

Simulation Physique pour les Mondes Virtuels

François Faure
Univ. Grenoble, LJK-CNRS, INRIA

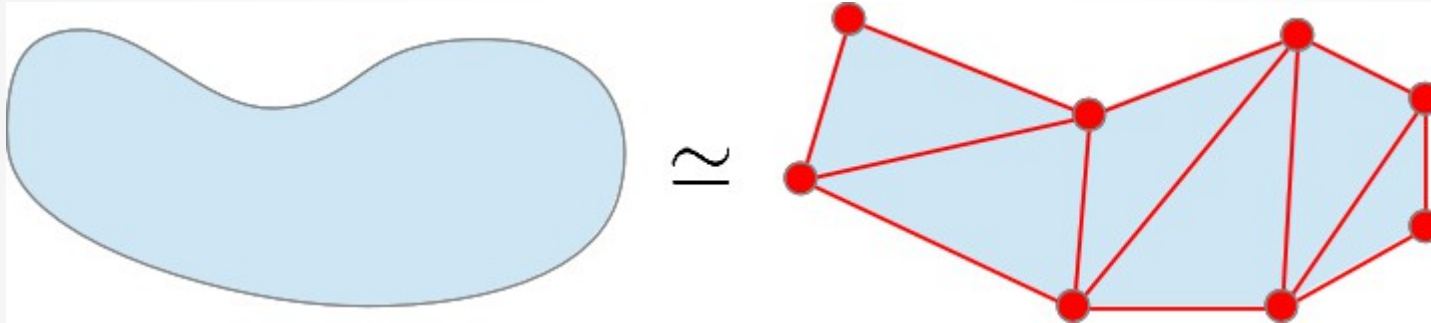
Collège de France, 3 Avril 2015

Plan

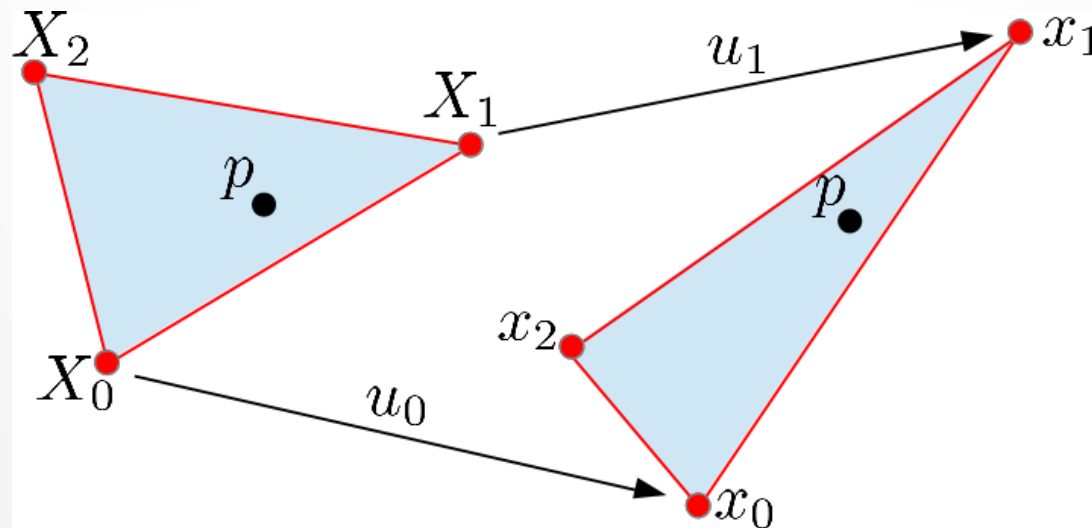
- Rappels
- Modèle à base de grilles
- Modèles recalés
- Modèles à base de repères
- Contact volumique

Modèles mécaniques discretisés

- Approximation par un maillage



- État de l'objet = état des nœuds x



Dynamique discretisée

- Lois de Newton $a = M^{-1}f$
- Intégration explicite du temps $v(t + h) = v(t) + ha(t)$
 - Instable !
- Intégration implicite $v(t + h) = v(t) + ha(t + h)$
 - Système d'équations à résoudre

$$(M - h^2 K)a = f + hKv$$

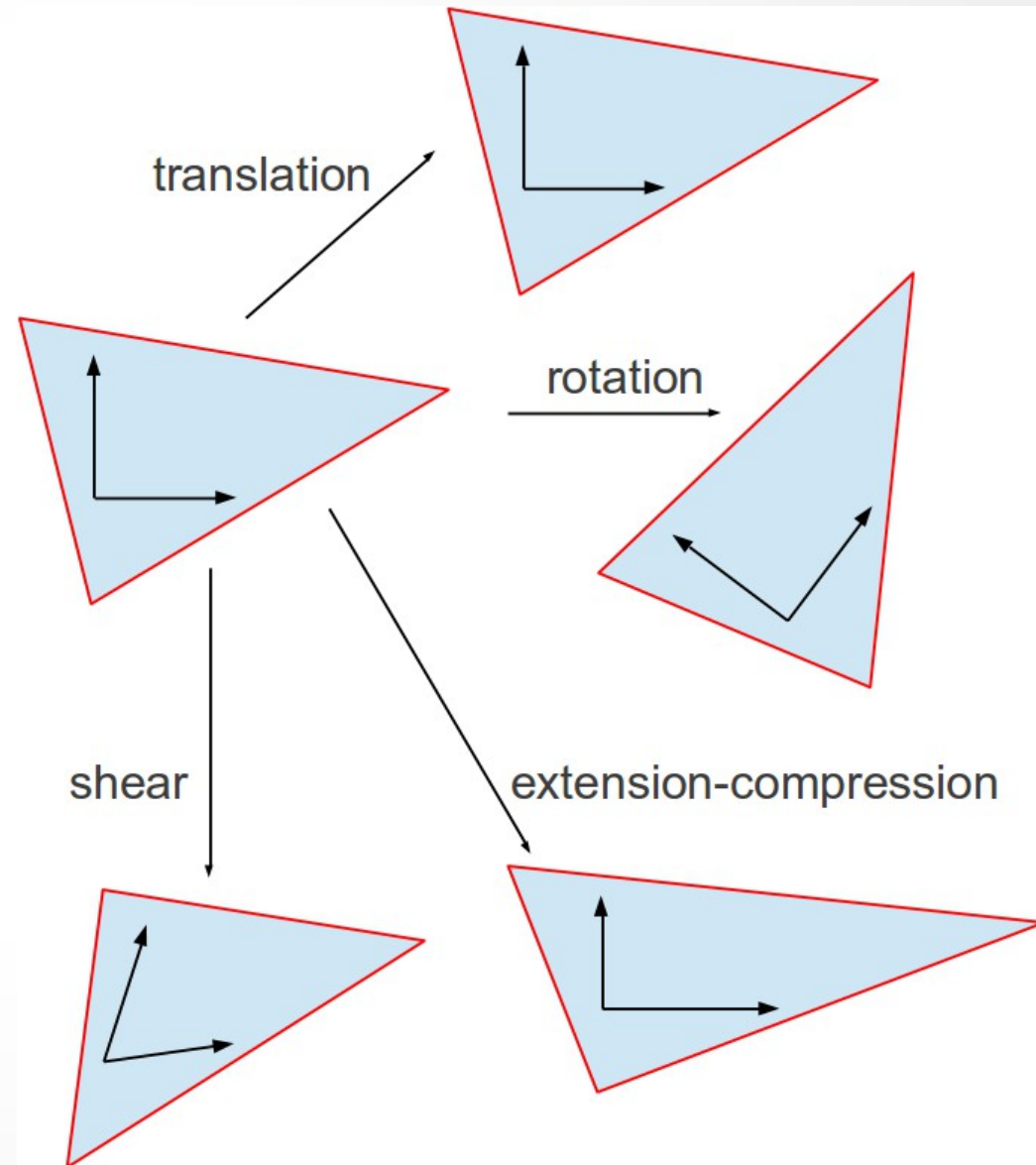
$$K = \frac{\partial f}{\partial x}$$

Eléments Finis

- Tenseur du gradient de déformation

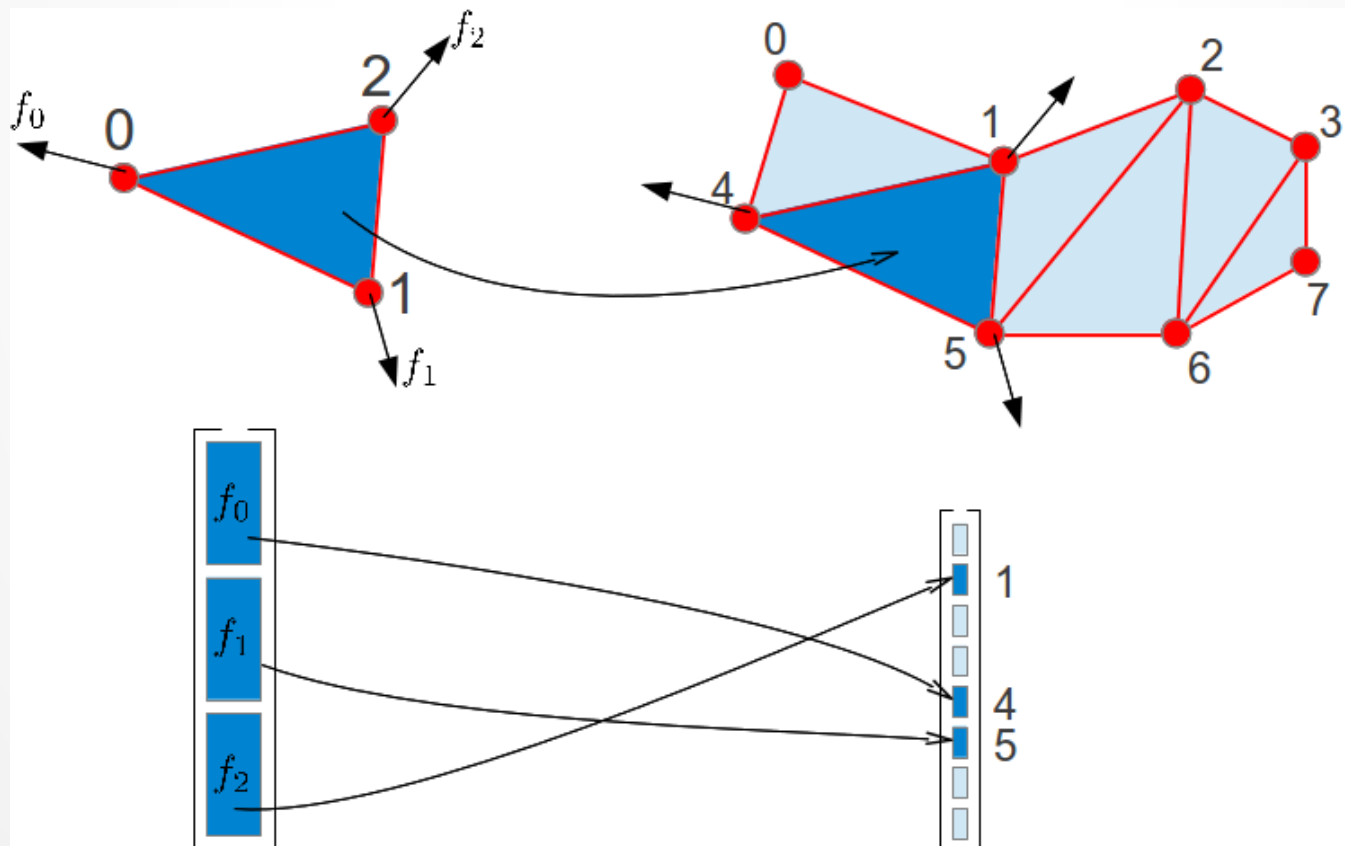
$$F = \frac{\partial x}{\partial X}$$

- déformation = changements de longueur et d'angles



Forces aux nœuds

- Force élastique en un élément: $f = -\frac{\partial W}{\partial x}$
- Numérotation globale et accumulation



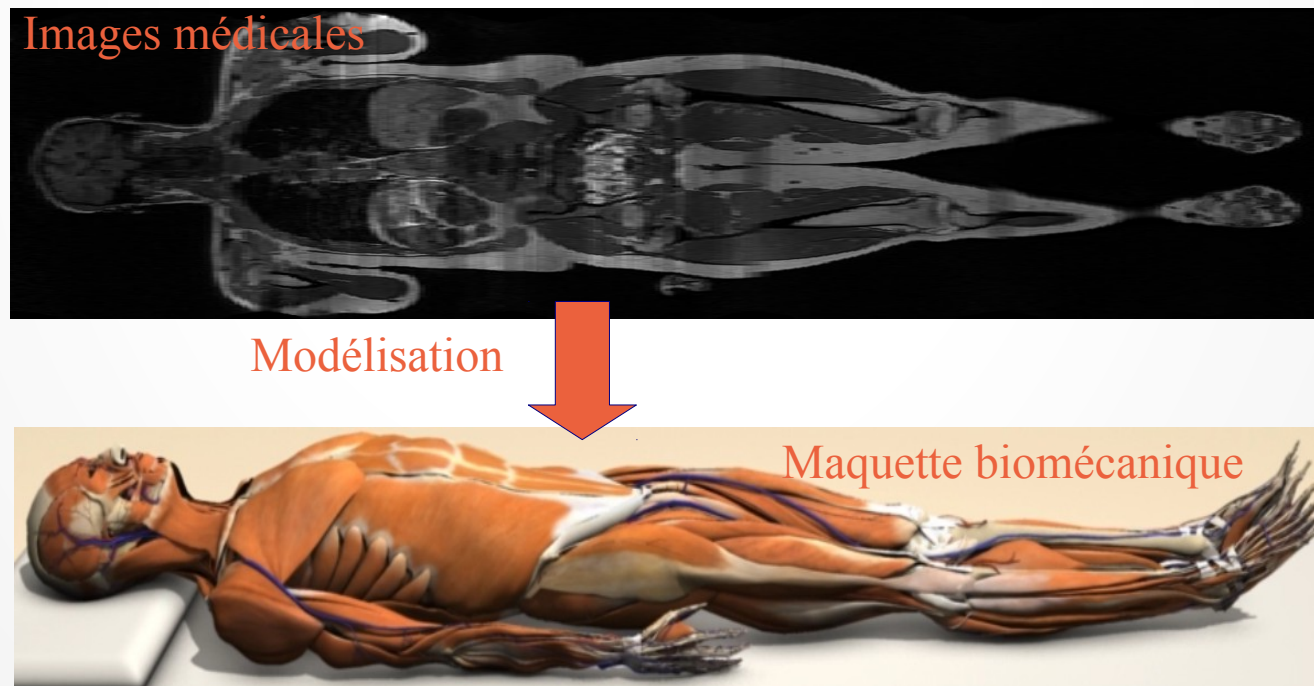
Résolution des systèmes d'équations

- Forte complexité, de $O(n)$ à $O(n^3)$
- Méthodes itératives: compromis précision/temps de calcul
 - Gradient conjugué [Baraff 98], Gauss-Seidel,...
 - Ramollissement, amortissement, lissage



Difficultés

- Résolution efficace des équations
- Modéliser à partir de données réelles
 - Mettre le réel en équations



Réduction de Modèles

- Moins de paramètres, plus petits systèmes d'équations
- Par analyse modale: paramètres = quelques modes de vibration

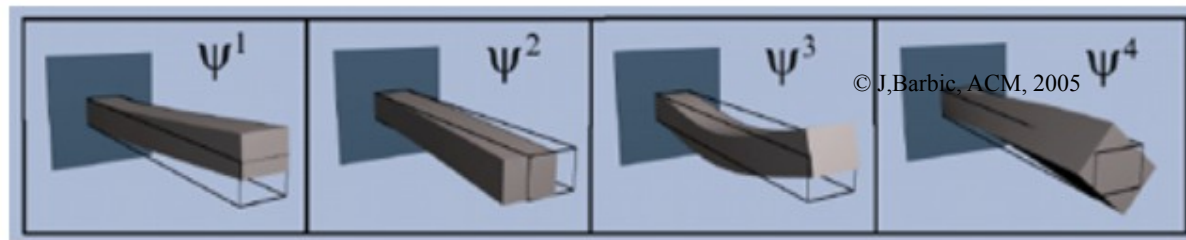
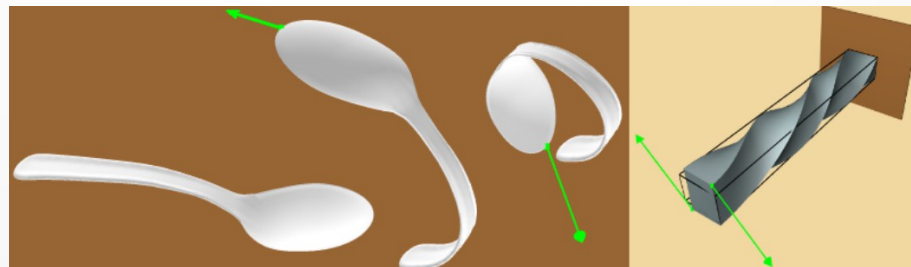


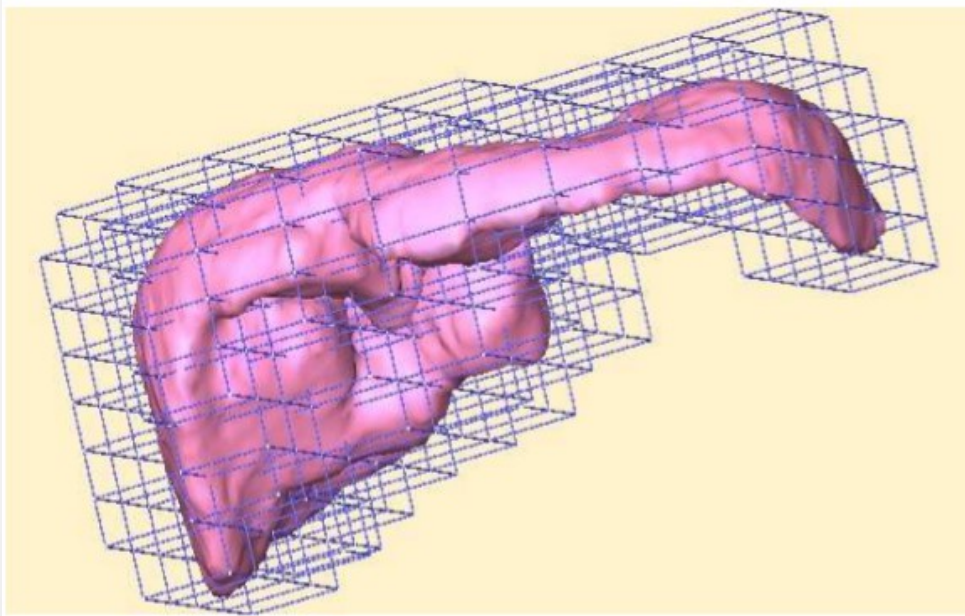
Figure 2: **Linear modes** for a cantilever beam.

