

Simulation mécanique et réalité virtuelle : outils d'aide à la compréhension et à la conception de systèmes

Soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches
Présentée à l'Université de Rennes 1
section mécanique (n° 60)
Le 23 novembre 2005 par Georges Dumont

Membres du jury

- Daniel Coutellier Professeur, Université de Valenciennes, Rapporteur
- Bernard Espiau Directeur de Recherches, INRIA Rhône-Alpes, Rapporteur
- Jean-Claude Léon Professeur, Université de Grenoble, Rapporteur
- Pierre Beckers Professeur, Université de Liège
- Patrick Chedmail Professeur, École Centrale de Nantes
- Paul Delamarche Professeur, Université de Rennes 2
- Lalaonirina Rakotomanana Professeur, Université de Rennes 1

Un rapide Curriculum vitæ

Titres

- Ingénieur
 - École Nationale des Ponts et Chaussées (1987)

- Diplôme d'Études Approfondies
 - Paris VI, mécanique (1987)

- Docteur
 - Université de Rennes 1, informatique (1990)

Parcours

- Ingénieur Stagiaire Michelin (1 an) :
 - ◆ éléments finis incompressibles pour le caoutchouc
- Thèse (3 ans) :
 - ◆ la mécanique comme modèle de mouvement
- Ingénieur Expert INRIA (1 an) :
 - ◆ projet de simulateur de conduite automobile SARA
- Ingénieur Chercheur EDF (30 mois) :
 - ◆ contact et éléments finis dans le code ASTER
- Maître de Conférences :
 - ◆ École Normale Supérieure de Cachan, mécanique (1994)
- Chargé de Recherches INRIA (2 ans) 2002-2004

Points clés : enseignement

- Préparation à l'agrégation de mécanique
 - Cours et TD : 1/3 des épreuves
 - Mécanique générale : solides rigides
 - Mécanique des solides déformables
- Troisième cycle
 - Prototypage virtuel au M2R RESIN (ENS/PARIS VI)
 - Mécanique et réalité virtuelle dans le M2P MNRV (Laval)
 - Conception multimétiers en École doctorale de l'ENS-Cachan
- Second cycle
 - Échange de services avec Rennes 1
 - Licence et maîtrise (L3, M1) : RDM

Points clés : responsabilités

- Naissance d'un département de Génie Mécanique
 - Ouverture de l'Antenne de l'ENS
 - Avec Pascal Mognol
- Direction d'études
 - ◆ 700 heures élève
 - ◆ 20 intervenants extérieurs
 - ◆ Résultats comparables à ceux de la maison mère (ENS Cachan)
- Fonctions collectives
 - Commissions de spécialistes (Rennes 1, ECN)
 - Jury de concours PSI (ENS/Polytechnique)
 - Conseil scientifique de l'ENS (8 ans)
 - Conseil de laboratoire de l'IRISA (depuis 2004)

Points clés : recherche

- Thème : Réalité virtuelle et mécanique
- Projet SIAMES de l'IRISA
- Détachement de 2 ans
- Bilan succinct (depuis 1998):
 - 2 thèses soutenues, 2 thèses en cours
 - 4 stages de DEA (M2R)
 - 2 études post doctorales
 - 6 participations à des jurys de thèse
 - 7 revues internationales, 1 chapitre d'ouvrage
 - 11 conférences internationales
 - 3 collaborations avec publications communes
 - 1 projet RNTL Salomé2
 - 2 actions spécifiques CNRS : contact et humain
 - 1 ATIP CNRS : paléanthropologie
- Titulaire de la PEDR (octobre 2005)

Définitions des termes « outils »

L'homme en interaction avec un monde virtuel modélisé ?

- Simulation mécanique et réalité virtuelle
 - Mécanique : modèle de la réalité
 - ◆ Science du mouvement
 - ◆ Efforts, déplacements, énergie
 - ◆ Objet au cœur des préoccupations
 - Réalité virtuelle : interaction avec les modèles
 - ◆ Immersion/interaction
 - ◆ Humain au cœur des préoccupations



Plan

- Credo
- Prototypage virtuel
- Interactions entre objets
- Couplage simulation/RV
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion

Credo

▪Credo

- Prototypage virtuel
- Interactions entre objets
- Couplage simulation/RV
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion



- Contexte
- Monde virtuel et monde réel
- Du virtuel vers le réel
- Du réel vers le virtuel

Contexte

- Bureau d'étude du futur
 - Réduire la durée de conception
 - Et les coûts
- Modèles de simulation
 - Compréhension du fonctionnement
 - Maîtrise du temps de simulation : pertinence du modèle
- Session de Réalité virtuelle
 - Manipulation
 - Problématique du temps de calcul : temps réel

Monde réel et monde virtuel

■ Perception naturelle

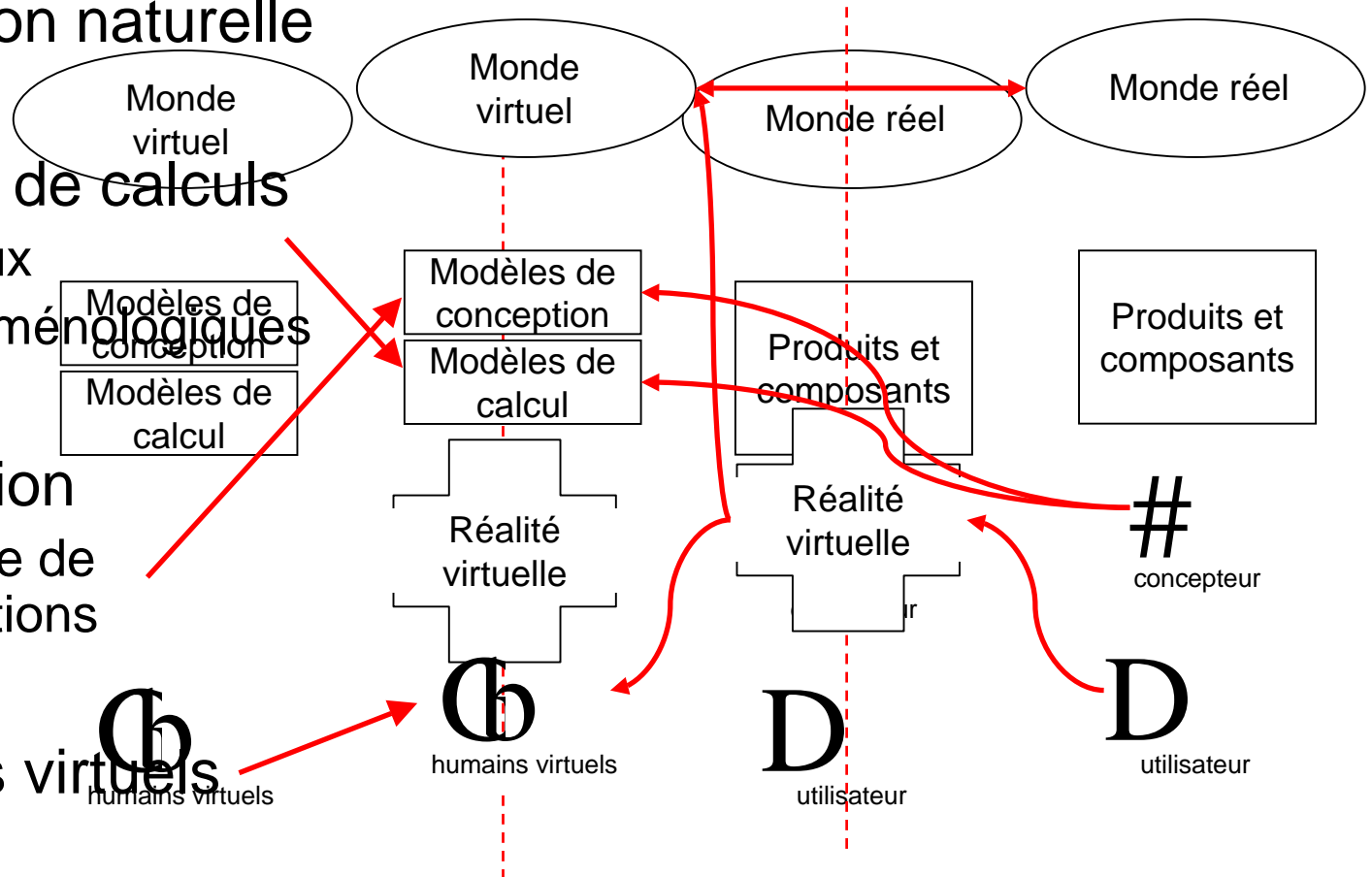
■ Modèles de calculs

- Globaux
- Phénoménologiques

■ Conception

- Analyse de simulations

■ Humains virtuels



Les relations entre le réel et le virtuel

■ Du réel vers le virtuel : compréhension

- Comprendre les phénomènes
- Proposer des modèles

Mécanique

■ Du virtuel vers le réel : conception

- Capacités d'interaction
- Analyse
- Retour sur les modèles

Réalité virtuelle

Prototypage virtuel

- Credo
- Prototypage virtuel →
 - Problématique
 - Contributions
 - Conclusion partielle
- Interactions entre objets
- Couplage simulation/RV
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion

