

Vérification et validation

Comparaison de modèles déformables pour la GMCAO

Emmanuel Promayon

Emmanuel.Promayon@imag.fr

<http://www-timc.imag.fr/Emmanuel.Promayon>



Université Joseph Fourier / CNRS UMR 5525

Plan

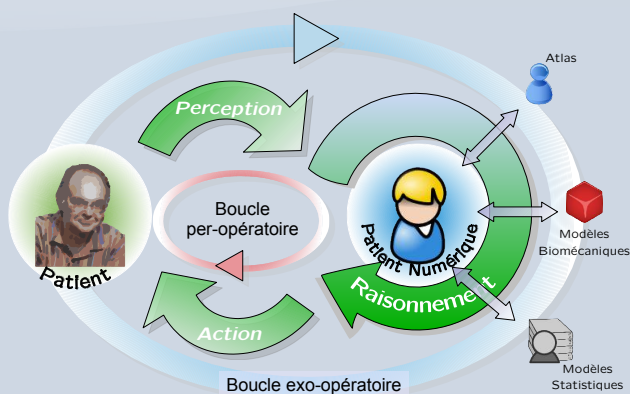
- Introduction
- Vérification et Validation pour la GMCAO
- Comparaisons
- Exemples
- Conclusion

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

2

Modèles déformables en GMCAO



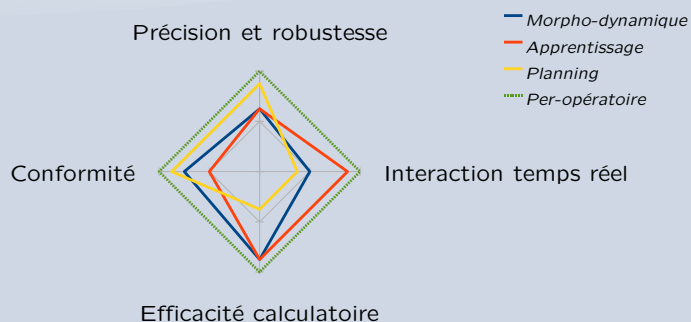
- ## Les simulateurs
- En GMCAO, quatre types de simulateurs/objectifs
 - simulateur d'apprentissage
 - simulateur morpho-dynamique (comprendre, diagnostiquer)
 - simulateur pour le planning
 - simulateur per-opérateur (le « graal »)
 - Émergence de simulateurs biologiques (type morpho-dynamique)

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

4

Simulateurs / caractéristiques



Motivations (défis !)

- Simuler
 - les déformations de tissus mous
 - de manière précise et réaliste
 - spécifiquement à un patient donné
 - en incluant les interactions avec l'utilisateur / le système de navigation chirurgical
 - en temps interactif !
- Construire un patient numérique le plus proche possible du patient réel

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

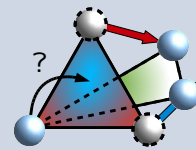
6

Nombreux modèles

- Il existe de très nombreuses approches
 - discrètes
 - continues
 - hybrides
- Utilisant des propriétés différentes
- Utilisant des méthodes de résolutions différentes

Points communs

- Nœud / DDL / particule discrète → atome
- Dans toutes les approches nodales, on considère
 - Les contraintes, forces, pressions sur les atomes
 - Les déplacements élémentaires des atomes
 - Les déformations locales
 - La loi de comportement liant sollicitations et forces élastiques



6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

7

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

8

Pas de modèle ultime

- On a
 - Plusieurs objectifs / plusieurs types de simulateurs
 - Nombreux modèles possibles
 - En GMCAO, les informations disponibles sont partielles
 - Géométrie
 - Propriétés des tissus / paramètres
 - Interactions
 - Chargements / conditions limites mal connues
- Le modèle « complet » et universel n'existe pas !

Biomécanique en GMCAO

- Recherche d'un compromis entre
 - Complexité,
 - Précision et
 - Rapidité
- En GMCAO, le « bon » modèle = celui qui délivre le meilleur compromis en fonction d'une utilisation précise

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

9

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

10

Utilisation en GMCAO

- Comment faire accepter l'utilisation de simulations biomécaniques dans les salles d'opération ? (une fois démontré le Service Médical Rendu)
- Vérifications et validations, et plus particulièrement dans une situation donnée

Plan

- Introduction
- **Vérification et Validation pour la GMCAO**
- Comparaisons
- Exemples
- Conclusion

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

11

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

12

Validation

- Dans la littérature médicale, la validation est un argument crucial
- En animation/informatique graphique, presque toujours dans la section "to do" / "future works" !
- Pourquoi ?
 - Difficile à faire / organiser, long, ...
 - Peut être négatif (difficile de faire passer un papier qui finit par "l'étape de validation montre bien que notre modèle ne fournit pas des simulations précises.")

