



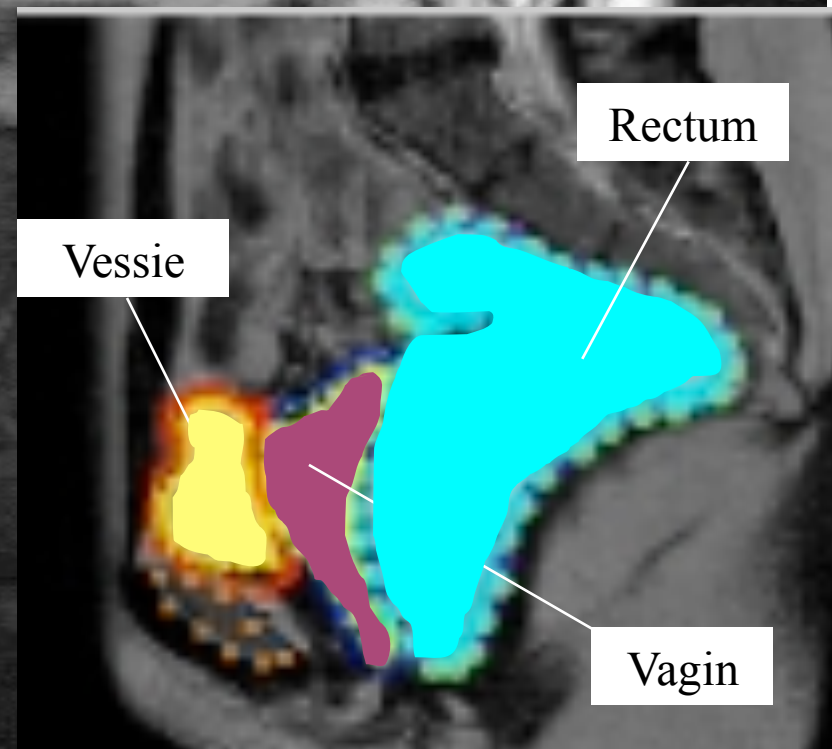
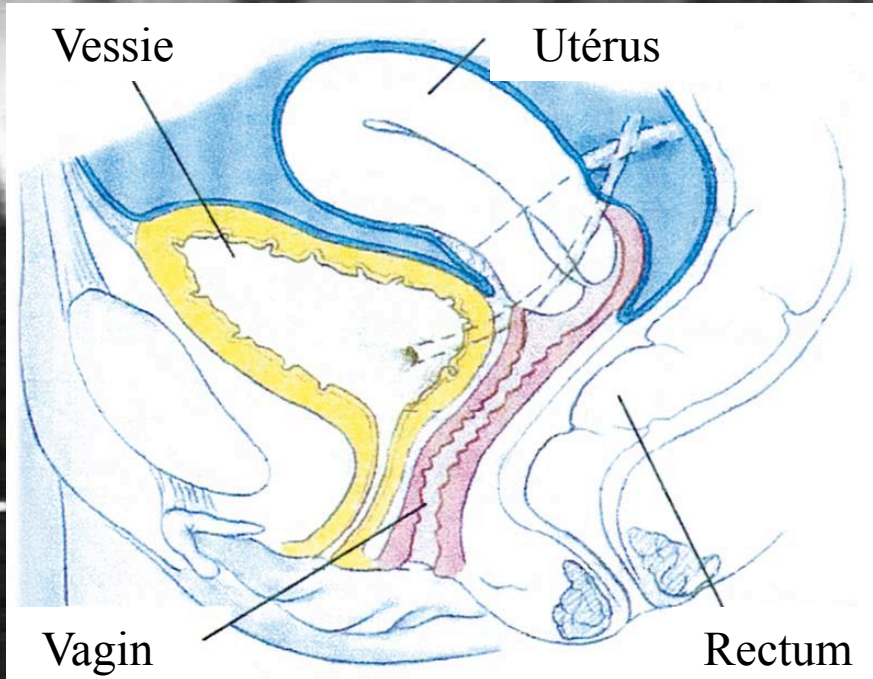
Modélisation mécanique et simulation EF de la cavité pelvienne