Enrichir la maquette numérique

■ Illustré par l'exemple

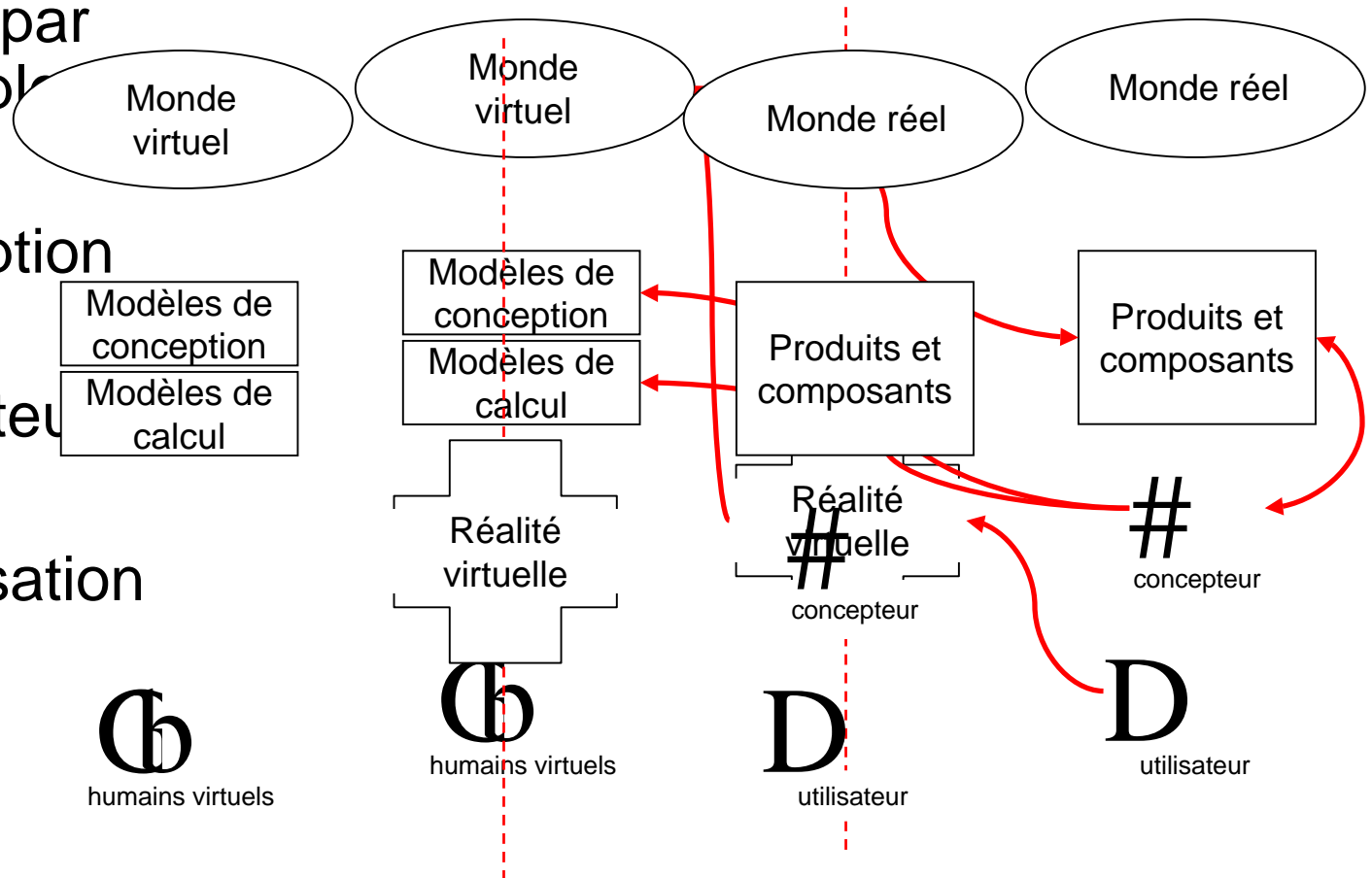
■ Conception

■ Calcul

■ Simulation

■ Optimisation

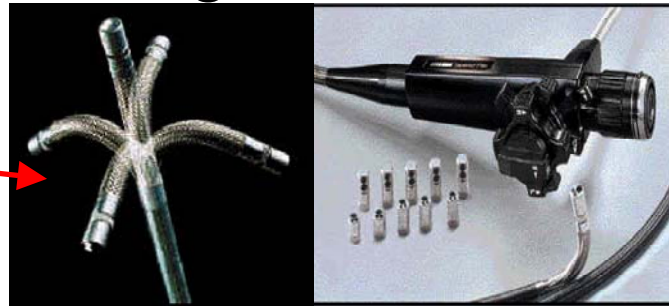
■ MESI



Endoscopes

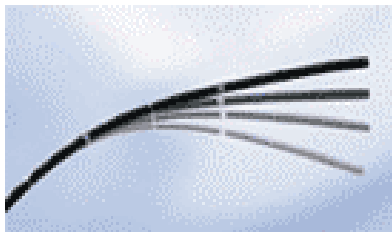
■ Exploration interne des organes

béquillage

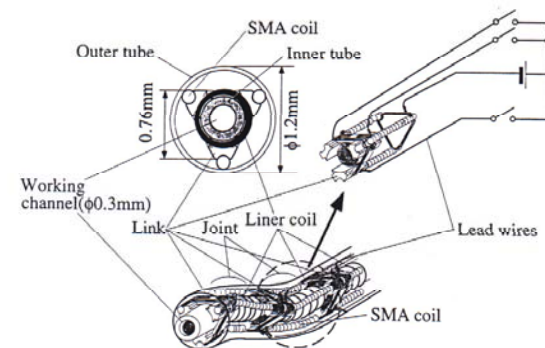


Olympus-Innoflex™

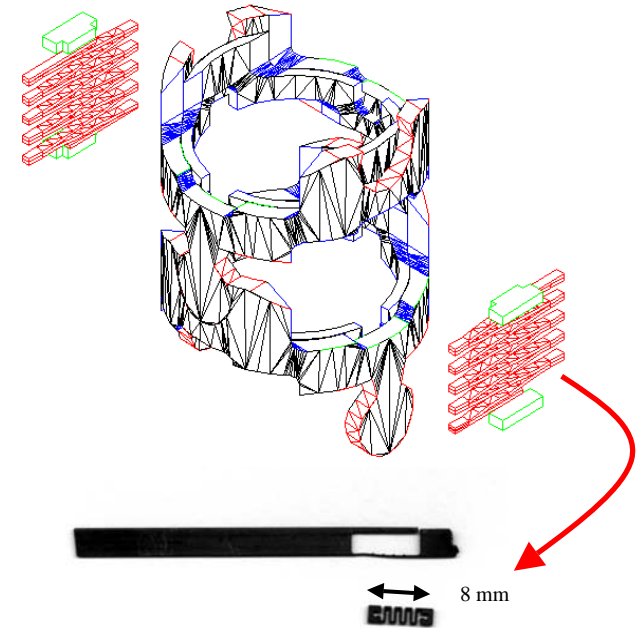
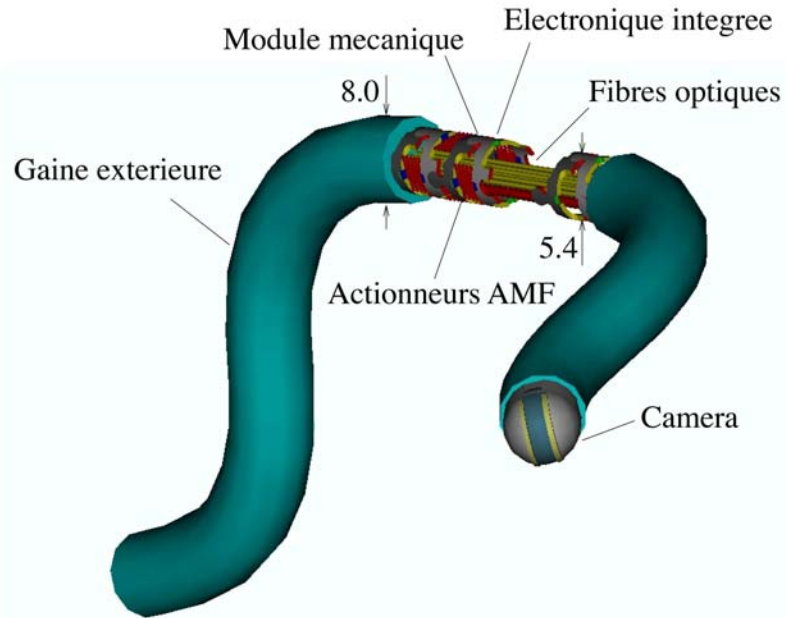
innoflex



Prototype développé à l'université de Tohoku :

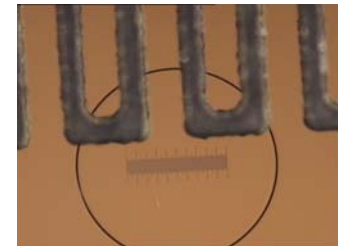


Le micro-endoscope prototype

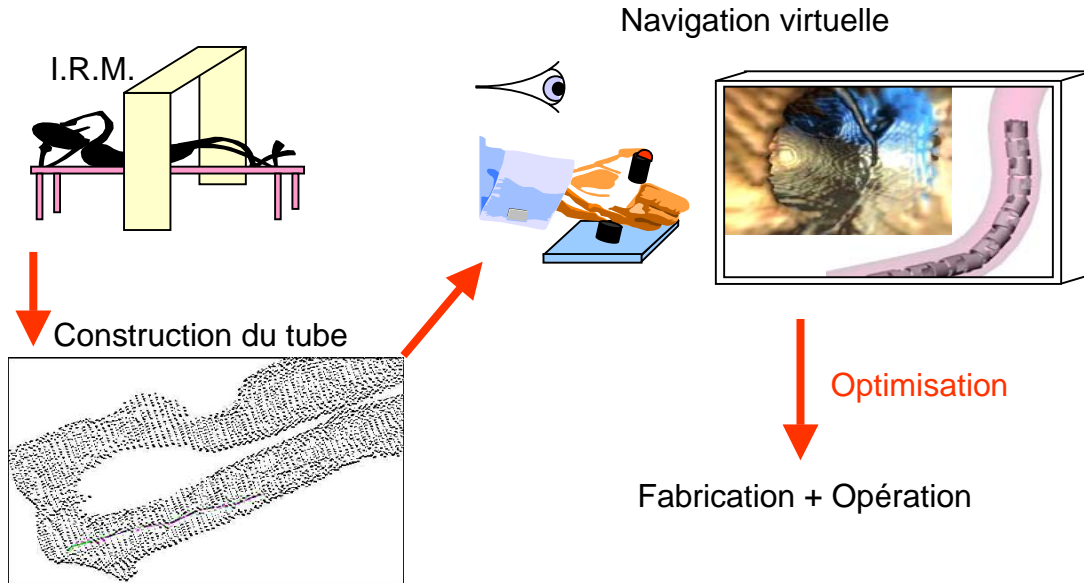


- Système articulé :
 - liaisons pivot ;
- Actionneurs en Alliage à Mémoire de Forme

(courtoisie LRP)



Un simulateur



- Intérêts de la conception d'un simulateur :
 - Formation des jeunes chirurgiens
 - Entraînement pré-opératoire
 - Test et prototypage virtuel

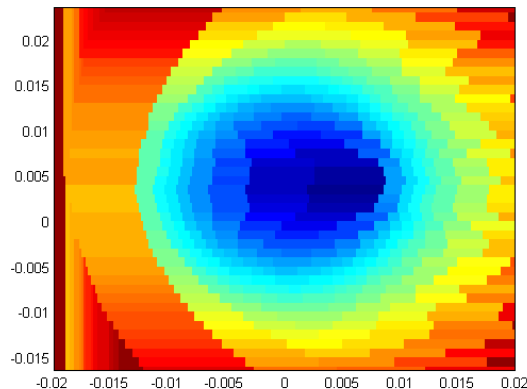
Modèle de contact

Interaction corps rigide / corps mou :
Modélisation par un effet ressort - amortisseur :

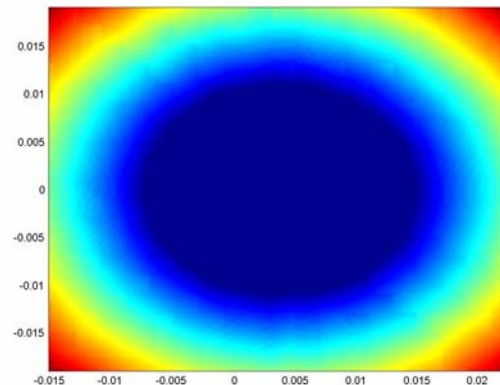
$$\vec{F} = -k_{tube} \cdot dist \cdot \vec{n} - f_{tube} \cdot vit_{pénétr} \cdot \vec{n}$$

Problème : déterminer $dist$ et \vec{n} avec un tube défini de manière discrète.

