

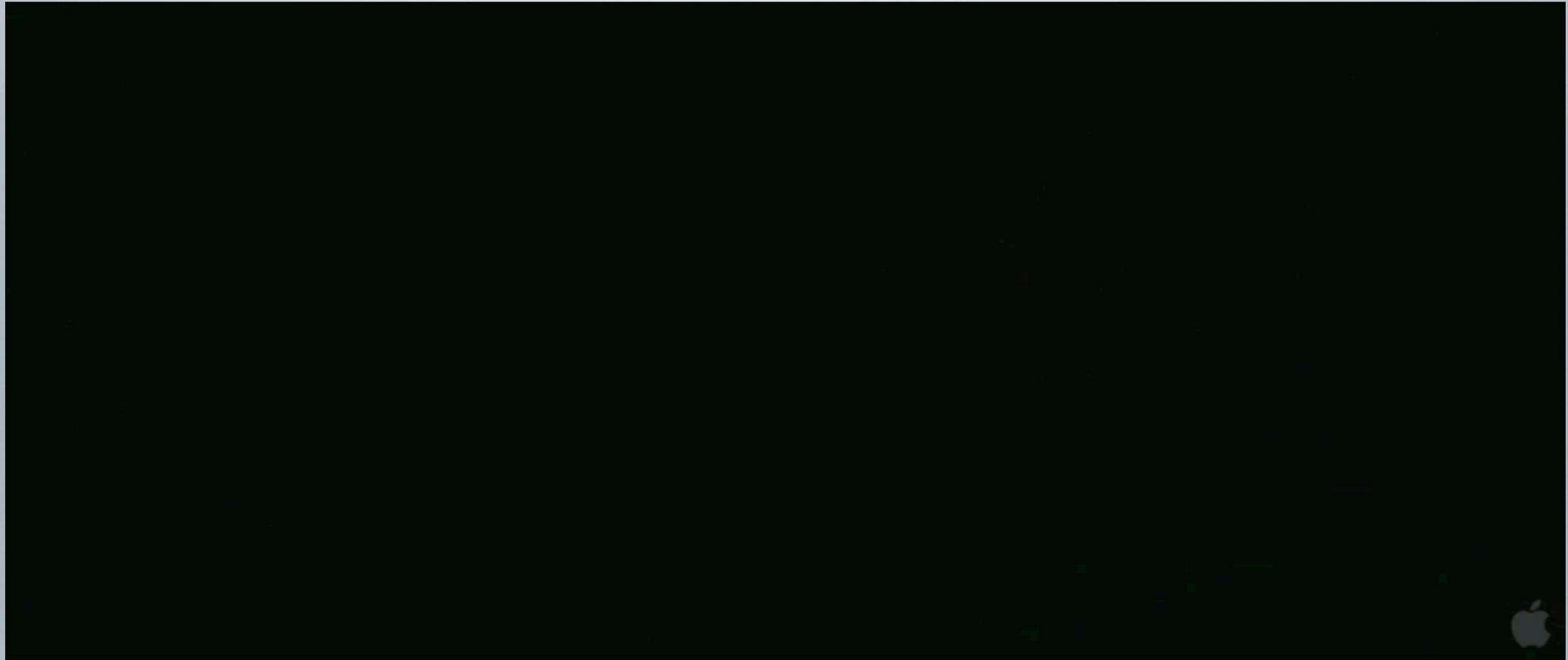


LA MÉTÉO DU CŒUR

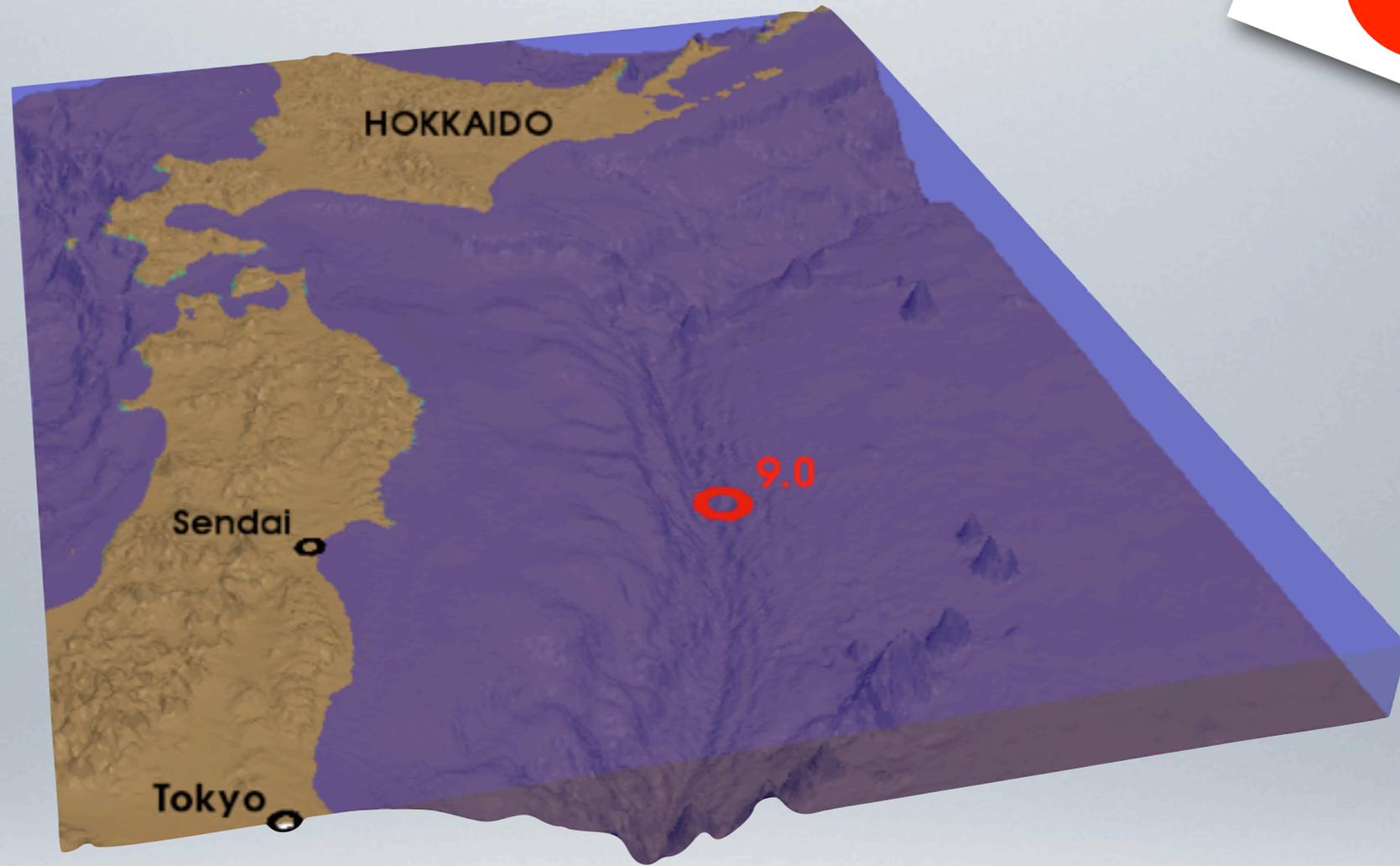
*Ou la modélisation personnalisée au service de la cardiologie
...et des patients*

Dominique Chapelle & Philippe Moireau
Inria Saclay-Ile-de-France
Equipe M3DISIM

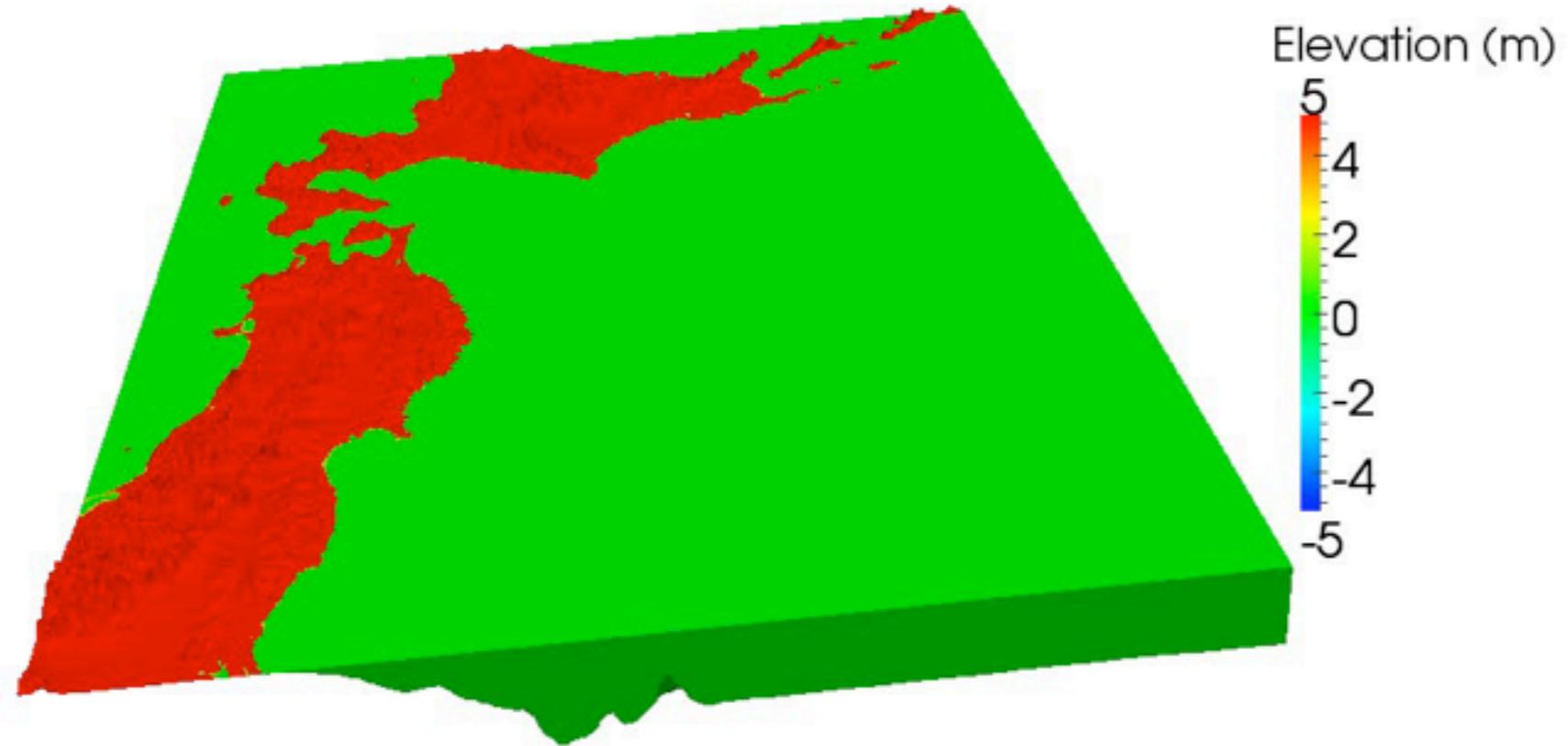
QUELLE EST LA DIFFÉRENCE ENTRE ÇA...