- Précalculs complexes, déformations globales
- Autres méthodes

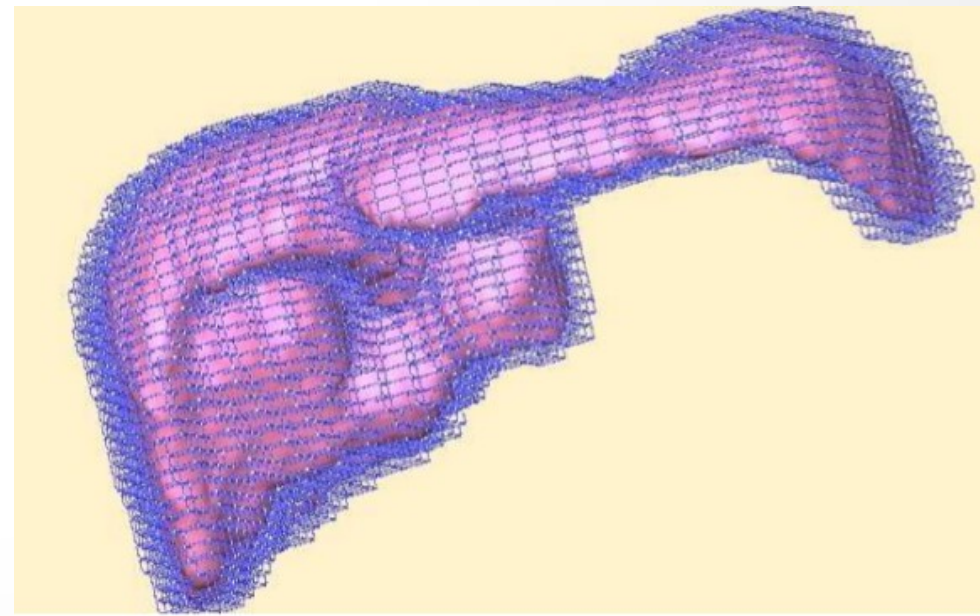


Immersion dans des maillages simples

- Petit nombre d'éléments
- Grilles: réglage facile



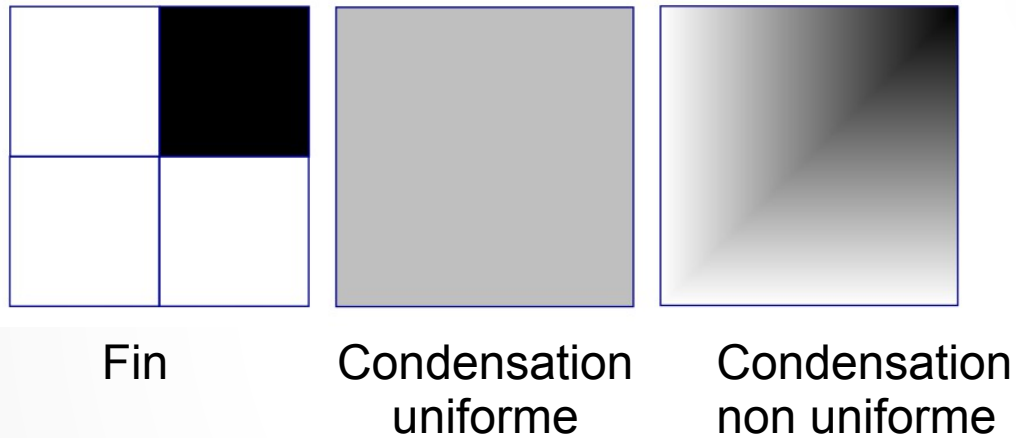
436 particles, 242 hexahedra



11378 particles, 8913 hexahedra

Éléments hétérogènes

- Condensation ascendante



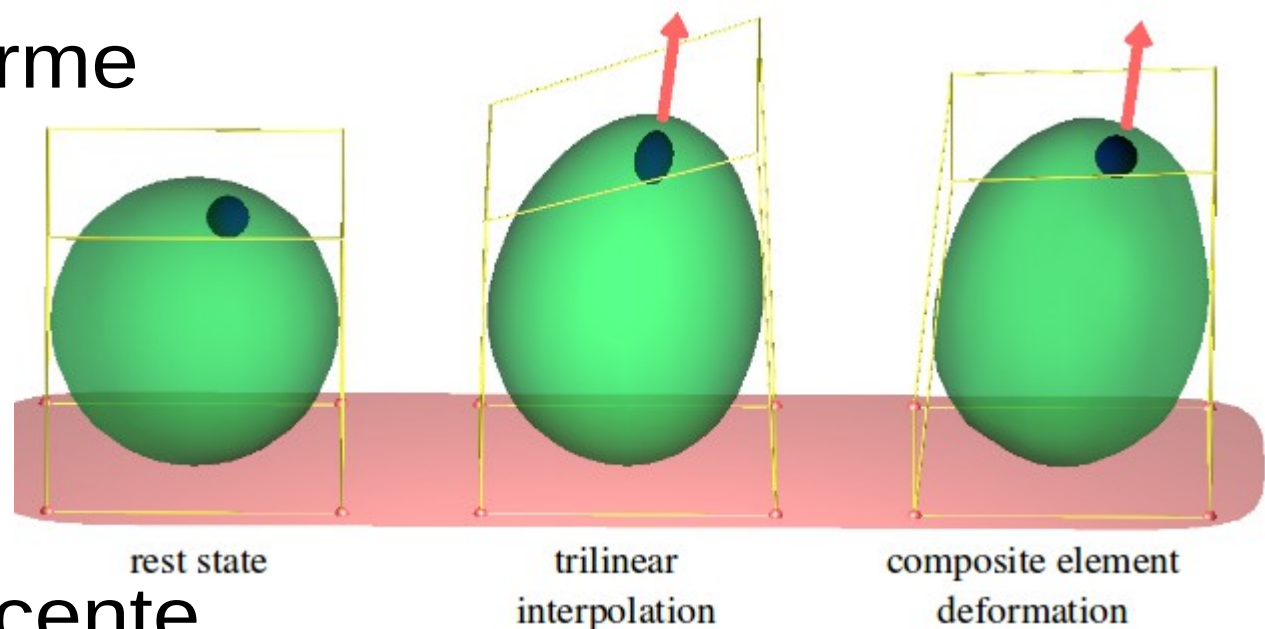
- Comportement uniforme/non-uniforme



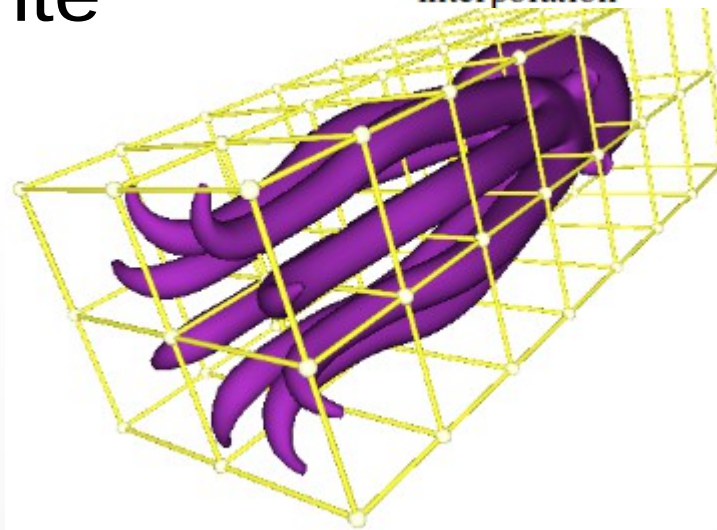
[NFP06]

Préservation de l'hétérogénéité et de la topologie sous-maille

- Raideur non-uniforme



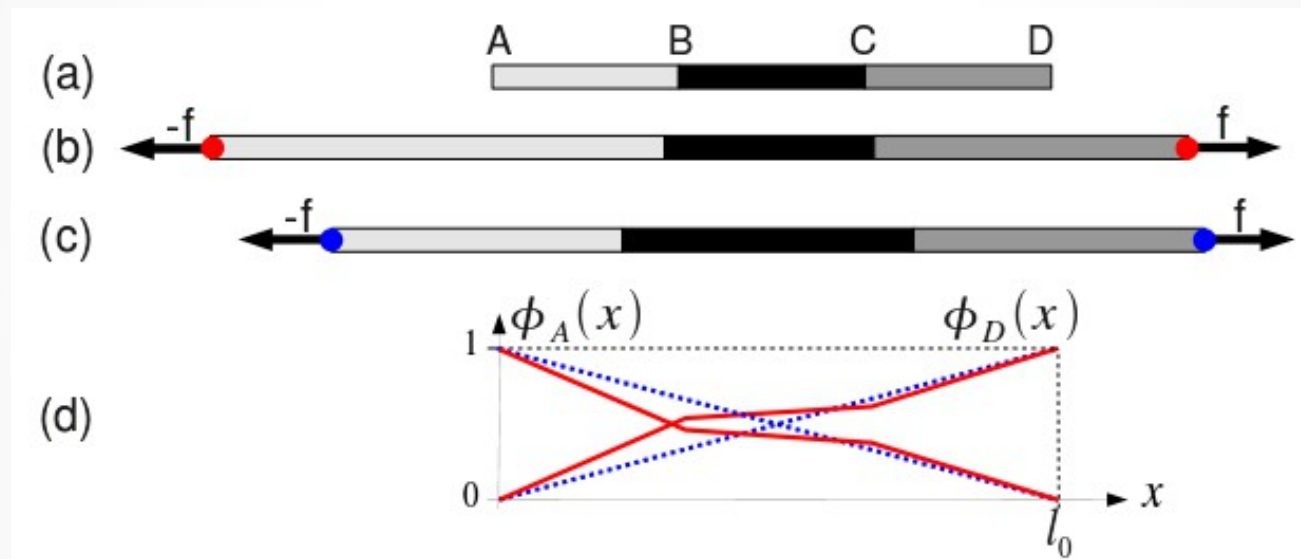
- Topologie arborescente



[NKLF09]

Préservation de la raideur sous-maille

- Fonctions de forme dépendant des matériaux

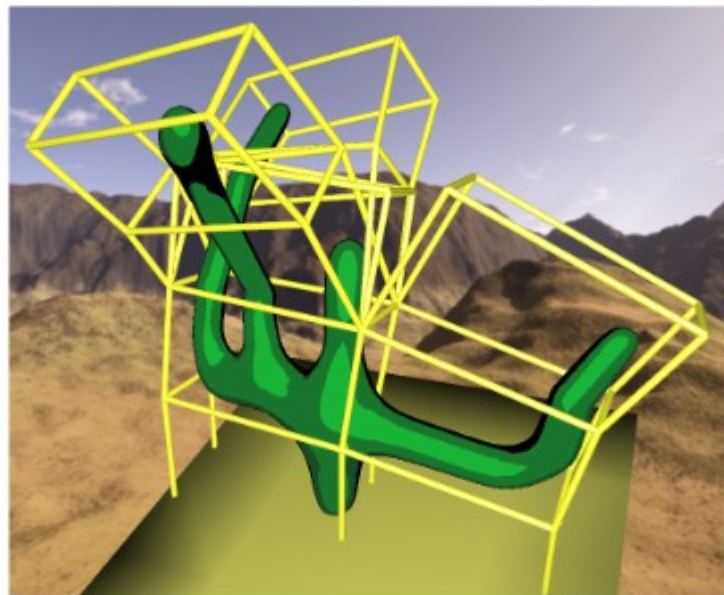
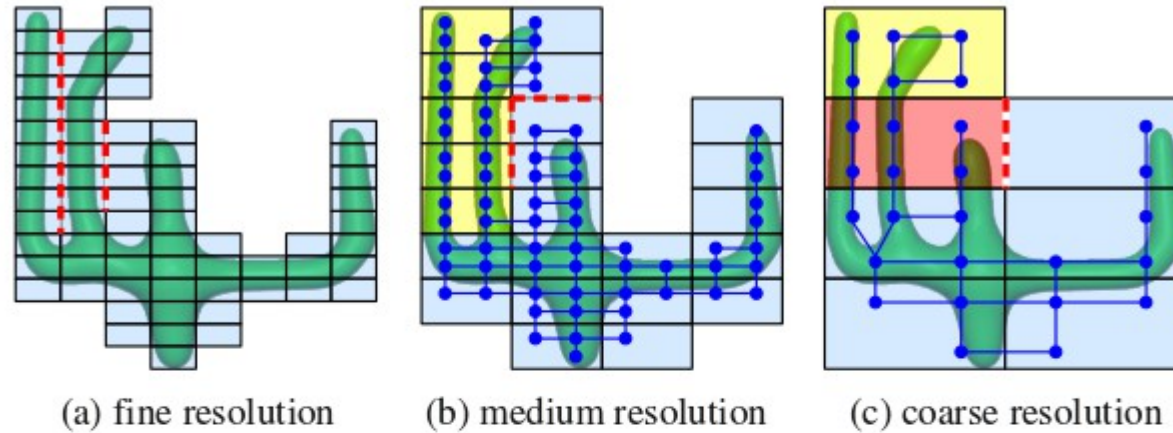


- Déplacements internes exacts en 1D
- Extension à 2D et 3D

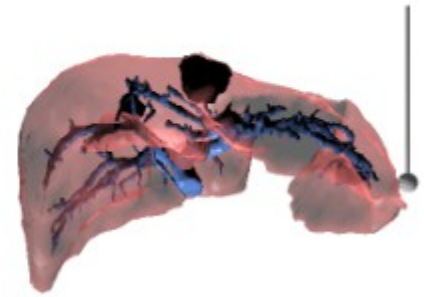
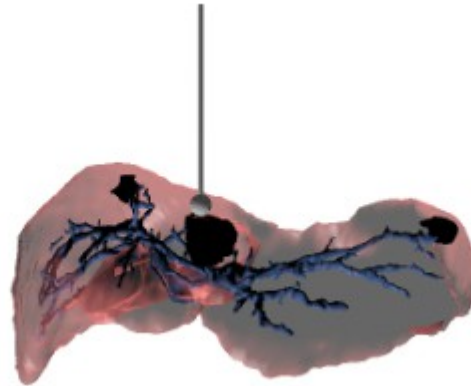
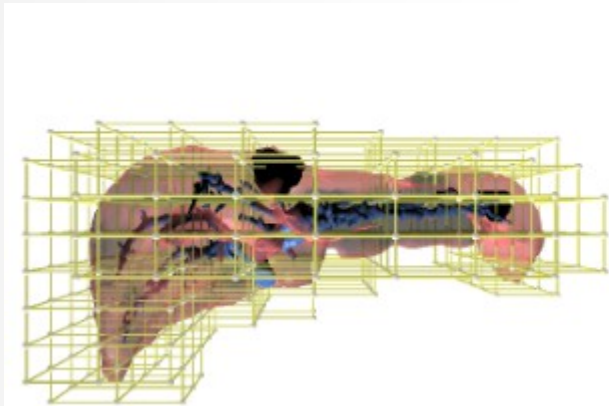
Video

Préservation de la topologie sous-maille

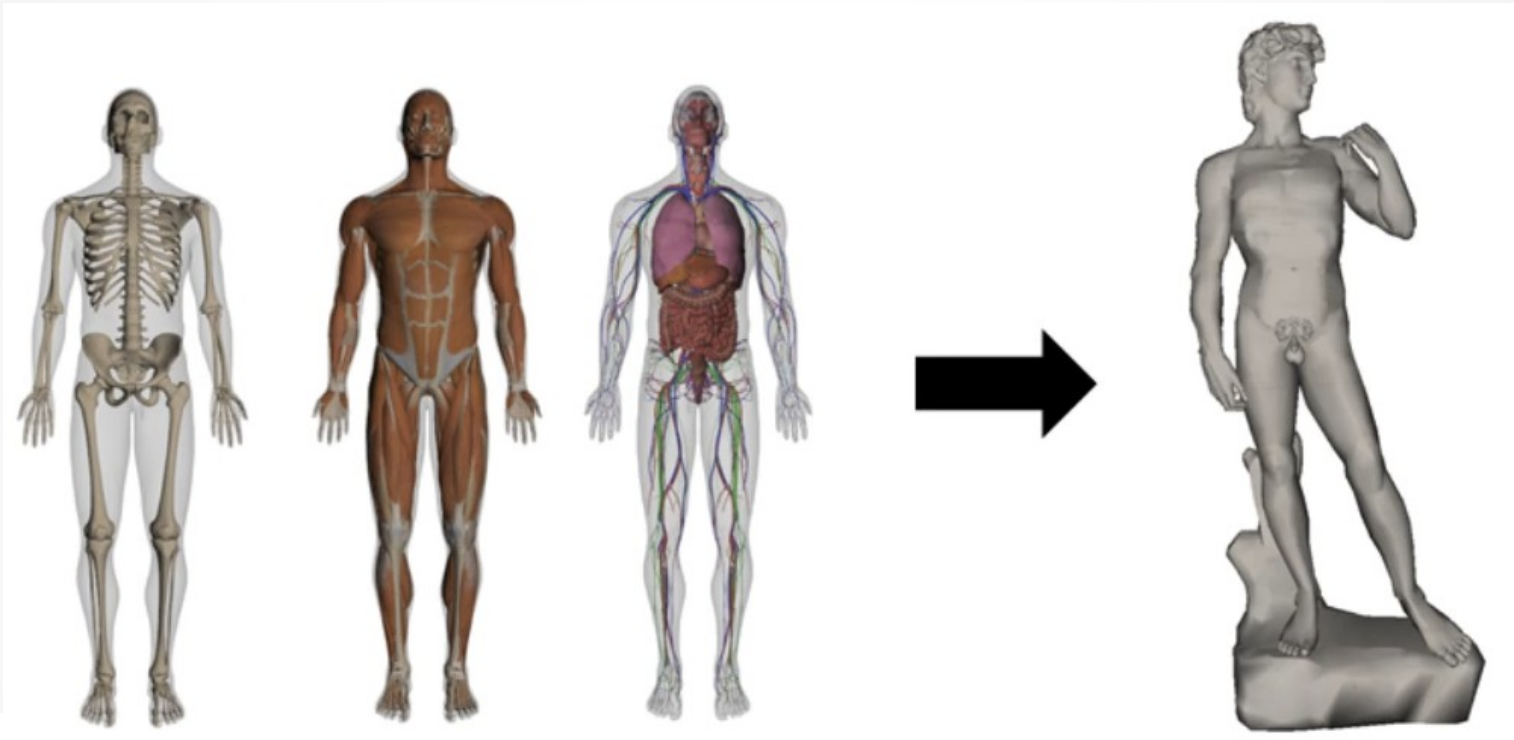
- Grilles arborescentes



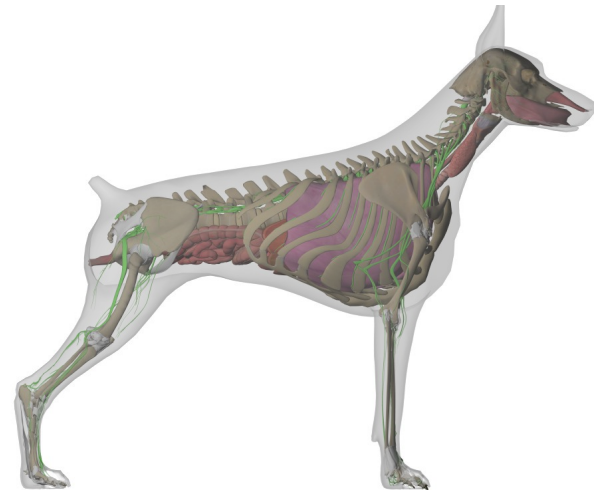
Video



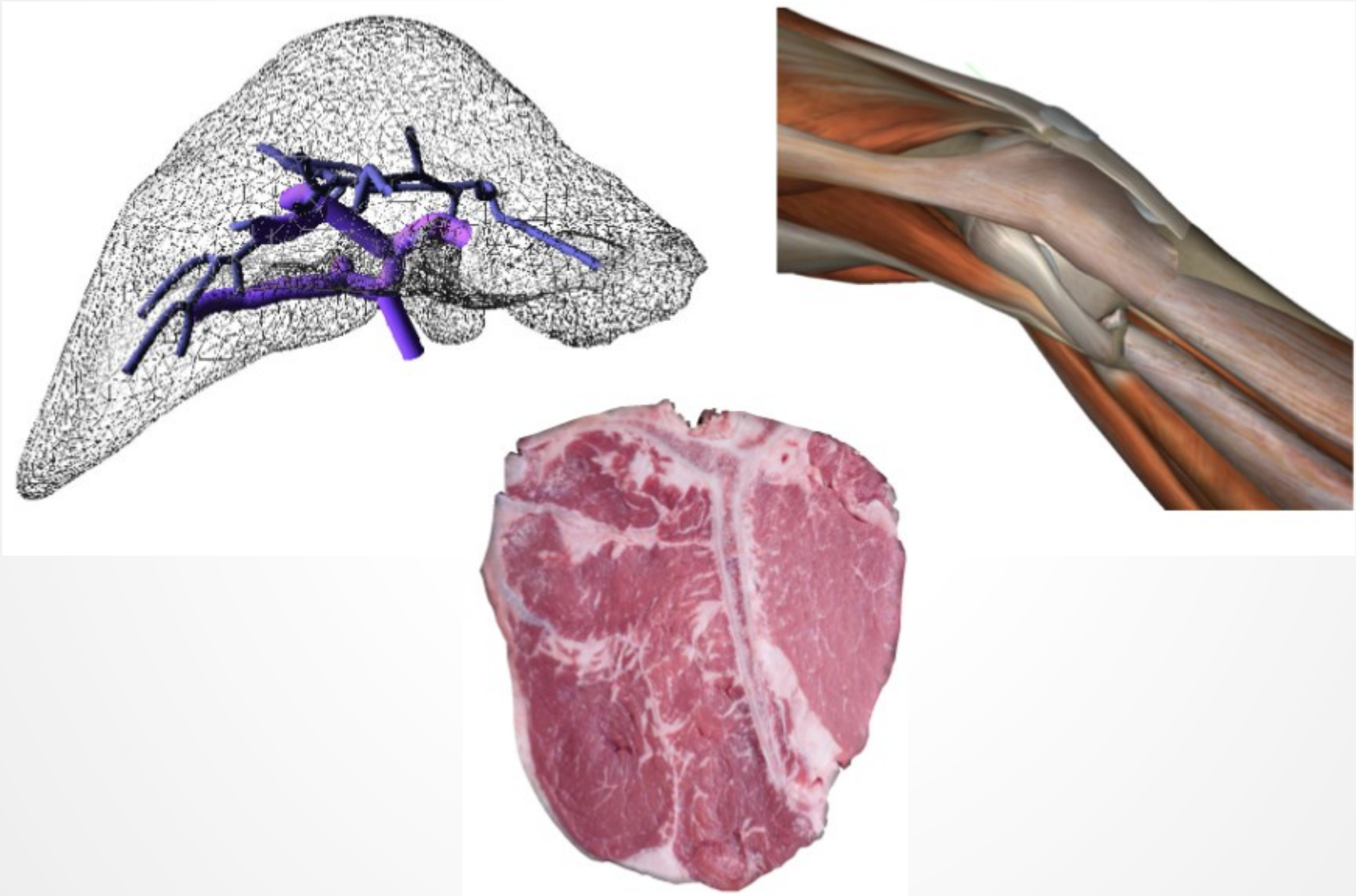
Modélisation par recalage: Transfert Anatomique



