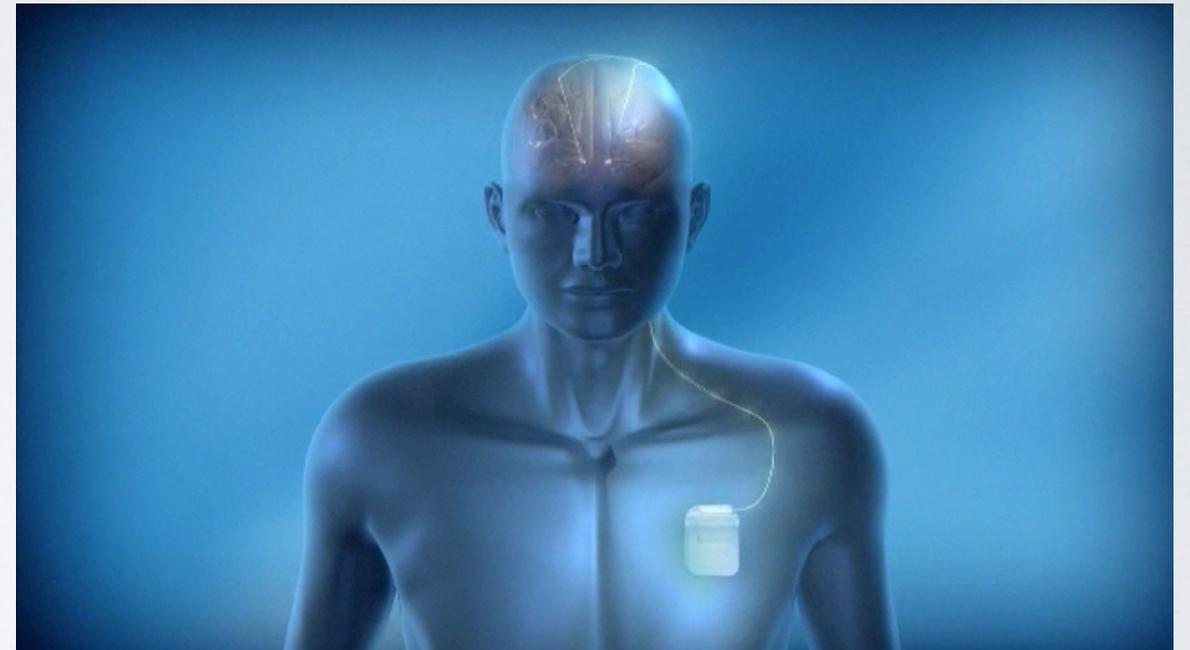


STIMULATION CÉRÉBRALE PROFONDE



DBS Off

DBS Off



DBS On

STIMULATION CÉRÉBRALE PROFONDE

■ Objectifs

- ▶ Développer un système de planification plus avancé pour la stimulation cérébrale profonde (Deep Brain Stimulation) prenant en compte le Brain Shift et la migration des structures profondes du cerveau

■ Collaboration avec iCube (Strasbourg), Inria Rennes, et l'Institut du Cerveau et de la Moelle (ICM)

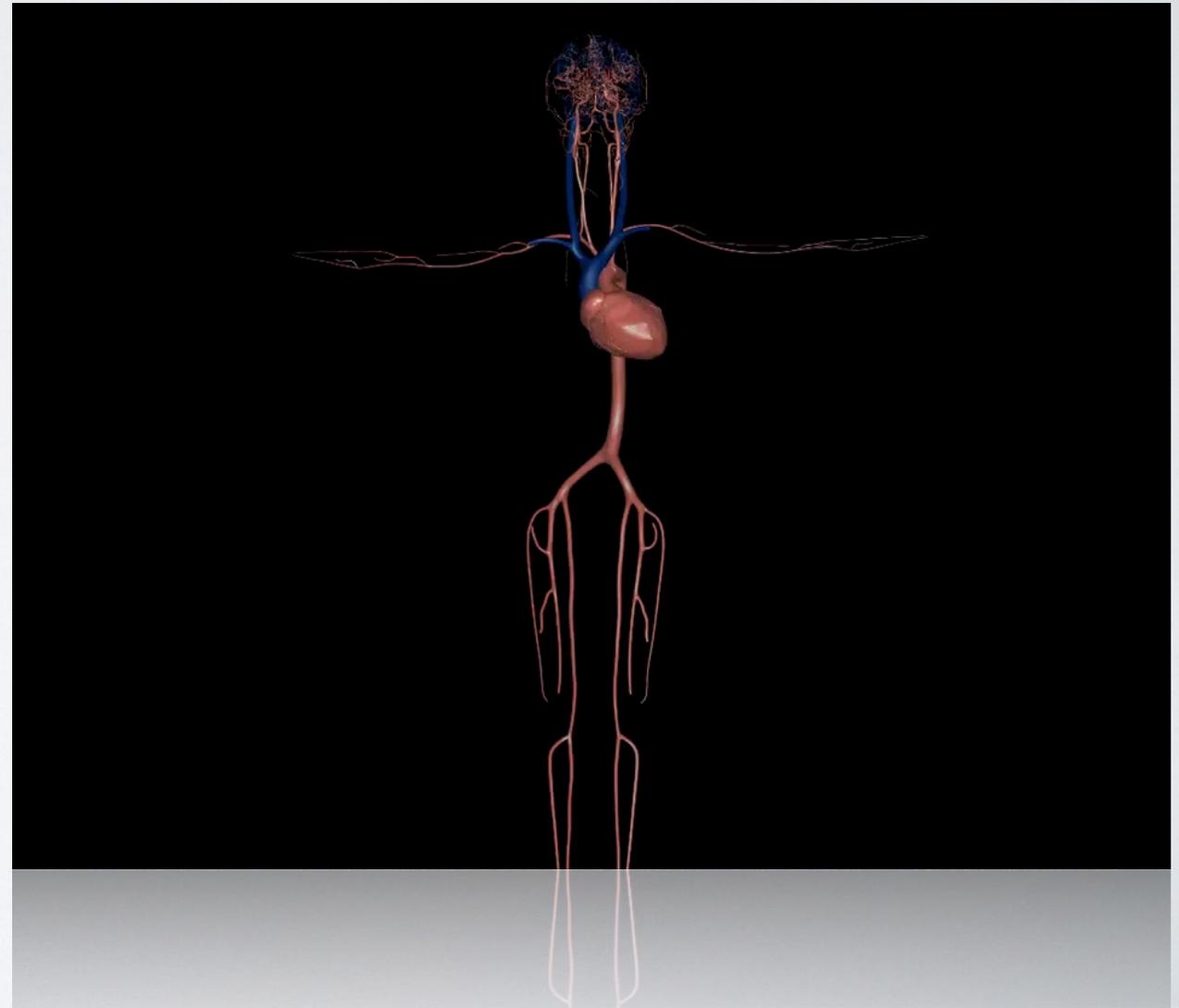
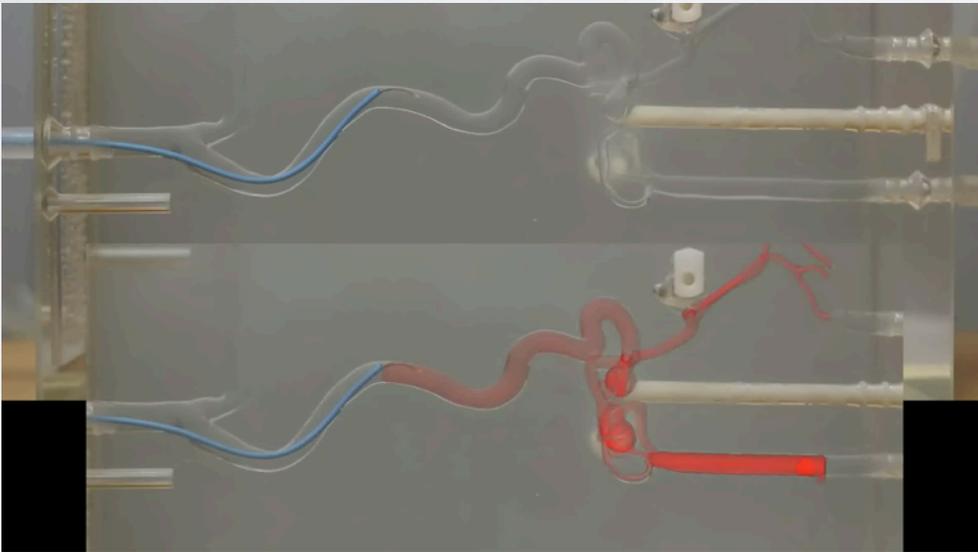
■ Contributions principales