ÇA...



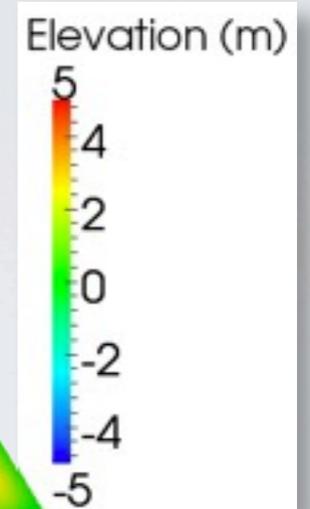
ET ÇA...



ET ÇA...

- 
- ✓ Difficile !
 - ✓ ~~Conséquences~~ ☺
 - ✓ Irréaliste !
 - ✓ Spectaculaire !

- 
- ✓ Esthétique ?
 - ✓ Réaliste ?
 - ✓ Conséquences ☸
 - ✓ Complexe !



Simuler

1 imiter pour tromper
simuler un malaise

2 **Prédire** un phénomène naturel
simuler un séisme

QU'EST CE QUE LA MODÉLISATION ?

Modèle

1 Objet destiné à être imité

Un top-model 😊

2 Représentation théorique d'un système d'éléments et de relations plus ou moins complexes

Un modèle mathématique

▸ Modéliser

▸ Comprendre le système

▸ Formuler un modèle

▸ Simuler sur ordinateur

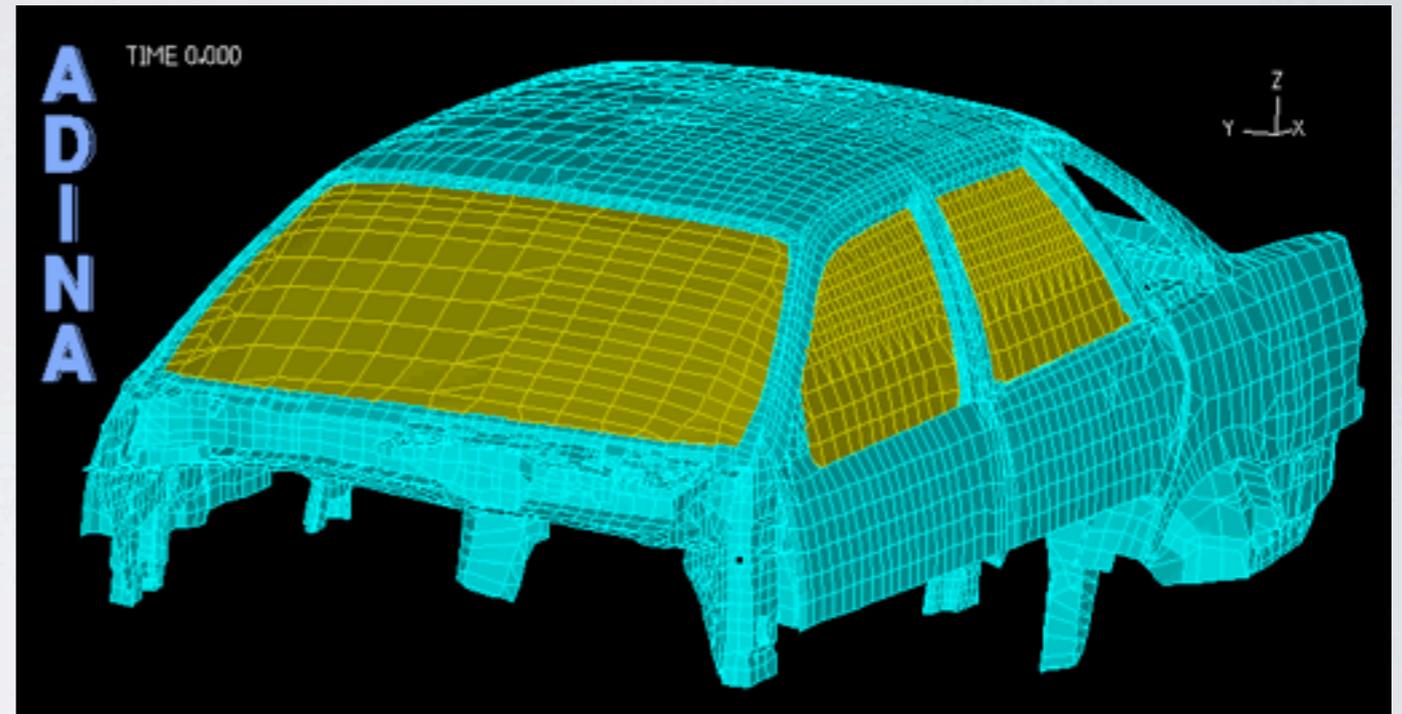
▸ Confronter aux données



▸ Prédire

▸ Estimer les grandeurs inconnues

EXEMPLE EN CONCEPTION INDUSTRIELLE



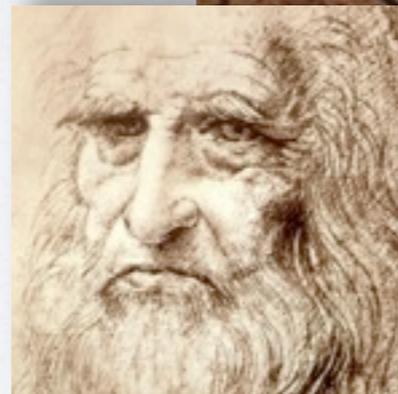
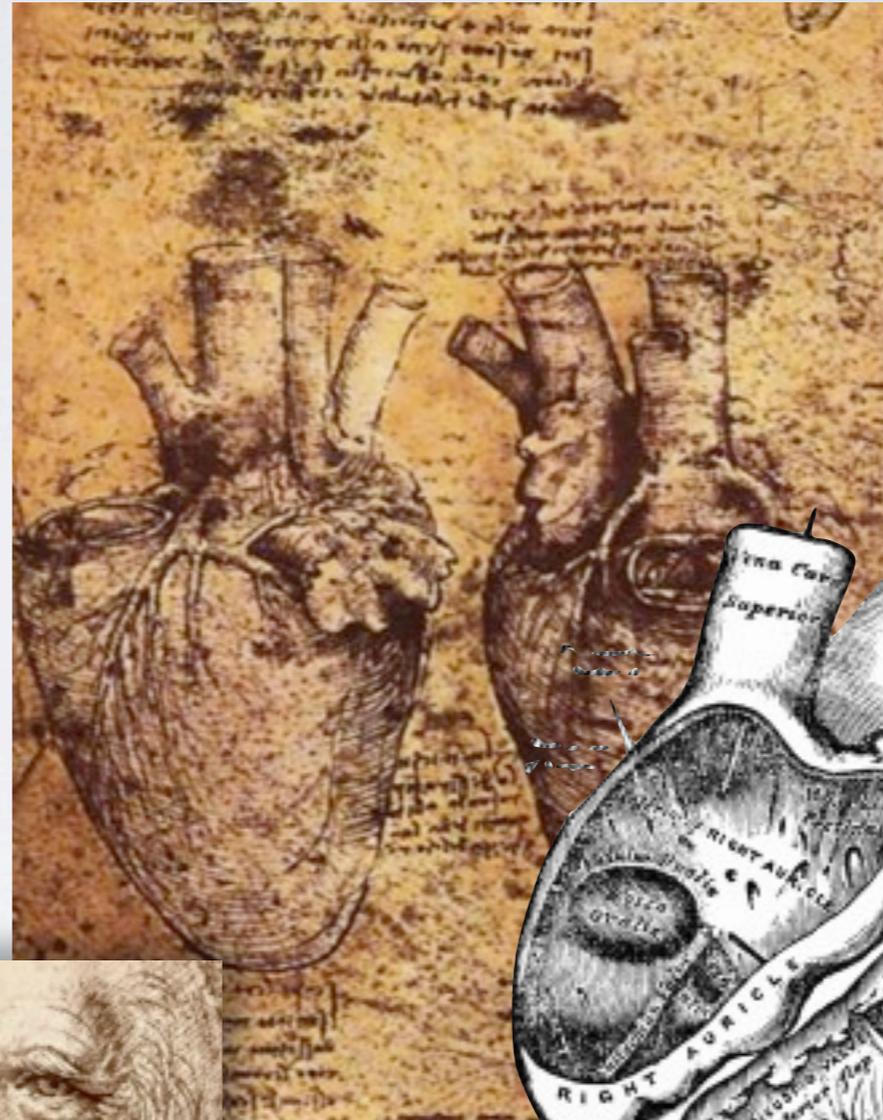
Objectifs de la modélisation industrielle

- 1 Respect du cahier des charges (maximiser la sécurité)
- 2 Raccourcir les cycles de conception et de production
- 3 Diminuer les coûts

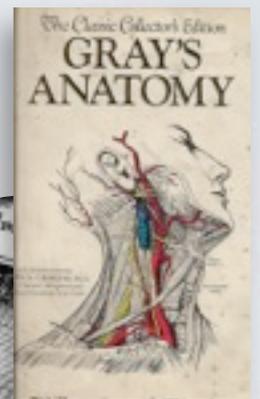
- ▶ **Différences pour un système naturel** (météo, médecine...)
 - ▶ La conception n'est pas au programme
 - ▶ On ne maîtrise pas les caractéristiques des composantes du système (patients)
 - ▶ Les incertitudes doivent être palliées grâce aux données

LE CŒUR

- ▶ Modéliser
- ▶ Comprendre le système
- ▶ Formuler un modèle
- ▶ Simuler sur ordinateur
- ▶ Confronter aux données



Leonard de Vinci



UN PEU DE PHYSIOLOGIE...

DE LA COMPRÉHENSION À LA MISE EN EQUATIONS

► La **contraction** du cœur permet de pomper le **sang** dans l'organisme. Cette contraction a lieu sous l'effet d'une **commande** d'origine électro-chimique qui se **propage** dans le muscle.