[DLGKFPC13]

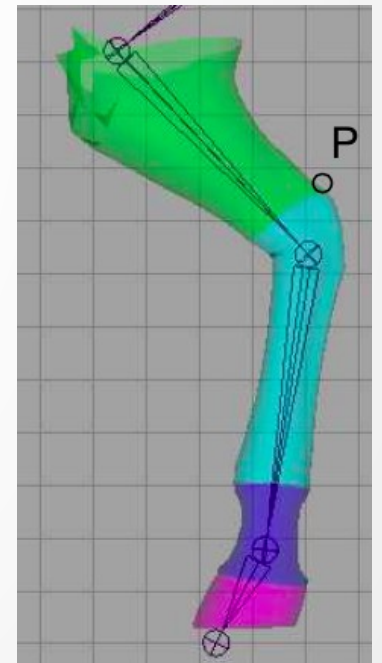
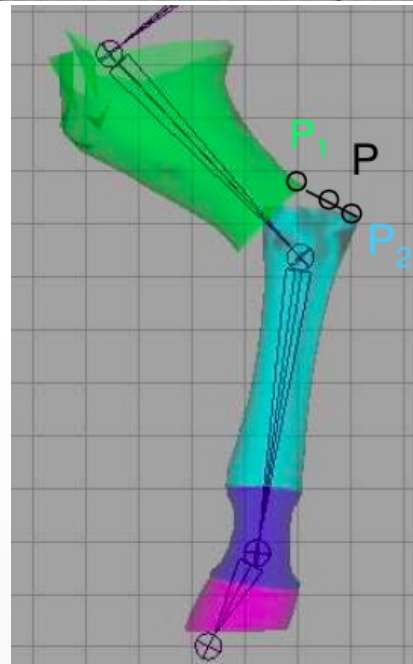
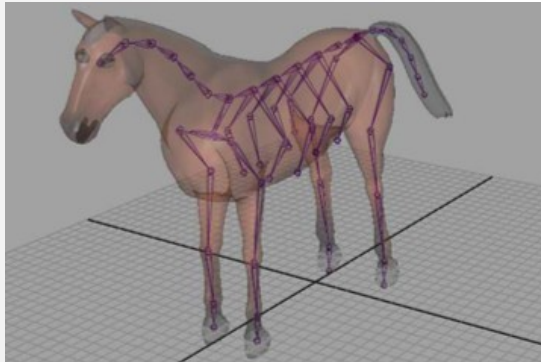
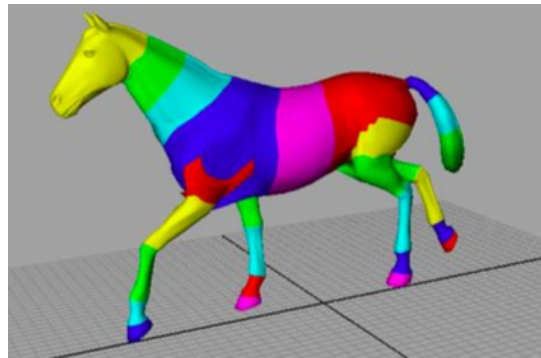


Objets très complexes



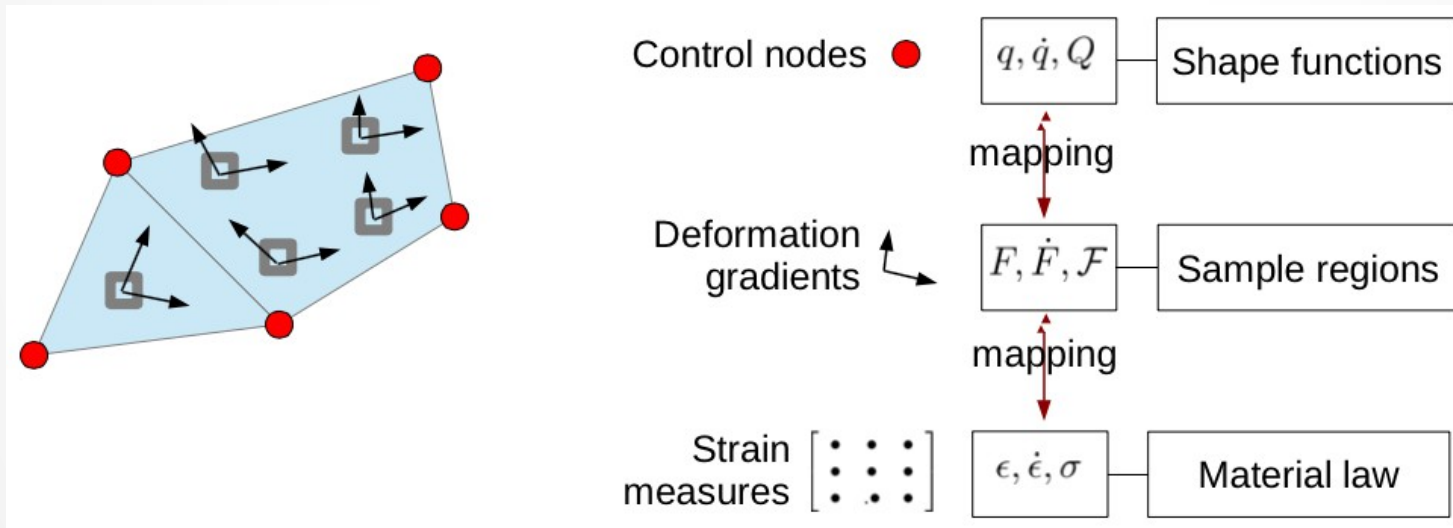
Enrobage

- Déformation lisse d'après repères de contrôle



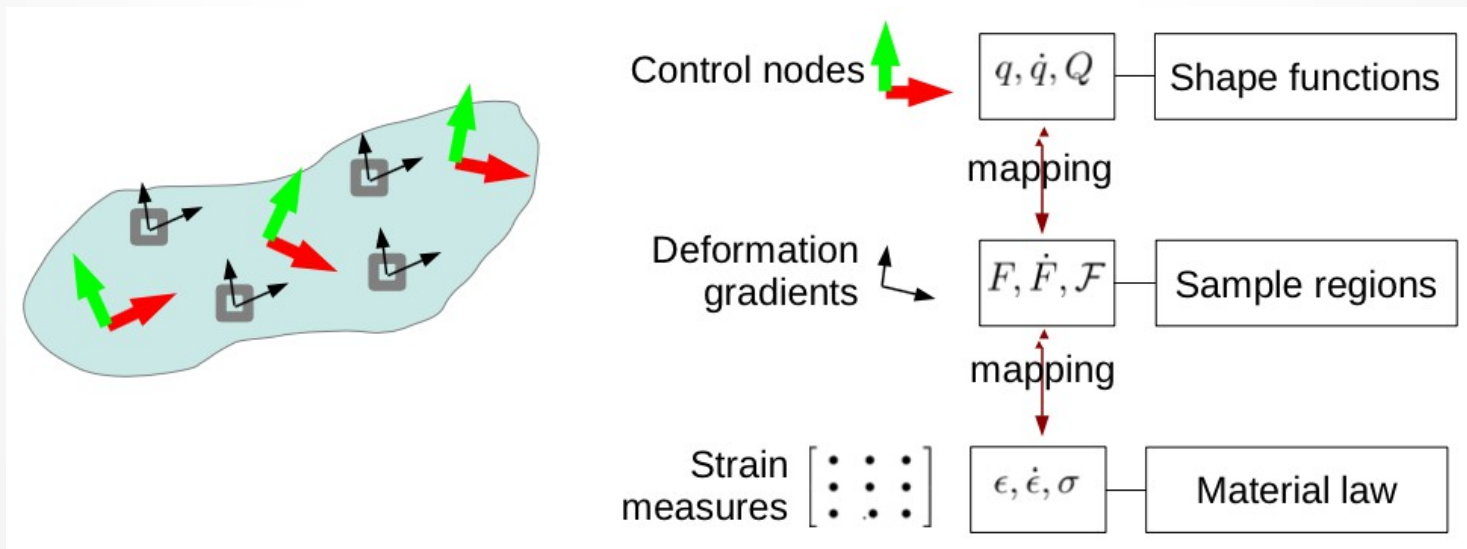
Abstraction de la mécanique des éléments finis

- 3 Niveaux: degrés de liberté, déformations, énergie
 - Applications aux éléments finis



Variante: modèle à base de repères

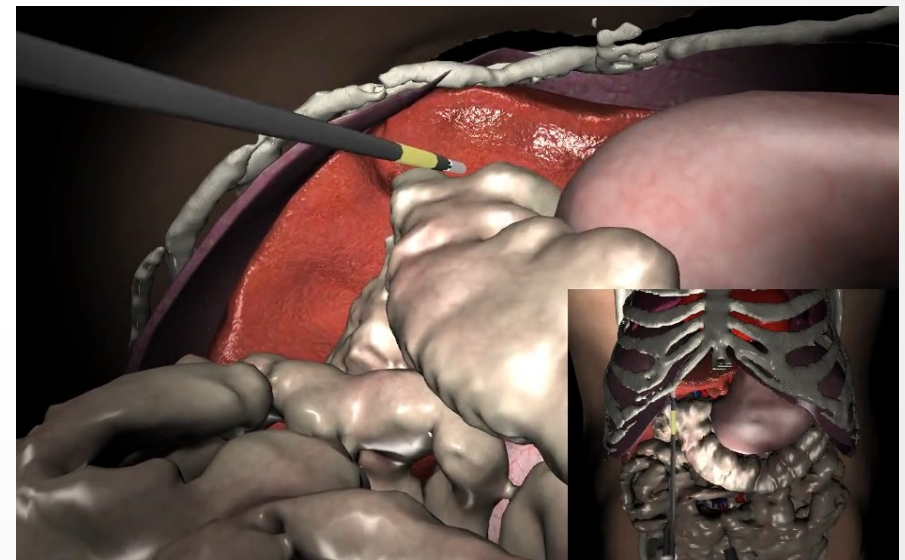
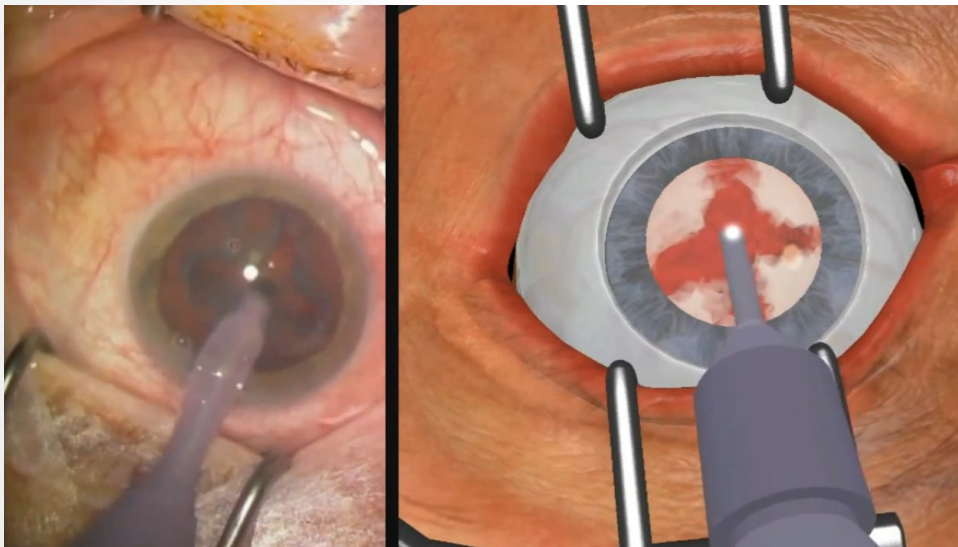
- 3 Niveaux: degrés de liberté, déformations, énergie
 - Repères et enrobage volumique



Implémentation dans SOFA



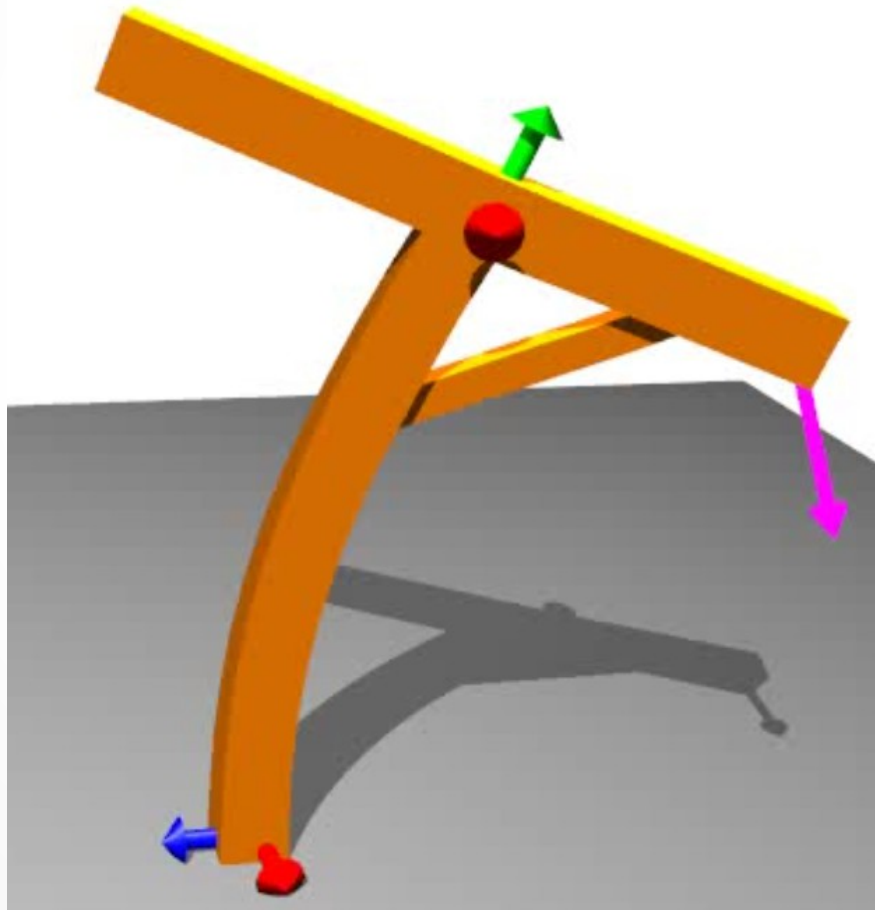
- Librairie open-source de simulation physique
- Soutenue par INRIA et autres institutions
- Modularité et efficacité
- www.sofa-framework.org



Modèles à base de repères

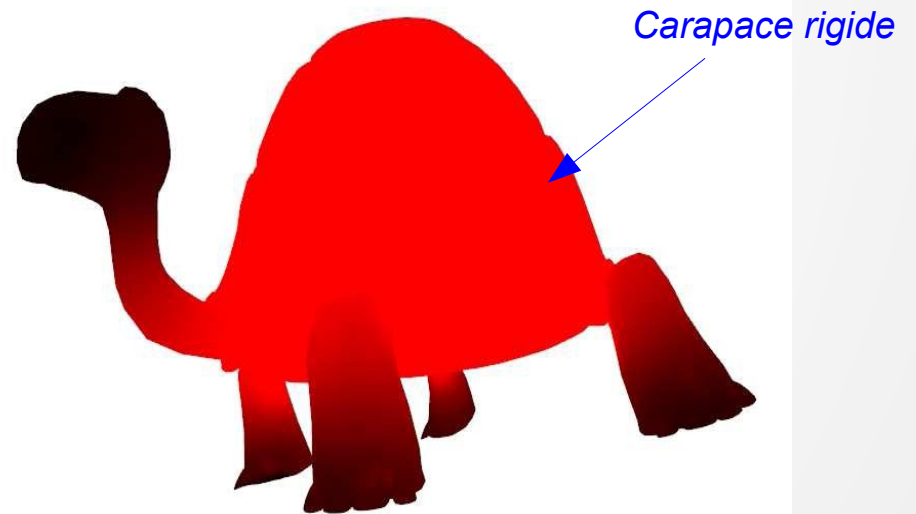
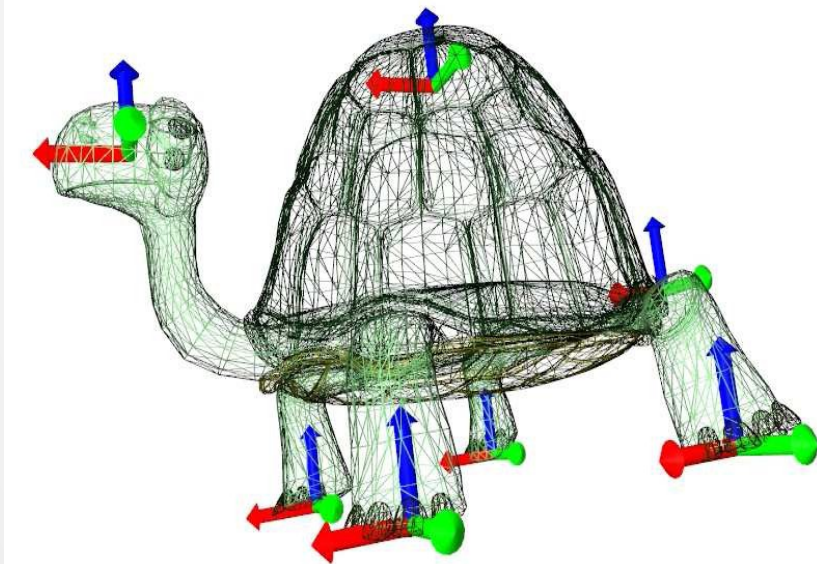
[GBFP11,FGBP11]