- ▶ Modélisation de la déformation du cerveau, interactions avec le CSF, et modélisation patient-spécifique
- ▶ Lien avec images médicales per-opératoires et recalage à travers la résolution d'un problème de minimisation



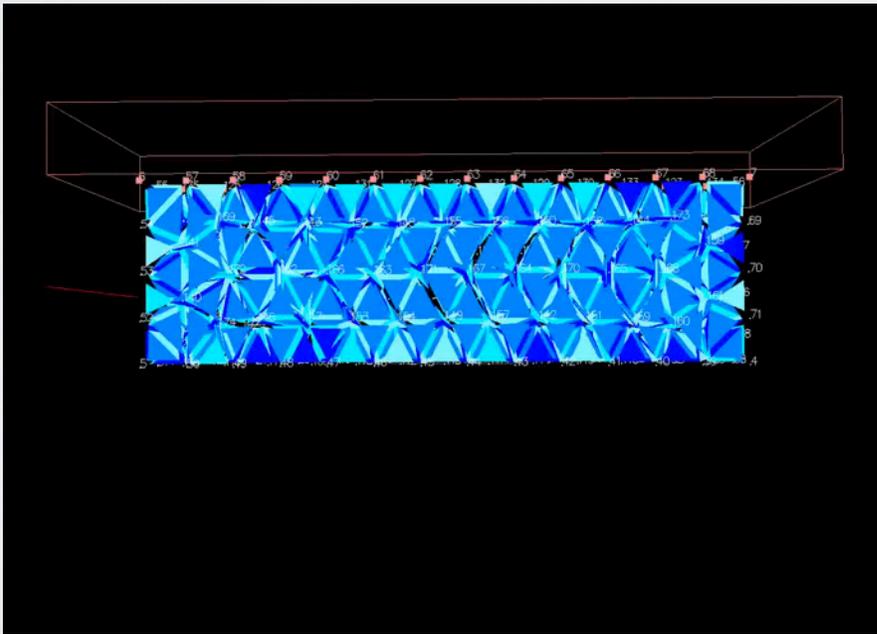
RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

- Radiologie interventionnelle
 - ▶ Collaboration avec l'équipe Magrit

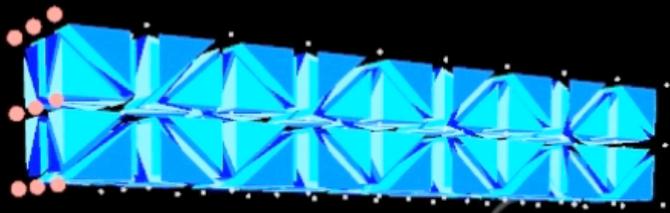


SOFA – REAL-TIME CUTTING

- Simulation de découpe et fracture en temps-réel
 - ▶ Travail commun avec l'équipe Icube IGG



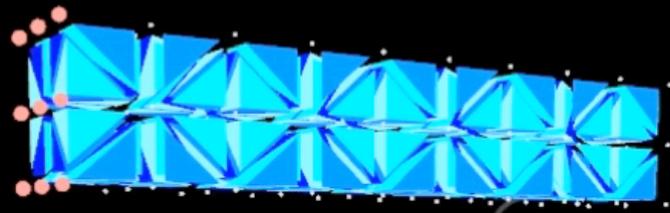
SOFA – ASSIMILATION DE DONNÉES



SOFA

An Open Source framework for medical simulation

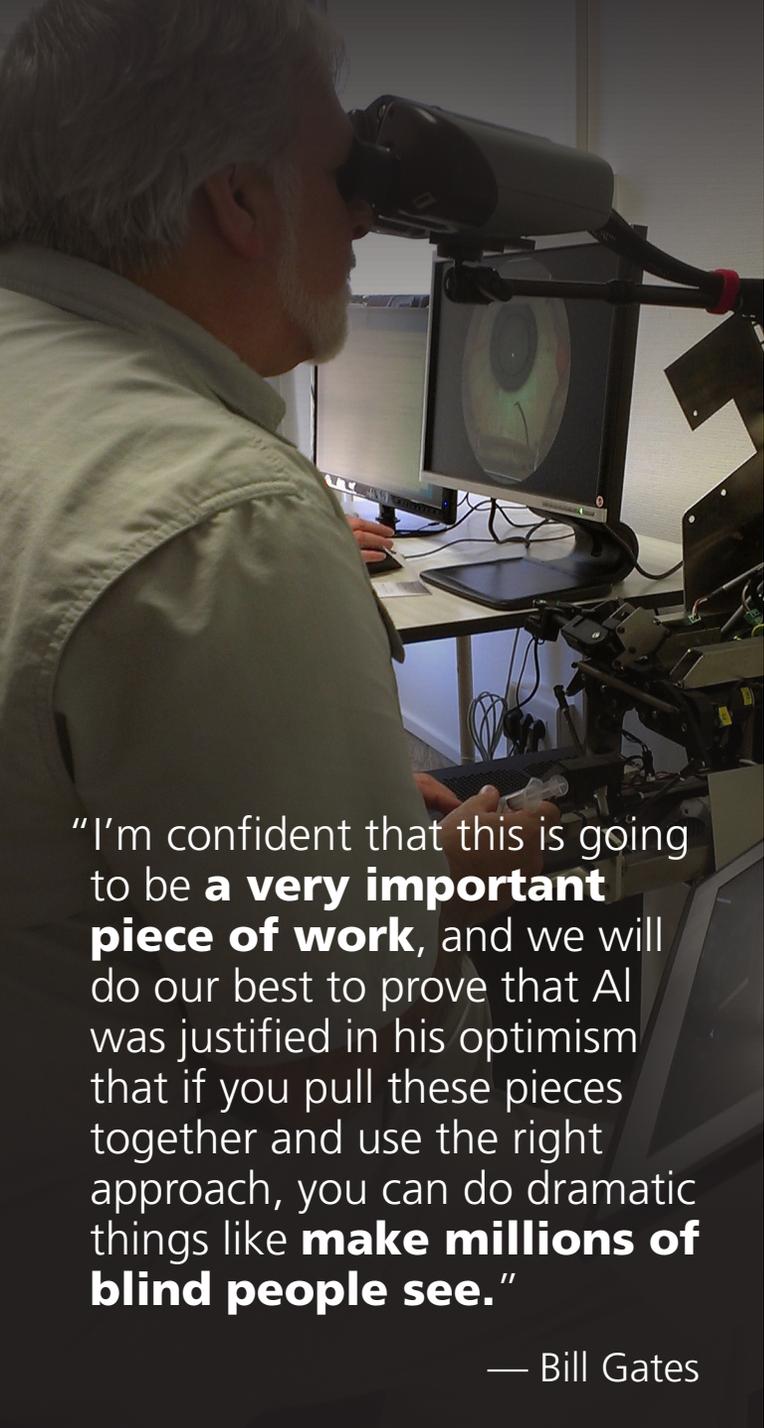
REFERENCE



SOFA

An Open Source framework for medical simulation

ESTIMATION USING REDUCED ORDER UKF



“I’m confident that this is going to be **a very important piece of work**, and we will do our best to prove that AI was justified in his optimism that if you pull these pieces together and use the right approach, you can do dramatic things like **make millions of blind people see.**”

— Bill Gates

LE PROJET “HELP ME SEE”

www.helpmesees.org

A 15-MINUTE SURGERY COULD GIVE THIS GIRL HER EYESIGHT BACK

CLOSE

YES, I WANT TO GIVE A BLIND CHILD OR ADULT A CHANCE TO SEE.