► Modéliser

- Comprendre le système
- Formuler un modèle
- Simuler sur ordinateur
- Confronter aux données

The image shows several overlapping strips of torn paper with mathematical equations. The most prominent strip contains the following equations:

$$\left[\begin{aligned} & \frac{\rho_f}{J_f} \frac{\partial J_f \underline{u}_f}{\partial t} \Big|_{\xi} + \rho_f (\underline{u}_f - \underline{w}) \cdot \underline{\nabla}_x \underline{u}_f - 2\mu \operatorname{div} \underline{\sigma}_i \\ & A_m \left(C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} + I_{\text{ion}}(V_m, w) \right) - \operatorname{div}(\underline{\sigma}_i \cdot \underline{\nabla} V_m) = \operatorname{div}(\underline{\sigma}_i \cdot \underline{\nabla} u_e) + I_{\text{app}}, \\ & - \operatorname{div}((\underline{\sigma}_i + \underline{\sigma}_e) \cdot \underline{\nabla} u_e) = \operatorname{div}(\underline{\sigma}_i \cdot \underline{\nabla} V_m), \\ & \frac{\partial w}{\partial t} + g(V_m, w) = 0 \end{aligned} \right. \quad \text{sur } \Omega$$

Other visible equations include:

$$\begin{aligned} & \underline{\Sigma} = -p \underline{J} \underline{C}^{-1} + \dots \\ & \underline{\sigma}_e = d(e_c) \underline{\tau}_e + \mu \underline{\epsilon}_e = \dots \\ & \underline{k}_e = -(|u| + \alpha |e_c|) \underline{k}_e + k_0 |u| \dots \\ & \underline{\tau}_e = -(|u| + \alpha |e_c|) \underline{\tau}_e + \underline{\epsilon}_e \dots \\ & Q_i = \dot{V}_i = \int_{\partial \Omega_i} \underline{\nu} \cdot \underline{E}^{-1} \cdot \delta \underline{\nu}_i \dots \end{aligned}$$

Modèle mathématique du comportement électrique

QUELQUES ÉQUATIONS BAC+12 ... 😊

SIMULER

▶ Calculer la valeur des grandeurs physiques étudiées en **tout** (?) point du système

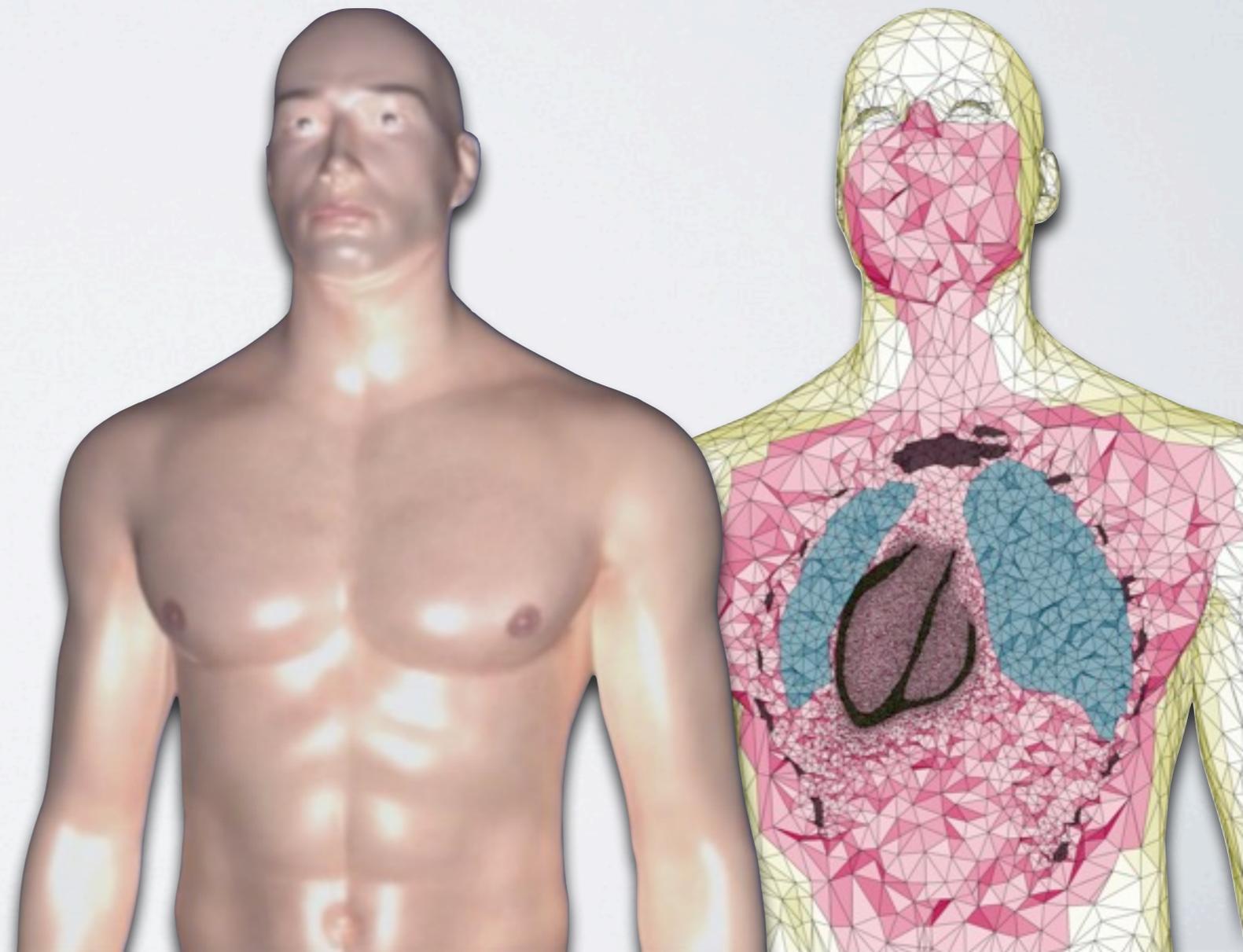
▶ Modéliser

▶ Comprendre le système

▶ Formuler un modèle

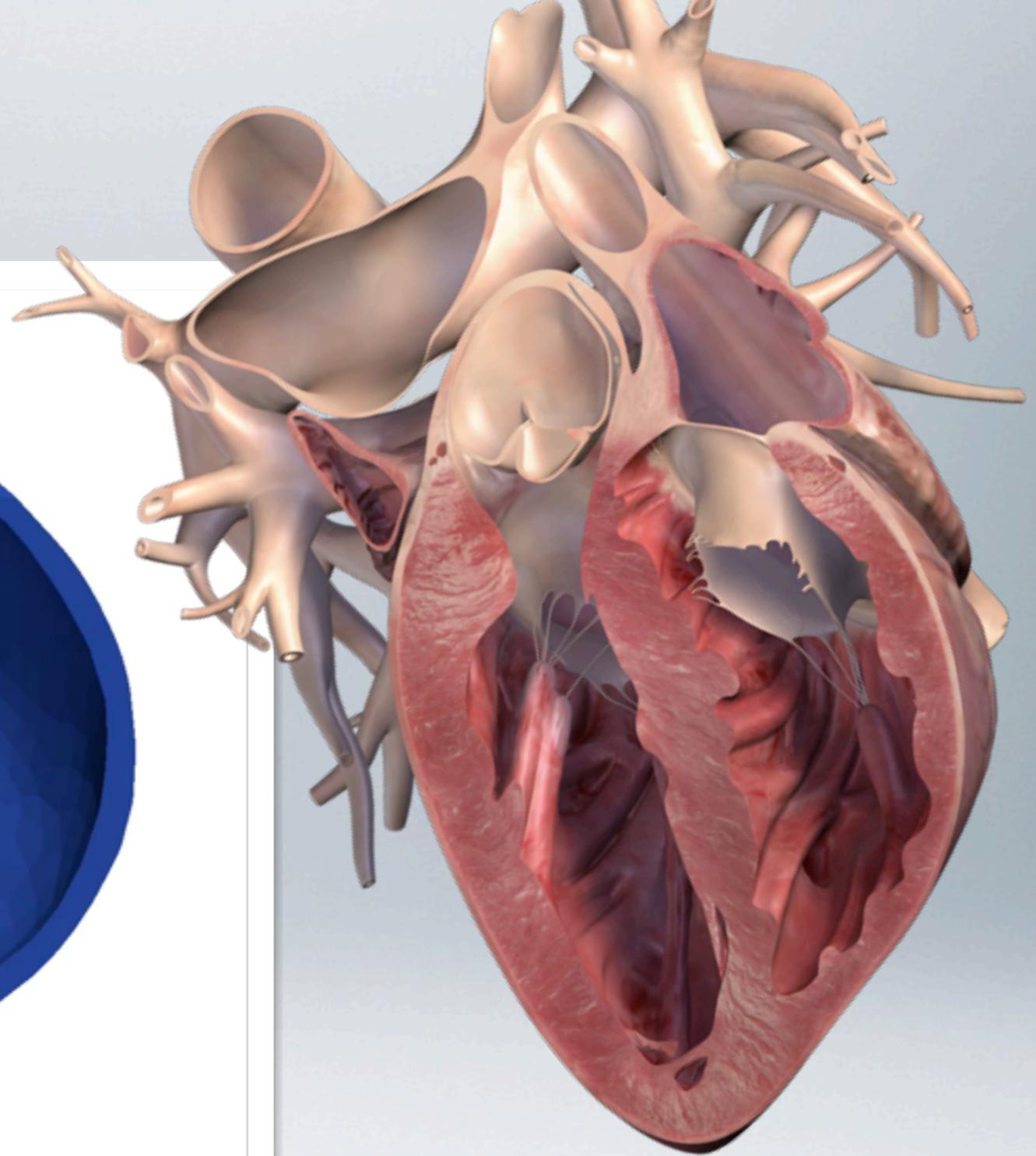
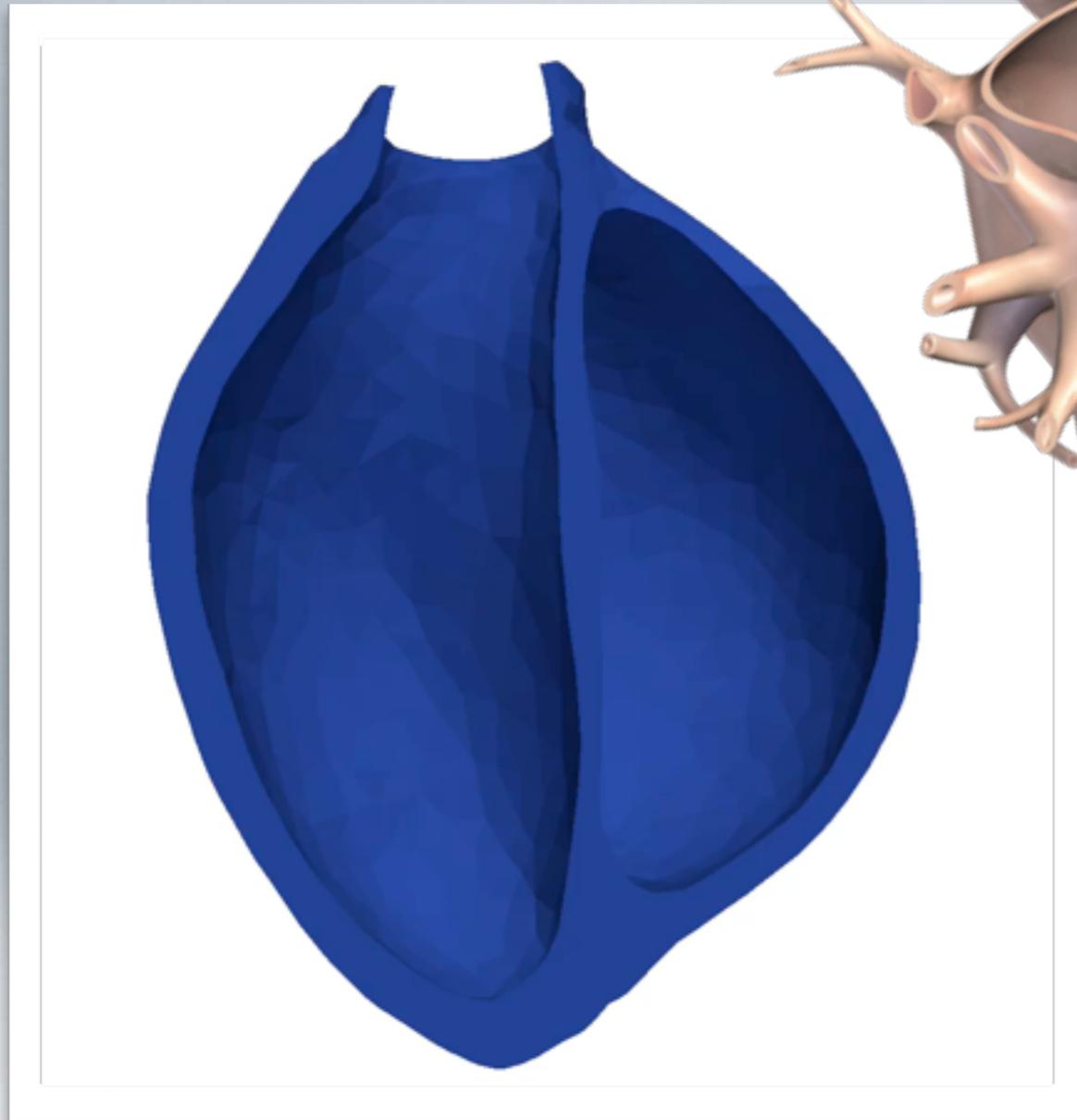
▶ Simuler sur ordinateur