- Modèles réduits avec contrôle local



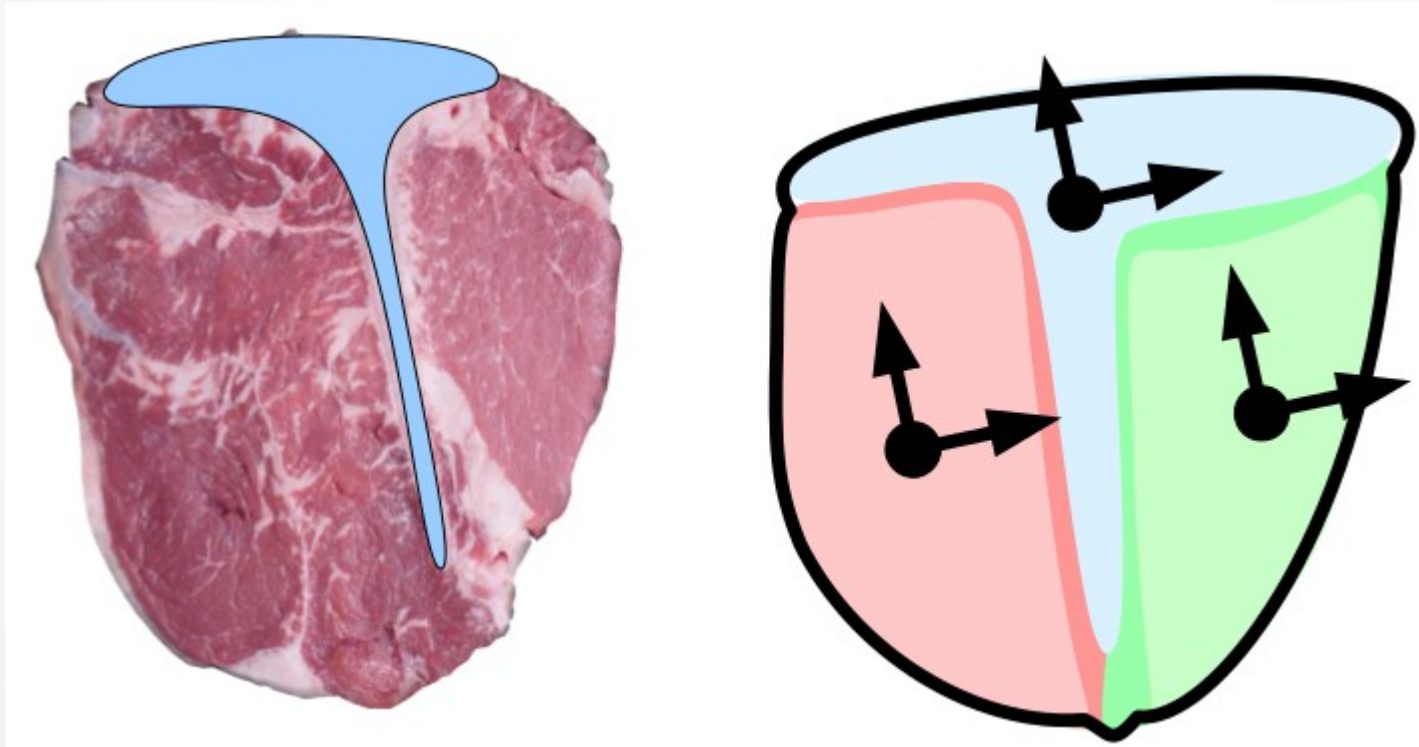
Contrôle de la raideur par fonctions de forme

- Tortue :
 - 7 repères
 - Partie rigide = influencée par un seul repère



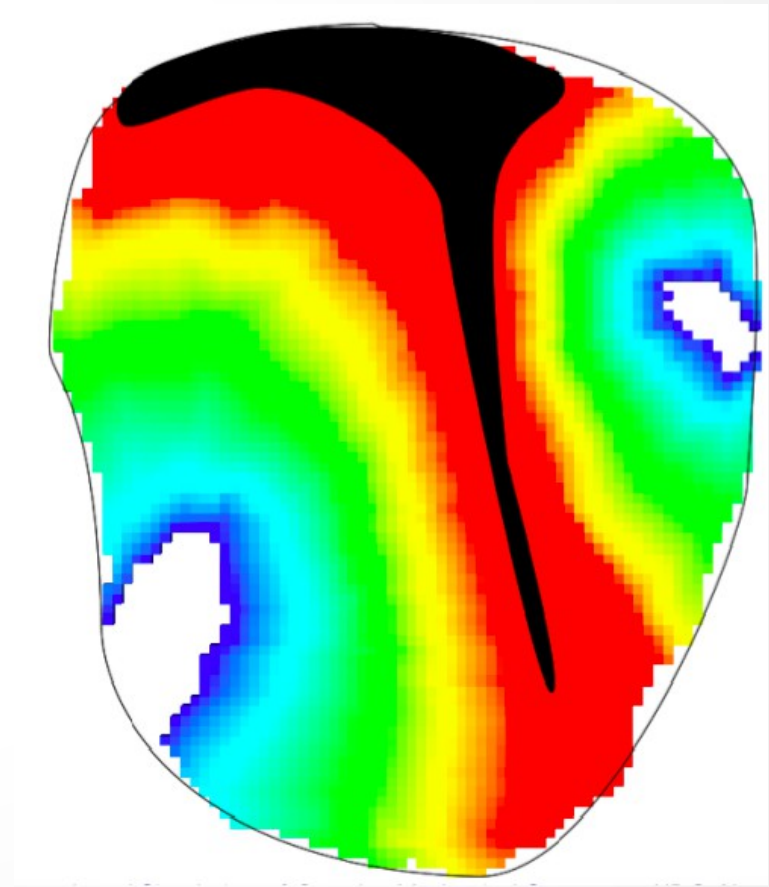
Calcul des fonctions de forme d'après les matériaux

- Fonctions représentées dans des repères locaux



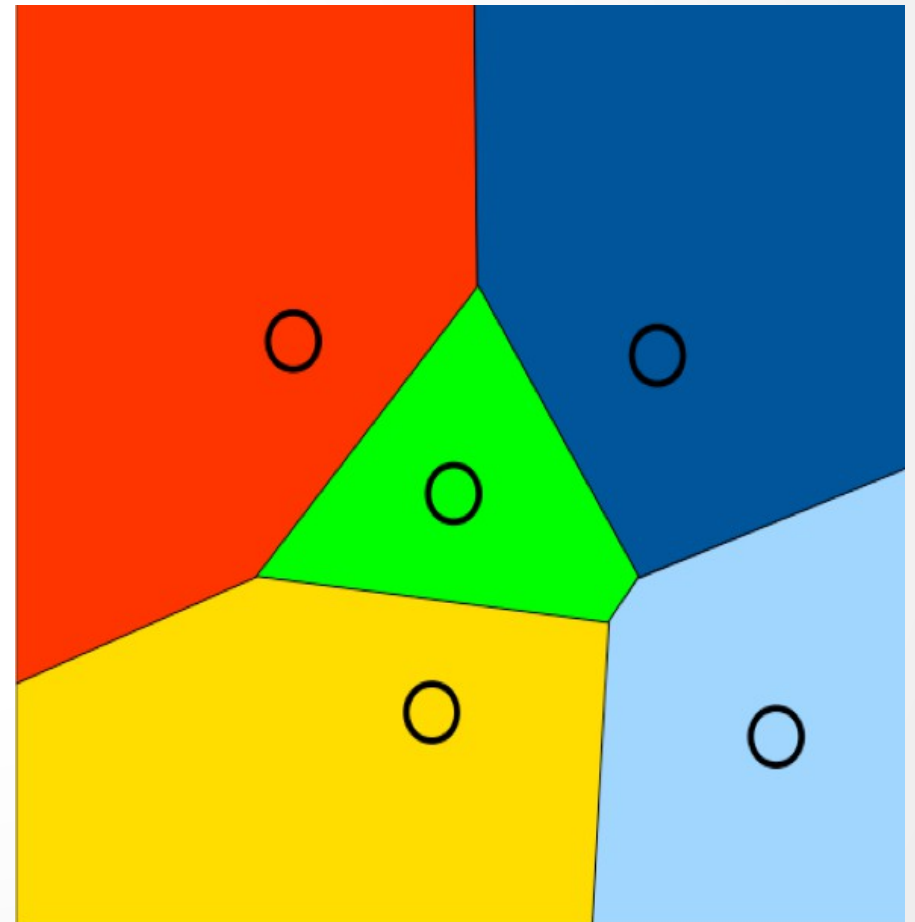
Fonction de forme idéale

- 1 au nœud
- Décroit à 0 aux voisins



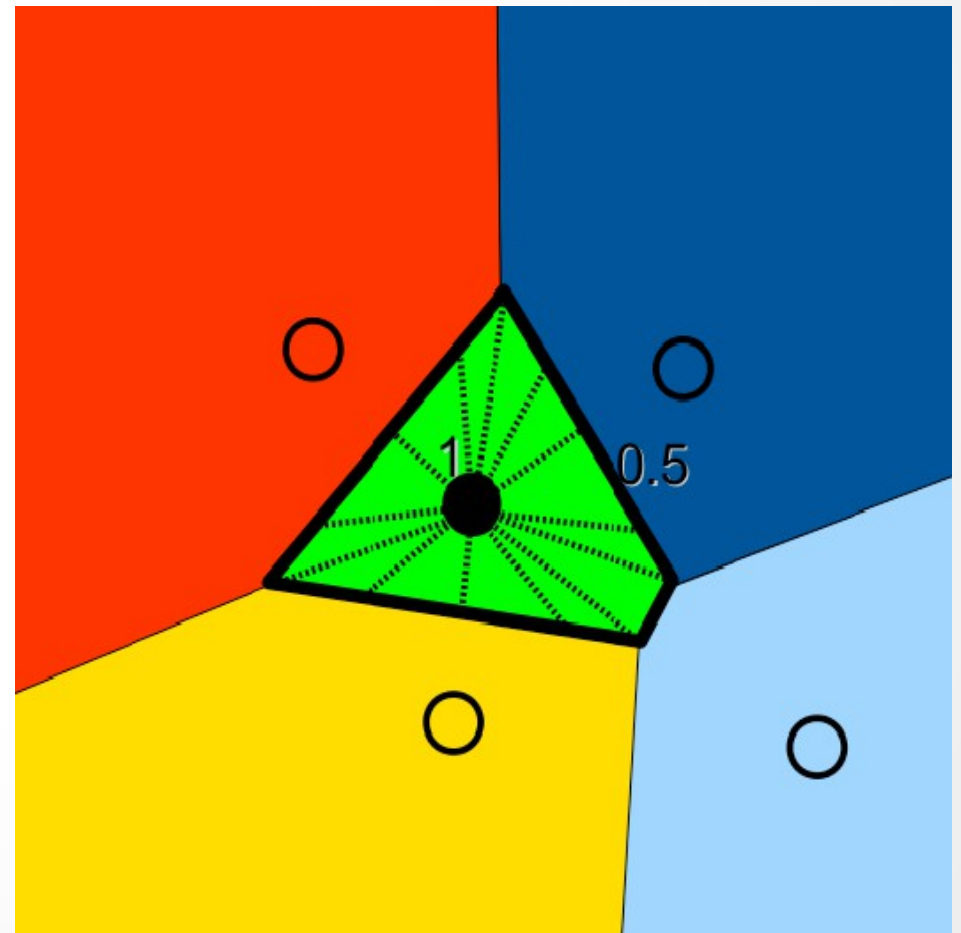
Partitionnement sans maillage

- Diagramme de Voronoi
 - Basé sur les distances



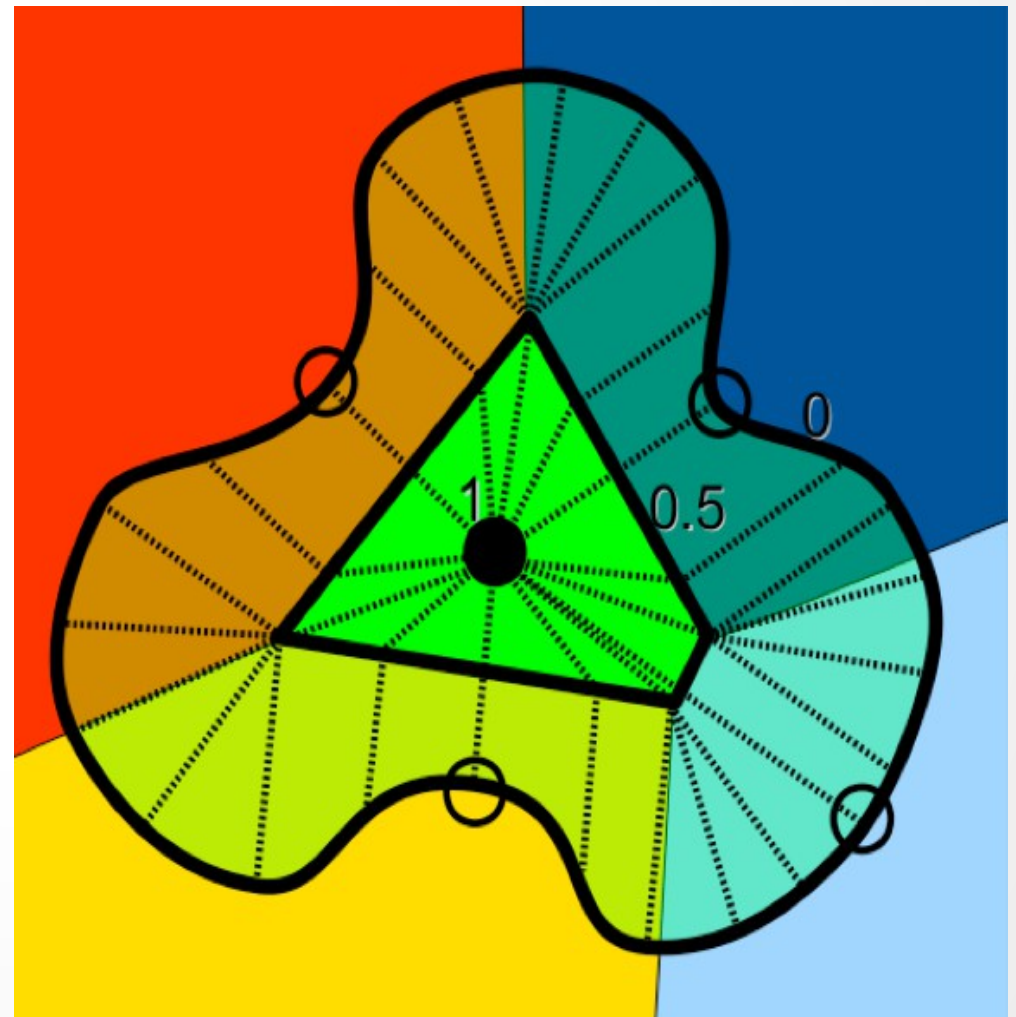
Interpolation dans les cellules

- Décroissance de 1 à 0.5



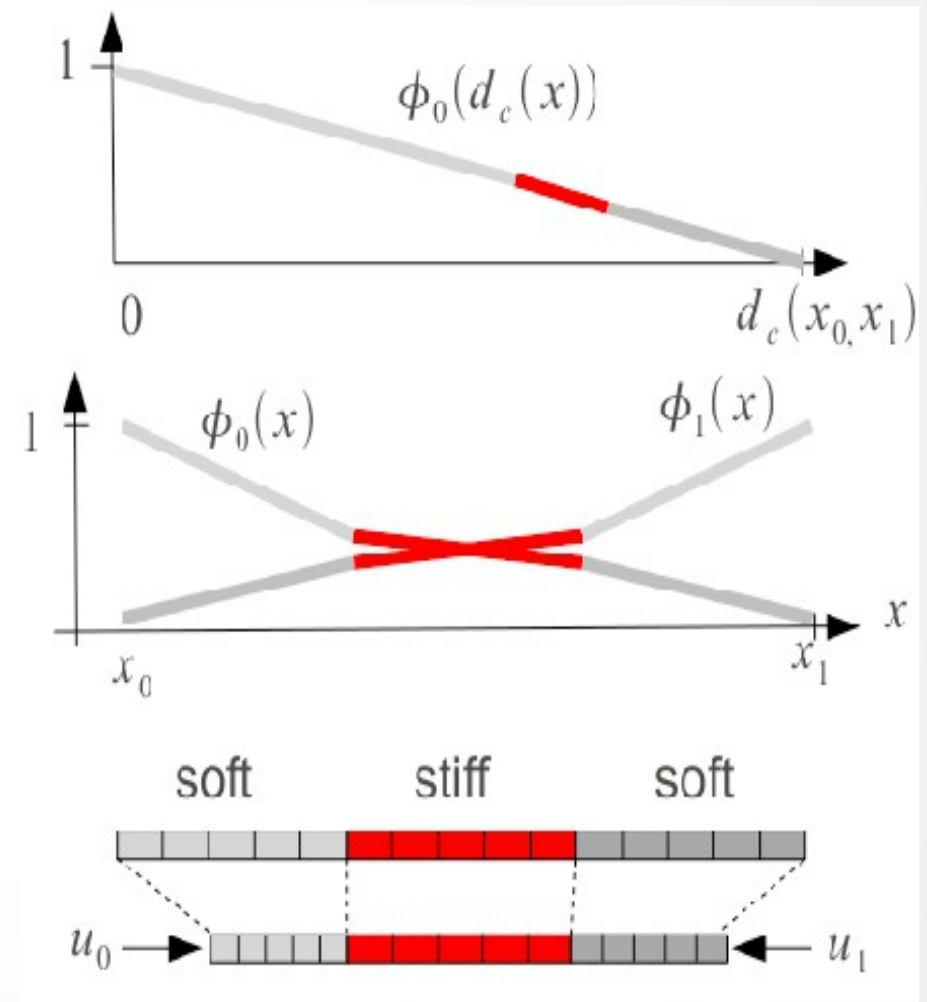
Extrapolation hors des cellules

- Décroissance de 0.5 à 0

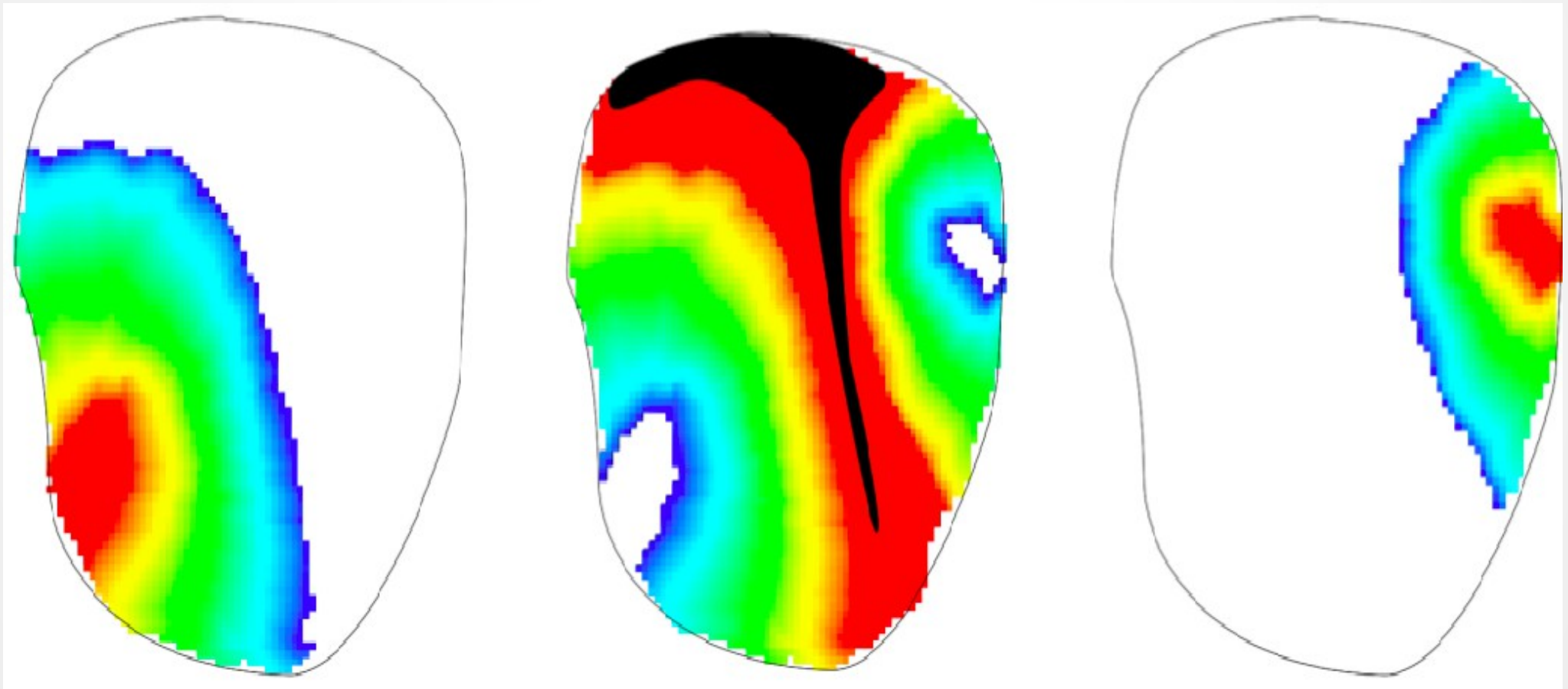


Distance Généralisée par les Matériaux

- Fonctions de forme dépend de la distance
- Distance biaisée par matériau:
 - Raide: courte distance
 - Mou: longue distance