\$300 Full Surgery \$150 Half Surgery
 \$75 Anesthesia Other

HelpMeSee is a registered 501c3. 100% of this gift is tax-deductible. © 2011 HelpMeSee.

First Name* Last Name*
 Email Address*
 Card Type* ▼
 Card Number*
 Exp. Date* (Ex: 01/13) CVV* ?
 Comments and Suggestions

DONATE

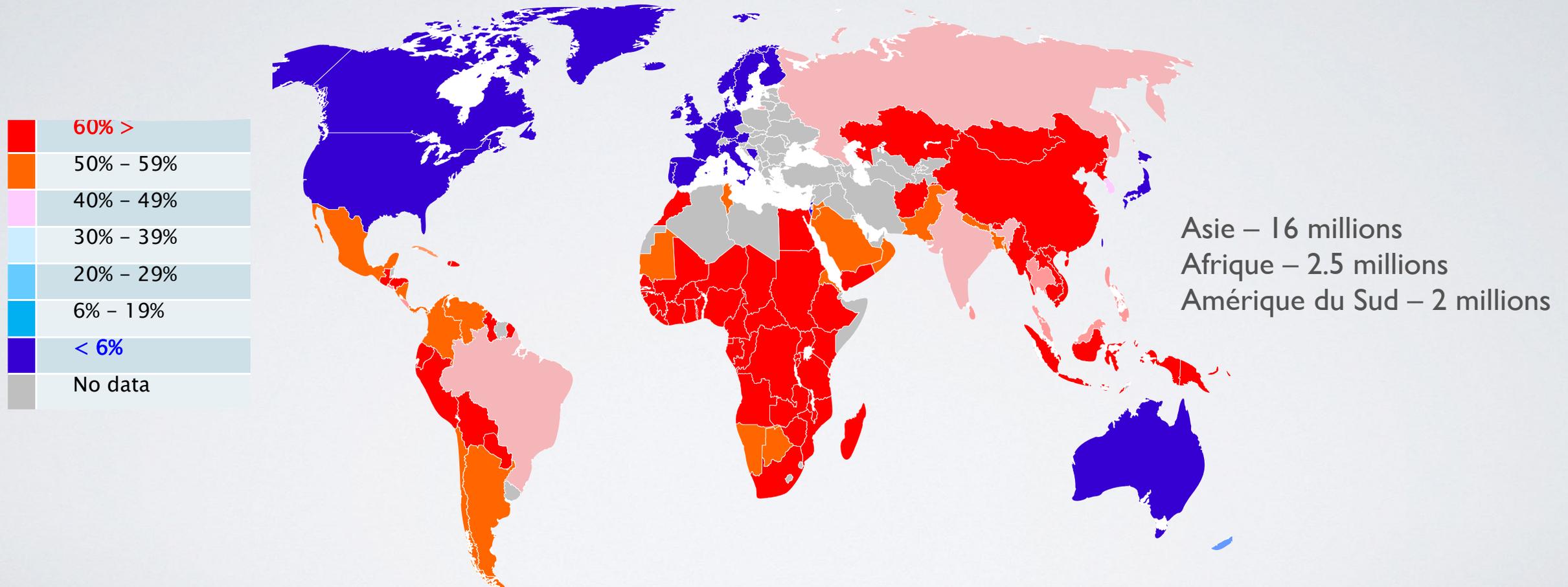
[Other ways to donate](#)

HELPMESSEE NEWS

March 12, 2013: Breakthrough in Eye Surgery Simulator Presented to French Prime Minister [READ MORE](#)

HELPING THE BLIND SEE. **4 1 0 4 9** SURGERIES PERFORMED.

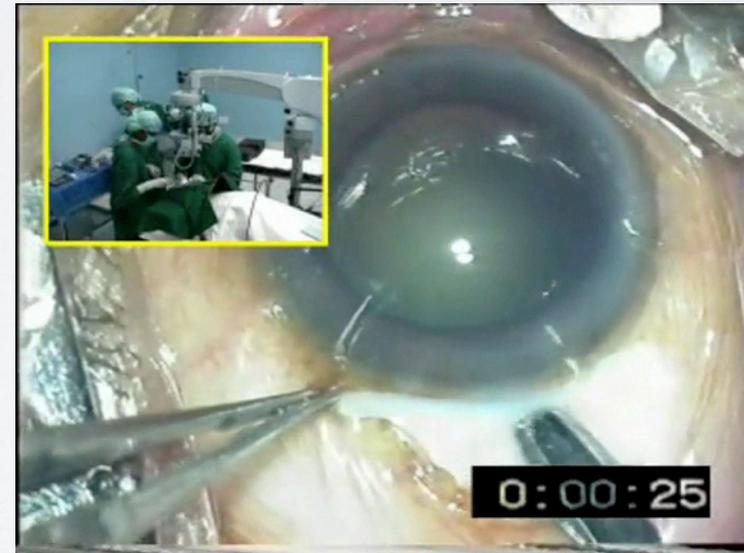
UN PROBLÈME À L'ÉCHELLE MONDIALE...



20 million d'enfants et de jeunes adultes aveugles en raison de cataractes non traitées

... ET UNE SOLUTION AMBITIEUSE

- Nouvelle technique chirurgicale (MSICS)
 - ▶ \$50 et 10 min par chirurgie
 - ▶ À comparer à \$5,000 pour l'approche conventionnelle (phacoémulsification)