Carte de distances (résolution = 1mm)



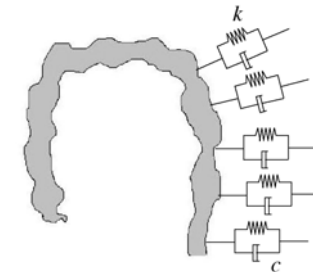
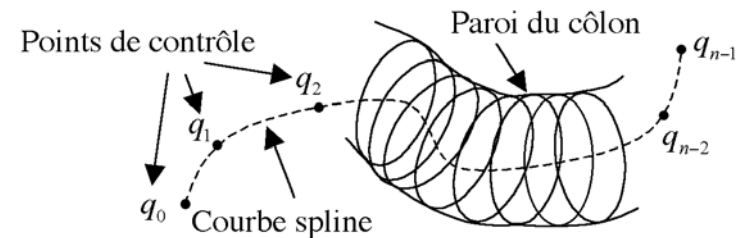
Distance obtenue par interpolation



Modèles

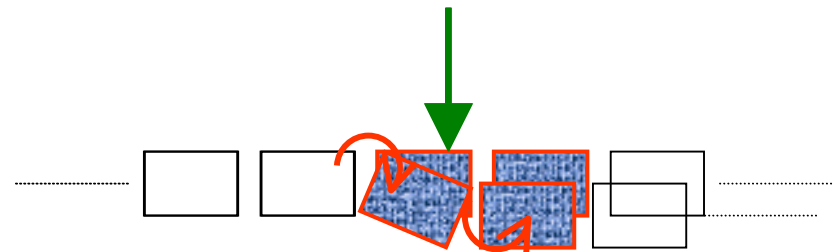
■ De cœlon :

- Splines déformables (traction+flexion)
- Modèle de Voigt comme loi de comportement



■ De commande :

- Approche multi-agents



Passage d'un coude

passif

contrôlé

rigide

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

mou

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

■ Déformation =>

Meilleure perception :

- Modèle plus proche de la réalité

■ Contrôle =>

Diminution des efforts :

- Minimisation des risques

Opération de débouclage

QuickTime™ et un
décompresseur codec YUV420
sont requis pour visionner cette image.

- Temps réel
- Prêt pour le passage à l'haptique

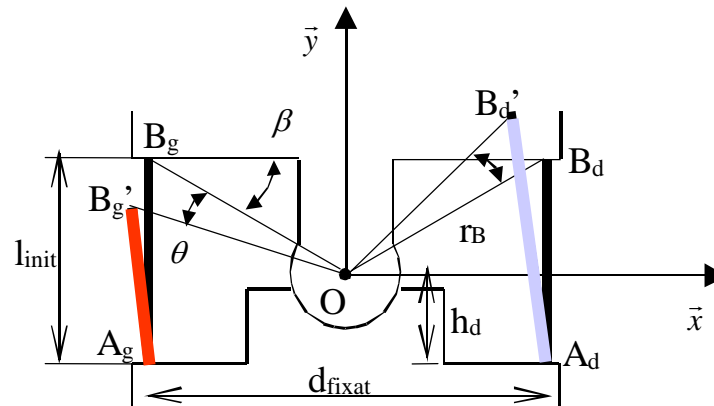
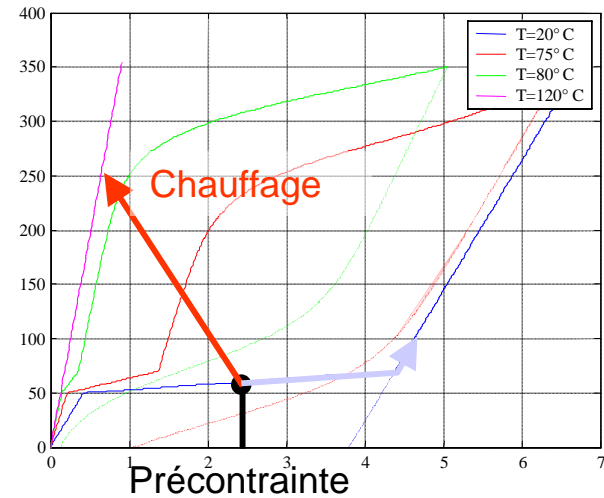
Optimisation des actionneurs

■ Modèle de comportement d'AMF

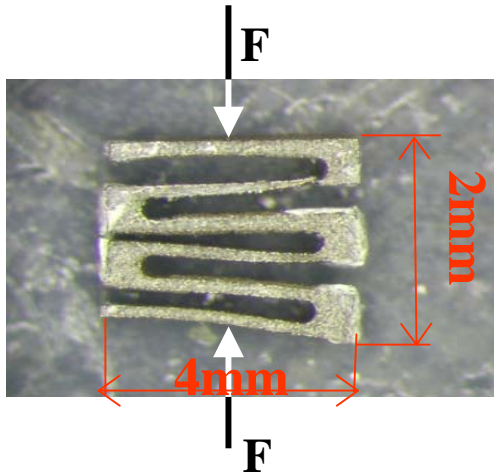
- Différence de rigidité entre phases:
 - ◆ Austénite (chaud)
 - ◆ Martensite (froid)

■ Modèle de poutre en couche

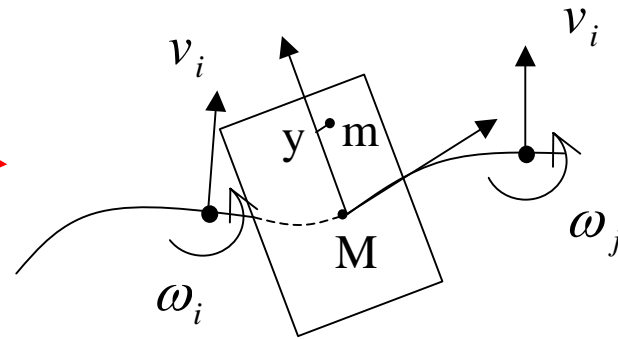
■ Optimisation par algorithmes génétiques



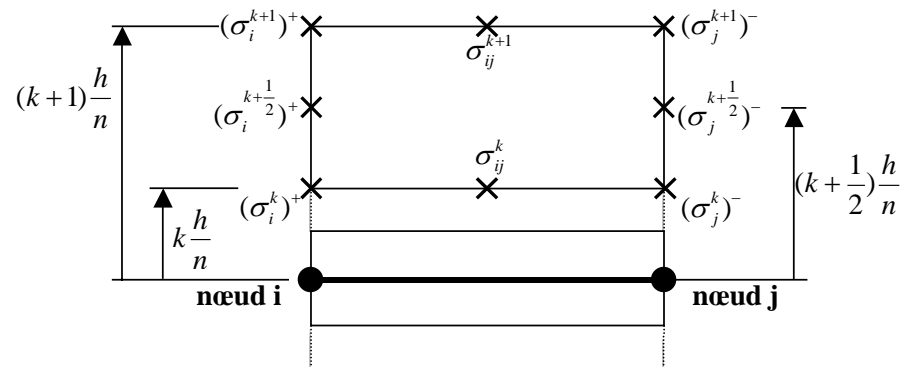
Modèle éléments finis de poutre en couche



Cinématique de type poutre de Euler Bernoulli



Stockage des contraintes



Interpolation

$$v(x) = v_i + \omega_i x + \left(3 \frac{v_j - v_i}{l^2} - 2 \frac{\omega_i}{l} - \frac{\omega_j}{l}\right) x^2 + \left(2 \frac{v_i - v_j}{l^3} + \frac{\omega_i}{l^2} + \frac{\omega_j}{l^2}\right) x^3$$

Trouver $(U(t, M), \sigma(t, M))$ tel que :

- U

$$\forall t \in [0, T], U(t, M) = U_g(t, M) \quad \partial\Omega_1$$

σ

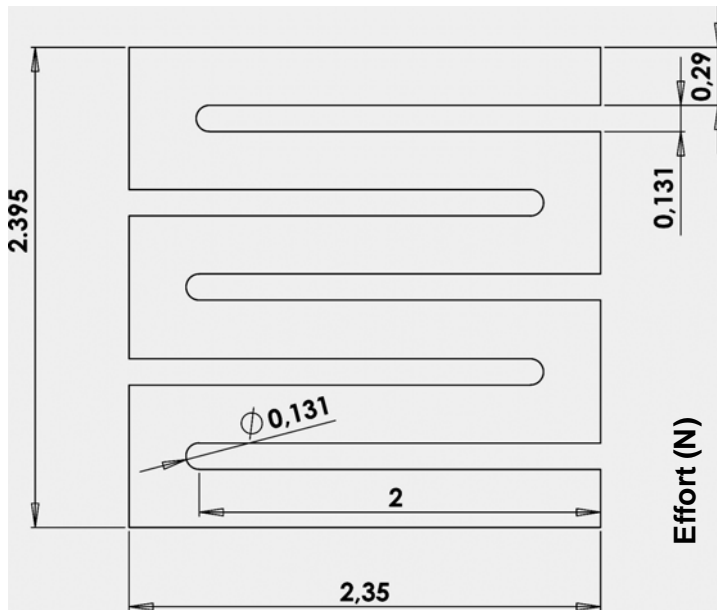
$$\forall t \in [0, T] \quad \forall U^* \quad U^*(t, M) = 0 \quad \partial\Omega_1$$

$$-\iiint_{\Omega} \text{Tr}[\sigma \cdot \varepsilon(U^*)] d\Omega + \iiint_{\Omega} f_g \cdot U^* d\Omega + \iint_{\partial\Omega_2} F_g \cdot U^* dS = 0$$

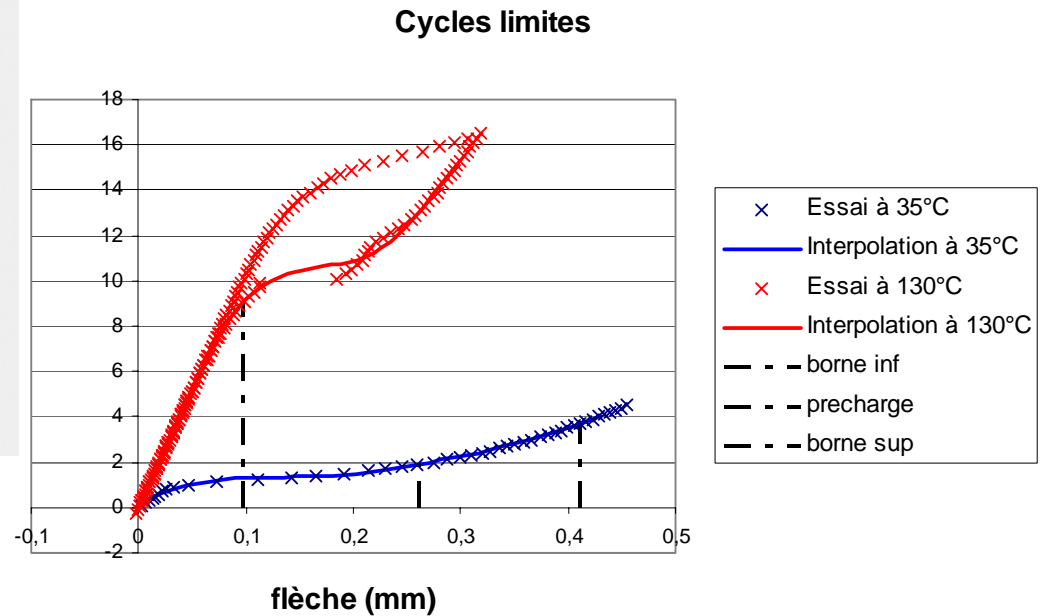
$$\forall M \in \Omega, \forall t \in [0, T], \sigma(t, M) = A[\varepsilon(\tau, M), \tau \leq t]$$

$$\forall M \in \Omega, U(0, M) = 0, \sigma(0, M) = 0$$

Optimisation des ressorts : résultats



Hauteur du ressort : 2,4mm
Précontrainte : 1,3mm
Réserve de C = 33mNm
Contrainte_{maxi} = 550 MPa