Résultat pour 3 nœuds



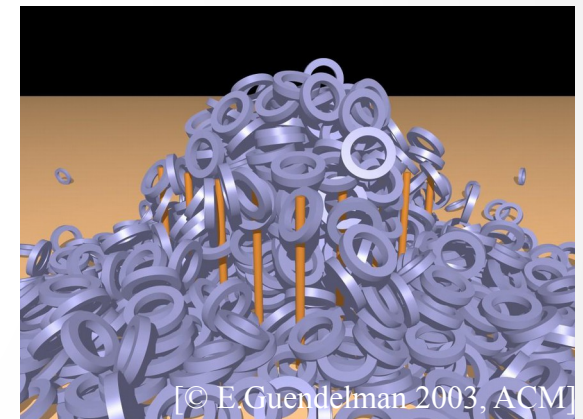
Vidéo

Contact Volumique



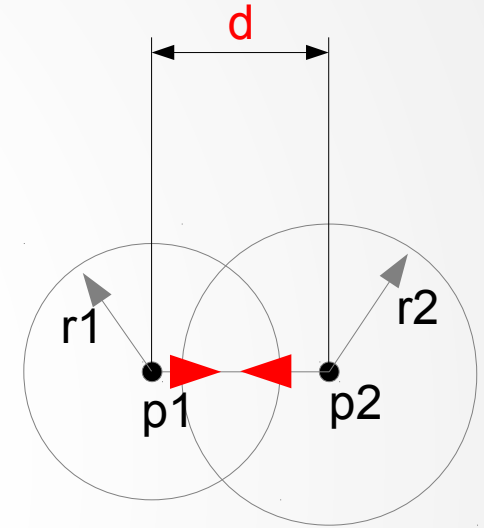
Détection et réponse aux collisions

- Surfaces déformables
- Volumes rigides
- Volumes déformables

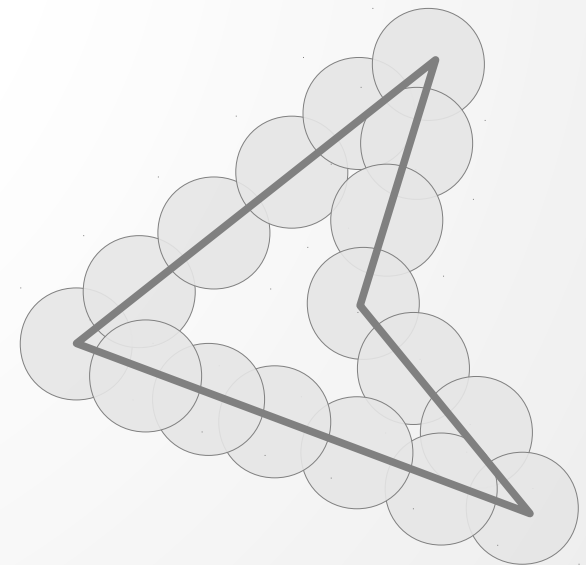


Contact entre particules

- Repulsion = accroître distance



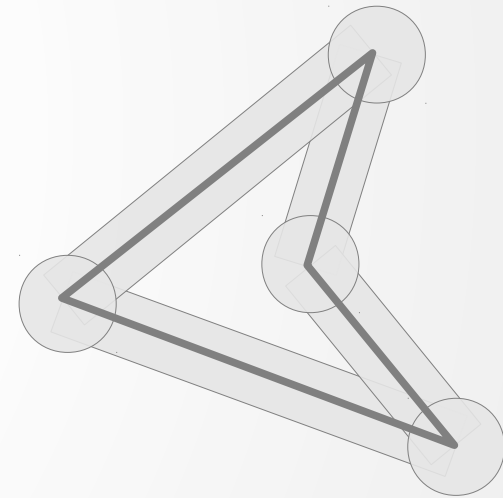
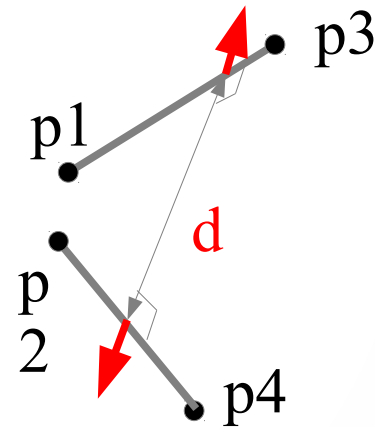
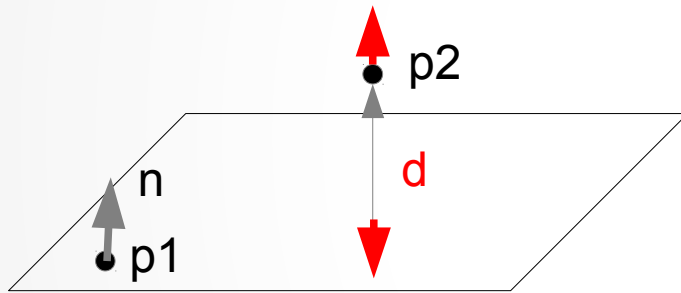
- Surface = spheres
 - simple
 - mauvais modèle surfacique



Contact entre maillages

- Polygones

- (point,polygone) et (arête,arête)

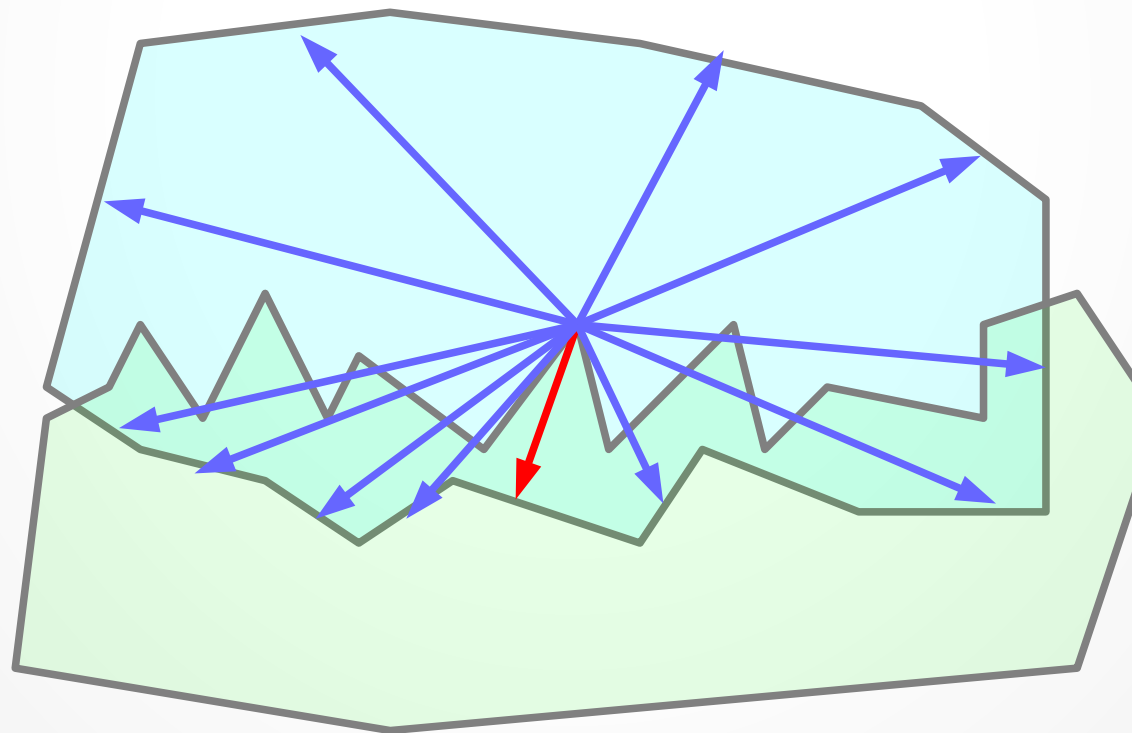


- Formes

- Cubes, capsules,...

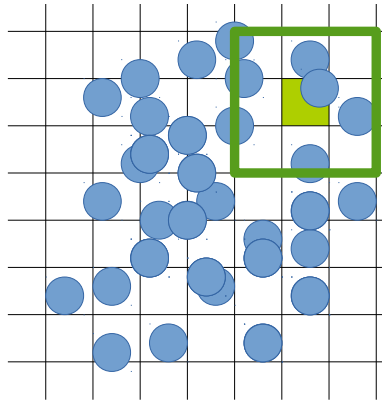
Complexité

- Quadratique

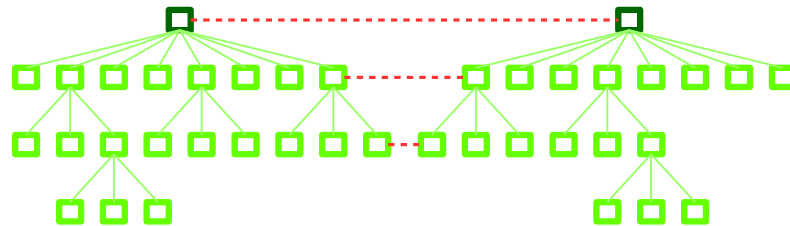
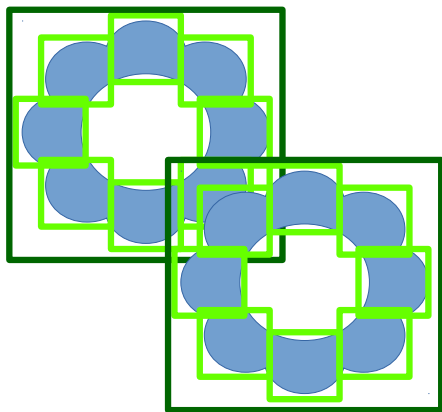


Méthodes d'accélération

- Grilles spatiales



- Hierarchies d'objets

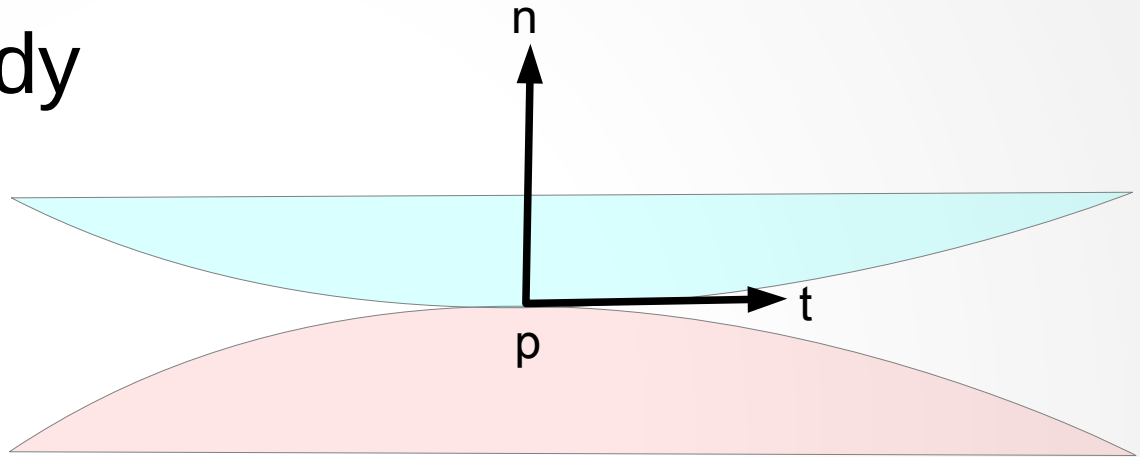


Inconvénients d'utiliser la distance

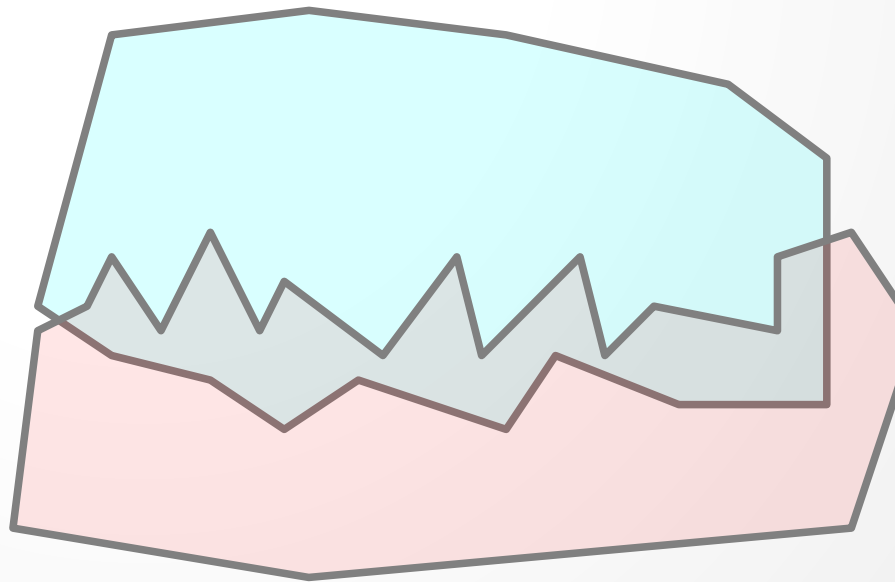
- Détection complexe
- Trop de contraintes
- Instabilités
- Incohérences
- Repulsion dépend de la résolution géométrique