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

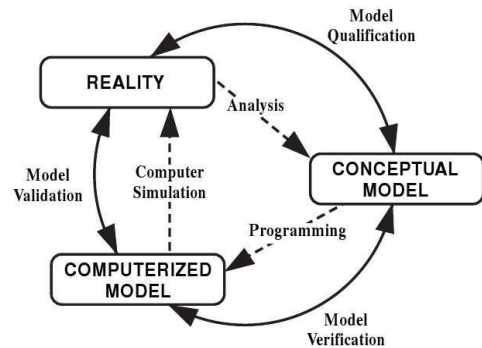
13

Vérification / Validation

Vérification

- Déterminer « solution »
- Validation « solution »
- Comparer « solution »

(Anderson, 1995)



(Oberkampf, Trucano, Hirsch, Appl. Mech. Review, 2004)

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

14

Restriction

- Impossible à faire dans le cas général !
 - On se restreint donc à
 - Validation et vérification de simulation par des modèles déformables pour la GMCAO
 - Proposition : utiliser des cas tests et produire vérification et validation au travers de comparaisons
- Arriver à une réponse « en pratique » à ce problème très compliqué de VV

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

15

VV en pratique

- 4 types de simulateurs
 - Apprentissage : l'interaction est le plus important l'exactitude/spécificité à un patient ne sont pas nécessairement recherchées
 - Autres simulateurs : utilisés par le clinicien pour prise de décision → la validation est nécessaire
- Vérification et validation
 - Réalisme physique
 - Paramètres (approche continue ou discrète)

6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

16

Vérification

- Deux cas
 - Utilisation de logiciels commerciaux MEF (ANSYS,...) : vérification déjà effectuée (normalement)
 - ⚠ « mauvaise » utilisation possible (ex: élément hexa plus généraux au lieu d'élément poutre)
 - Code Maison : vérification à faire brique logicielle par brique logicielle
- Vérification interne
 - Il faut s'assurer de la *reproductibilité* des tests, version après version, modification après modification
- Vérification externe
 - Entre logiciels il faut pouvoir effectuer les mêmes tests !

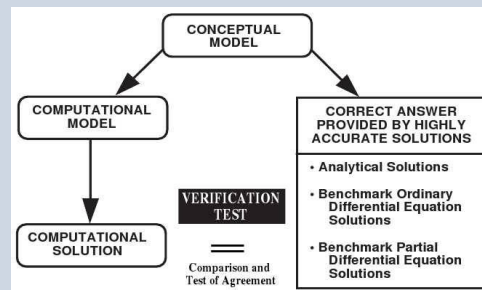
6 Février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

17

Comparaisons pour la vérification

- La vérification peut se faire à travers des comparaisons
 - Solutions analytiques et/ou gold-standard vs modèle
 - Pour un modèle donné en faisant varier les paramètres de simulation (maillage, etc...)



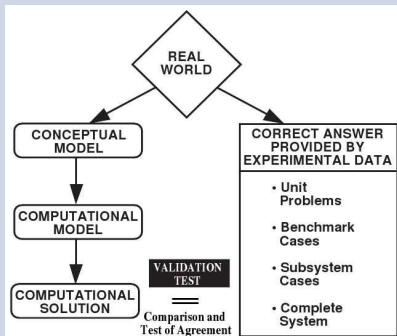
(Oberkampf, Trucano, Hirsch, Appl. Mech. Review, 2004)

6 Février 2009

18

Comparaisons pour la validation

- La validation peut se faire à l'aide de comparaisons
 - Expériences contrôlées (in vitro)
 - Données médicales ou biologiques (in vivo)



6 février 2009

(Oberkampf, Trucano, Hirsch, Appl. Mech. Review, 2004)

19

Plan

- Introduction
- Vérification et Validation pour la GMCAO
- Comparaisons**
- Exemples
- Conclusion

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

20

VV → tests de comparaisons

- Ici on cherche le meilleur compromis
- Sur une expérience test, on définit des métriques d'erreur et on peut comparer quel modèle/paramètre fournit le meilleur compromis !