Conclusion partielle

- Modèles de calcul et de conception
- Simulateur
- Optimisation
- Une chaîne complète :
 - Faisabilité
 - Intérêt

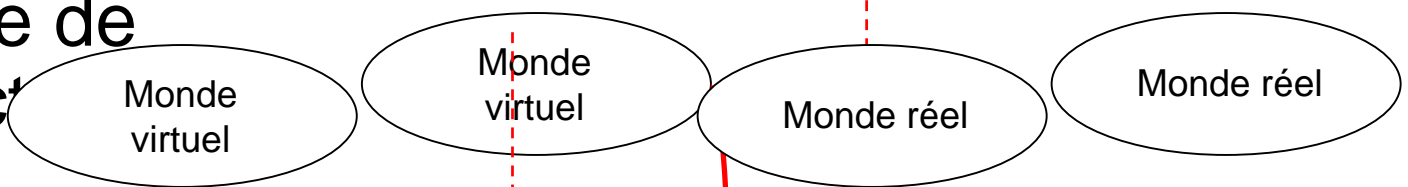
- Expérimentations complémentaires pour validation
 - Paramètres de loi de comportement du cône
 - Validation du modèle d'actionneur

Interaction entre objets

- Credo
- Prototypage virtuel
- **Interactions entre objets** →
 - Problématique
 - Contributions
 - Conclusion partielle
- Couplage simulation/RV
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion

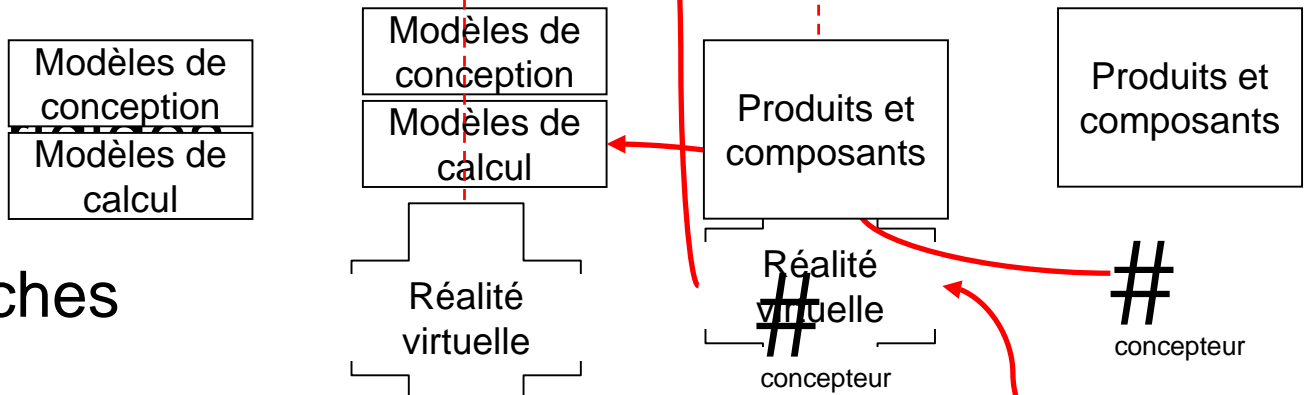
Améliorer la réponse

■ Modèle de contact choc



■ Solides

- Deux approches



■ BIPOP



humains virtuels



humains virtuels

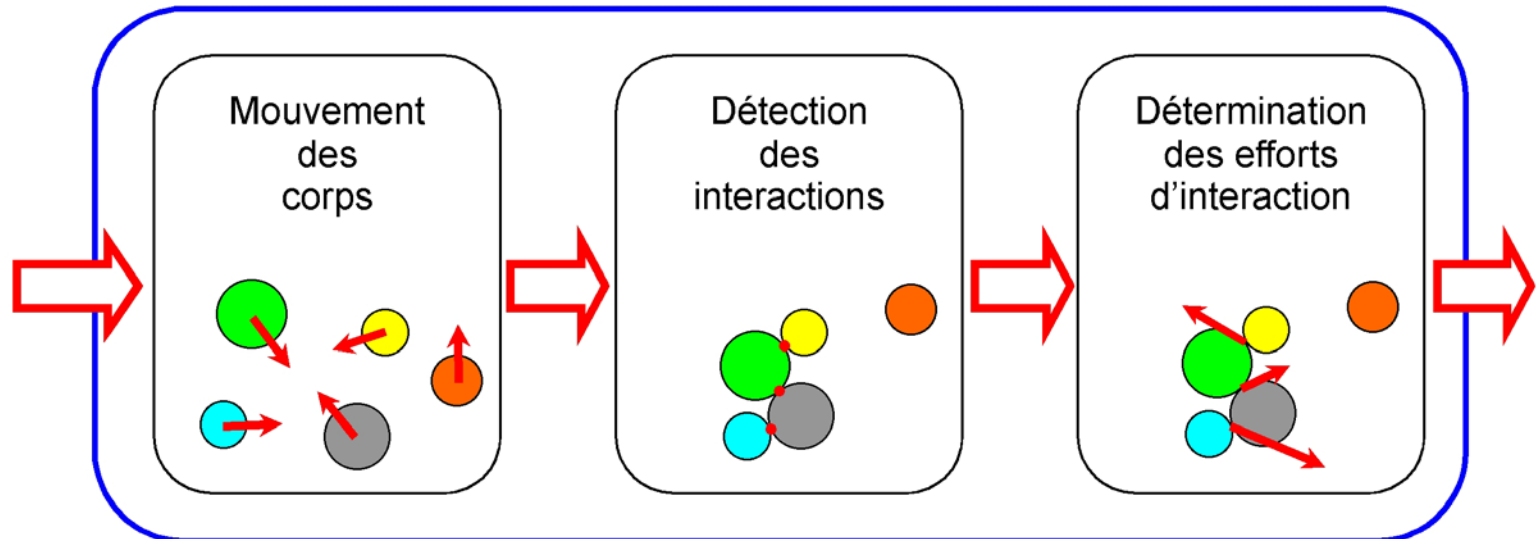


utilisateur



utilisateur

Le calcul des interactions : schéma général



- Pilotage par l'événement
- Temps contrôlé

Dynamique pilotée par l'événement

- Dynamique non contrainte
- Gestion des instants

$$M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q} + K(q)q = F_{ext}(q, \dot{q}, t) + R$$

q : paramètre de configuration

$M / C / K$: matrice de masse

/ de viscosité / de raideur

F_{ext} : forces extérieures

R : forces de contact

Dynamique en temps contrôlé

rigide et pas de viscosité : $C / K \rightarrow 0$

en termes de mesures : $M(q) d\dot{q} = F_{ext}(q, \dot{q}, t) dt + R dv$

choc entre corps : $\ddot{q} \rightarrow d\dot{q}$ discontinuité de vitesse
 dv impulsion instantanée

discrétisation temporelle (h : pas de temps)

$$\dot{q}^{i+1} = \dot{q}^i + \theta(M^{-1})^i h F_{ext}^{i+1} + (1 - \theta) F_{ext}^i$$

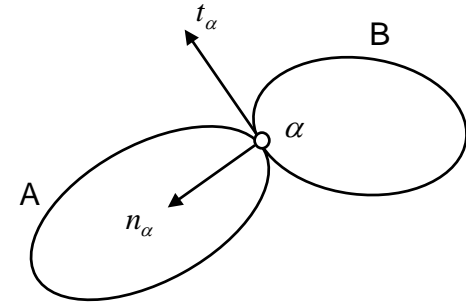
$$q^{i+1} = q_{libre}^{i+1} + (M^{-1})^i h R^{i+1}$$

Les lois : contact

Contact

assurer l'impénétrabilité
Condition de Signorini

$$\rightarrow \begin{cases} v_{n,\alpha} \geq 0 \\ r_{n,\alpha} \geq 0 \\ r_{n,\alpha} \bullet v_{n,\alpha} = 0 \end{cases}$$



QuickTime™ et un
décompresseur Animation JPEG OpenDML
sont requis pour visionner cette image.

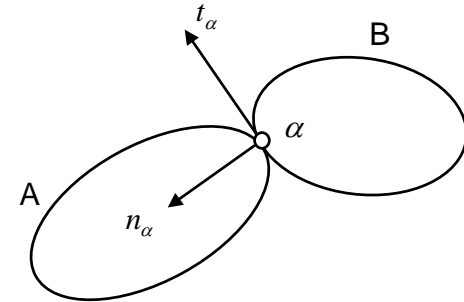
QuickTime™ et un
décompresseur codec YUV420
sont requis pour visionner cette image.

Les lois : choc

Choc

restitution normale $\rightarrow v_{n,\alpha}^+ \geq -e v_{n,\alpha}^-$

restitution tangentielle $\rightarrow v_{t,\alpha}^+ \geq -e v_{t,\alpha}^-$



QuickTime™ et un
décompresseur 3ivx D4 4.0.4
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

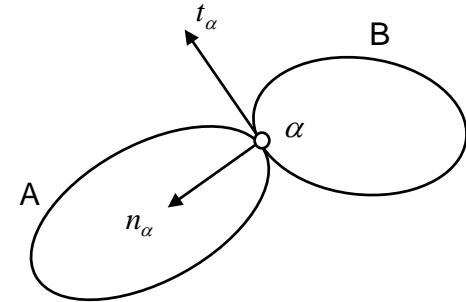
Conservation de l'énergie

Les lois : frottement

Frottement

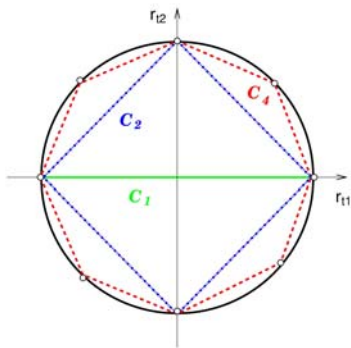
force dans le cône de frottement $\rightarrow \|r_{t,\alpha}\| \leq \mu r_{n,\alpha}$

si mouvement relatif $\rightarrow r_{t,\alpha} = -\mu \left(\frac{v_{t,\alpha}}{\|v_{t,\alpha}\|} \right)$

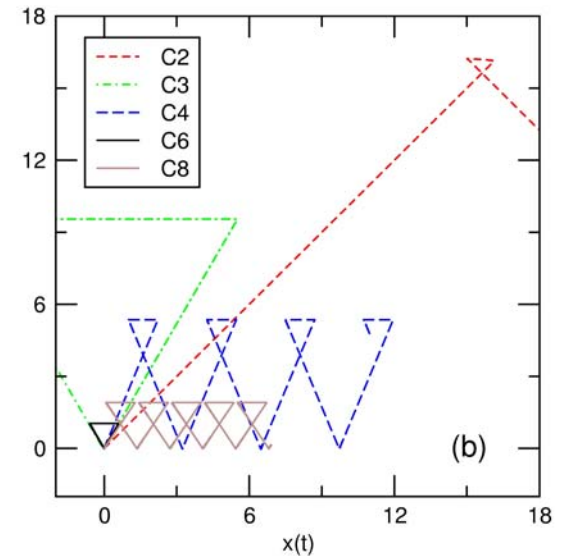


■ Force cyclique sur une bille =>

◆ Trajectoire triangulaire



Approximation du cône

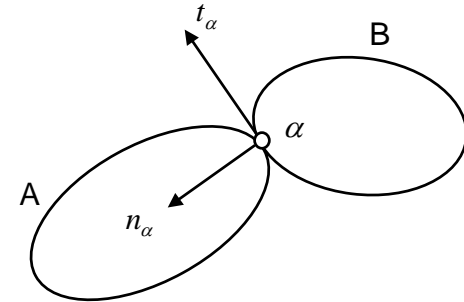


Les lois : frottement

Frottement

force dans le cône de frottement $\rightarrow \|r_{t,\alpha}\| \leq \mu r_{n,\alpha}$