Géométrie du contact

- What people study

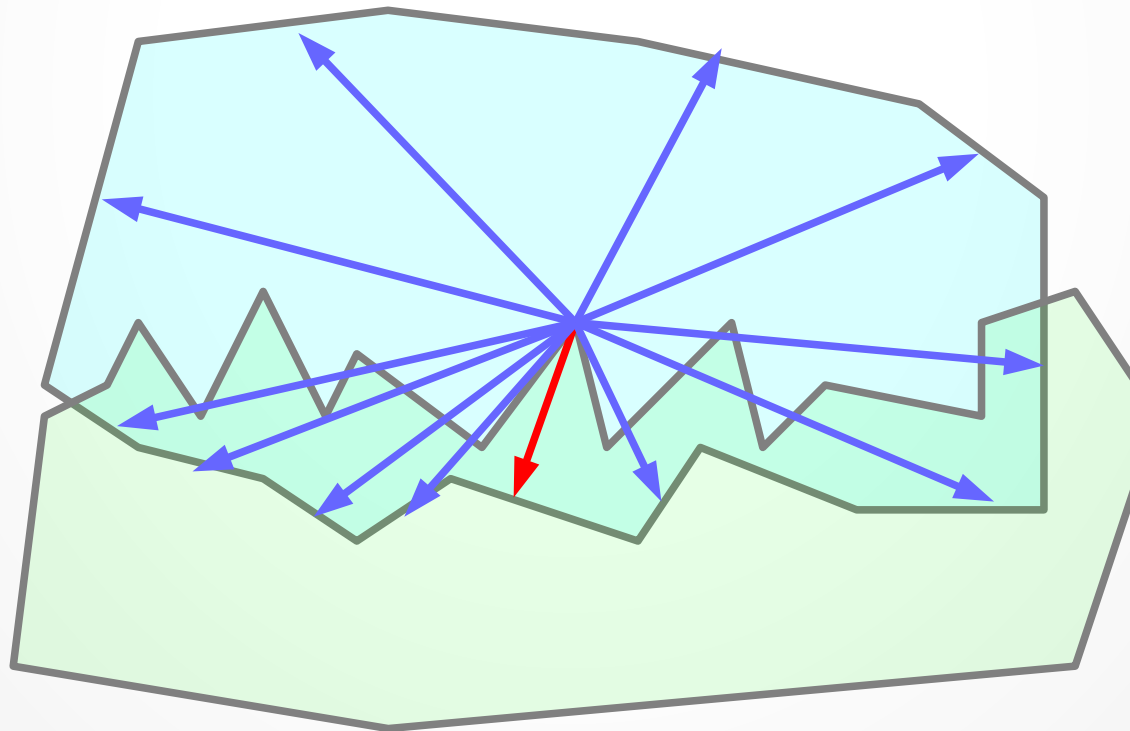


- The real world



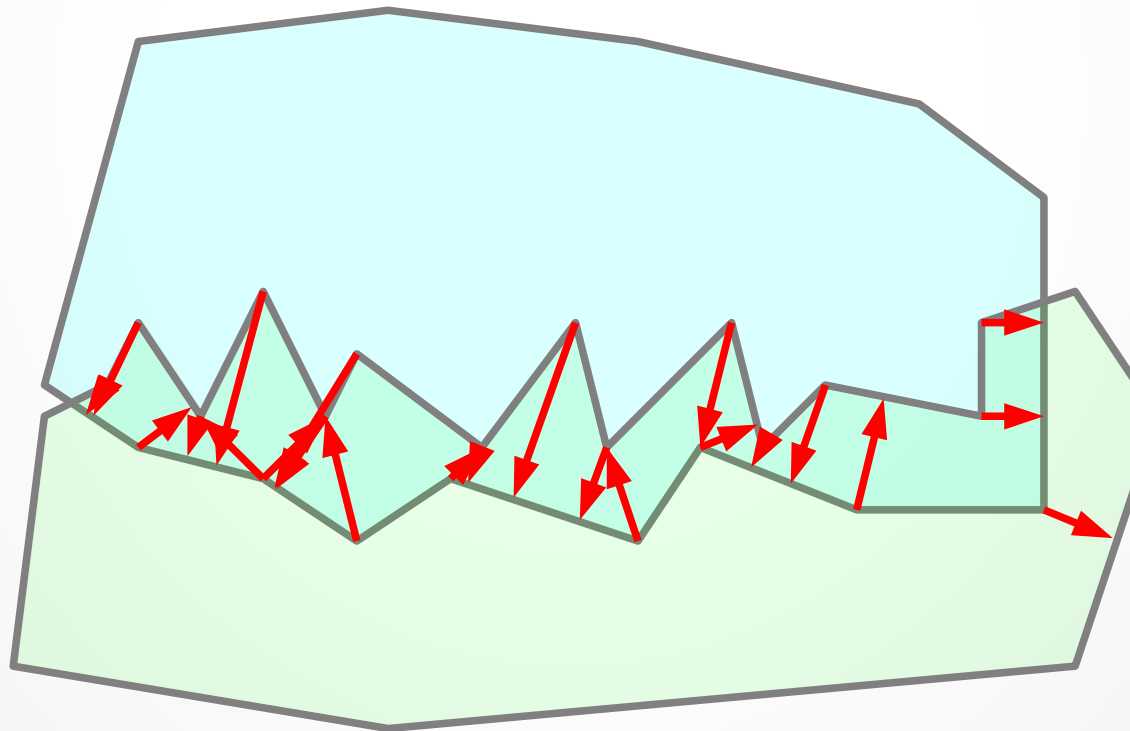
Complexité de détection

- Quadratique
 - accélération: mises à jour coûteuses



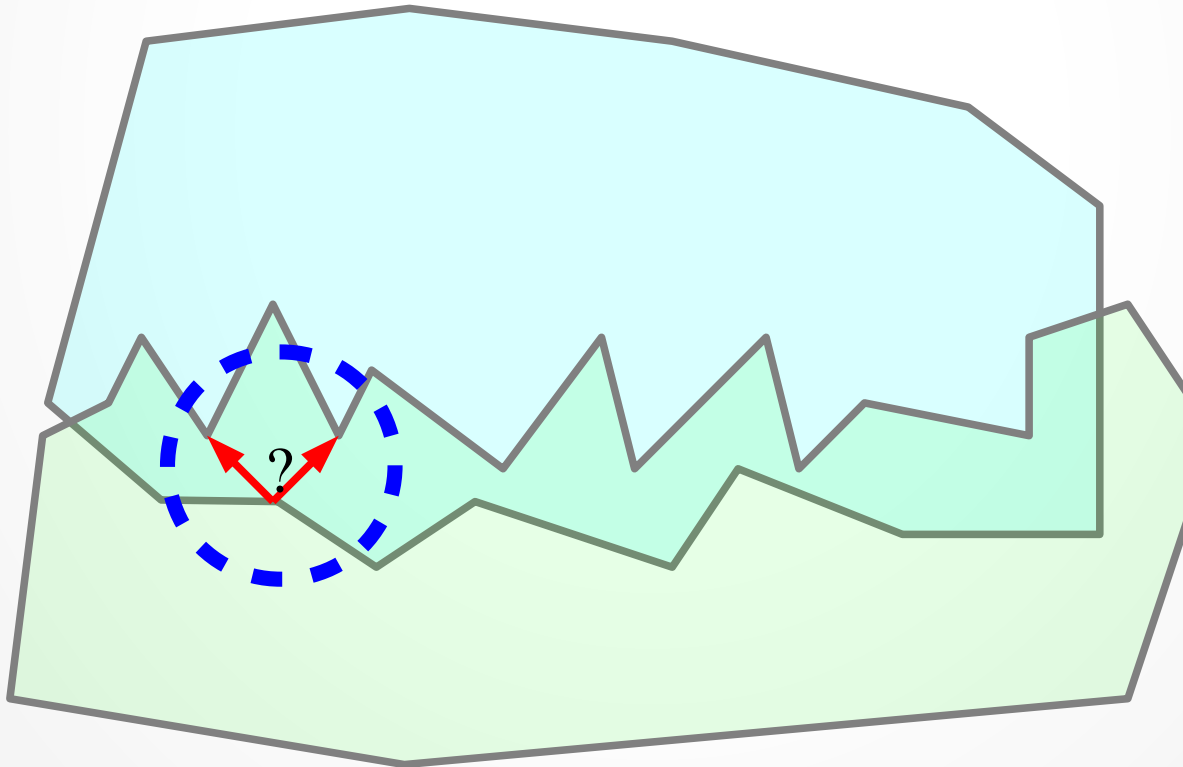
Trop de contraintes

- Beaucoup d'équations, longs calculs



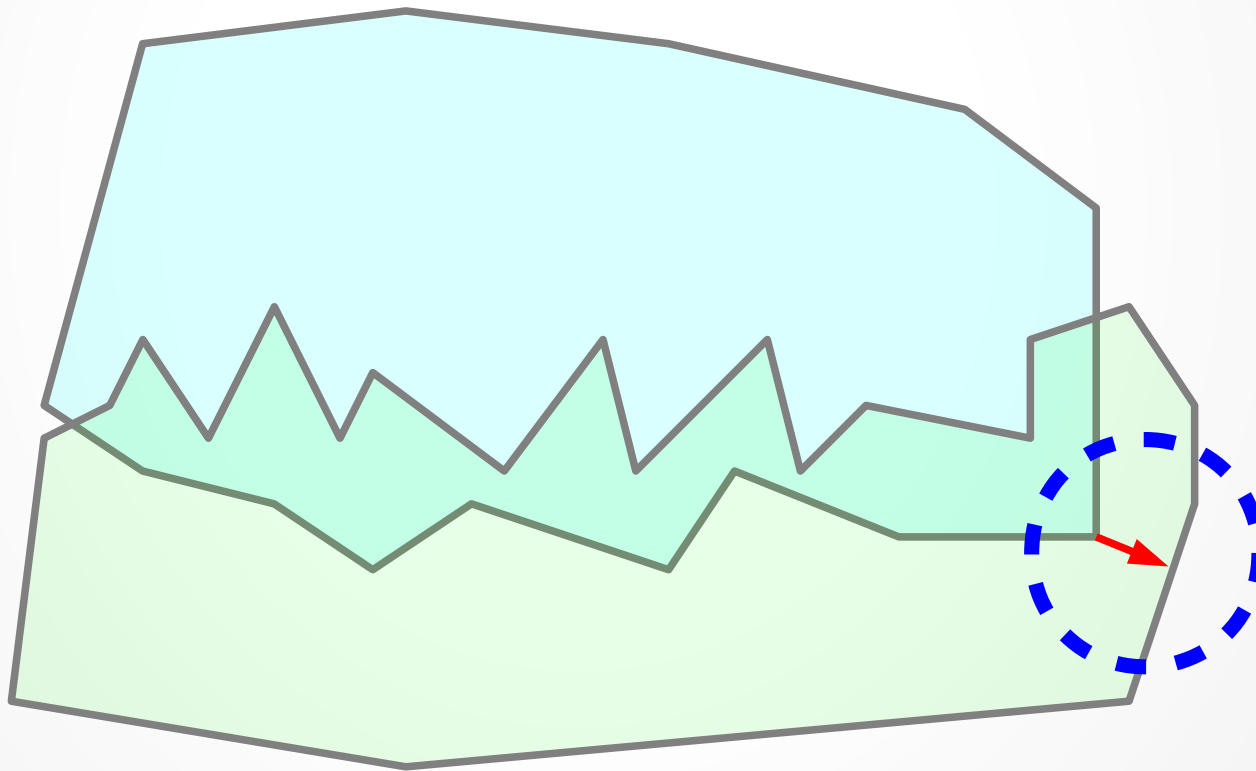
Instabilités

- Ambiguïtés créent des oscillations



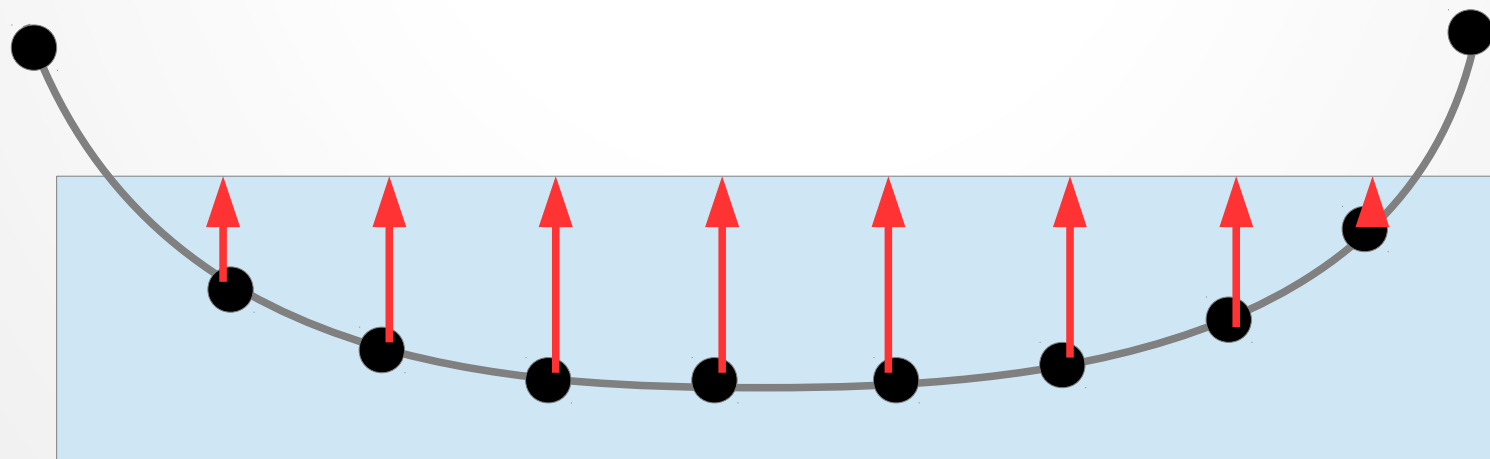
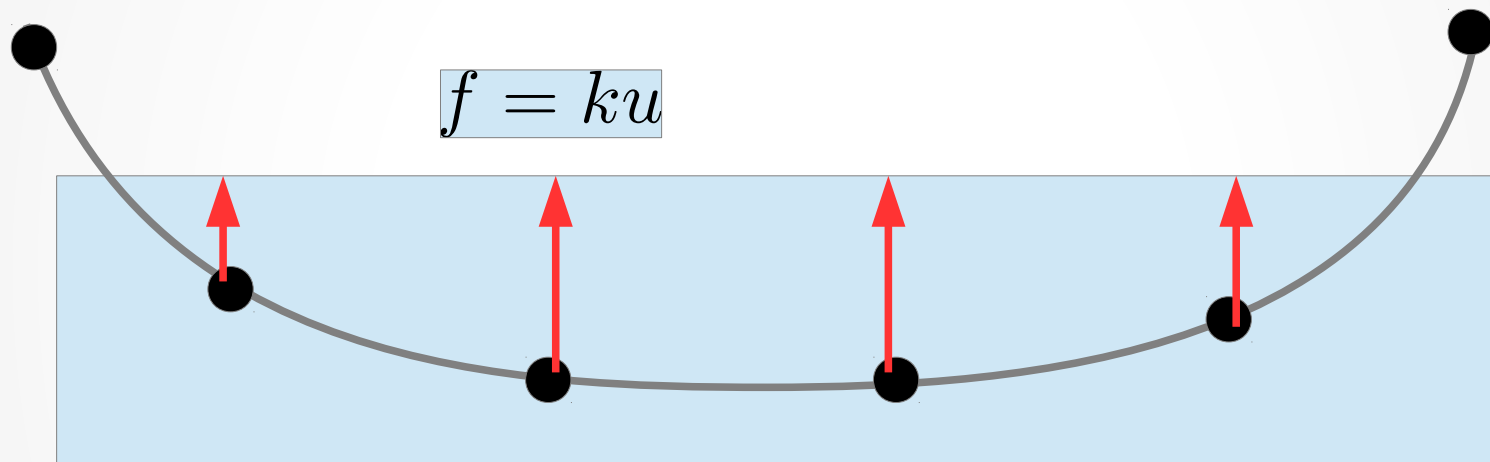
Incohérences

- La surface la plus proche n'est pas forcément la bonne



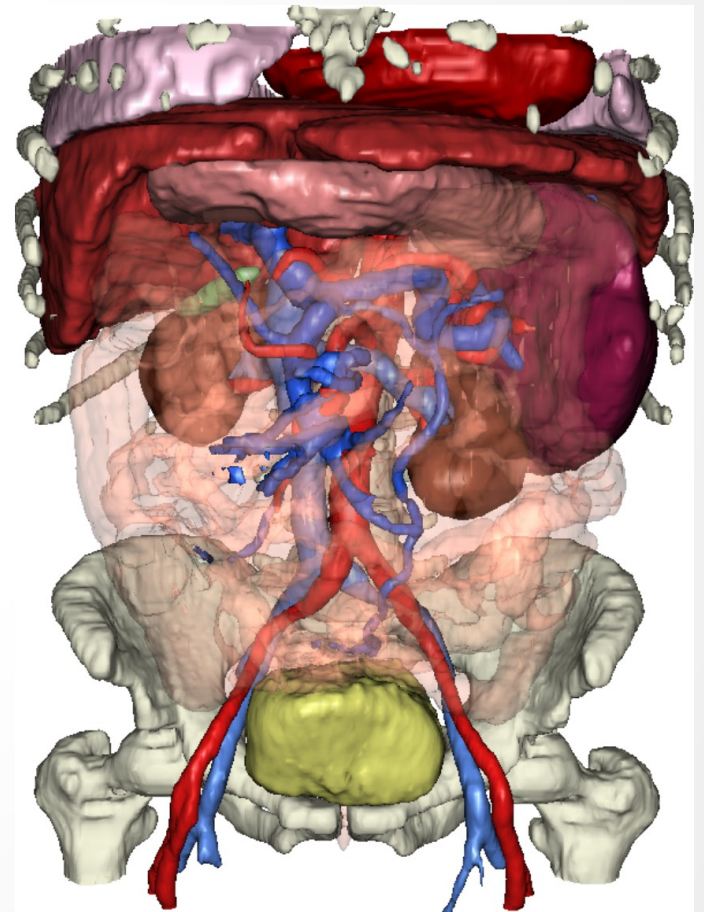
Dépendance à la résolution

- Force totale = somme des forces aux sommets



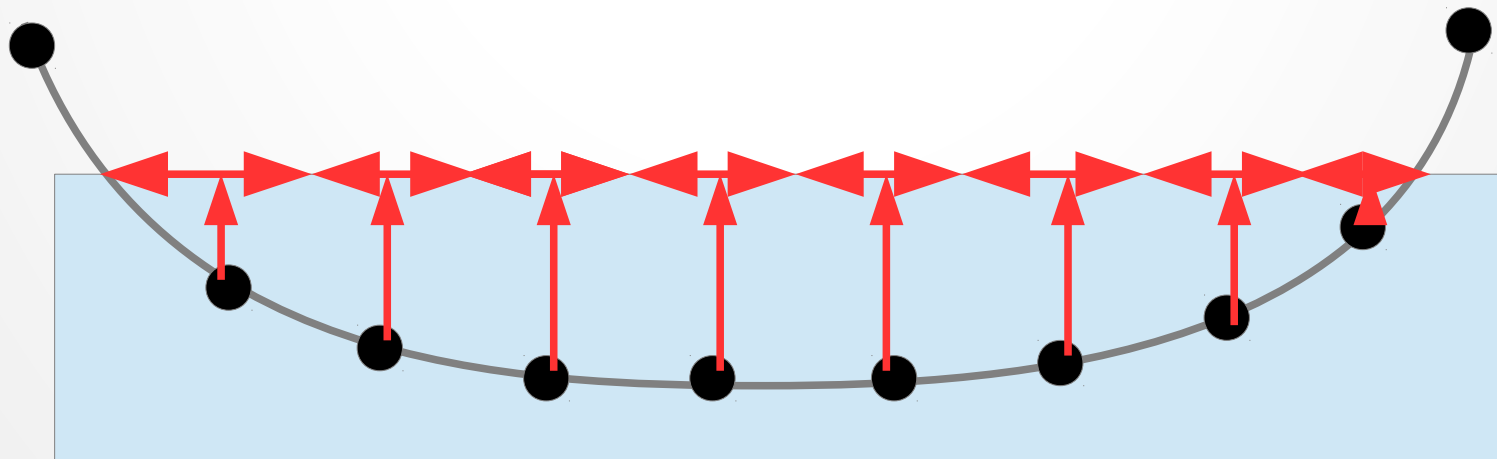
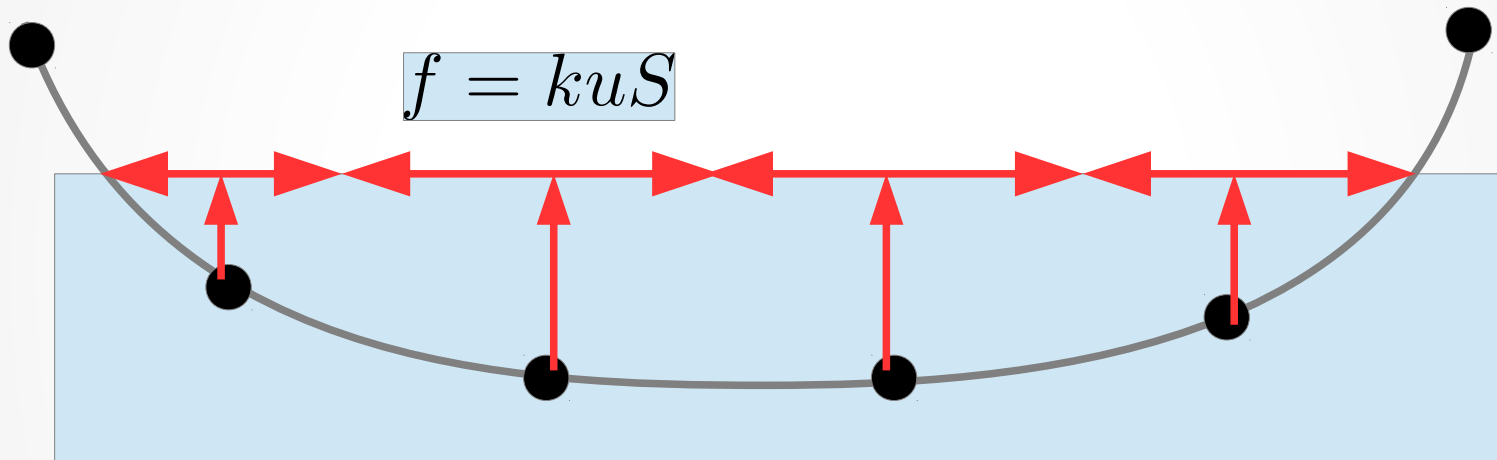
Notre approche: Contact volumique

- Géométrie complexe
- Déformable, découpable
 - Auto-collisions
 - Accélération inefficaces
- Temps de calcul limité
- Robustesse
 - Détection (longs pas de temps)
 - Réponse entre objets raides



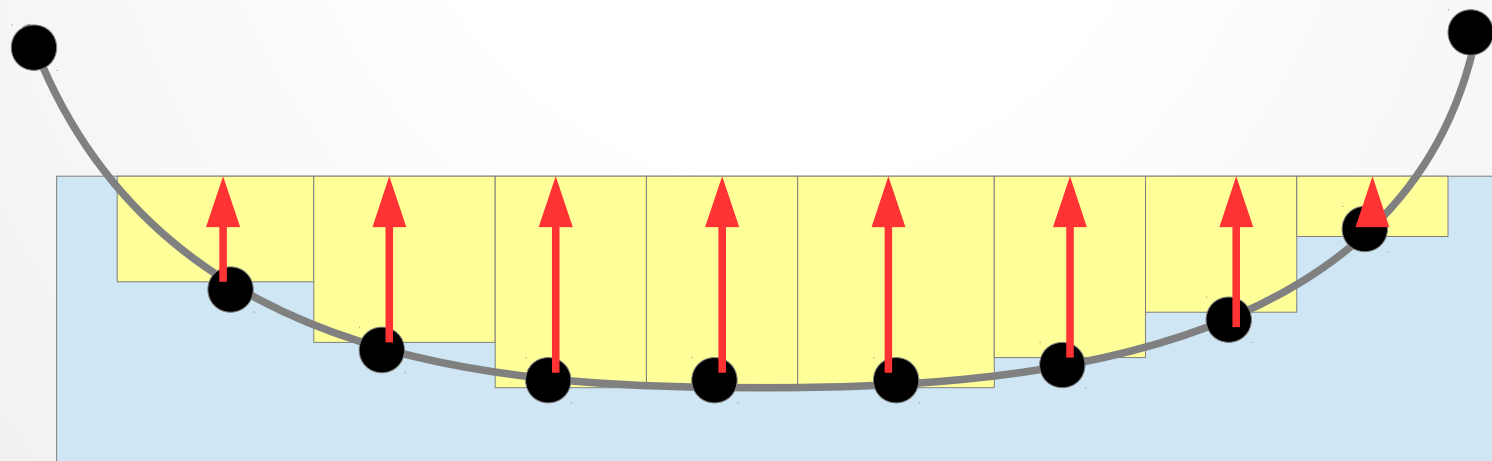
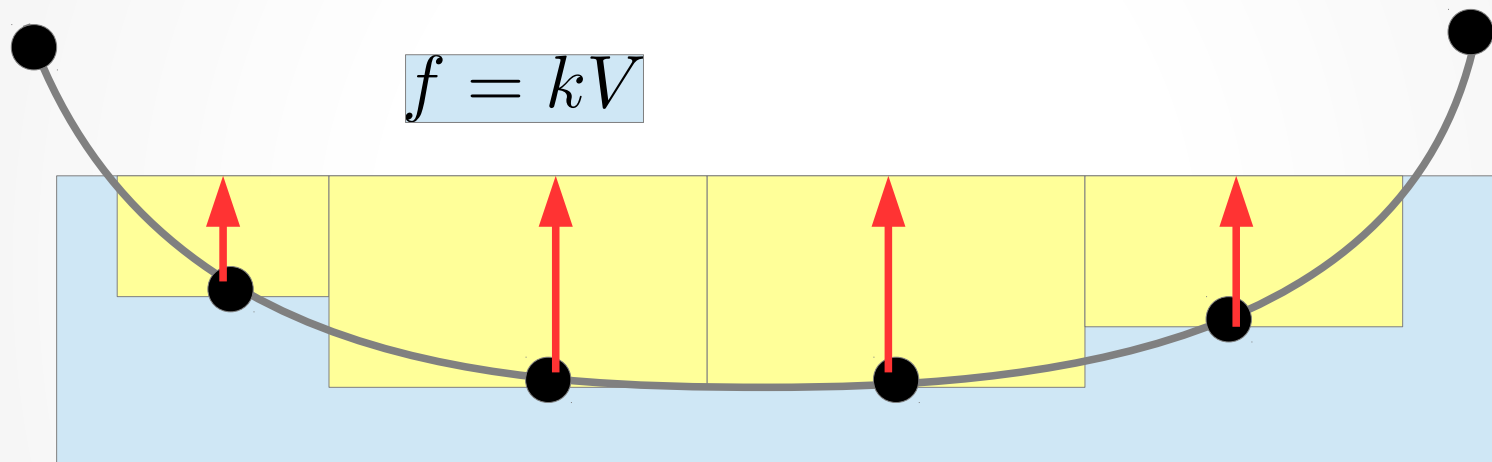
Force indépendante de la résolution

- Multiplier la force par l'aire associée au sommet



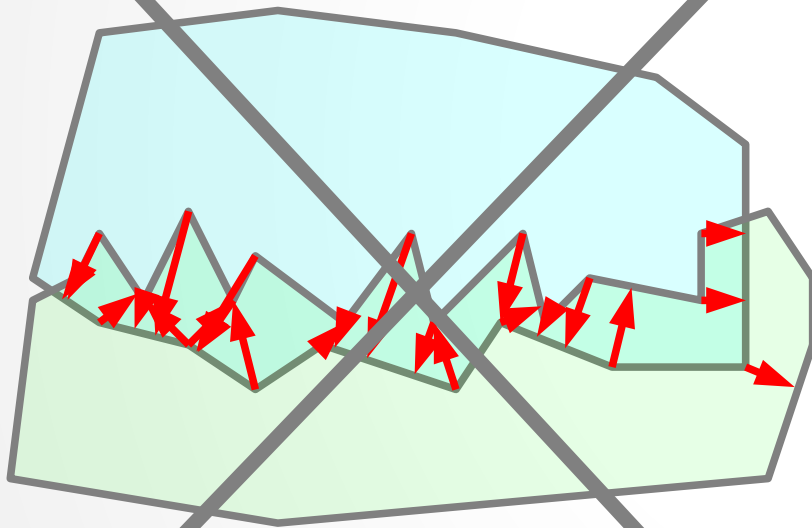
Mais alors...