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

21

Types de comparaisons

- Trois degrés de comparaisons :
 - Simple (in silico)
 - Solutions analytiques (gold standard) ou
 - Solutions MEF (silver standard, certifiées)
 - Difficile (in vitro)
 - Expériences contrôlées, matériau connu
 - problème des conditions limites incertaines
 - Très difficile (in vivo)
 - Données médicales ou biologiques
 - paramètres à mesurer, conditions d'expérience incertaines,

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

22

Erreurs mesurées

- Deux types d'erreur
 - Erreur de modélisation, i.e. incohérence entre le modèle et la réalité physique (au niveau de la géométrie, des conditions limites, des propriétés des matériaux et des lois constitutives,...)
 - Erreur numérique (discrétisation, convergence, arrondis,...)
- On choisit ici de ne pas expliciter ces erreurs de manière indépendante mais de définir des métriques d'erreur globales pour la comparaison (toujours dans l'idée d'avoir quelque chose utilisable « en pratique »)

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

23

Métriques

- Sans faire d'assumption sur les modèles, les métriques de comparaisons doivent rester géométriques
- Au niveau des atomes (ddl, noeuds, masses,...)
 - Déplacements
 - Erreurs positions simulées des atomes p/r aux positions « réelle » (e.g. erreur relative sur la norme d'énergie)
 - Forme du contour
 - Erreur de surface
- Au niveau des cellules (triangles, tétra, hexa...)
 - Plus difficile (représentations géométriques différentes)
 - Mais possible (déformations)

6 février 2009

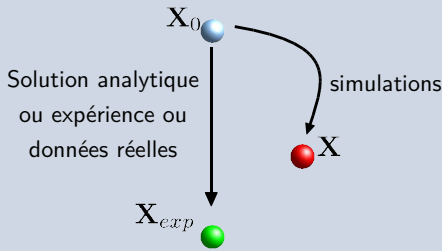
(c) 2009 - Emmanuel Promayon

24

Erreurs de simulation

- Exemple : erreur relative sur la norme d'énergie

$$\varepsilon_{REN} = \frac{1}{n} \sum_n \frac{\|X X_{exp}\|}{\|X_0 X_{exp}\|}$$



6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

25

Quels comparaisons mettre en place ?

- Comparaisons = définition d'une situation précise / cas test (modèle, paramètres, conditions limites, paramètres de résolution...)
- langages de description des tests indépendants

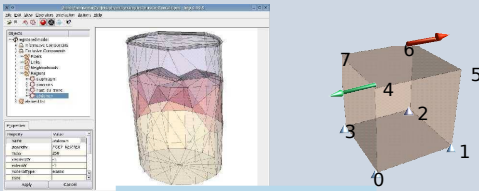
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

26

Formalisation : 2 langages XML

- 2 langages XML + API ont été définis pour décrire des expérimentations spécifiques (cas test)
 - PML (Physical Model markup Language) décrit la géométrie des objets et les paramètres associés
 - LML (Load Markup Language) définit les contraintes et chargements à appliquer au cours de la simulation



(Chabanas, Promayon, ISMS'04)

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

27

Plan

- Introduction
- Vérification et Validation pour la GMCAO
- Comparaisons
- Exemples
 - Vérification
 - Validation
- Conclusion

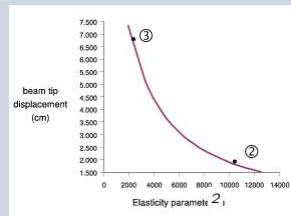
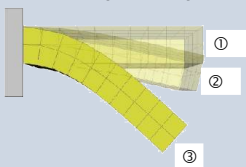
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

28

Comparaisons analytiques

- Poutre, métrique déplacement



- Exemple : vérifier qu'un paramètre d'élasticité d'un modèle discret peut être assimilé à un module d'Young (loi de comportement linéaire)

(Marchal, Promayon, Troccaz, ISVC'05)

(Nesme, Marchal, Promayon, Chabanas, Payan, Faure, Transworld Research Network 05)

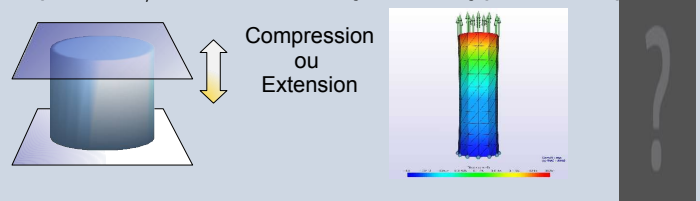
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