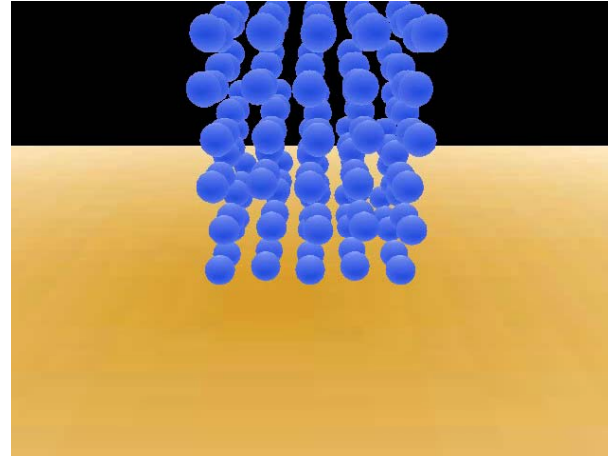
si mouvement relatif $\rightarrow r_{t,\alpha} = -\mu \left(\frac{v_{t,\alpha}}{\|v_{t,\alpha}\|} \right)$



décompresseur 3ivx D4 4.0.4
sont requis pour visionner cette image.

Illustrations

QuickTime™ et un
décompresseur Animation JPEG OpenDML
sont requis pour visionner cette image.



décompresseur Animation JPEG OpenDML
sont requis pour visionner cette image.

Conclusion partielle

- Deux méthodes en solides rigides :
 - Pilotage par le temps :
 - ◆ Instant précis de l'interaction
 - ◆ Retour en arrière
 - ◆ Calculs précis mais longs
 - Temps contrôlé
 - ◆ Adapté à l'interaction
 - ◆ Impulsions moyennes seulement
- Compromis entre :
 - Le nombre d'objets
 - La **qualité** de la simulation
 - Le temps de calcul
- Aller vers :
 - Le couplage avec la détection
 - Le couplage entre rigide et déformable
 - Le déformable pré-calculé pour enrichir le rigide

Couplage simulation/RV

- Credo
- Prototypage virtuel
- Interactions entre objets
- **Couplage simulation/RV** →
 - Problématique
 - Contributions
 - Conclusion partielle
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion

Analyser une maquette numérique

■ Modèles importants

■ Analyse numérique

■ Interagir avec les résultats

■ Modifier la conception

■ Salomé2 :

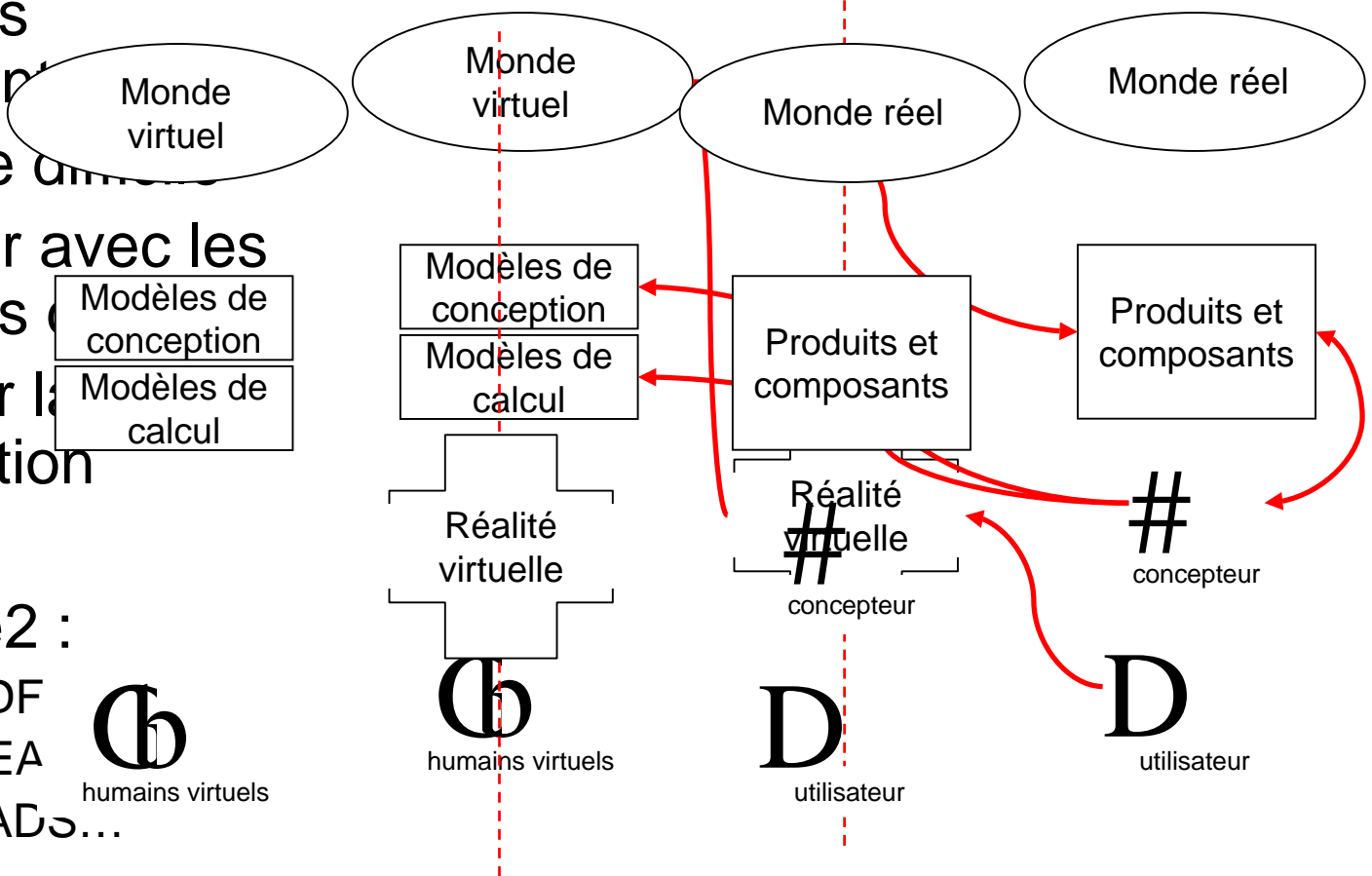
◆ EDF

◆ CEA

◆ EADS...



humains virtuels



Problématique

■ Analyse interactive de maquettes numériques

Maquette numérique

■ Modèle CAO

● Géométrie fine

- ◆ 4 000 000 de tétraèdres

Maquette virtuelle

■ Temps réel

● Géométrie limitée

- ◆ 300 000 facettes

Contrôle de la simplification

■ Précision totale

■ Précision dégradée

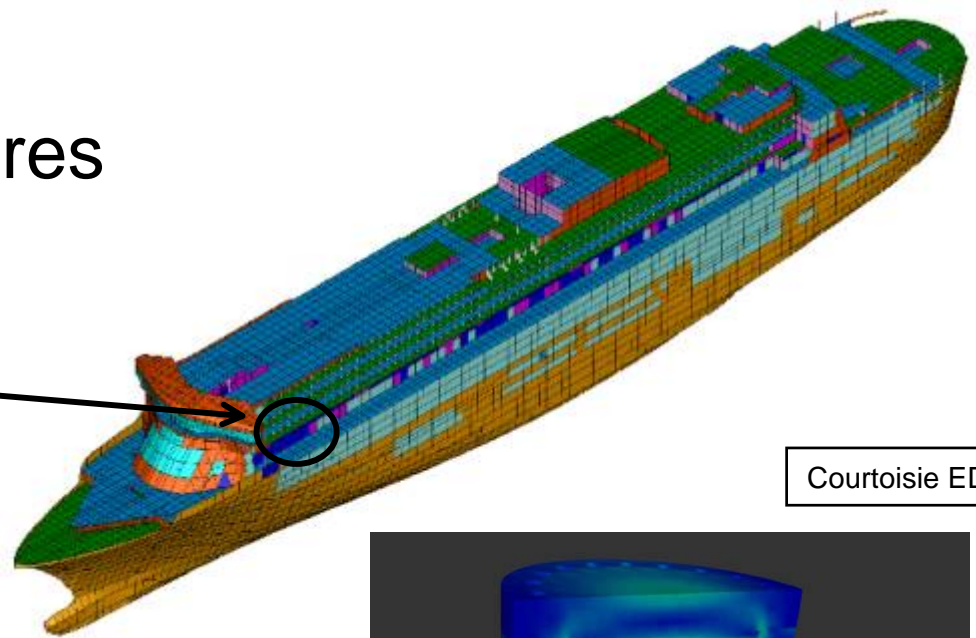
Gestion du multi-échelle

Scénarii cibles

Courtoisie Principia

■ Calculs de structures

Zoom sur zone d'intérêt

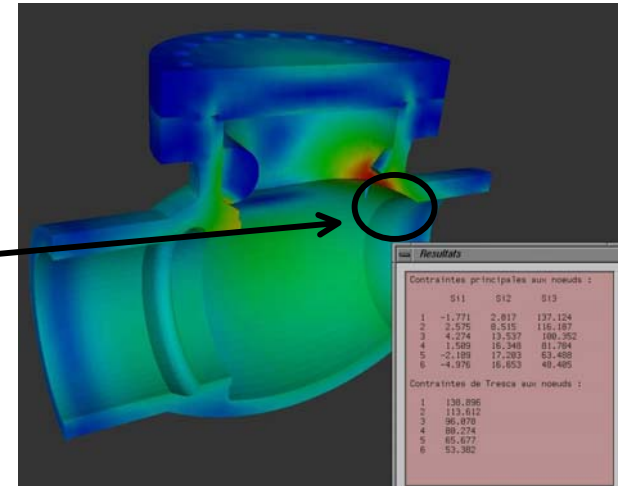


Courtoisie EDF

■ Calcul thermomécanique

Sélection contrainte par la surface

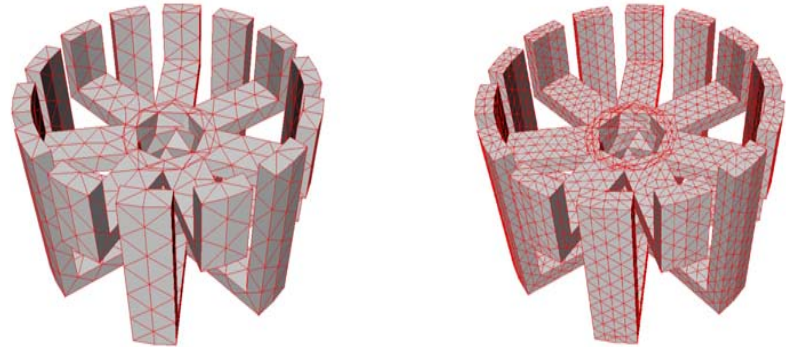
- 500 000 éléments x 10 vannes
- 100 pas de temps
- 15 chargements distincts



Simplification statique des maquettes

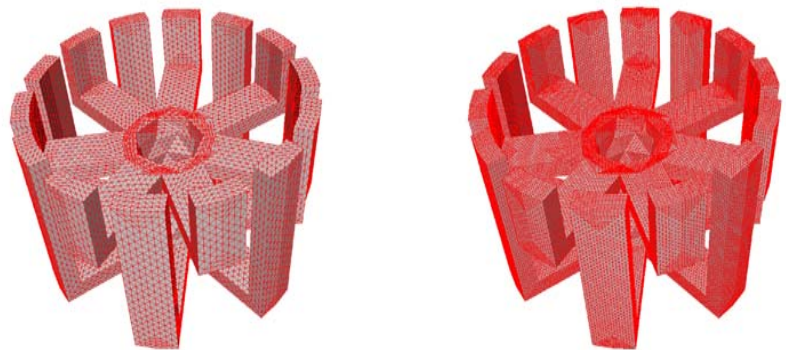
■ Avantages :

- Simplification robuste et pertinente / distorsion
- Modèle « compilé »
 - ◆ Triangle strips, display lists...