- C'est le volume d'intersection !



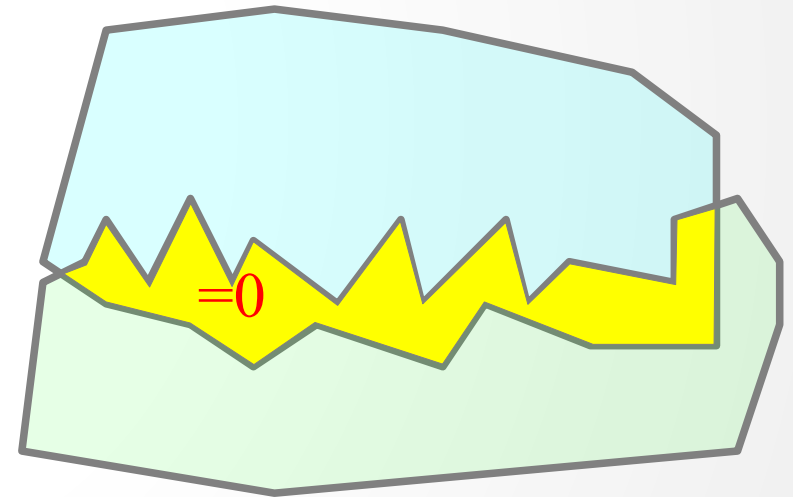
Comparaison

Profondeur d'intersection = 0



Nombreuses contraintes

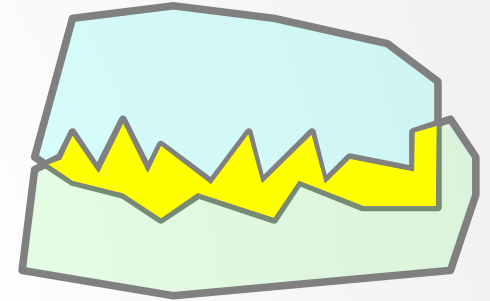
Volume d'intersection = 0



Une seule contrainte !

Force de pression

- Volume d'intersection \mathcal{V}



- Energie

$$E = \frac{1}{2}k\mathcal{V}^2$$

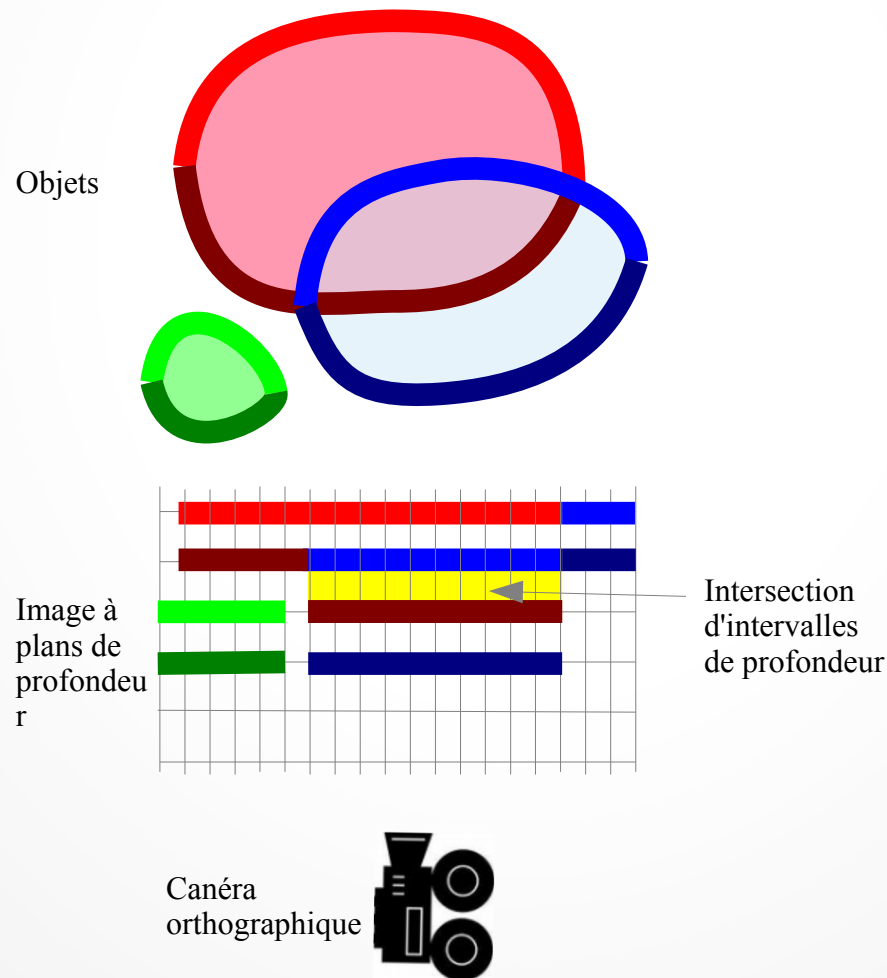
- Force

$$f = -\frac{\partial E}{\partial x} = -k\mathcal{V}\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial x}$$

- Nécessite calcul efficace du volume et de sa dérivée

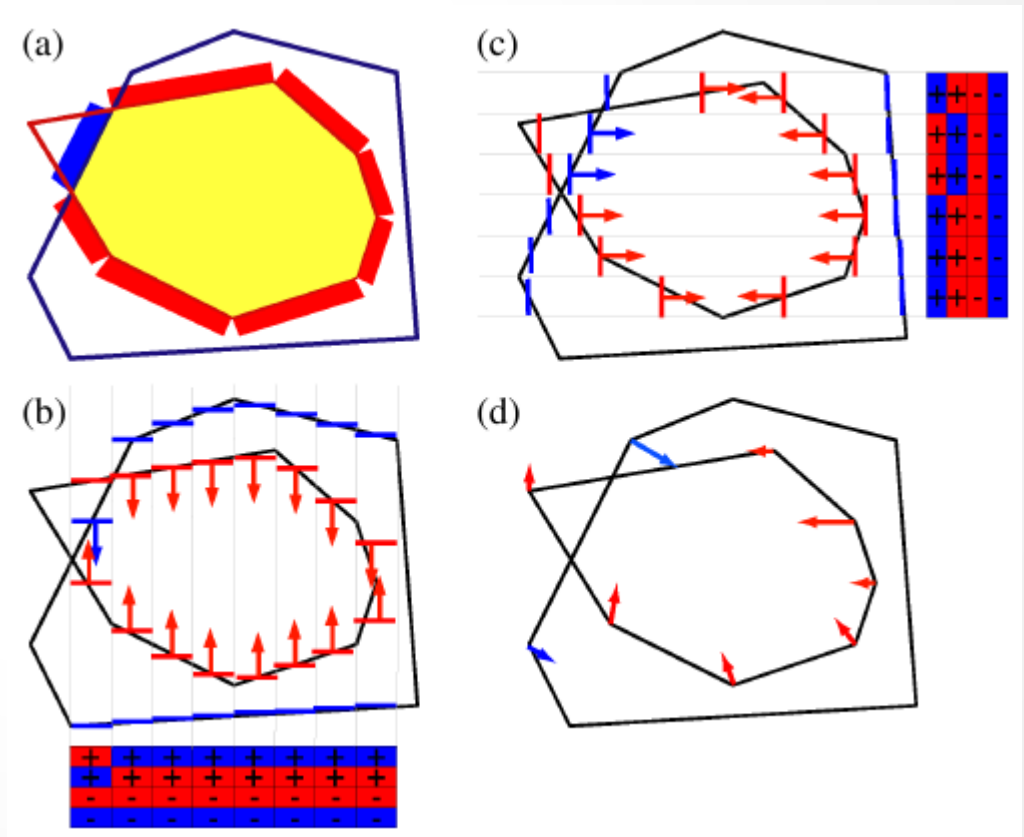
Volume d'intersection calculé sur GPU

Calculs d'intervalles dans des Images à Plans de Profondeur (*IPP*) [Heidelberger et al. 2003,2004]



Calcul des forces

- Rendu des objets dans des IPP orthogonales
- Detection des intervalles d'intersection
- Force de pression sur les pixels
- Accumulation aux sommets de la surface



Calcul des dérivées sur volume

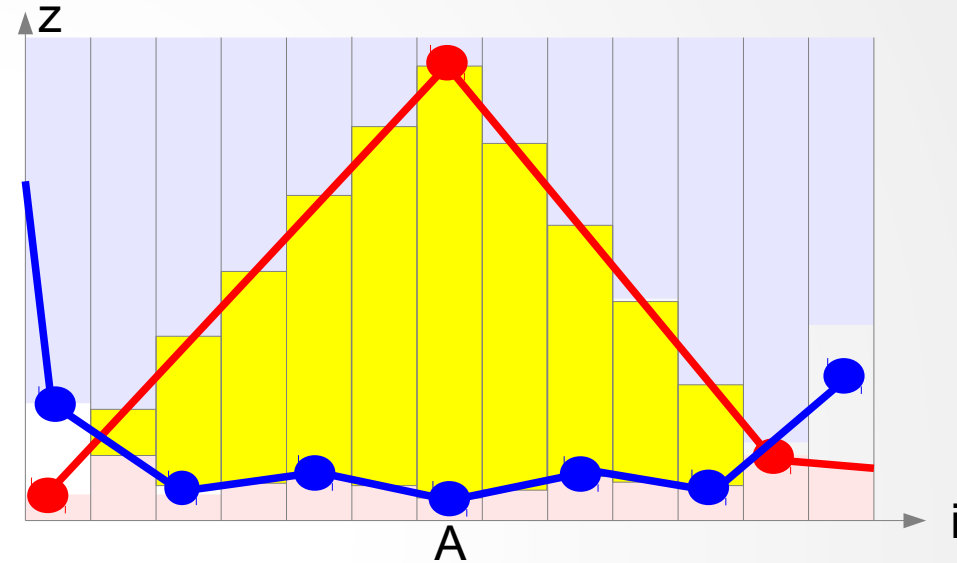
- Volume

$$\mathcal{V} = a \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} (-1)^d z_{ij}$$

- Gradient

$$\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial z_A} = a \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} (-1)^d \frac{\partial z_{ij}}{\partial z_A}$$

- Ombrage de Gouraud :
- Trois vues orthogonales :

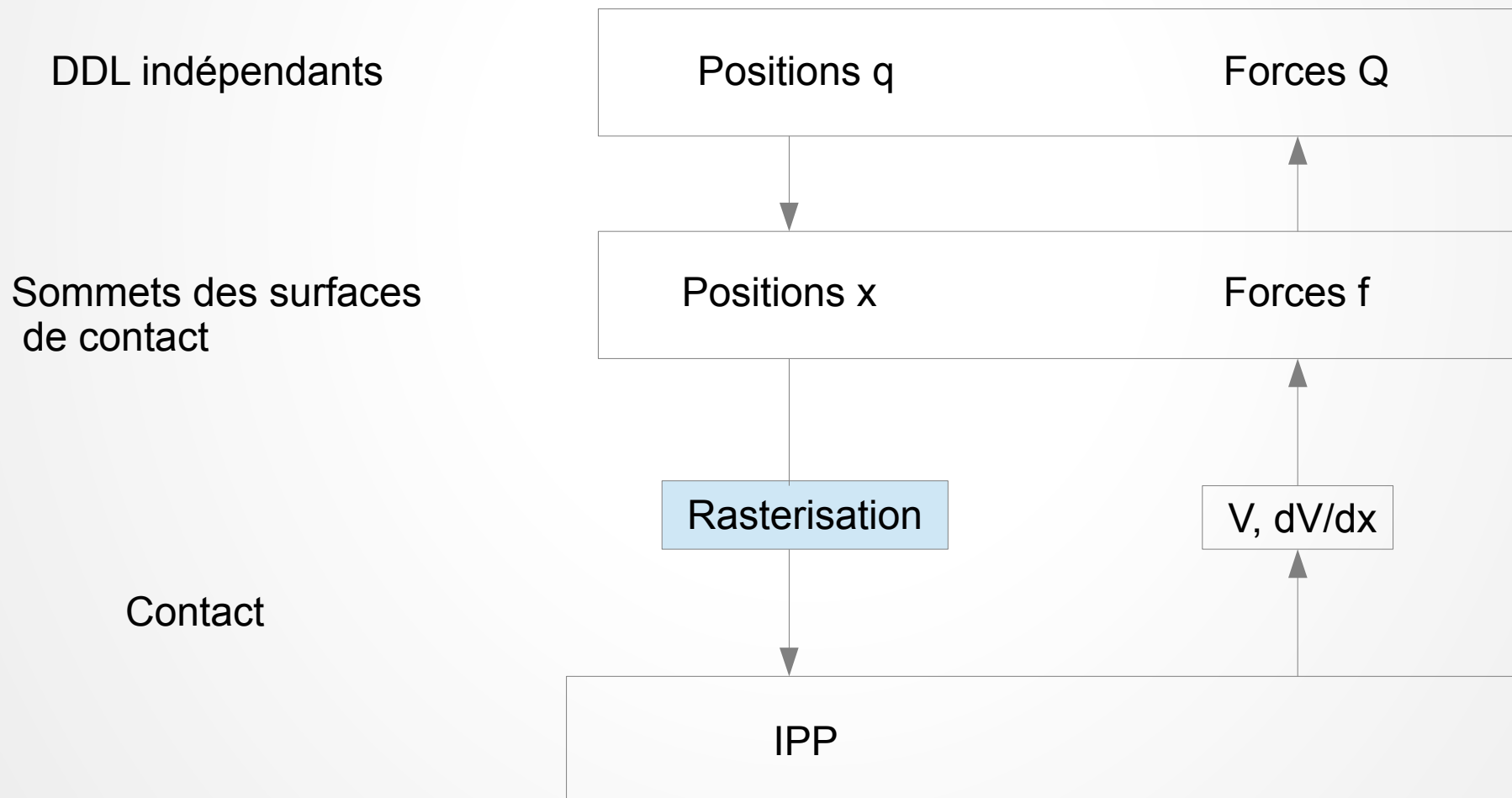


$$\frac{\partial z_{ij}}{\partial z_A}$$

$$\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial x_A}, \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial y_A}, \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial z_A}$$

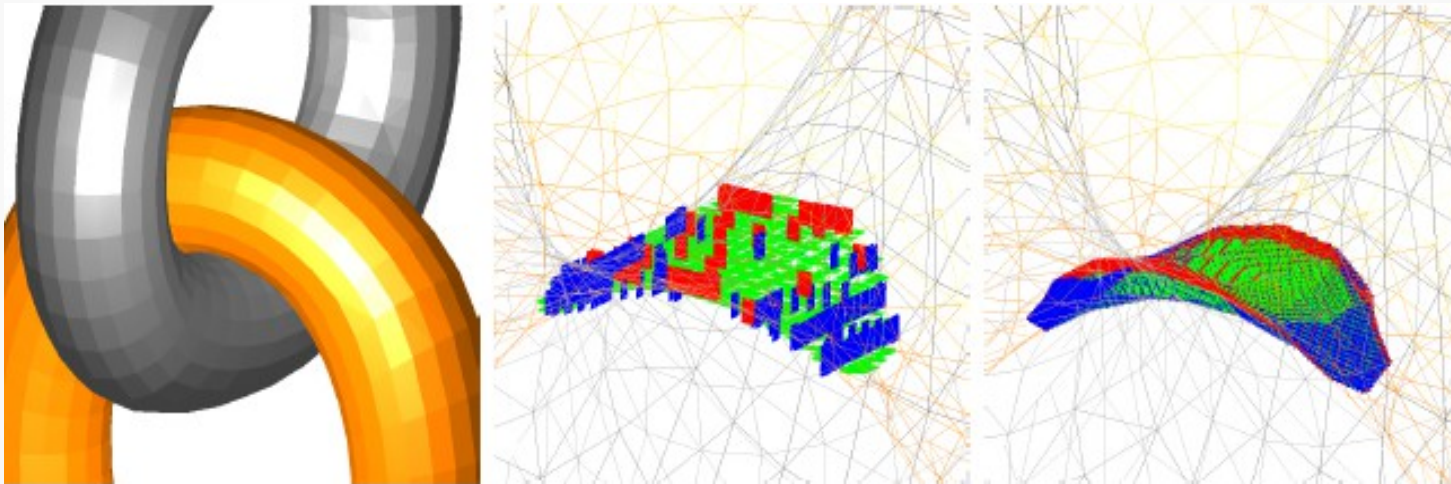
Généralité

- Application à tous modèles physiques



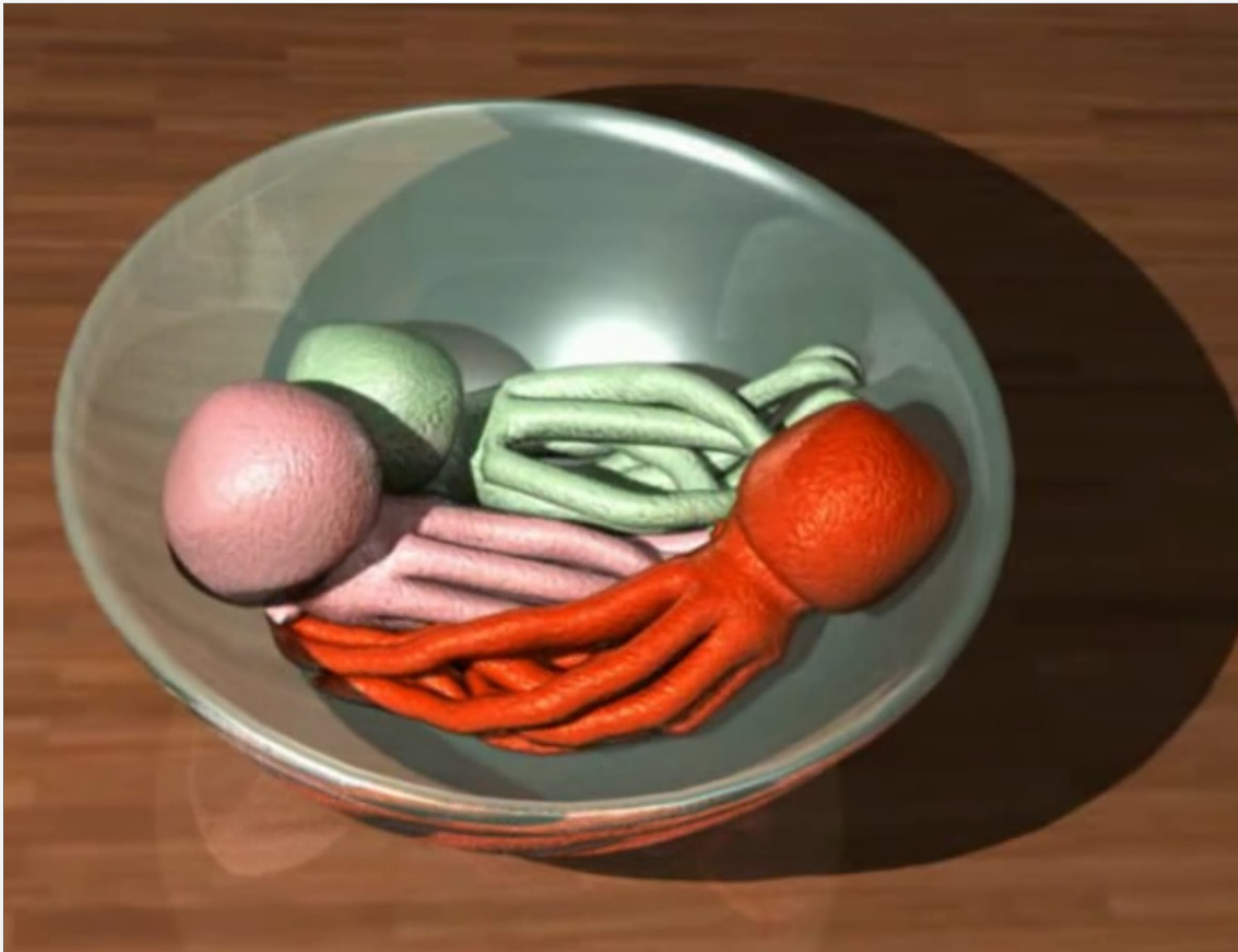
Influence de la résolution

- Forces dépendent assez peu de la résolution des IPP



- Dépendent très peu de la résolution des surfaces

Video

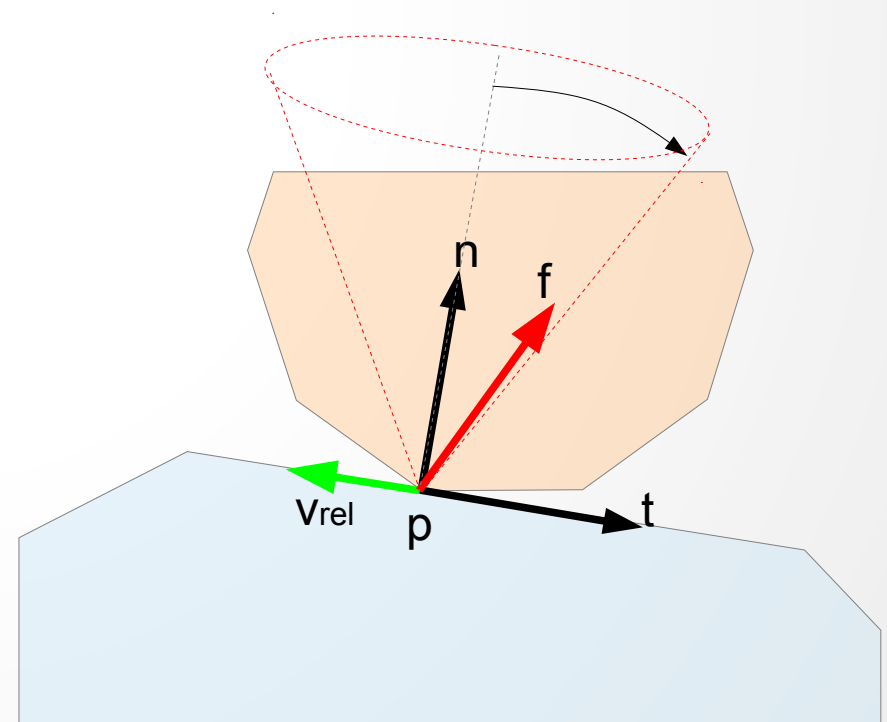


[FAFB08]