▶ Confronter aux données



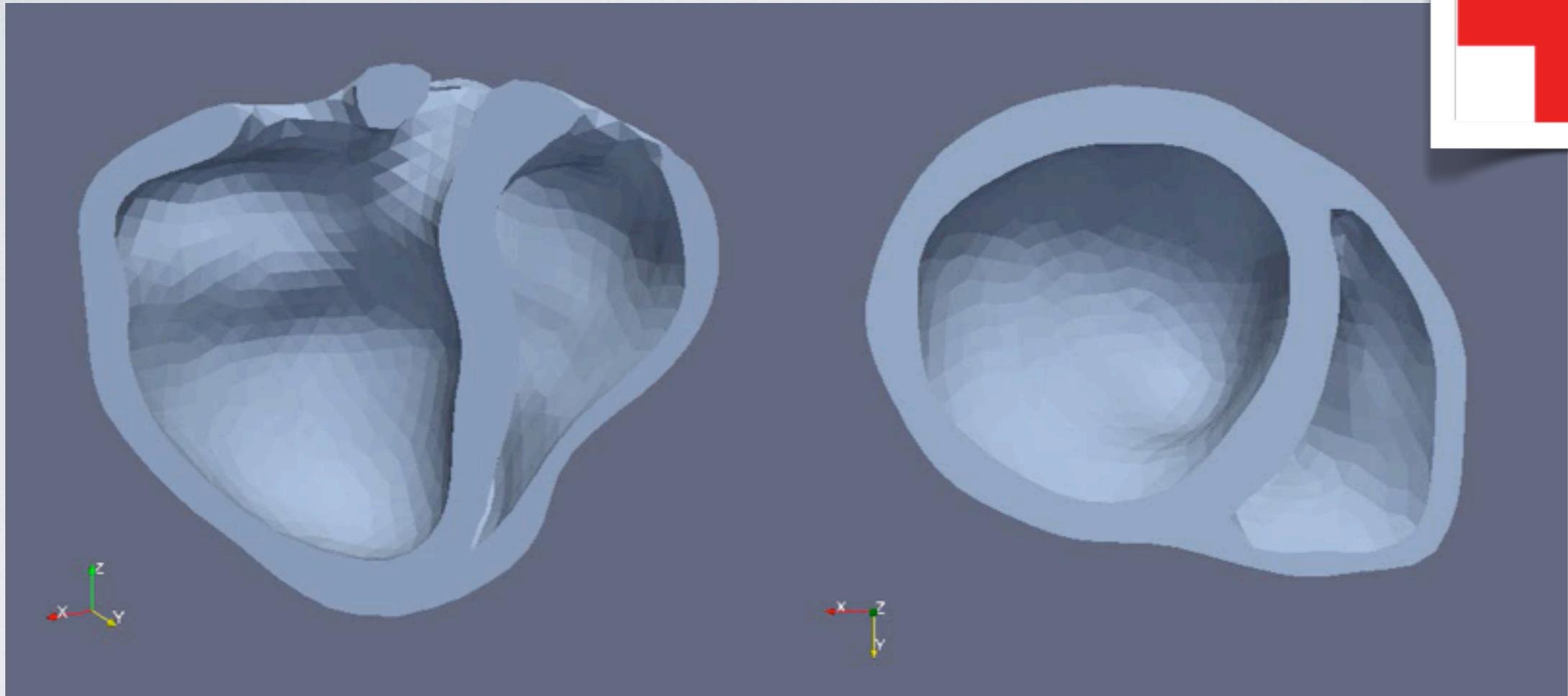
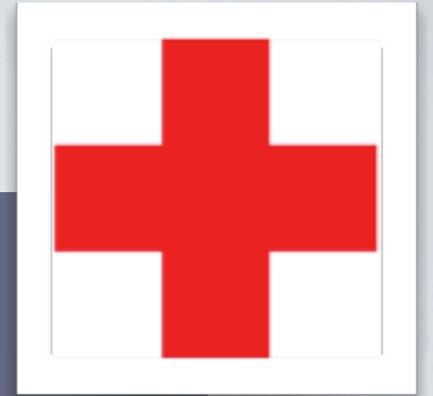
Simulation numérique

EXEMPLES DE SIMULATIONS - MILLESIME 2008 ...



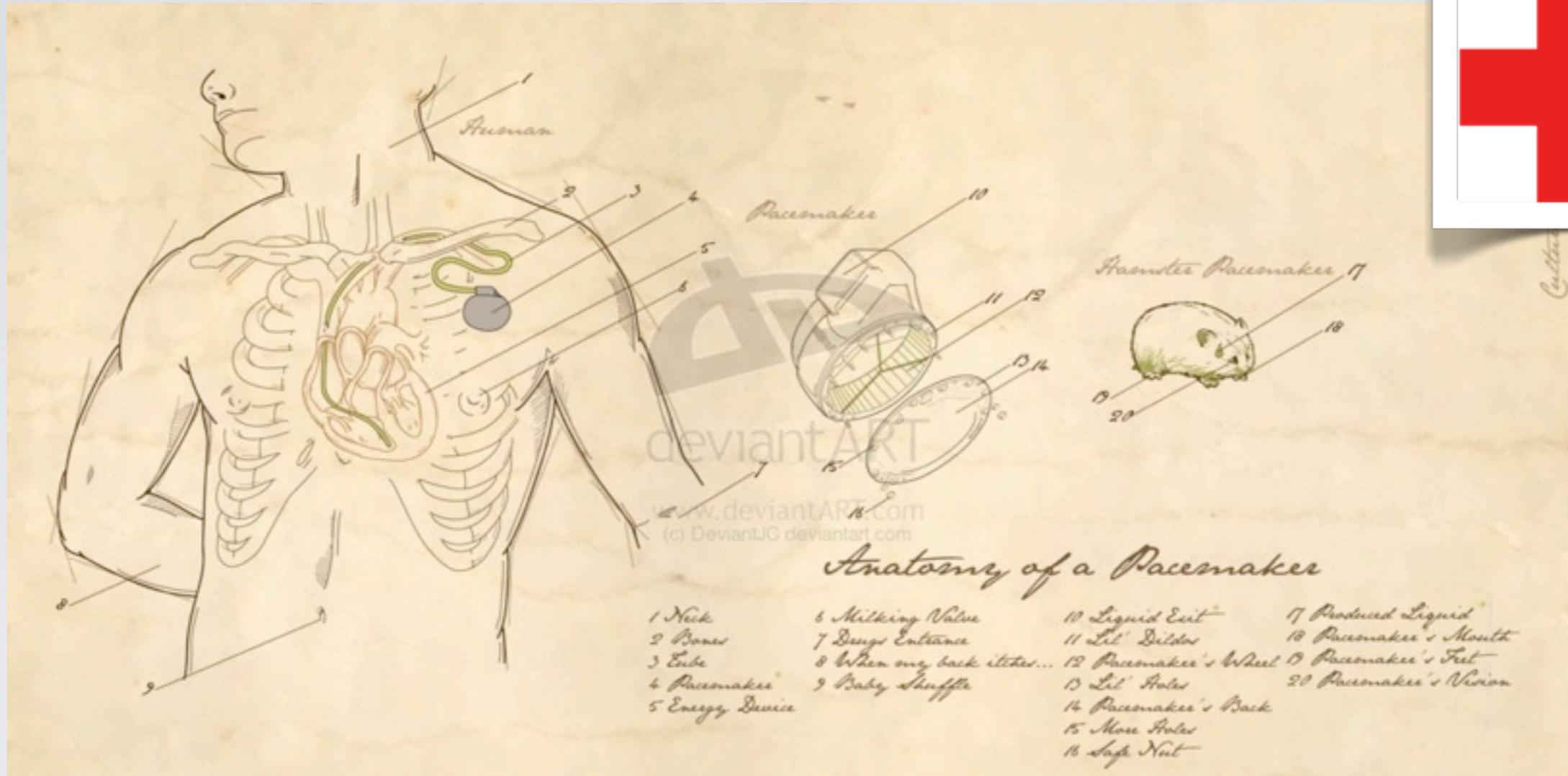
SIMULATION CARDIAQUE (M3DISIM, INRIA)