■ Inconvénients :

- Perte d'information définitive
- Occupation mémoire supplémentaire



Courtoisie OpenCascade

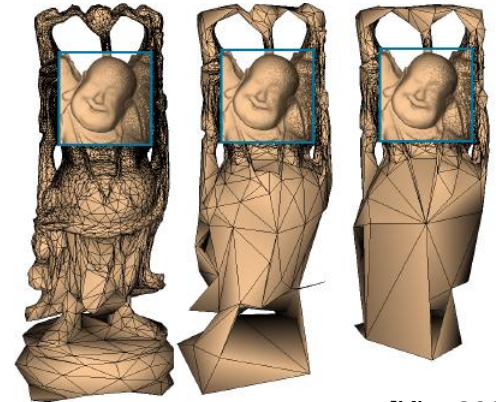
Simplification dynamique des maquettes

■ Avantages :

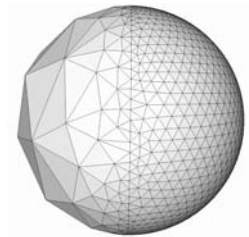
- Résolution adaptative
- Pas de perte d'information

■ Inconvénients :

- GPU mal exploité
 - ◆ Modèle non compilé
- CPU sur-exploité
 - ◆ Structure de donnée traversée à chaque pas de temps

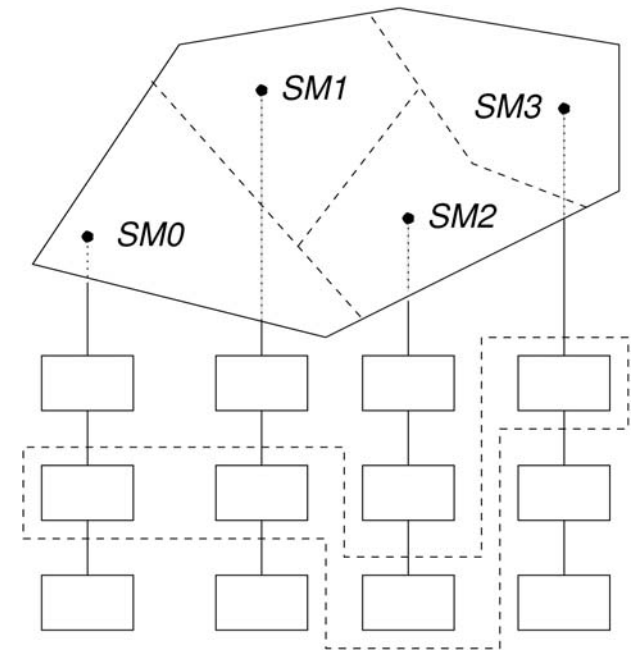


[Kim 2003]



Simplification sans perte

- Approche hybride
- Partitionnement en sous-modèles
- Hiérarchie dynamique des sous-modèles
- Traitement statique des sous-modèles
- Graphe dual du modèle global



Exemples

■ Club de golf

- ◆ 1 700 000 facettes, 150 sous-domaines, 9 secondes



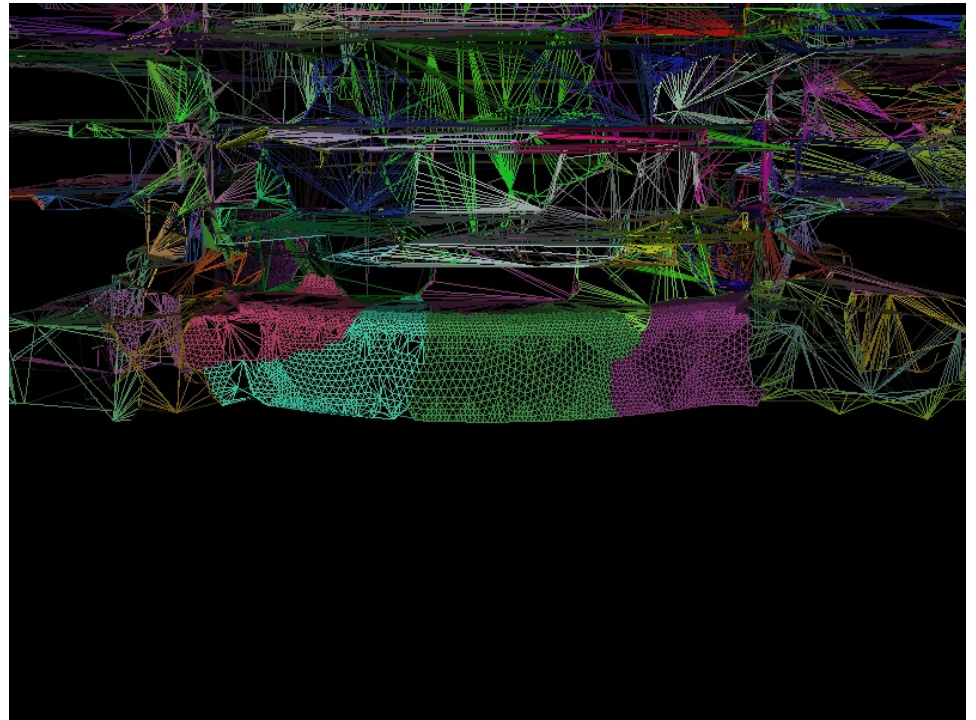
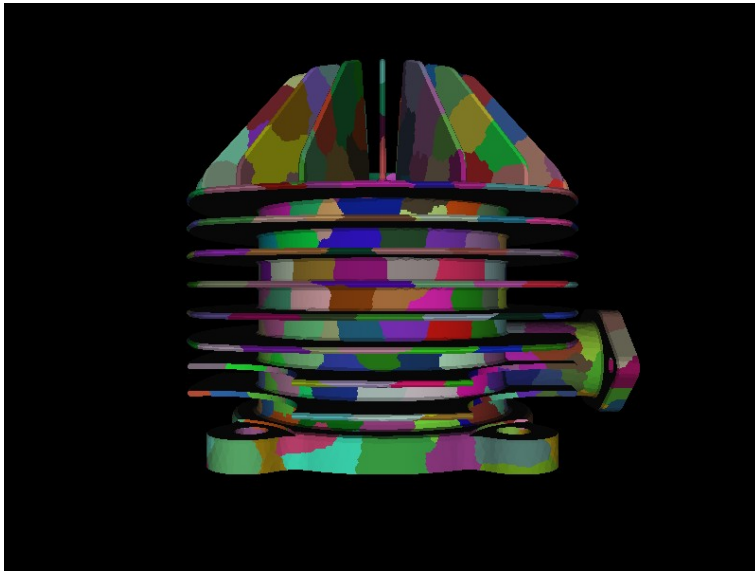
■ Jante

- ◆ 1 100 000 facettes, 150 sous-domaines, 5 secondes



Culasse

- Traitement 6 min : 600 sous-maillages
- Analyse interactive



Performances

Modèles Images par s	Jante	Club de golf	culasse
Haute résolution	5,1	2,8	<<1
Basse résolution	110	90	50
Multi-résolution	40	37	27

Conclusion partielle

- Traitement interactif de maillages
 - Sans perte d'information
 - partitionnement

- Mailles volumiques
 - Partitionnement
 - Simplification


- Évolution temporelle
 - Maillage entièrement dynamique

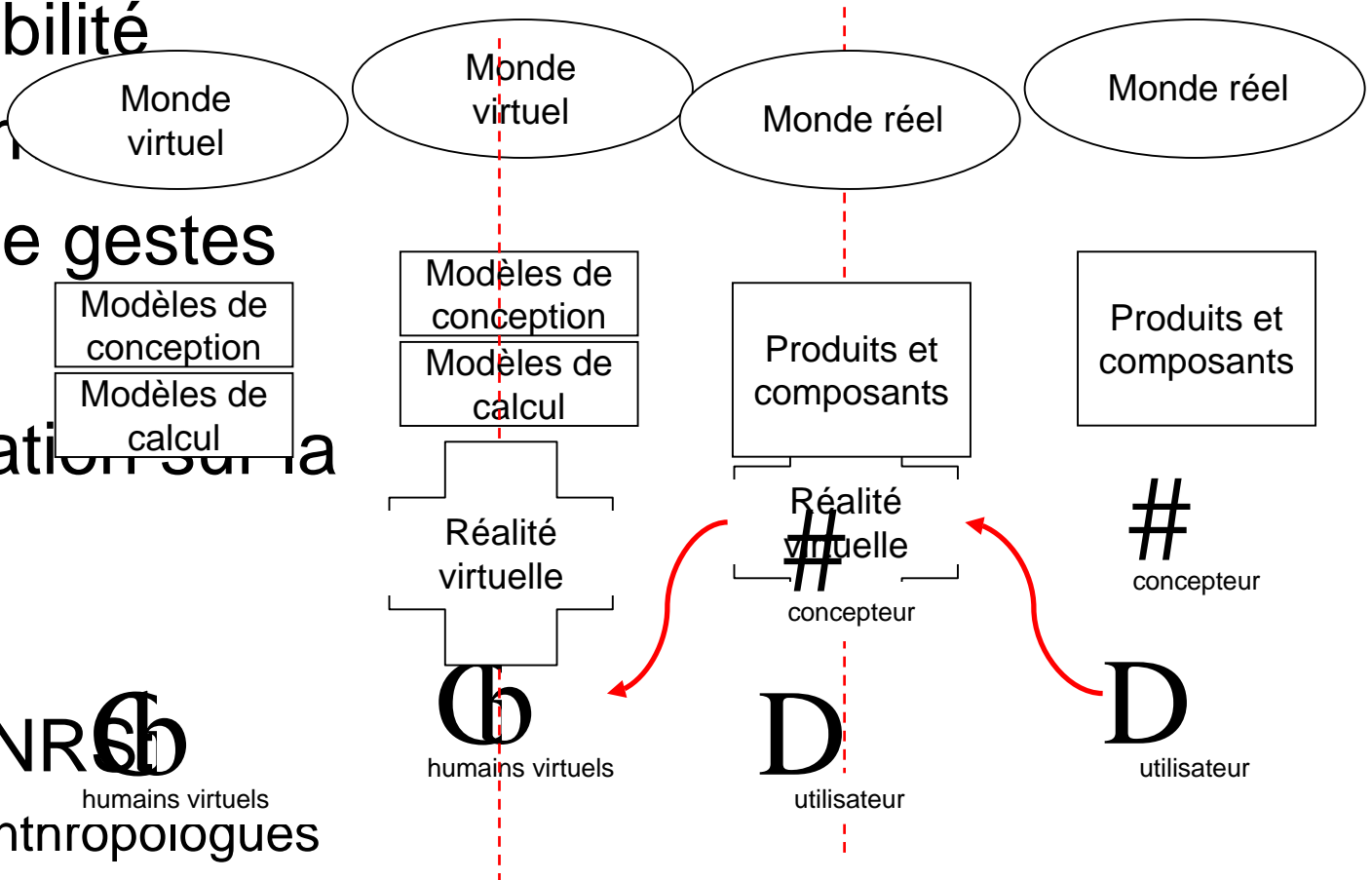
- Retour sur conception

Humain virtuel

- Credo
- Prototypage virtuel
- Interactions entre objets
- Couplage simulation/RV
- **Humain virtuel** →
 - Problématique
 - Contributions
 - Conclusion partielle
- Pistes et conclusion