29

Comparaisons analytiques (forme)

- Compression/extension du cylindre hyper-élastique



- On peut comparer les erreurs commises p/r solution analytique

— méthode discrète

- - - - MEF (ANSYS)

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

29

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

30

Validation (comparaisons expérimentales)

- Expériences contrôlées difficiles
 - Construire un modèle physique réel
 - difficile de garantir la rhéologie/propriétés physiques d'un objet construit (erreurs dans la construction ou l'assemblage, propriétés réelles,...)
 - Contrôler toutes les conditions expérimentales
 - difficile d'être très précis (erreurs dans le contrôle des positions ou des forces, conditions de frottements...)
 - Mesurer les déplacements (erreur de segmentation,...)
- Exemples
 - truth cube
 - cylindre

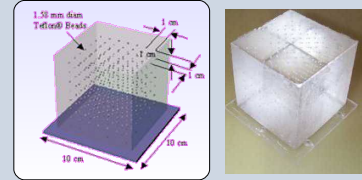
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

31

Construction du Truth-cube

- Truth Cube (Kerdok et al., 2003)



- Cube de silicone (propriétés mécaniques connues)
- Construit couche par couche
- 7x7 billes de téflon par couche

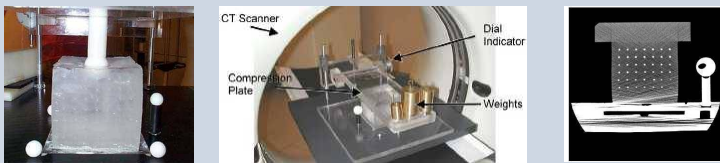
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

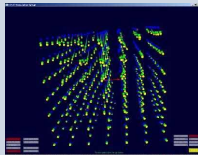
32

Expériences du Truth-cube

- Indentation/compression sous contrôle scanner TDM



- Segmentation de la position des billes



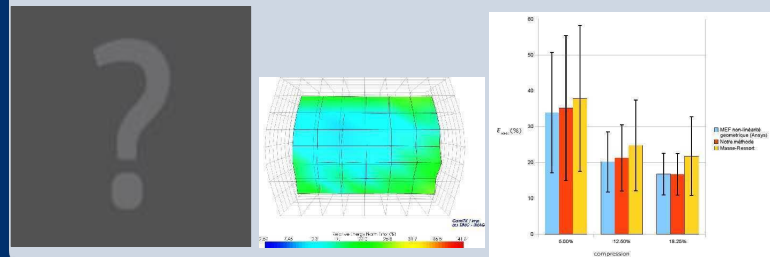
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

33

Comparaison avec le Truth-cube

- Simulation des expériences et comparaison des déplacements réels avec les déplacements simulés
- Erreur relative sur la norme d'énergie pour plusieurs méthodes, compression, ...



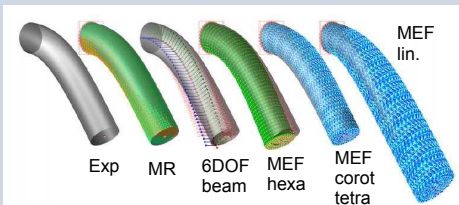
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

34

Cylindre

- Cylindre en ECOFLEX ($E=60\text{kPa}$, incompressible)
- SOFA



- Pas de marqueurs \rightarrow erreur de surface

Relative Energy Norm Error (%)	Relative Surface Error		
	Mean (mm)	Mean (%)	Standard Deviation
71.41	18.60	20.34	32.31
1.15	0.63	4.95	15.44
11.29	2.87	8.41	14.73
1.80	4.32	8.09	7.75
1.41	0.75	4.64	10.72

(Marchal, Allard, Duriez, Cotin, ISBMS 2008)

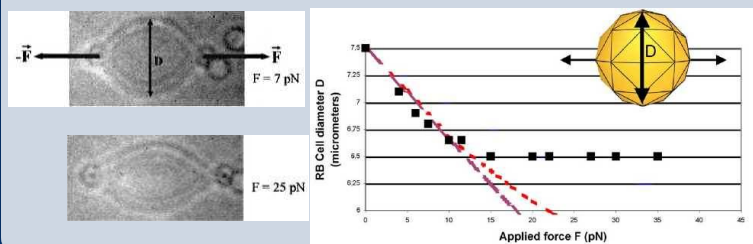
6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

35

Données réelles : géométrie

- D'autres validations sont possibles, notamment en utilisant les données pré/post opératoires
- À une autre échelle, on peut faire des comparaisons avec des expériences de micro-manipulations