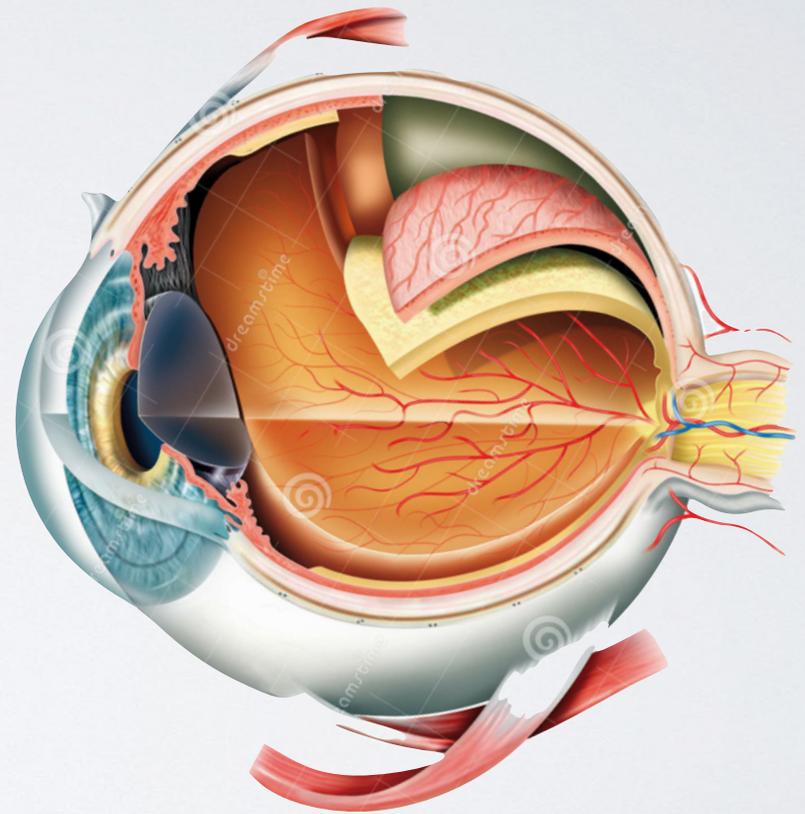
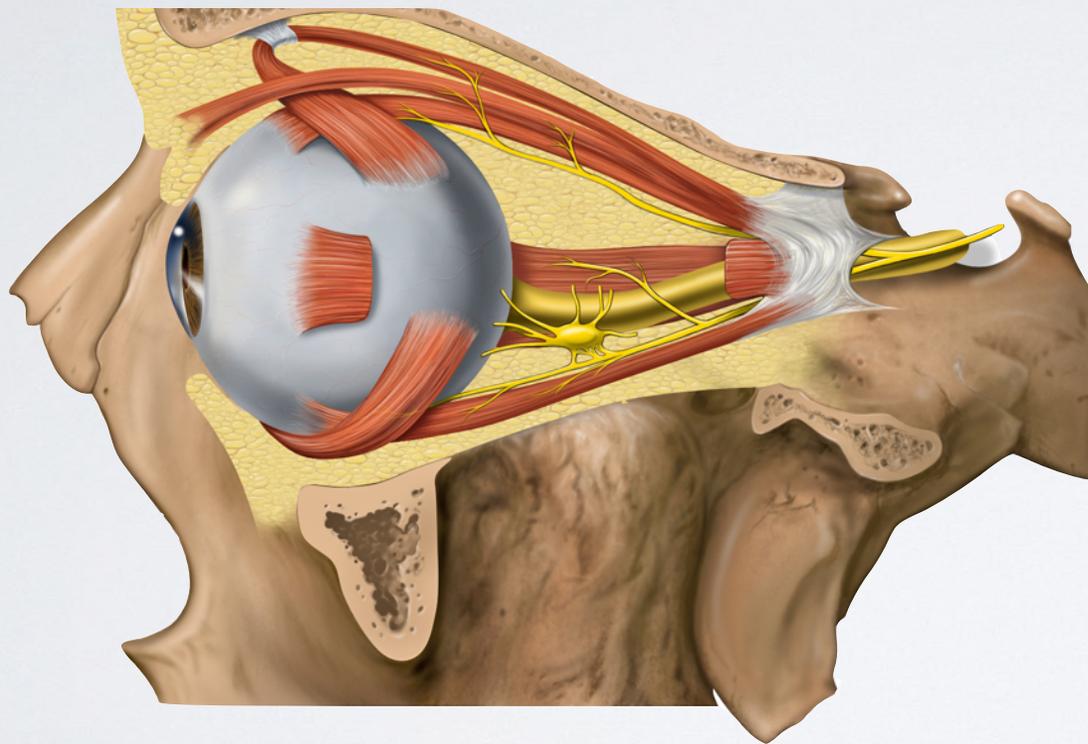
- Trop peu de chirurgiens formés à cette technique (100 en 2014 mais 30 000 nécessaires)

ACCÉLÉRER LA FORMATION PAR LA SIMULATION

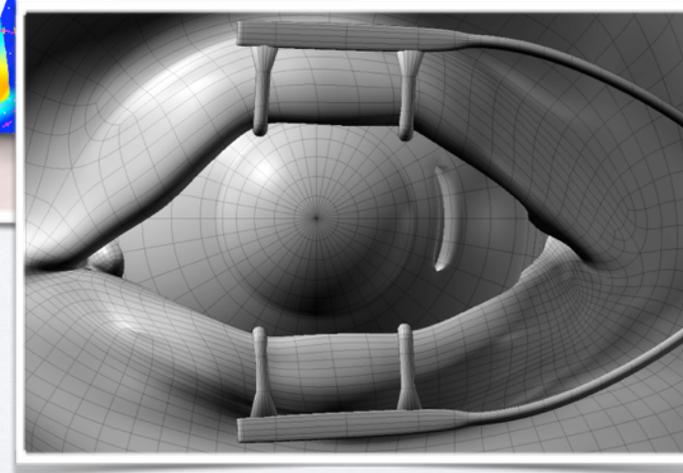
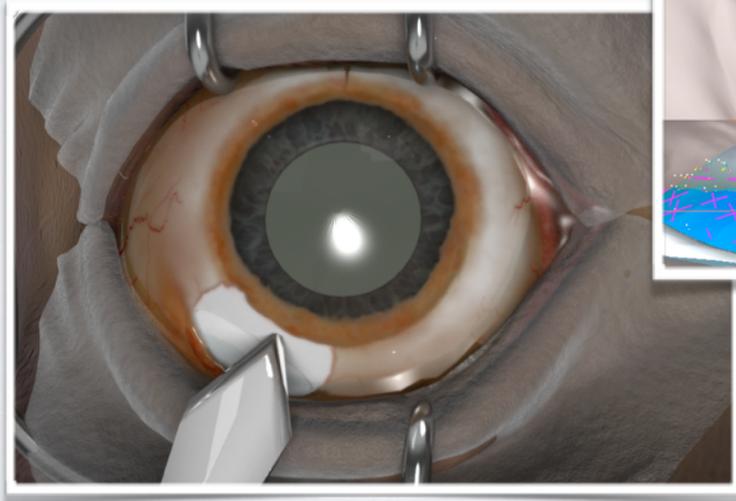
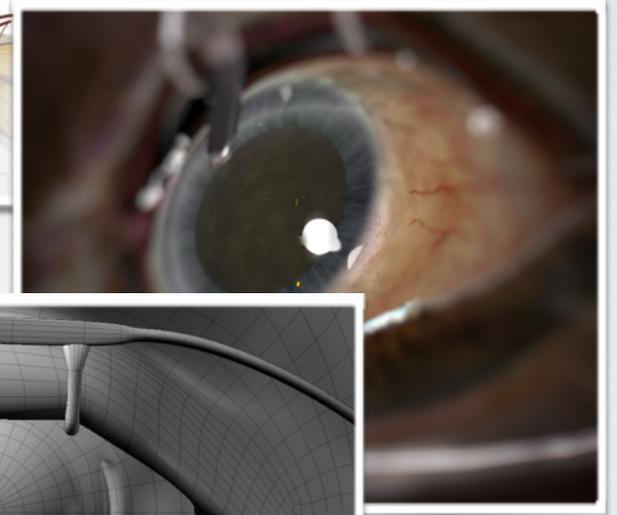
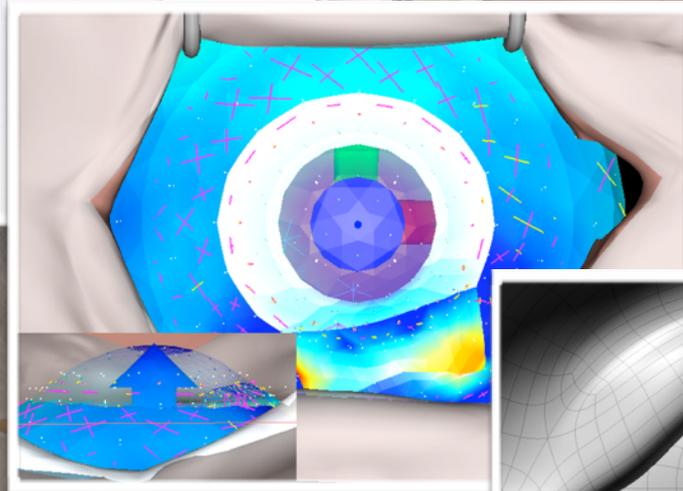
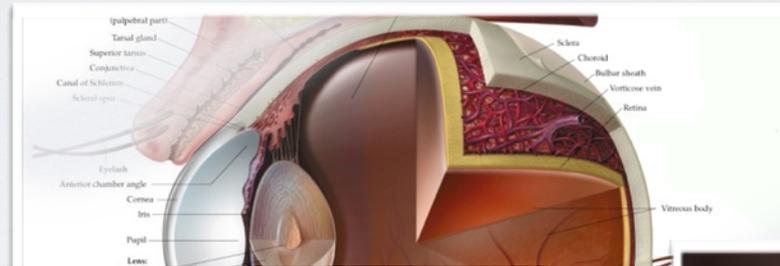
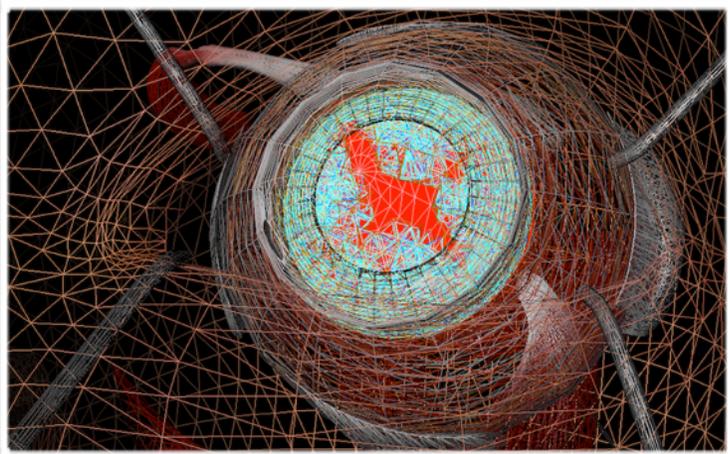
- Une solution possible : la simulation numérique interactive
- Pour cela les simulateurs devront
 - ▶ Nécessiter peu de maintenance
 - ▶ Être très réalistes
 - ▶ Prendre en compte complications et variations anatomiques
 - ▶ Être distribués dans de nombreux centres de formations
- Il sera ainsi possible de former 30,000 chirurgiens en moins de 5 ans