M Brieu^{LML}

C Rubod^{CHR}, P Dubois^{U703}, M Cosson^{CHR}



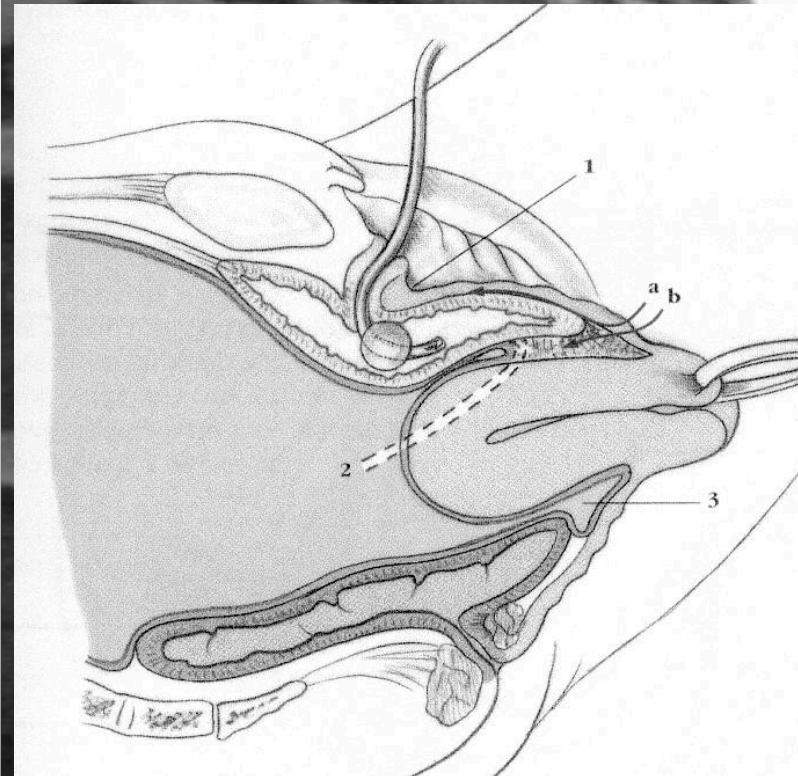
Anatomie du système pelvien



Prolapsus pelvien



- **Prolapsus**
 - 33% de la population féminine
 - 60% si > 60 ans
- **Facteurs de risque**
 - surpoids
 - (sur)activités physique
 - parité
- **Incidence**
 - ↑ / pays développés
 - ↑ / espérance de vie
- **Traitement**
 - Fonctionnel
 - Patientes âgées
 - Récidives 40%
 - Techniques nouvelles
- **Physiopathologie**
 - Mal connue



Pourquoi développer un modèle numérique du système pelvien ?