6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

36

(Promayon, Martiel, Tracqui, Polymer & Cell Dynamics 2003)

Données réelles : surfaces

- Cas idéal : le clinicien a besoin d'une vérification post-opératoire par imagerie
 - Scanner pré et post-opératoire
 - Mesures précises des découpes osseuses et déplacements (conditions limites contrôlées = déplacements imposés)
 - Simulation des tissus mous
 - Comparaison des surfaces réelles / simulées



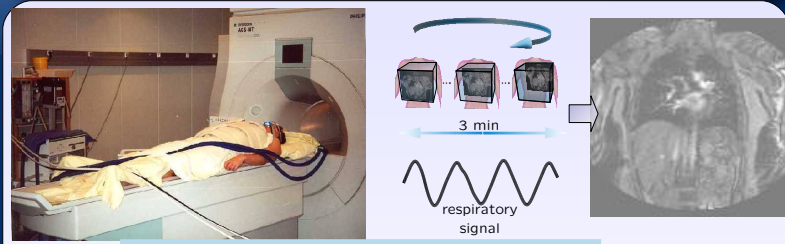
(Chabanas, Payan, ISMS'04)

(Luboz, Chabanas, Swider, Payan, CMBBE 2005)

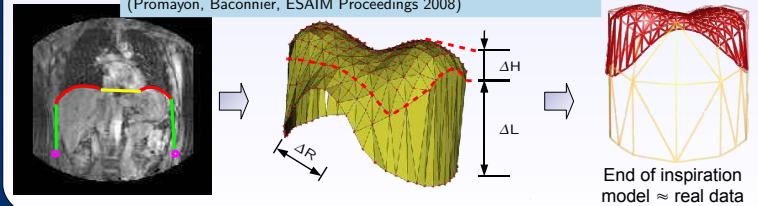
6 février 2009

37

Données réelles : mesures



(Craighero, Promayon, Baconnier, Lebas, Coulomb, Eur. Radiol 2005)
(Promayon, Baconnier, ESAIM Proceedings 2008)



Mesures in-vivo

- Pour la validation, mais aussi pour l'utilisation en per-opératoire, il faut connaître les paramètres
- Paramètres spécifiques à un patient donné → mesures in-vivo indispensables
- Plusieurs pistes possibles
 - Élastométrie
 - Mesures par indentation (TeMPeST)
 - Mesures par aspiration

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

39

Mesures par indentation

- Utilisation du prototype de TeMPeST



(Ottensmeyer, Salisbury, MICCAI 01)

- Problèmes rencontrés
 - Encombrement/accessibilité
 - Mouvements relatifs du corps/organe p/r pointe de mesure
 - Sensibilité aux vibrations



6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

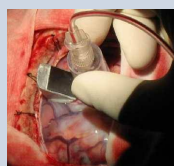
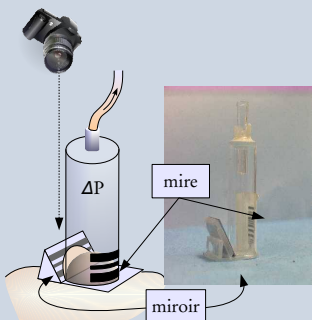
39

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

40

Mesures par aspiration

- Dispositif léger
- Aspiration + image
- Mesures ► loi de comportement
- Élasticité non-linéaire du cerveau



6 février 2009

(Schiaivone, Chassat, Boudou, Promayon, Valvidia, Payan, accepté MedIA 09)

41

Conclusion

- Vérification et validation peuvent se faire à travers des comparaisons
 - Perspectives : définir un cadre formel + environnement logiciel correspondant
- Les comparaisons permettent de
 - Trouver le meilleur modèle et/ou ses paramètres (le plus vite, le plus précis, le plus interactif) en fonction d'un certain nombre d'objectifs bien définis (tps de calculs, erreurs commises, type de comportement à prendre en compte...etc...)
 - Faire accepter ce compromis aux cliniciens

6 février 2009

(c) 2009 - Emmanuel Promayon

41

42

Vers un benchmark

- Perspective : modélisation par un langage XML des
 - Grandeurs et variables à mesurer/monitorer/observer
 - Paramètres de simulation (pas d'intégration, ...)
 - Critères d'arrêt de la simulation

→ Benchmark de modèles déformables (SOFA)

- Idées et bonnes volontés bienvenues !