Frottement de Coulomb

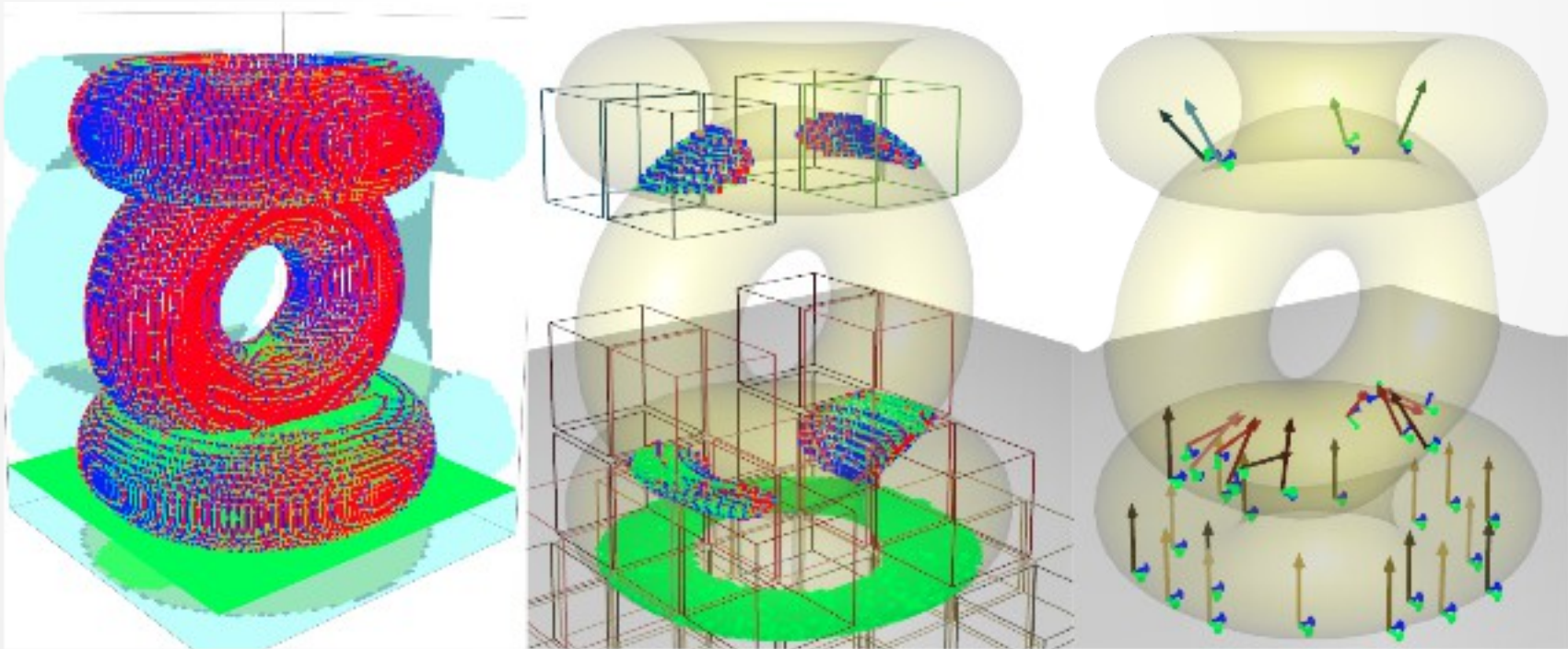
- Important pour le réalisme
- Contraintes complexes à chaque point de contact

$$\begin{array}{l} f_n \geq 0 \quad \perp \quad v_n \geq 0 \\ f_t \leq \nu f_n \end{array}$$



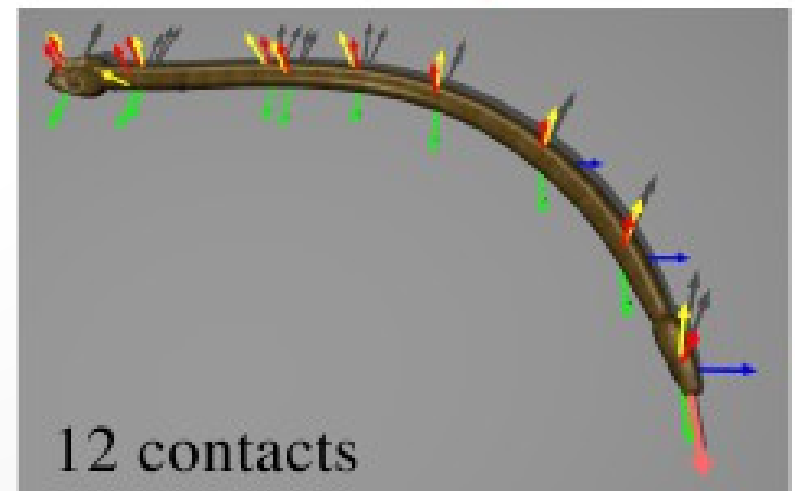
Contact Multivolume [AFCFDK10]

- Volume d'intersection divisé en cellules
- Un contact par cellule



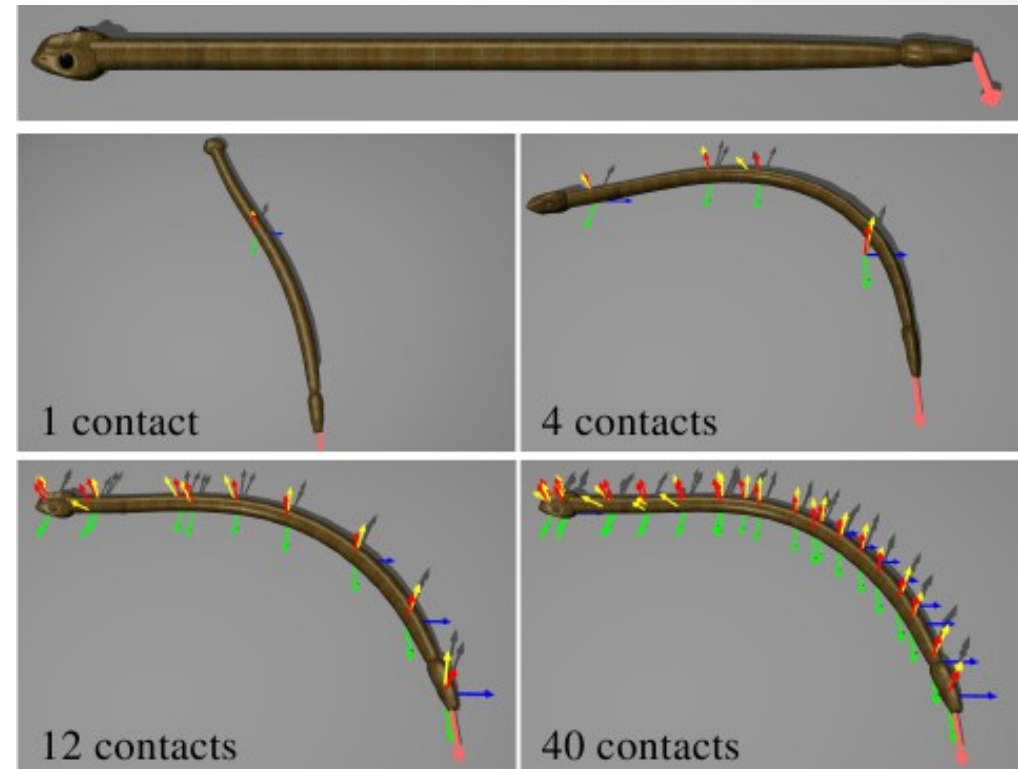
Amélioration du frottement

- Différents comportements dans la surface de contact

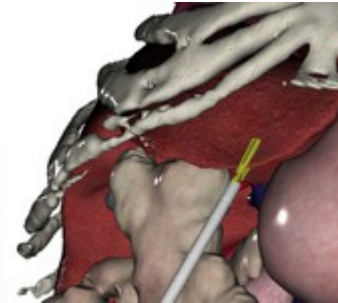
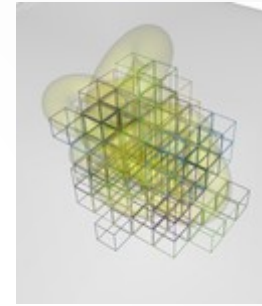
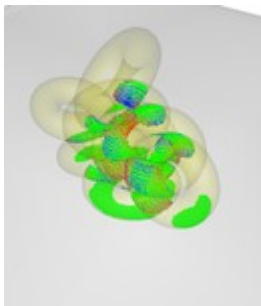
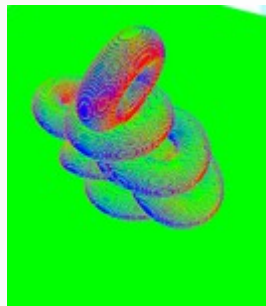
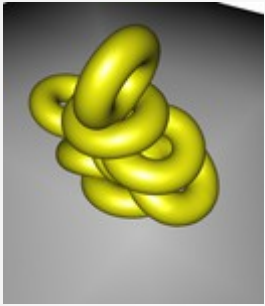


Compromis précision-temps de calcul

- Résolution grille → Résolution contact
- Independent de la résolution de la surface !
- Convergence vers un résultat



Vidéos

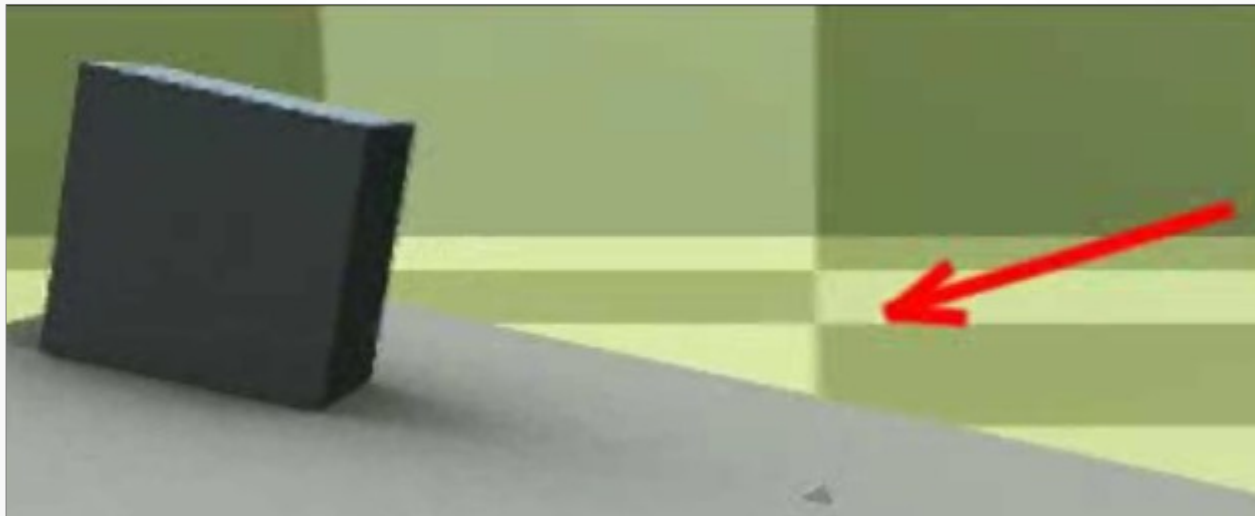


[AFCFDK10]

<http://www.sofa-framework.org/projects/ldi/>

Adaptivité [WFP12]

- Difficulté de traiter les détails sous-pixels



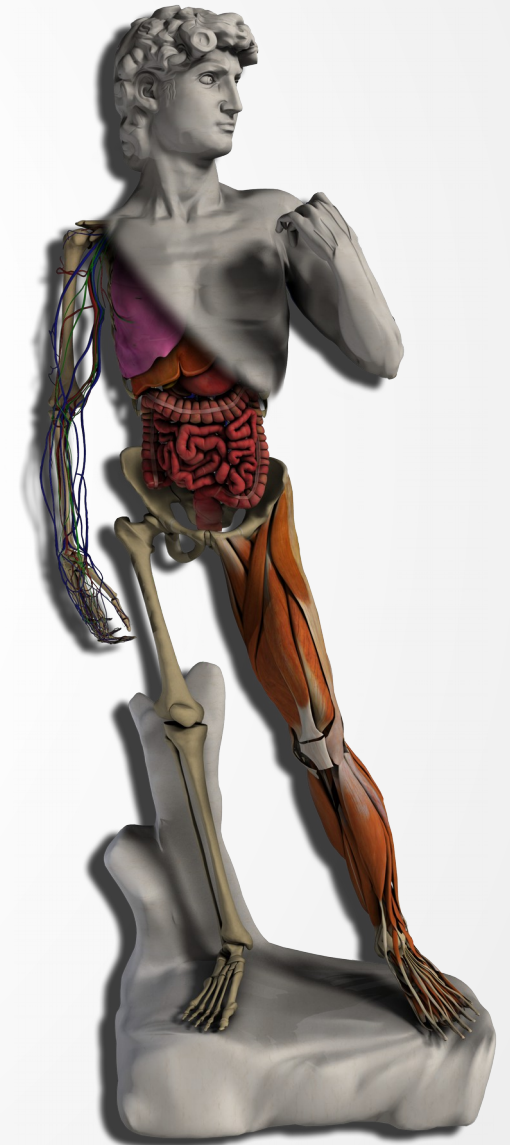
- Lancer de rayons adaptatif

Video

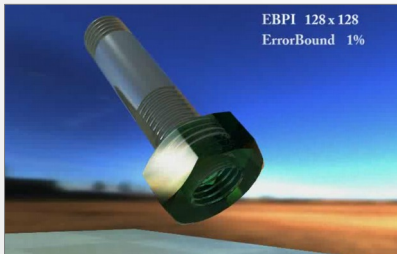
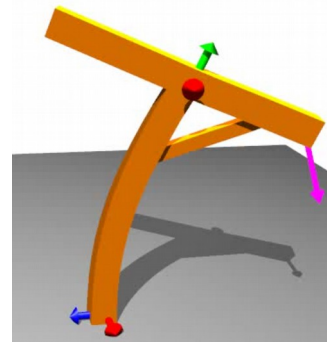
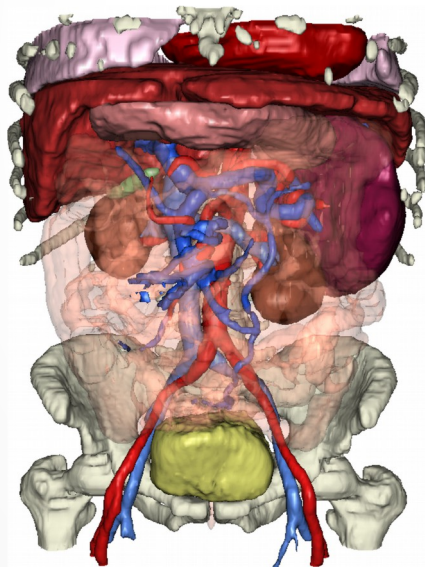
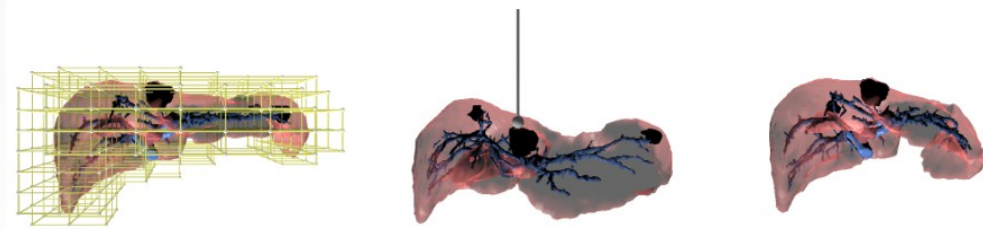


Travaux Futurs

- Valorisation: start-up Anatoscope
- Modèles réduits
- Adaptativité
- Modélisation par l'exemple



Merci !



EBPI 128 x 128
ErrorBound 1%



Bibliographie

- NPF06 Animating Shapes at Arbitrary Resolution with Non-Uniform Stiffness. Matthieu Nesme, Yohan Payan, François Faure. VRIPHYS, 2006, Madrid, Spain.
- FAFB08 Image-based Collision Detection and Response between Arbitrary Volumetric Objects. François Faure, Jérémie Allard, Florent Falipou, Sébastien Barbier. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, Jul 2008, Dublin, Ireland.
- NKLF09 Preserving Topology and Elasticity for Embedded Deformable Models. Matthieu Nesme, Paul Kry, Lenka Jerabkova, François Faure. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009
- AFCFDK10 Volume Contact Constraints at Arbitrary Resolution. Jérémie Allard, François Faure, Hadrien Courtecuisse, Florent Falipou, Christian Duriez, Paul Kry. Proceedings of SIGGRAPH 2010.
- GBFP11 Frame-based Elastic Models. Benjamin Gilles, Guillaume Bousquet, François Faure, Dinesh Pai. ACM Transactions on Graphics 2011, 30 (2)
- FGBP11 Sparse Meshless Models of Complex Deformable Solids. François Faure, Benjamin Gilles, Guillaume Bousquet, Dinesh K. Pai. Proceedings of SIGGRAPH'2011
- WFP12 Adaptive Image-based Intersection Volume. Bin Wang, François Faure, Dinesh K. Pai. Proceedings of SIGGRAPH 2012
- DLGKFPC13 Anatomy Transfer. Ali Hamadi Dicko, Tiantian Liu, Benjamin Gilles, Ladislav Kavan, François Faure, Olivier Palombi, Marie-Paule Cani. 2013, ACM SIGGRAPH ASIA