Peupler les mondes virtuels

- Accessibilité
- Ergonomie
- Étude de gestes
- Focalisation sur la marche
- ATIP CNRS  humains virtuels
 - Paléoanthropologues



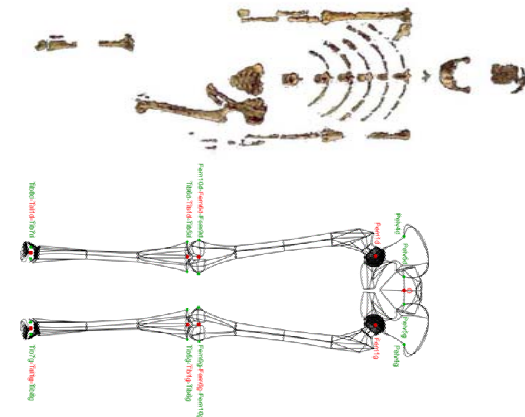
Simulation de la marche

- Adaptation de mouvement
 - Importantes bases de données
 - Représentation synthétique du mouvement
 - Adaptation morphologique
 - Interpolation

- Dynamique inverse et directe
 - Mouvements plus lisses
 - Accès aux efforts/couples : pénibilité
 - Calcul des couples (asservissement)

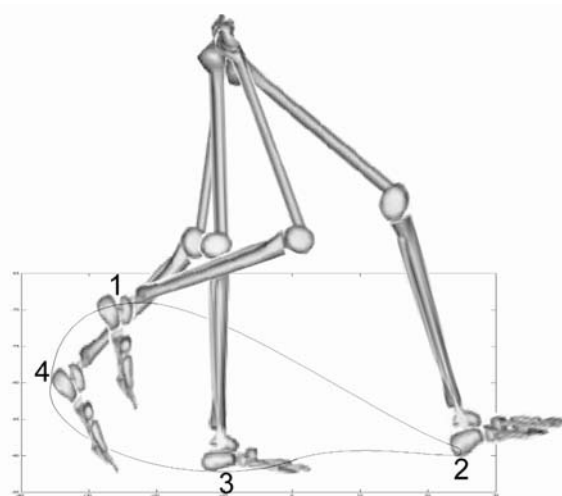
Méthode d'adaptation

- Capture de mouvements : données réelles
- Adaptation morphologique :
 - Influence géométrique
 - Influence de la posture
- Méthode :
 - Construction du squelette
 - Choix du mouvement le plus proche
 - Construction du mouvement adapté



Représentation

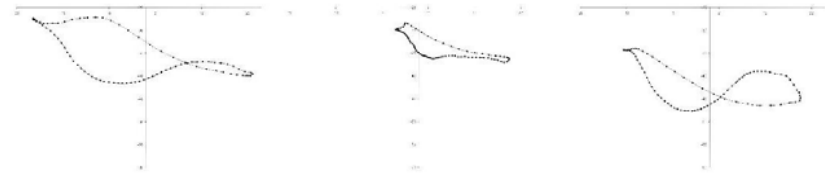
- La poulaine : représentation compacte



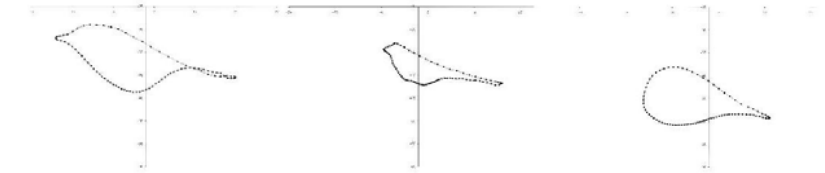
- Ajustement automatique d'un polynôme
- Extraction des dimensions des membres

- Variation morphologique et posturale
- Base :
 - 40 sujets, 120 marches

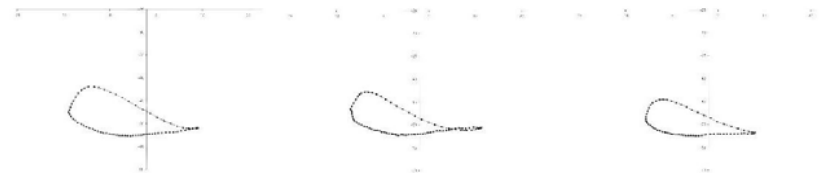
Singe



Intermédiaire



Normal

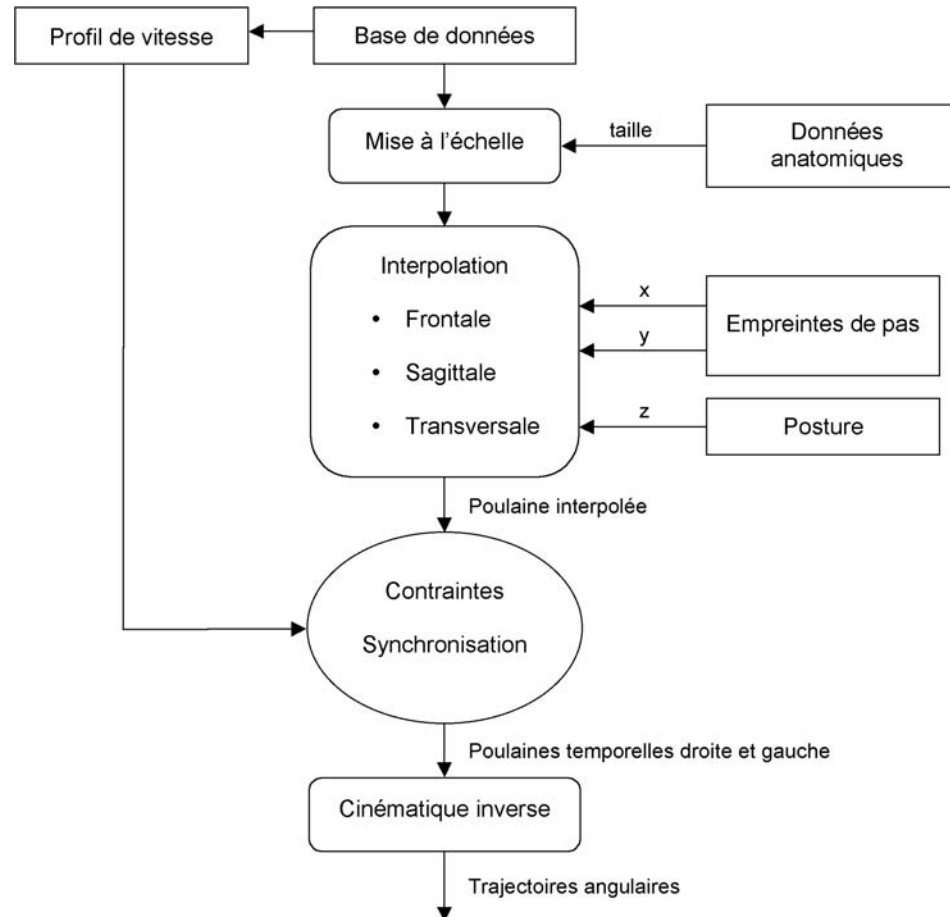


Sujet 1

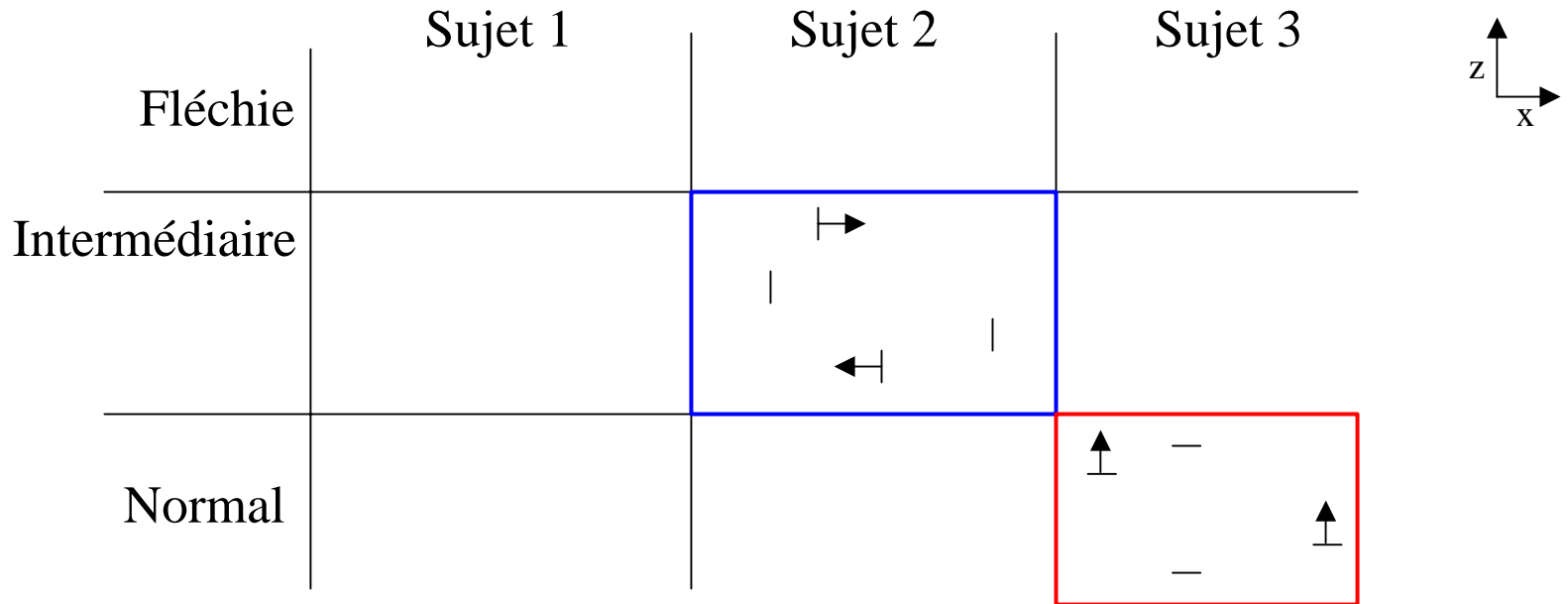
Sujet 2

Sujet 3

Méthode

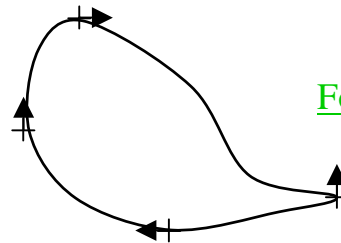


Interpolation décorrelée



1. choix du sujet
2. choix de la posture
3. Poulaine

lg pas
] hauteur



Forme finale

Résultats

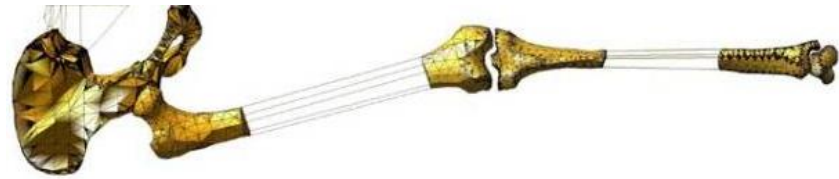
QuickTime™ et un
décompresseur H.264
sont requis pour visionner cette image.