L'OEIL, UNE ANATOMIE COMPLEXE

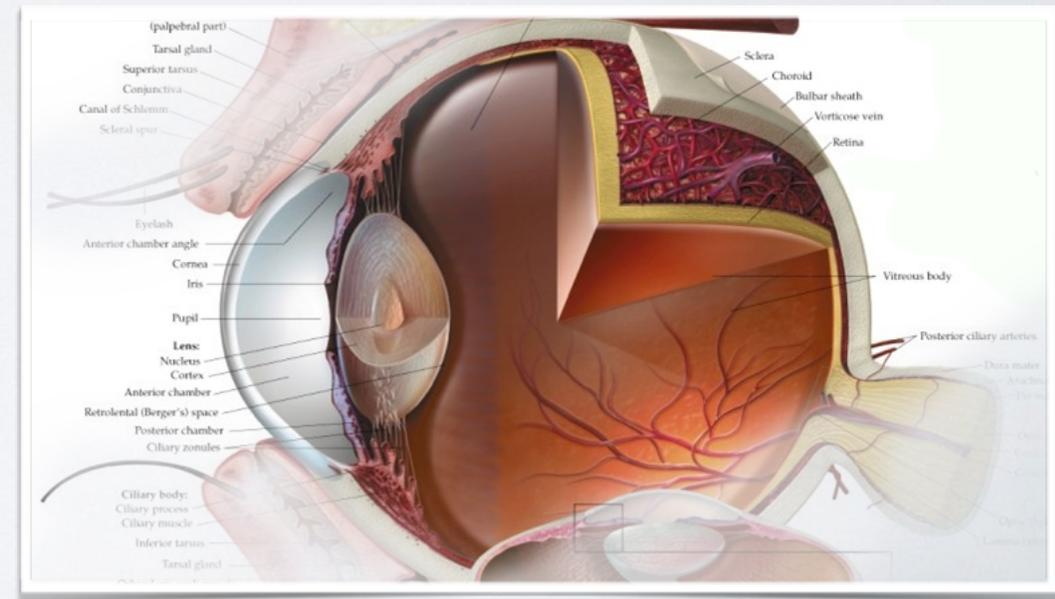


L'OEIL, UNE ANATOMIE COMPLEXE



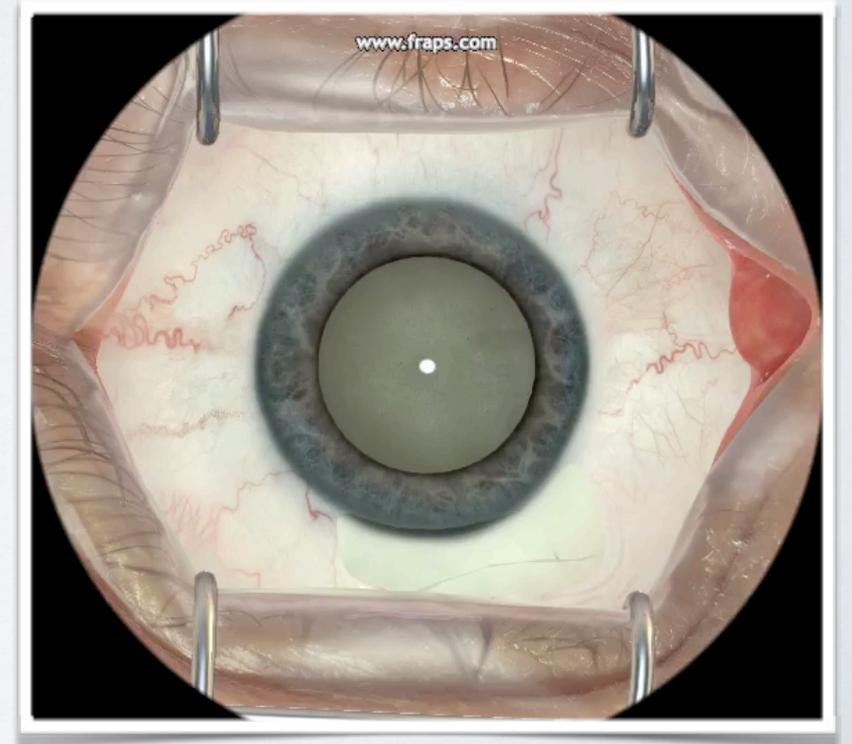
MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE

- Modélisation physique de la cornée, de la sclère, de l'iris, des zonules et de la conjonctive
 - ▶ Chaque structure est modélisée de façon spécifique
 - ▶ Les différentes structures sont couplées mécaniquement entre elles
- Modélisation de la pression intra-oculaire
 - ▶ La pression décroît si une ouverture est créée
 - ▶ La pression contrôle la raideur du globe oculaire
- Simulation en temps-réel
 - ▶ Méthodes éléments finis optimisées
 - ▶ Schéma d'intégration implicite
 - ▶ Solveurs de systèmes linéaires sur GPU



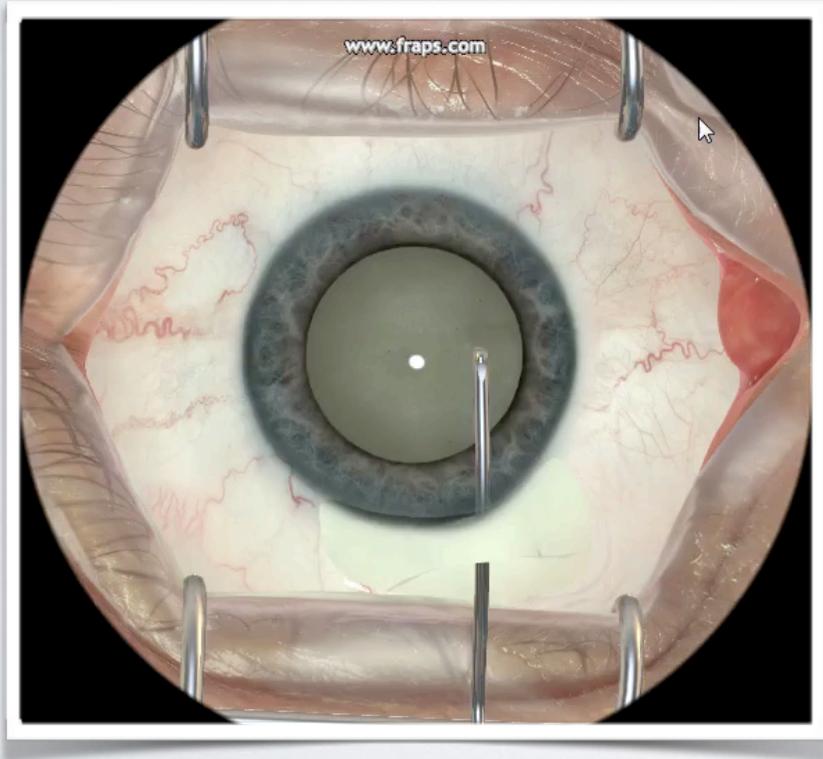
MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE

- Modélisation physique de la cornée, de la sclère, de l'iris, des zonules et de la conjonctive
 - ▶ Chaque structure est modélisée de façon spécifique
 - ▶ Les différentes structures sont couplées mécaniquement entre elles
- Modélisation de la pression intra-oculaire
 - ▶ La pression décroît si une ouverture est créée
 - ▶ La pression contrôle la raideur du globe oculaire
- Simulation en temps-réel
 - ▶ Méthodes éléments finis optimisées
 - ▶ Schéma d'intégration implicite
 - ▶ Solveurs de systèmes linéaires sur GPU



PRISE EN COMPTE DES INTERACTIONS

- Les interactions sont au coeur même d'une intervention chirurgicale



- Interaction anatomie - instruments
 - ▶ Deformation
 - ▶ Injection de fluides
 - ▶ Modèles de contact non-lisses
 - ▶ Changements topologiques
 - ▶ Retour d'efforts



MSICS Simulator Prototype

HelpMeSee Project - Moog/SenseGraphics/InSimo/Inria

UNE OPPORTUNITÉ UNIQUE POUR LA SIMULATION MÉDICALE

Formation “théorique”



200 to 300 sessions d'entraînement sur simulateur



20 interventions contrôlées sur patient

90% de la formation sera réalisée sur modèles numériques !

... MAIS AVEC UN IMPACT POTENTIEL ÉNORME

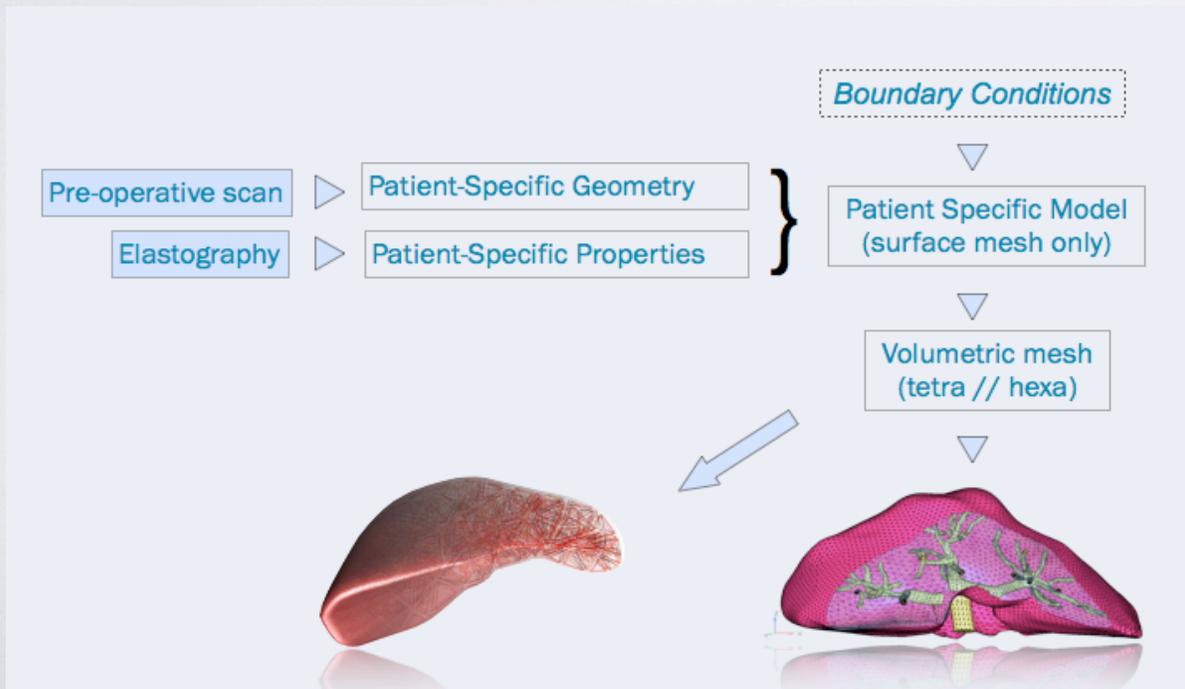


Bill Gates s'exprimant sur les défis de la simulation et la fondation HelpMeSee

DE NOUVEAUX DÉFIS

DE L'APPRENTISSAGE À L'AIDE PER-OPÉRATOIRE

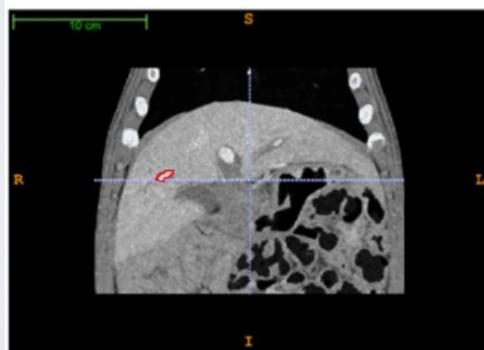
- Modèles numériques plus complexes
- Paramétrisation patient-spécifique
- Identification des conditions aux limites
- Reconstruction automatique
- Maillages volumiques adaptatifs
- Nouvelles méthodes numériques



RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR LA CHIRURGIE HÉPATIQUE



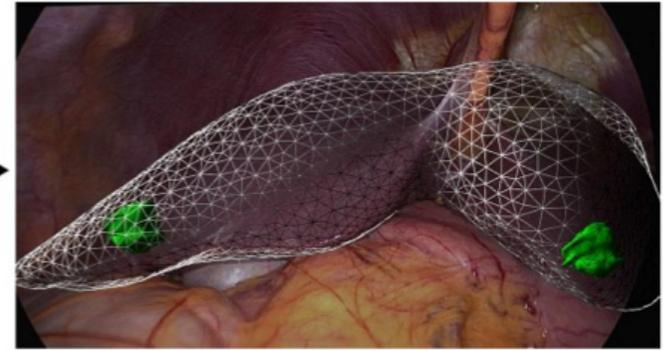
Chirurgie mini-invasive



Pre-operative Scan



Intra-operative View

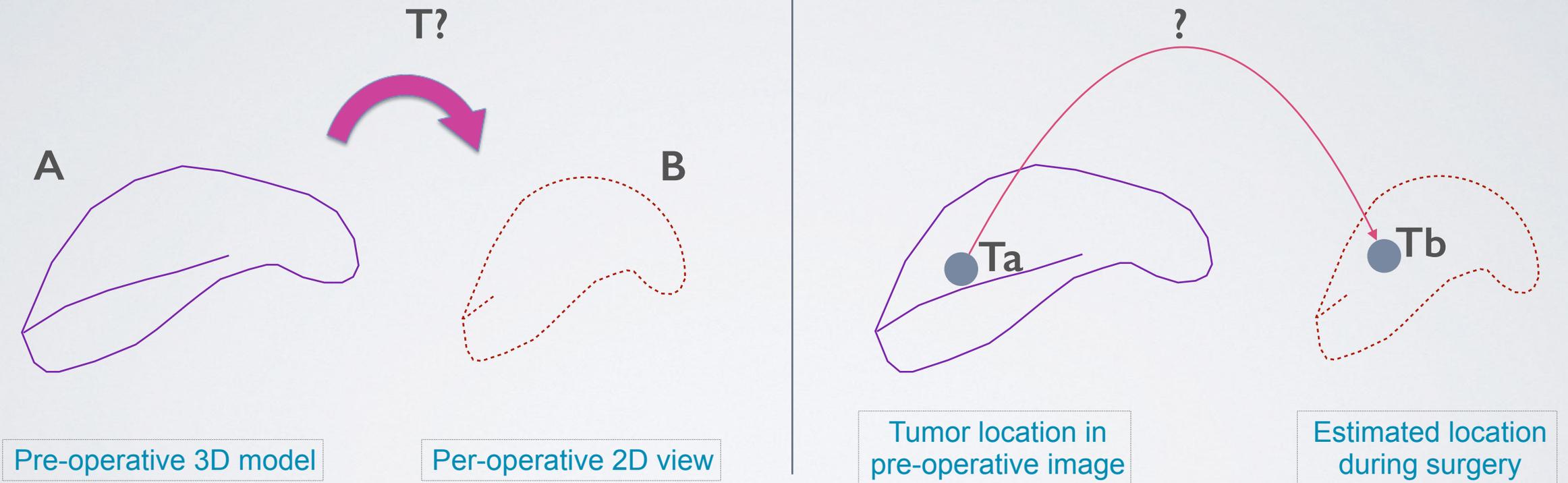


Augmented View

UN EXEMPLE : LA RÉALITÉ AUGMENTÉE

- Recalage (registration)
 - ▶ Aligner un modèle préopératoire sur le(s) image(s) per-opératoire(s)
- Suivi temps-réel (real-time tracking)
 - ▶ Combinaison de “computer vision” et déformation temps-réel
- Localisation précise de la cible
 - ▶ La précision de la localisation de la cible dépend du choix de modélisation
- Visualisation
 - ▶ Mixer “intelligemment” les modèles virtuels avec la vue per-opératoire

POURQUOI CE PROBLÈME EST-IL DIFFICILE ?



Plusieurs transformations amènent A vers B, mais la plupart ne transforment pas Ta en Tb

MODÈLE BIOMÉCANIQUE DU FOIE

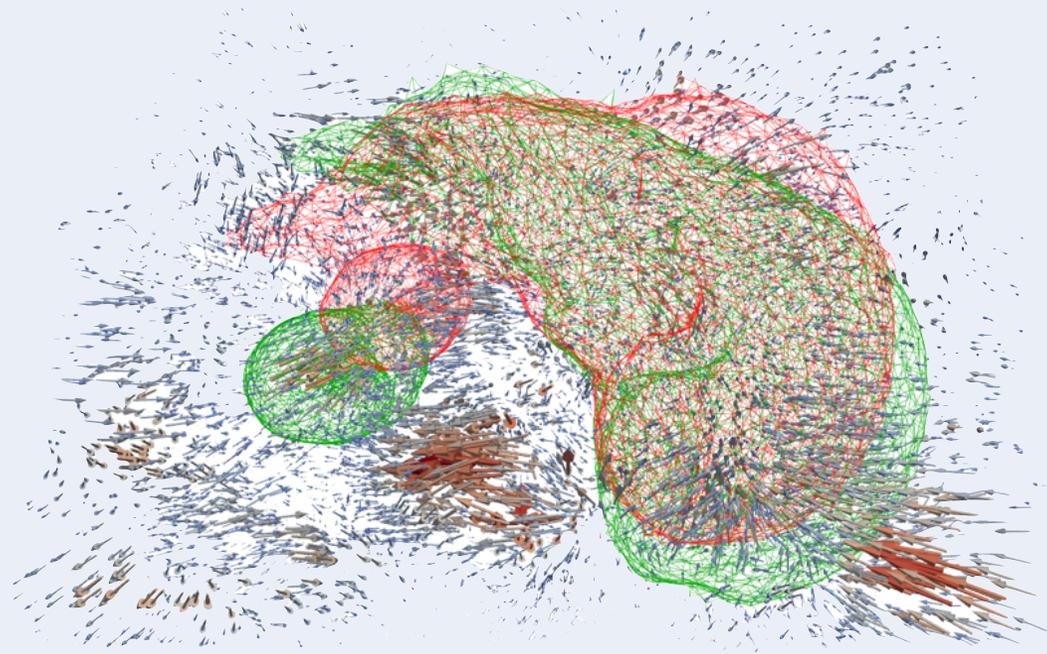
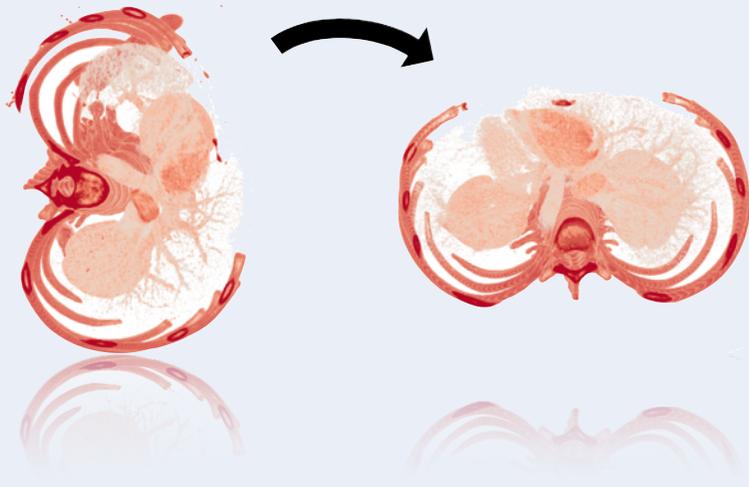
- ▶ Modèle complet du foie
 - ▶ Capsule de Glisson
 - ▶ Réseau vasculaire
 - ▶ Parenchyme

Liver under gravity

with capsule

without capsule

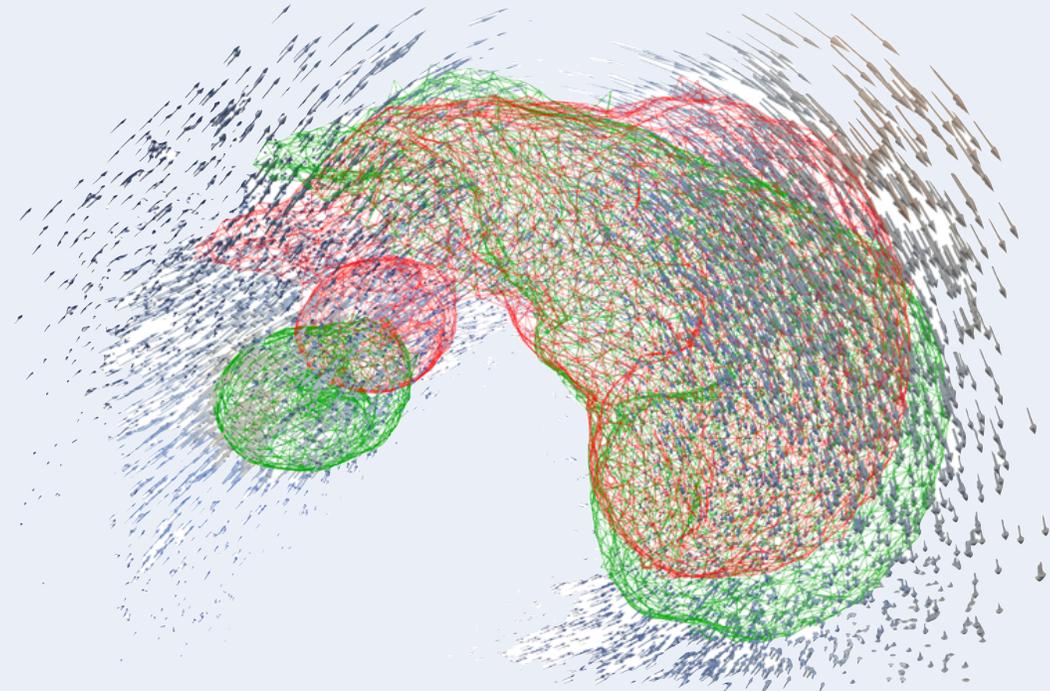
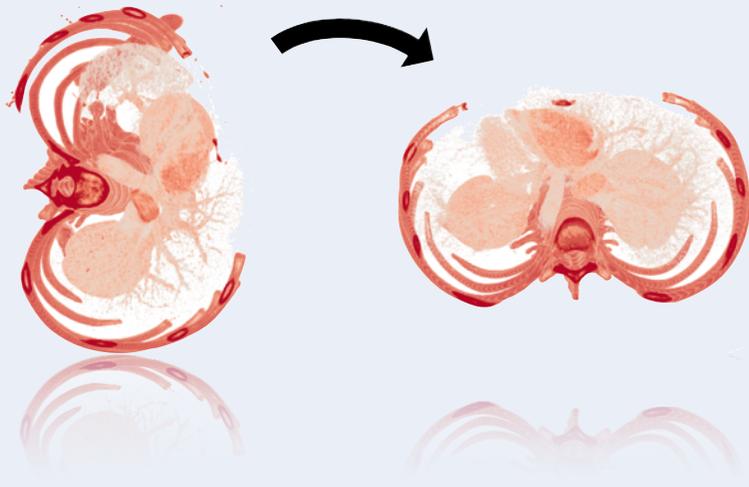
INFLUENCE DU CHOIX DU MODÈLE