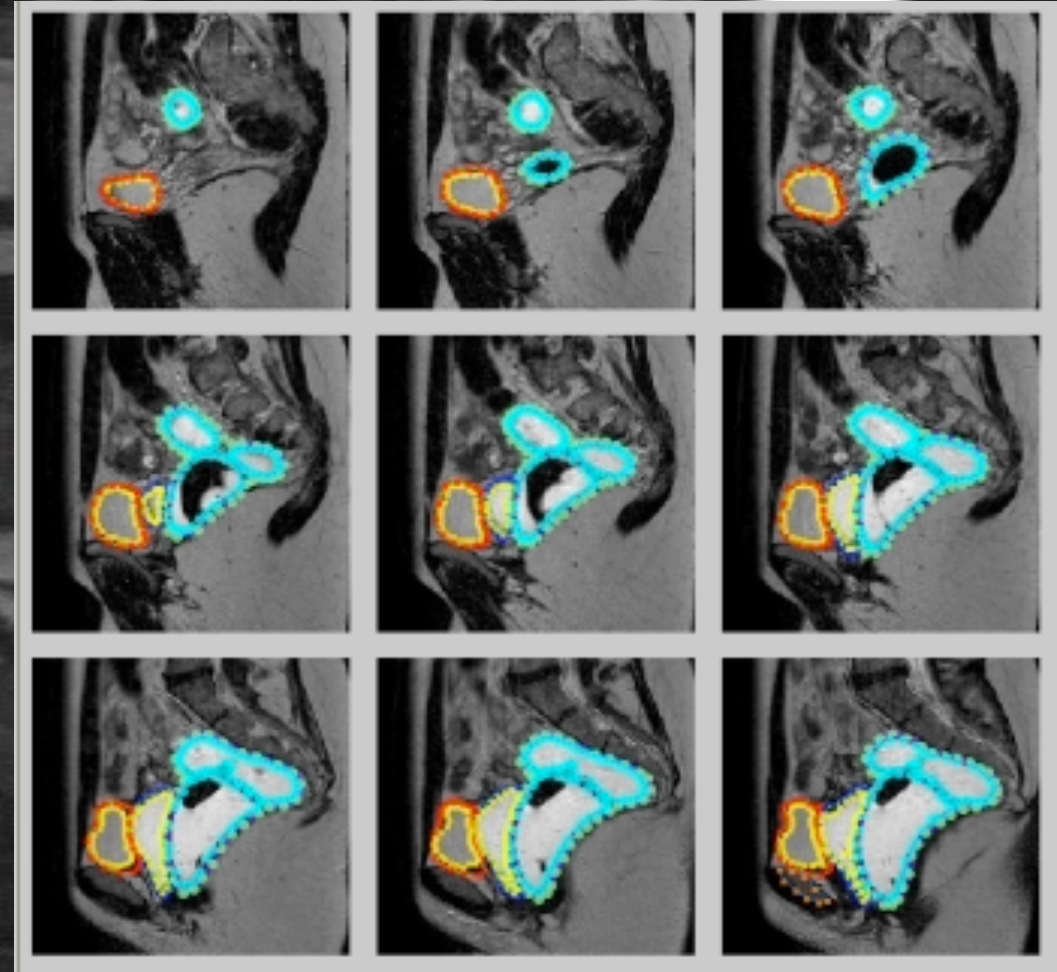
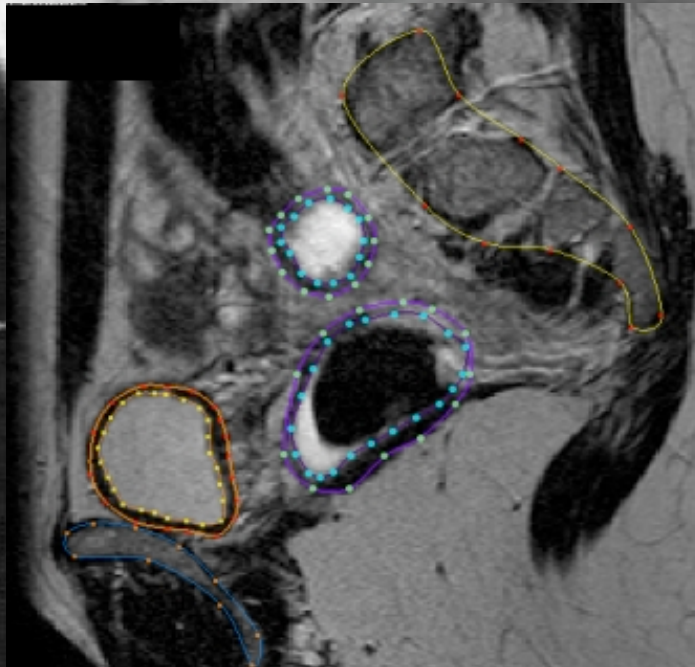