PRÉDIRE: OPÉRATION VIRTUELLE



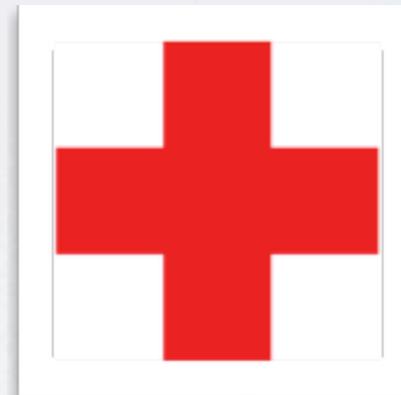
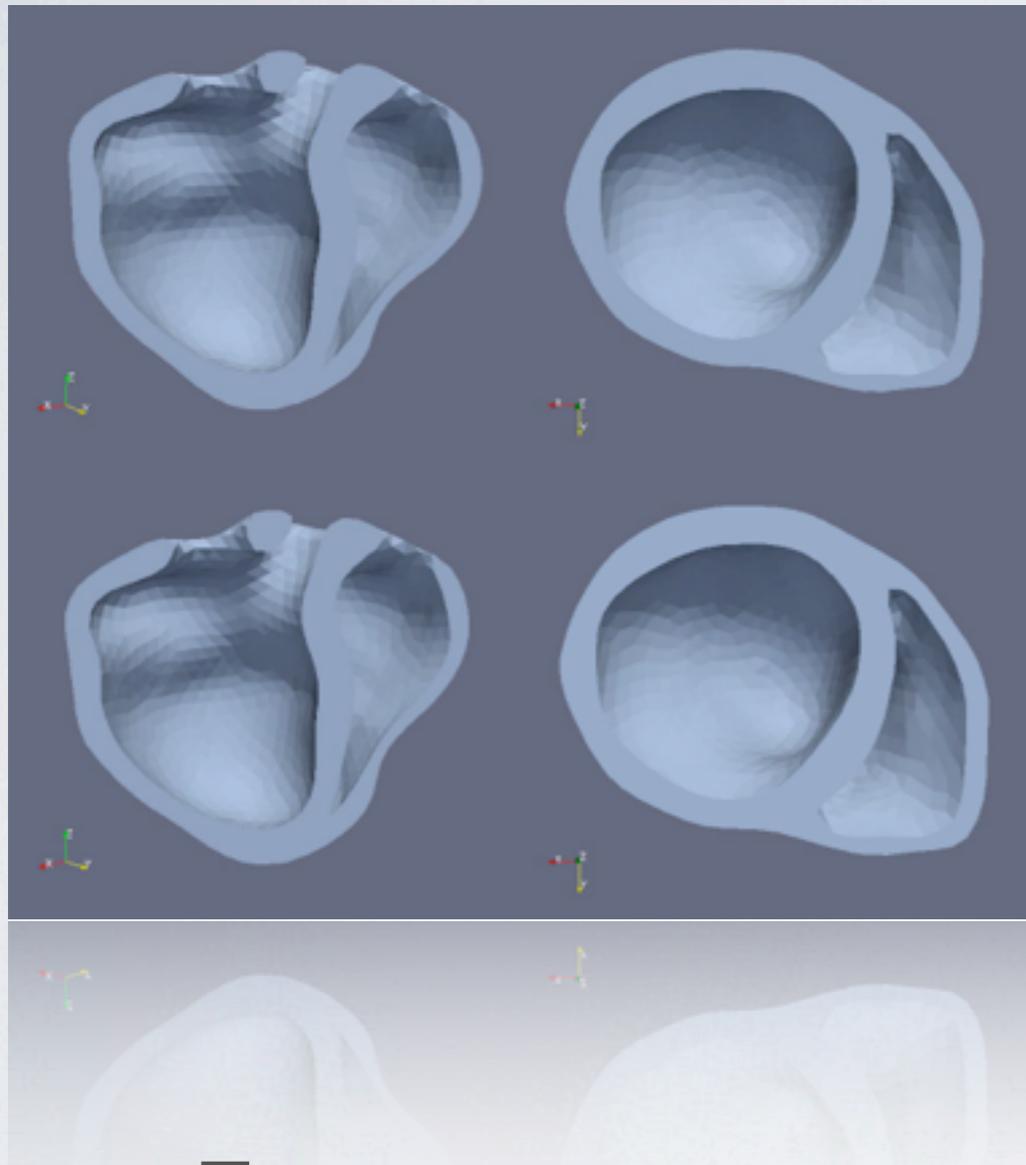
POSE D'UN PACEMAKER...

PRÉDIRE: OPÉRATION VIRTUELLE



POSE D'UN PACEMAKER...

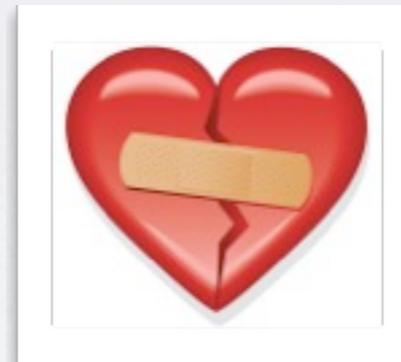
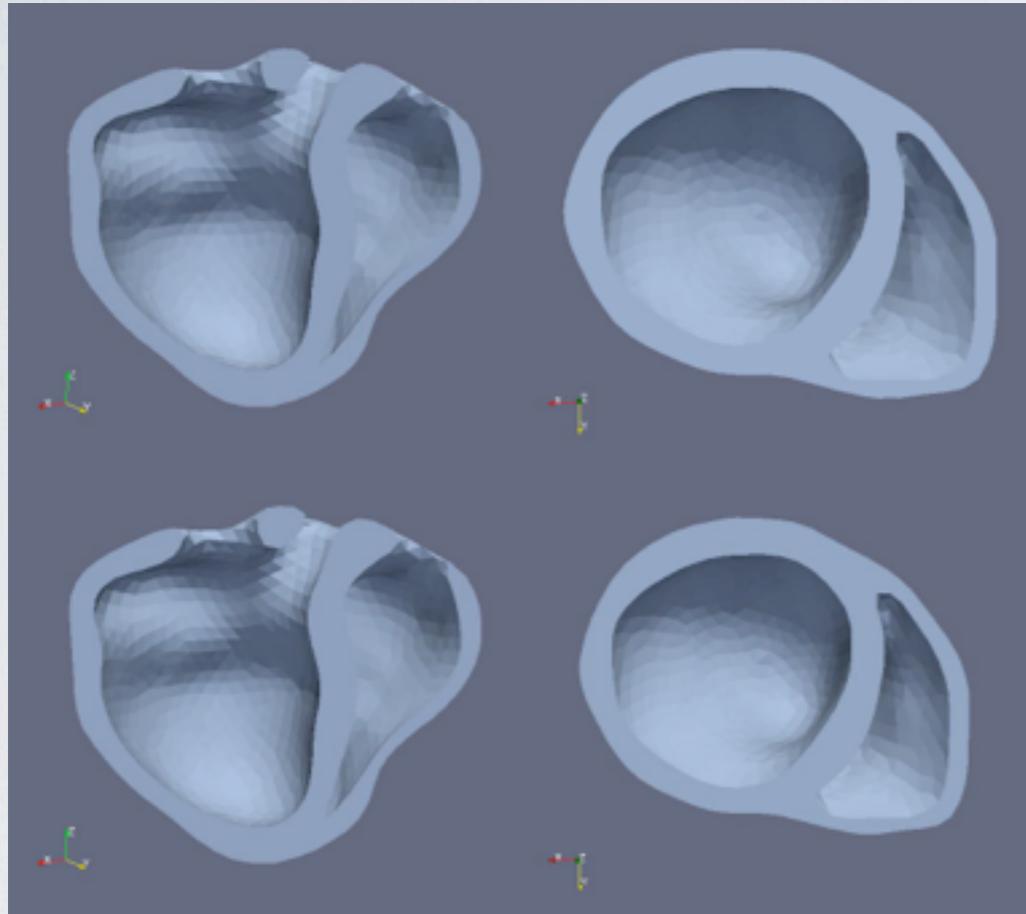
OPÉRATION VIRTUELLE



► Pas assez de sang éjecté

ESSAIS VIRTUELS DE POSE DE PACEMAKER...