Champ de déplacement résultant d'une méthode de recalage basée sur l'intensité

- 1) champ non régulier
- 2) ne décrit pas correctement la réalité

INFLUENCE DU CHOIX DU MODÈLE

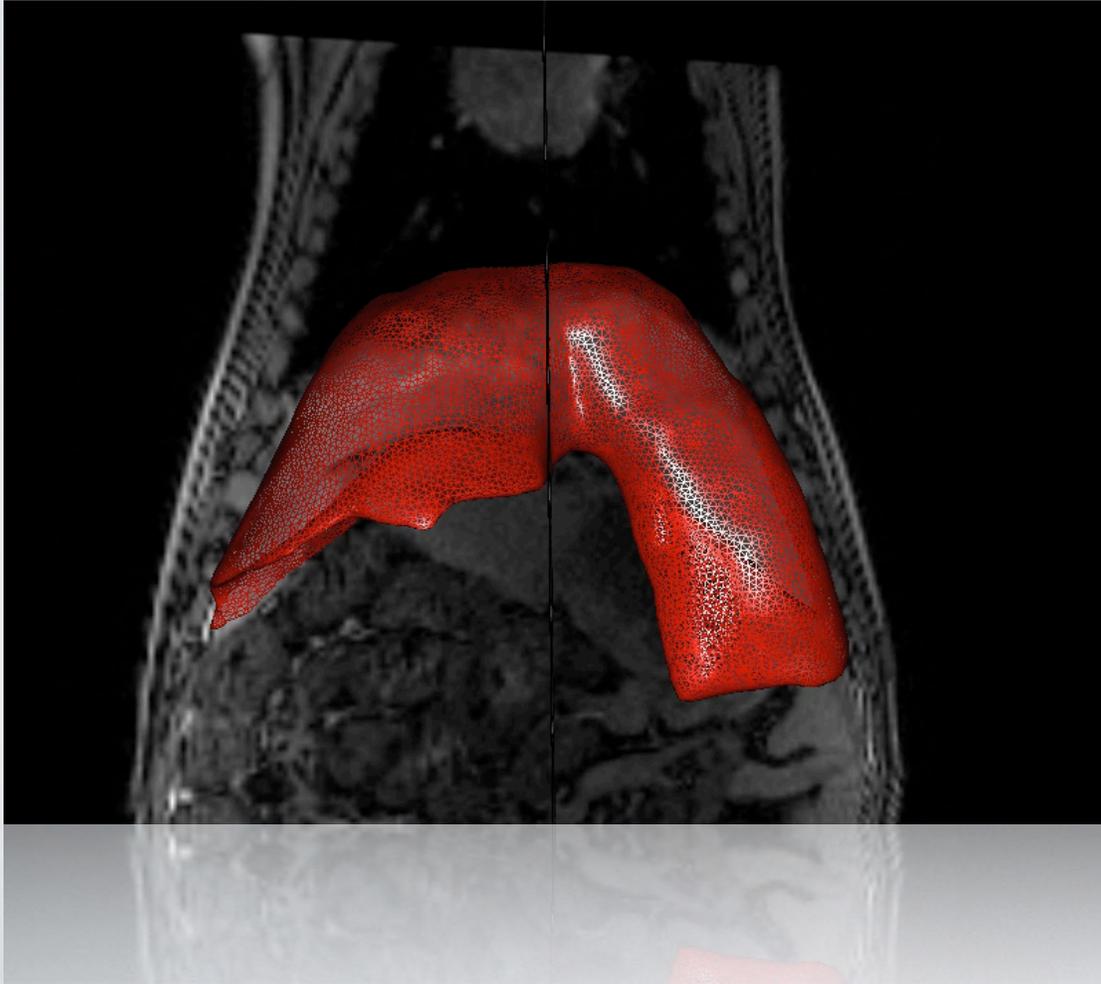


Champ de déplacement résultant d'une méthode de recalage basée sur un modèle biomécanique

1) champ régulier

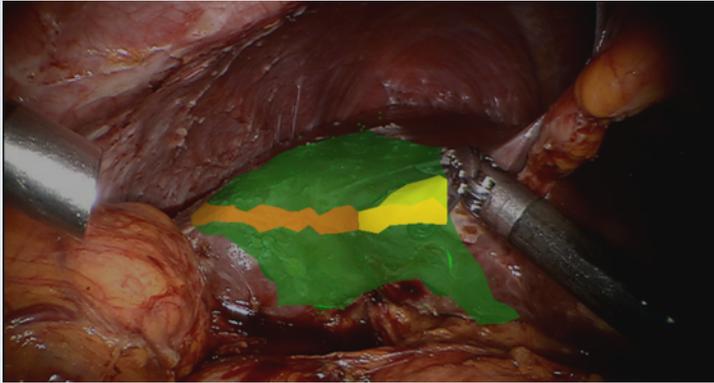
2) décrit correctement la réalité (rotation de 90 degrés)

RECALAGE NON-RIGIDE

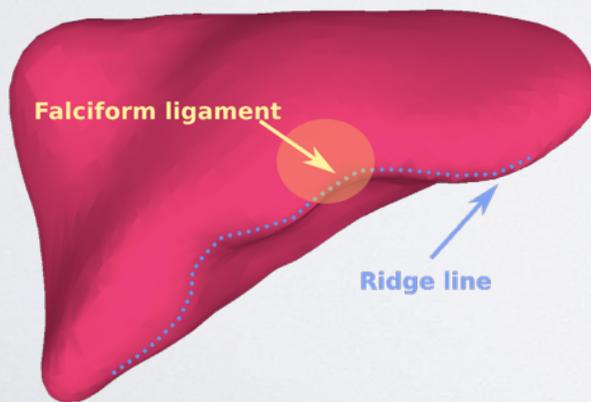


Real-time non-rigid registration
with (bi-planar) dynamic MRI data

RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR LA CHIRURGIE HÉPATIQUE



AUGMENTED REALITY FOR
MINIMALLY INVASIVE LIVER SURGERY
BASED ON REAL-TIME
BIOMECHANICAL SIMULATION



SIMULATION NUMÉRIQUE EN MÉDECINE : UN CONTINUUM

- Même modèles sous-jacents entre apprentissage et aide intra-opératoire
- Continuité dans les travaux de recherche
- Continuité dans le transfert de technologie (recherche translationnelle)
- Continuité dans le cursus professionnel des médecins
 - ▶ formation et pratique basée sur des outils technologiques communs
- Un outil formidable : SOFA (Simulation Open Framework Architecture)

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Et un grand merci à

Juan Pablo de la Plata
Jérémie Dequidt
Christian Duriez
Pierre-Jean Bensoussan
Hadrien Courtecuisse
Christoph Paulus
Bruno Carrez
Ahmed Yureidini
Hugo Talbot
Vincent Majorczyk
Alexandre Bilger
Julien Bosman
Guillaume Kazmitcheff
Zhifan Jiang
Eulalie Coevoet
Nazim Haouchine
Rosalie Plantefève
Mario Sanz Lopez
Frédéric Roy
Rémi Bessart-Duparc