De l'homme à l'hominidé

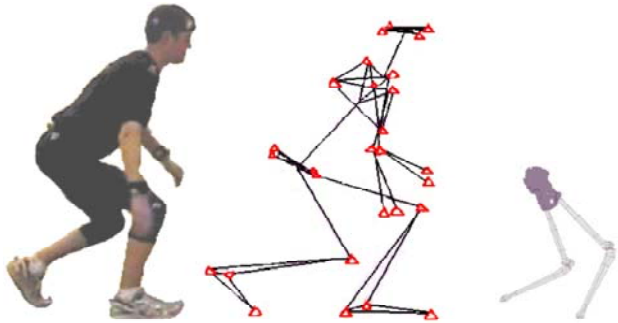
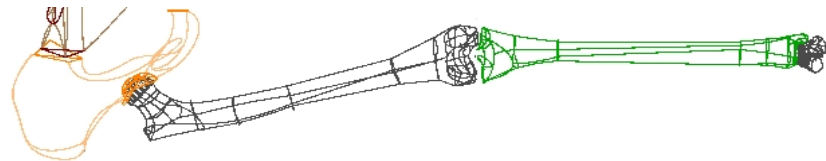
■ Un outil de tests d'hypothèses

■ La morphologie du squelette

● Reconstruction 3D

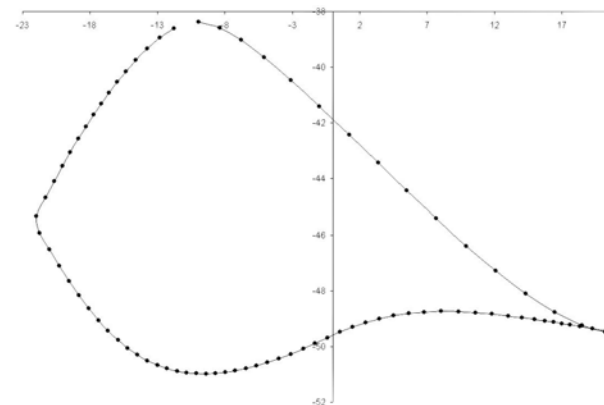


● Une hypothèse de réarticulation :



Hypothèses du mouvement

- Longueur de pas
- Posture naturelle
- Vitesse de déplacement
- Rotations du bassin
- Choix d'interpolations



Lucy : australopithecus afarensis

QuickTime™ et un
décompresseur H.264
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur H.264
sont requis pour visionner cette image.

■ Longueur de pas

■ Posture

Conclusion et perspectives

- Création d'un mouvement de marche adapté à:
 - une morphologie
 - une posture
- Captures de mouvements réels
- Représentation spécifique et interpolation

- Augmentation de la base de données
- D'autres mouvements :
 - Haut du corps
 - Préhension
- De la mécanique
 - Dynamique directe et inverse

Pistes et conclusion

- Credo
- Prototypage virtuel
- Interactions entre objets
- Couplage simulation/RV
- Humain virtuel
- Pistes et conclusion

Conclusion

- Prototype virtuel
 - ◆ Chaîne complète et modèles simplifiés
 - ◆ Problématique de la validité de l'objectif pour la conception
- Modèles d'interaction
 - ◆ Approches en ligne
 - ◆ Couplage avec la détection
 - ◆ Problématique du multi-échelle et du pré-calcul hors ligne
- Analyse de résultats
 - ◆ Aide à l'analyse
 - ◆ Problématique du retour sur conception
- Humain virtuel
 - ◆ La marche
 - ◆ Aller vers la dynamique : causes du mouvement
 - ◆ Problématique de la plausibilité

Multi-représentation et hiérarchie

■ Multi-modèles

- Solides rigides et solides déformables
 - Niveau d'observation
- Humain virtuel hiérarchique
 - Déplacement
 - Préhension

■ Multi-fréquences

- Phénomènes de temps caractéristiques différents
 - Niveau d'observation

Les contributeurs

- Christofer Kühn (thèse)
- Guillermo Andrade (post-doc)
- Mathieu Renouf (post-doc)
- Frédéric Beauchamp (thèse)
- Jean-Marie Souffez (DEA + thèse)
- Nicolas Pronost (DEA + thèse)
- Sébastien Gouleau (DEA)

Merci de votre attention

Merci de votre attention

Implications

■ Contrôle de la simplification

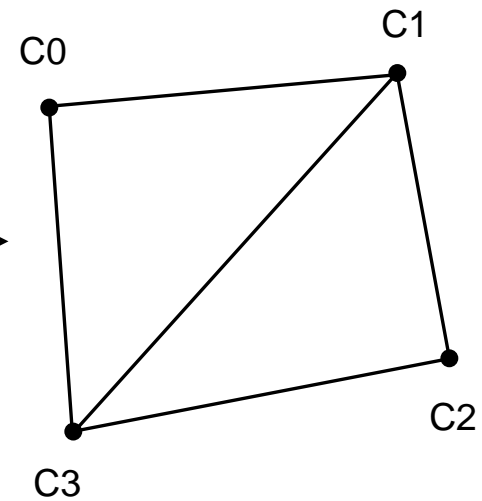
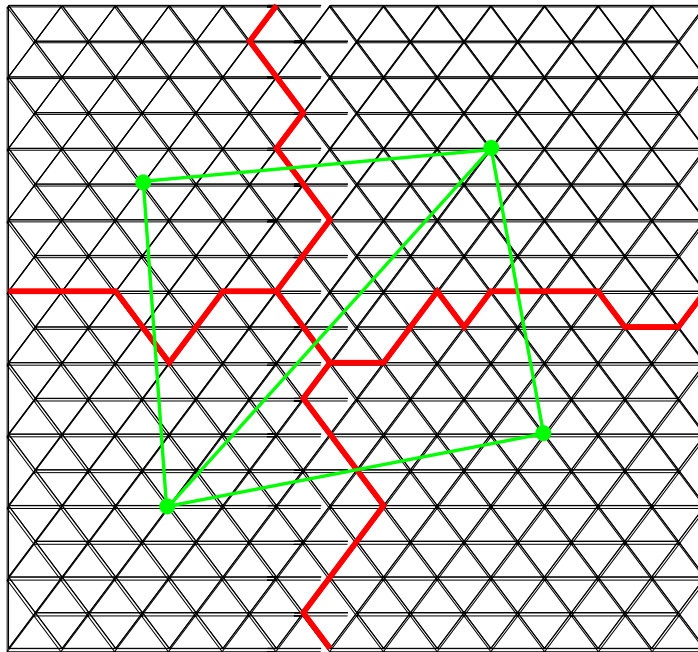
- Simplification statique ?
 - ◆ ok pour maquette virtuelle
- Simplification dynamique ?
 - ◆ ok pour maquette numérique

■ Gestion du multi-échelle

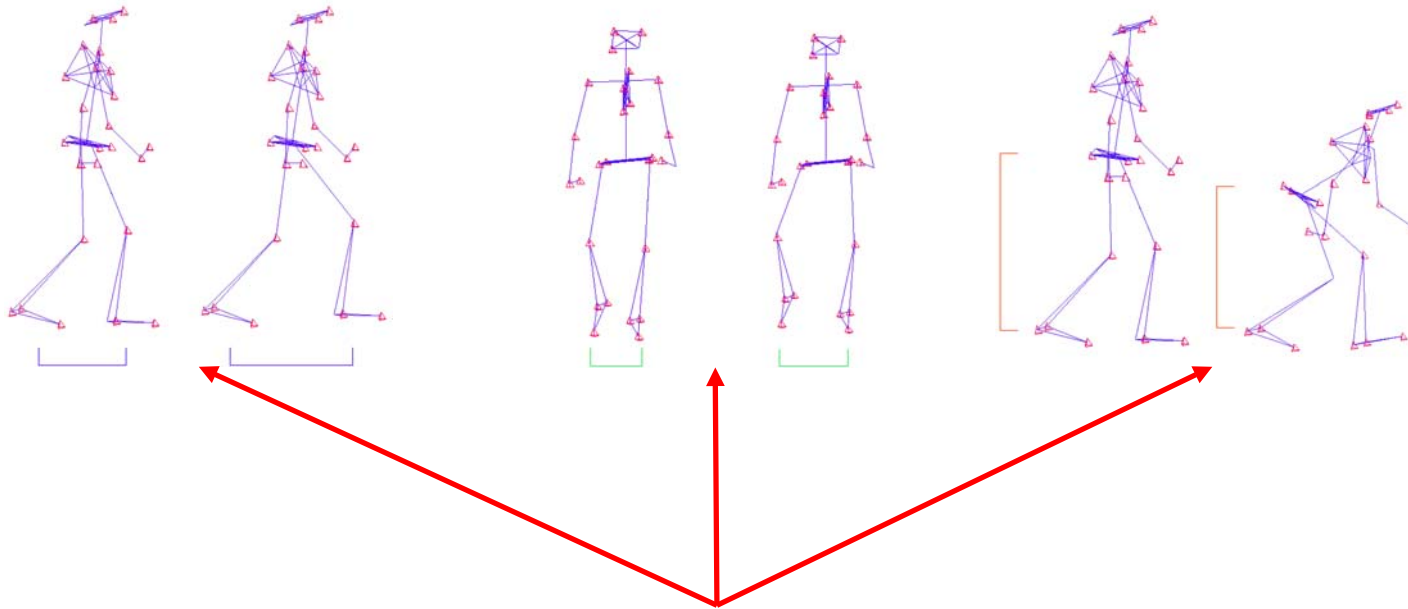
- Ne pas perdre la pertinence originale du modèle
- Une perte d'information est inacceptable

Partitionnement et graphe dual

■ Principe



Interpolation dans les trois directions



- Interpolation orthogonale au plan frontal
- Écartement des pieds

Courbe reconstruite

- Selection sur acquisitions différentes
- Validation sur la base
- Synchronisation
- Symétrisation