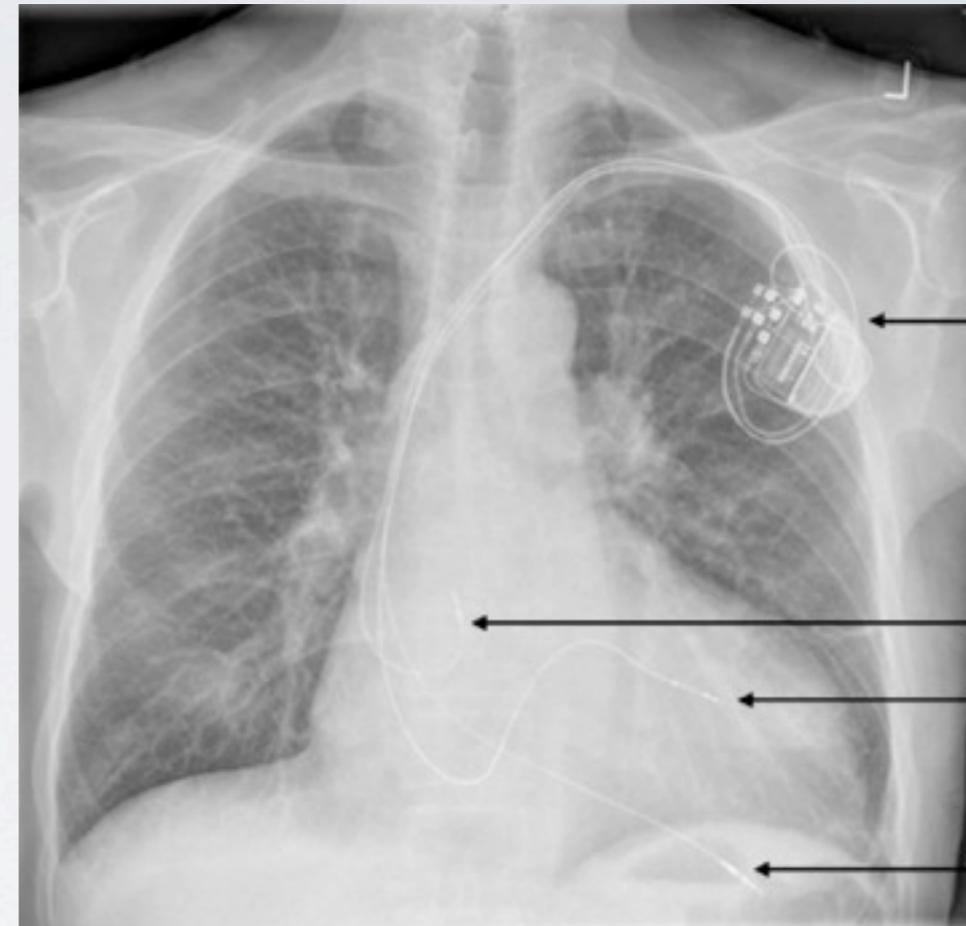
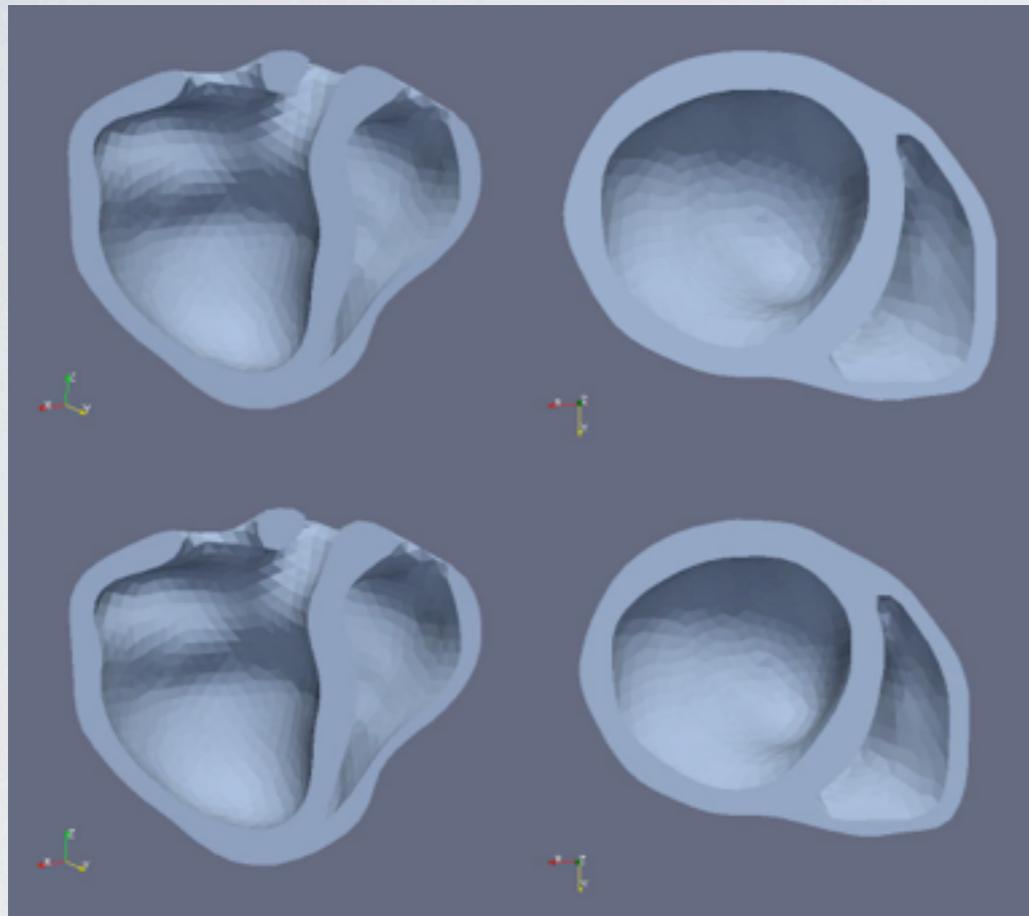
OPÉRATION VIRTUELLE



► Bonne fraction d'éjection

ESSAIS VIRTUELS DE POSE DE PACEMAKER...

OPÉRATION VIRTUELLE



Pacemaker

électrode

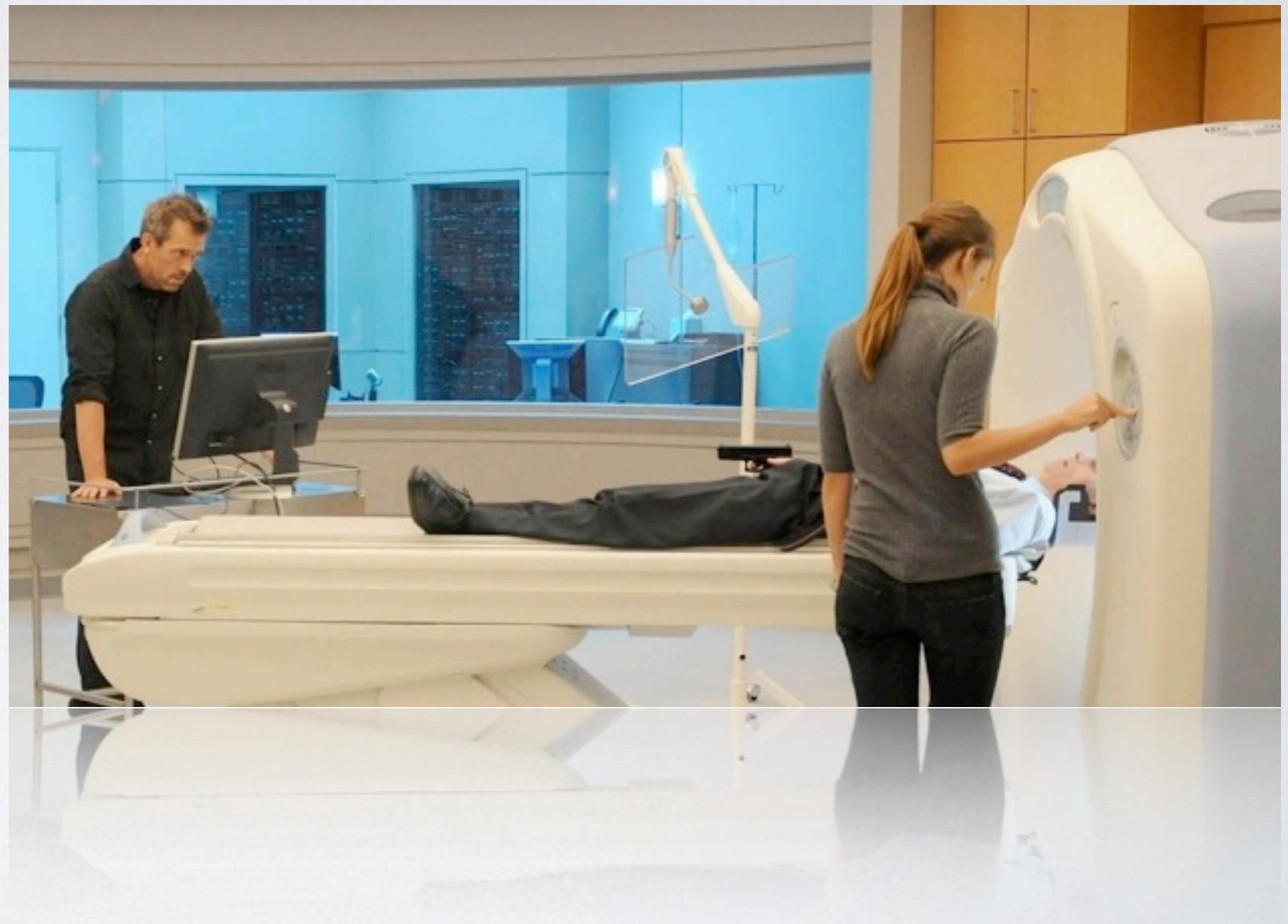
électrode

électrode

ESSAIS VIRTUELS DE POSE DE PACEMAKER...

CONFRONTER AUX DONNÉES

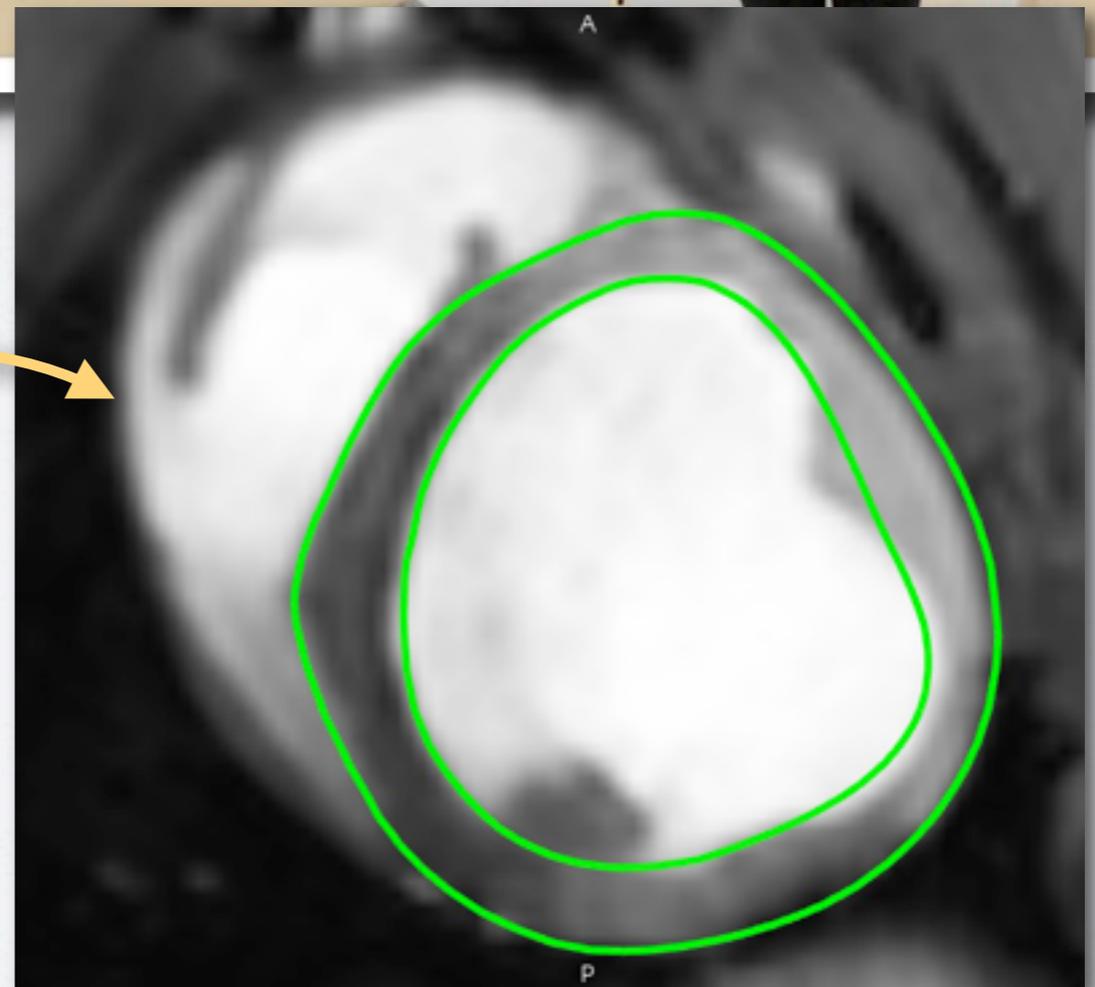
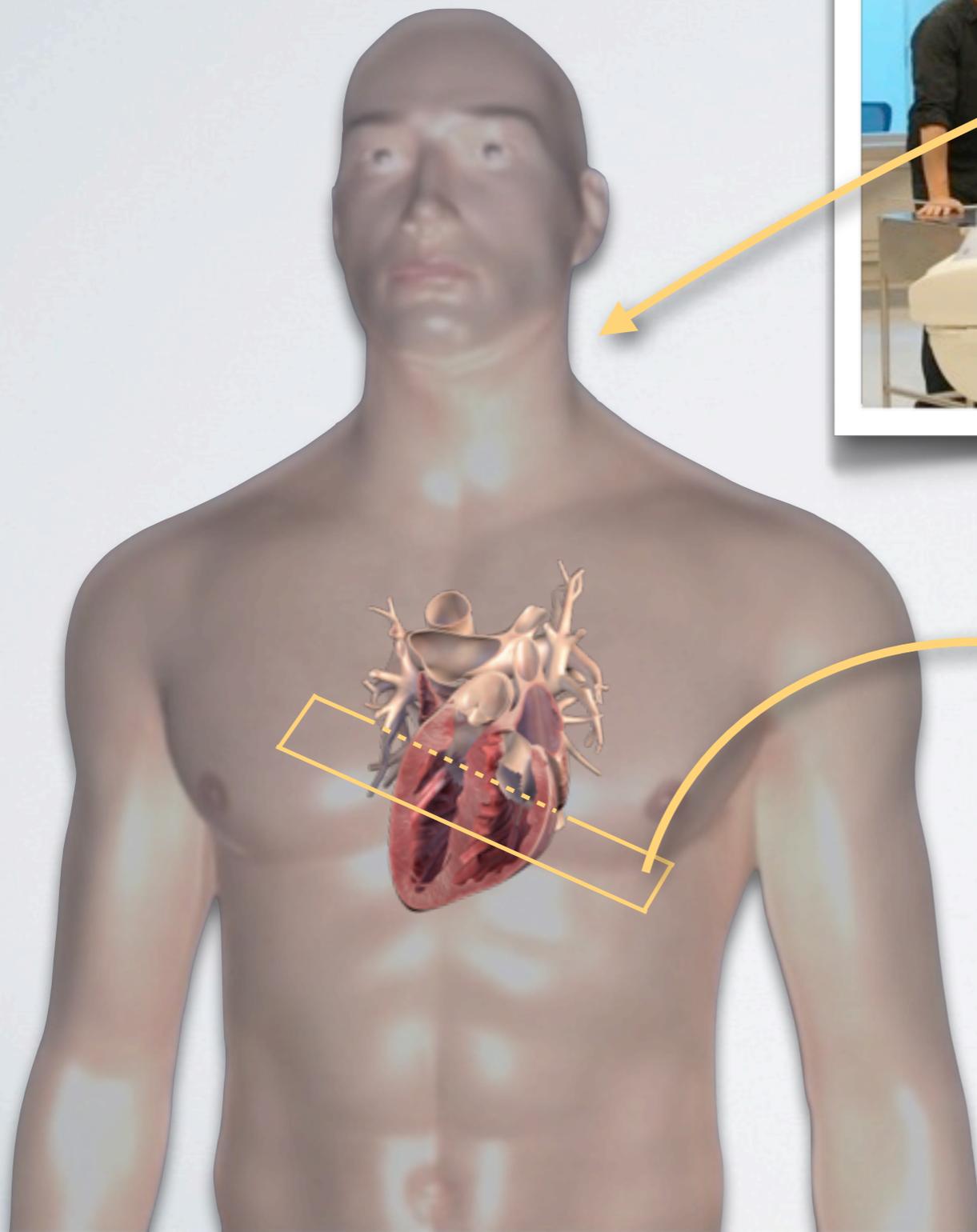
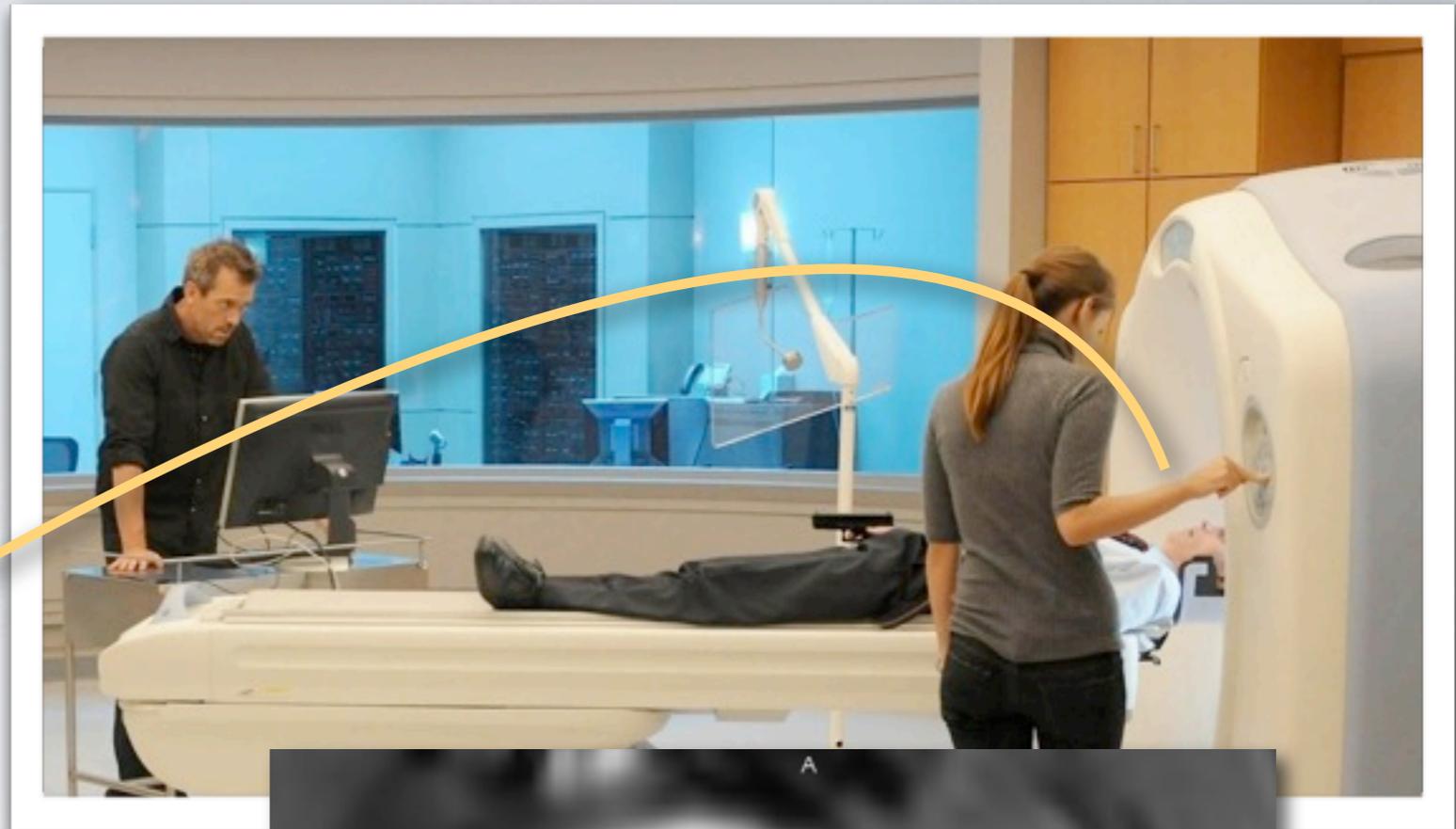
- ▶ Modéliser
 - ▶ Comprendre le système
 - ▶ Formuler un modèle
 - ▶ Simuler sur ordinateur
 - ▶ Confronter aux données



A L'HÔPITAL

IRM

IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNETIQUE



QU'EST CE QUE LA MODÉLISATION ?

- ▶ Modéliser

- ▶ Comprendre le système
- ▶ Formuler un modèle
- ▶ Simuler sur ordinateur
- ▶ Confronter aux données

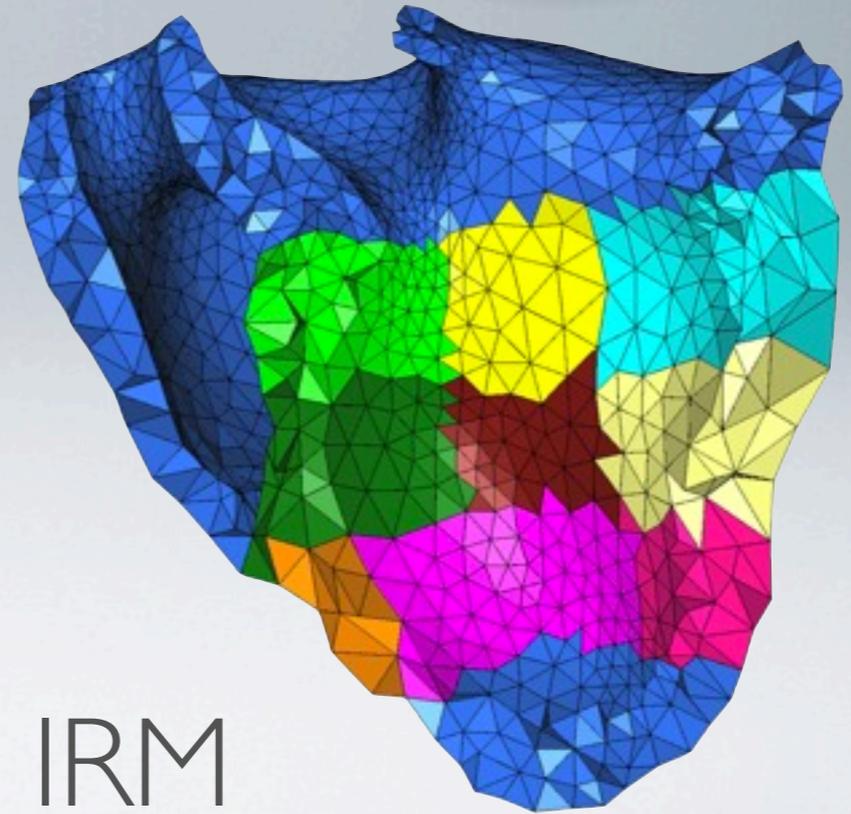
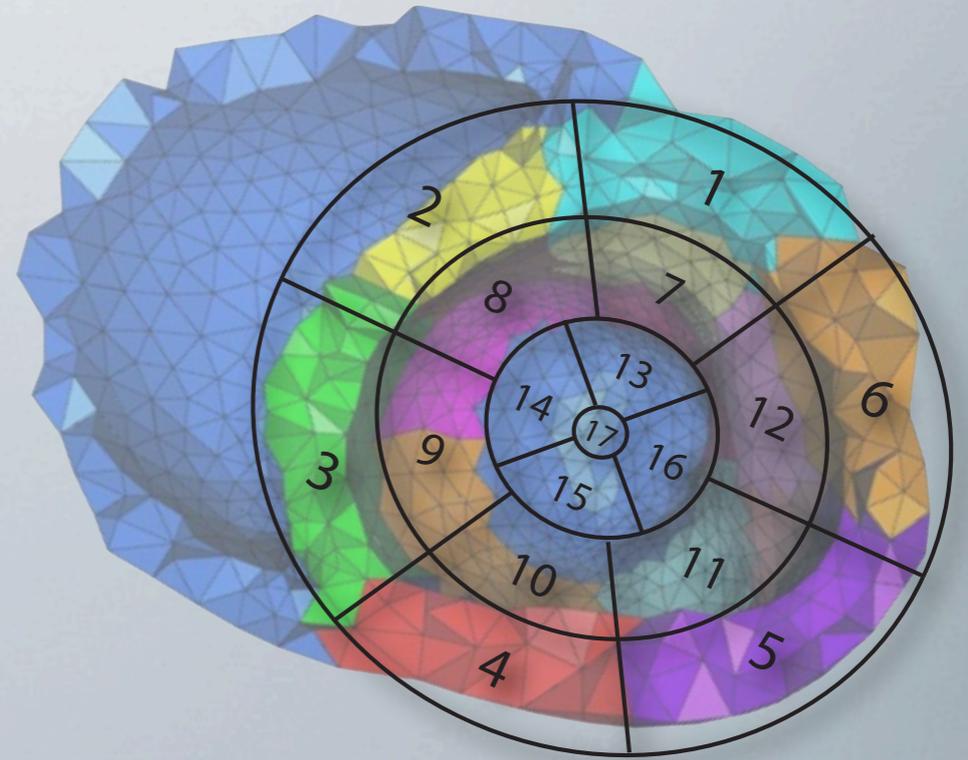
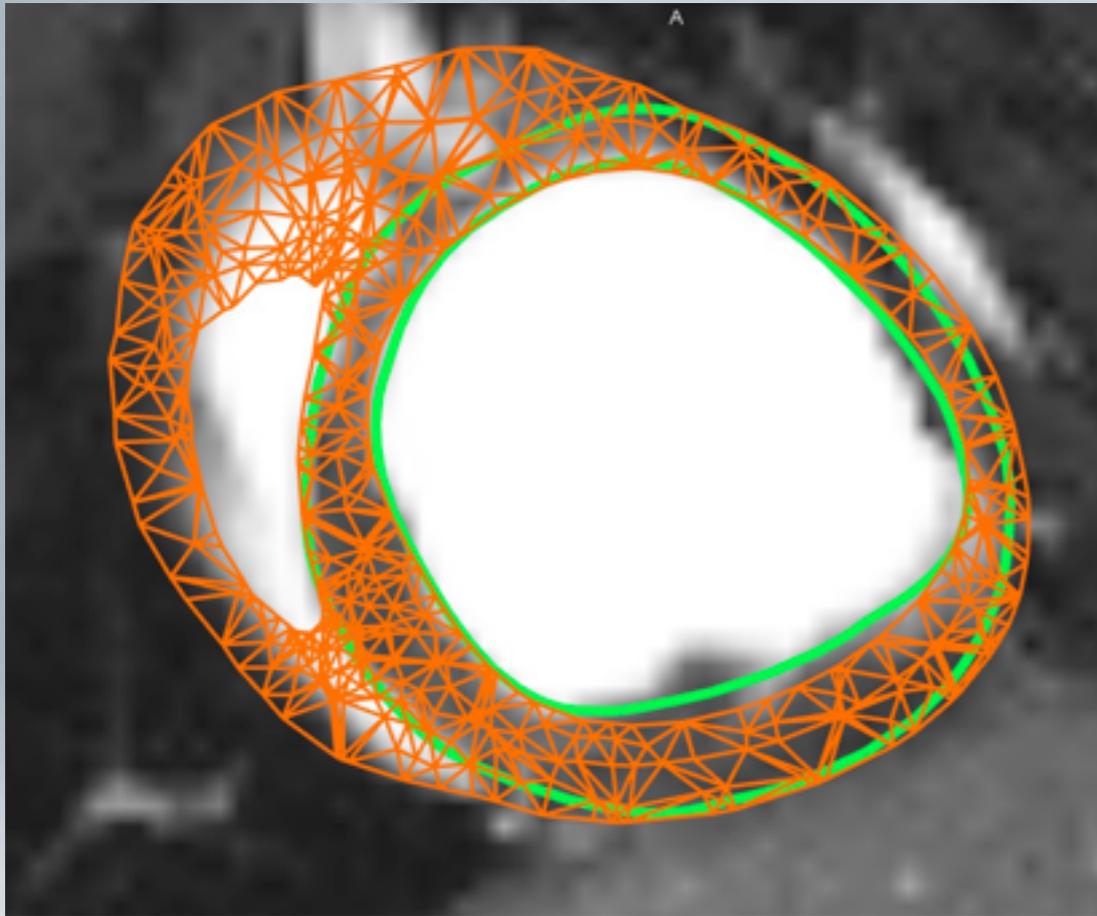


- ▶ Prédire

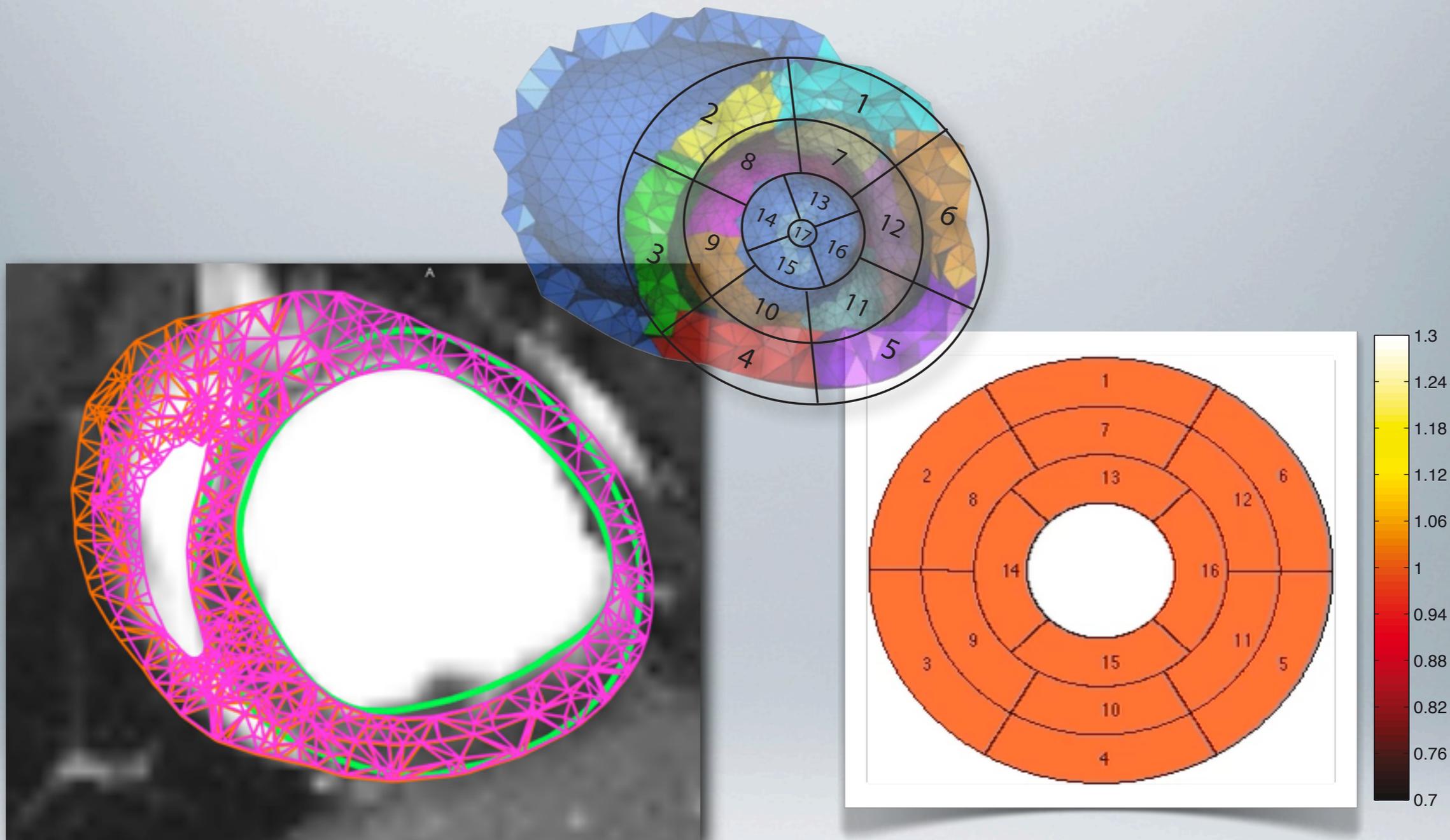
- ▶ Estimer les grandeurs inconnues

Couplage modèle-données

ASSIMILATION DE DONNÉES



SIMULATION VS. IRM



CARACTÉRISATION DE L'INFARCTUS

LA MÉTÉO DU COEUR ?

Modèle

~~1~~ ~~Objet destiné à être imité~~

~~Un top model~~

2 Représentation théorique d'un système d'éléments et de relations plus ou moins complexes

Un modèle mathématique

- ▶ Modéliser
 - ▶ Comprendre le système
 - ▶ Formuler un modèle
 - ▶ Simuler sur ordinateur
 - ▶ Confronter aux données



▶ Prédire

- ▶ Estimer les grandeurs inconnues



Simuler

~~1~~ ~~imiter pour tromper~~

~~simuler un malaise~~

2 reproduire un phénomène naturel

simuler un séisme

EN SAVOIR PLUS / DEVENIR ACTEUR...



▶ “Le cœur numérique - Le film” sur **interstices.info**

▶ https://interstices.info/jcms/c_23092/le-coeur-numerique-le-film



A la mémoire de Gilles Kahn

A la mémoire de Gilles Kahn