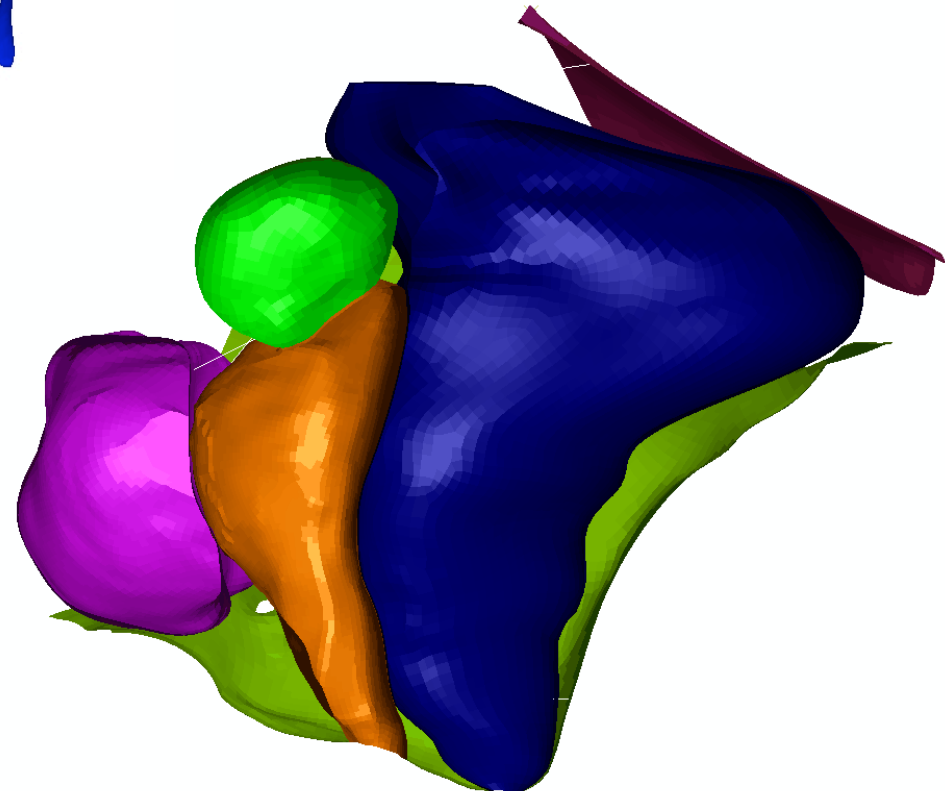
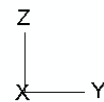
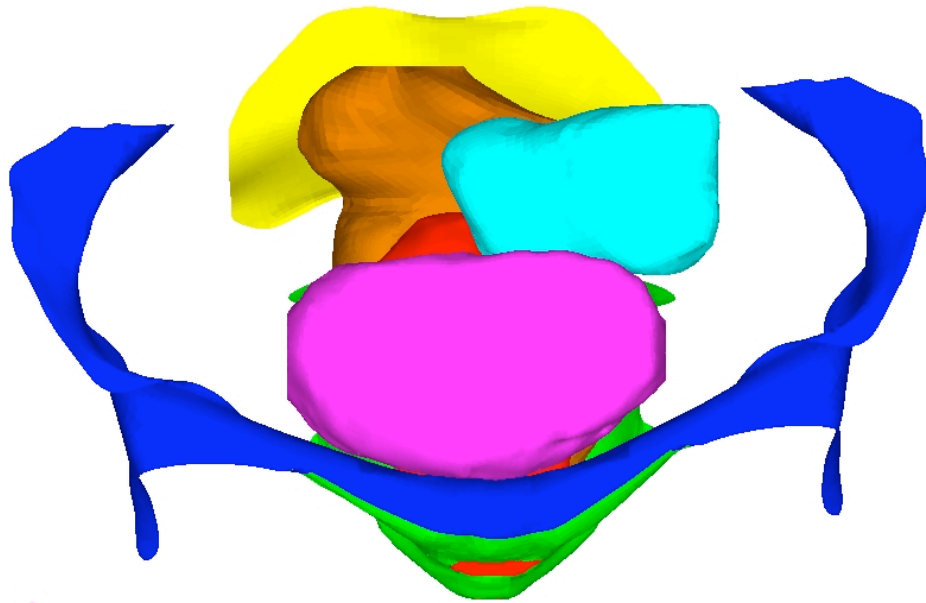
- **Compréhension de la physiopathologie des prolapsus**
- **Représentation et diagnostic des prolapsus**
- **Simulation des corrections chirurgicales**
- **Evaluation des techniques chirurgicales**
- **Enseignement**

Comment construire un modèle numérique ?

1. Etablir d'un modèle géométrique synthétisant les données obtenues par imagerie et études anat.
2. Définir les propriétés mécaniques des tissus et ligaments
3. Définir les conditions de chargements en efforts et déplacements imposés
4. Mettre en œuvre les outils de simulations
9. Valider par confrontation expérimentale

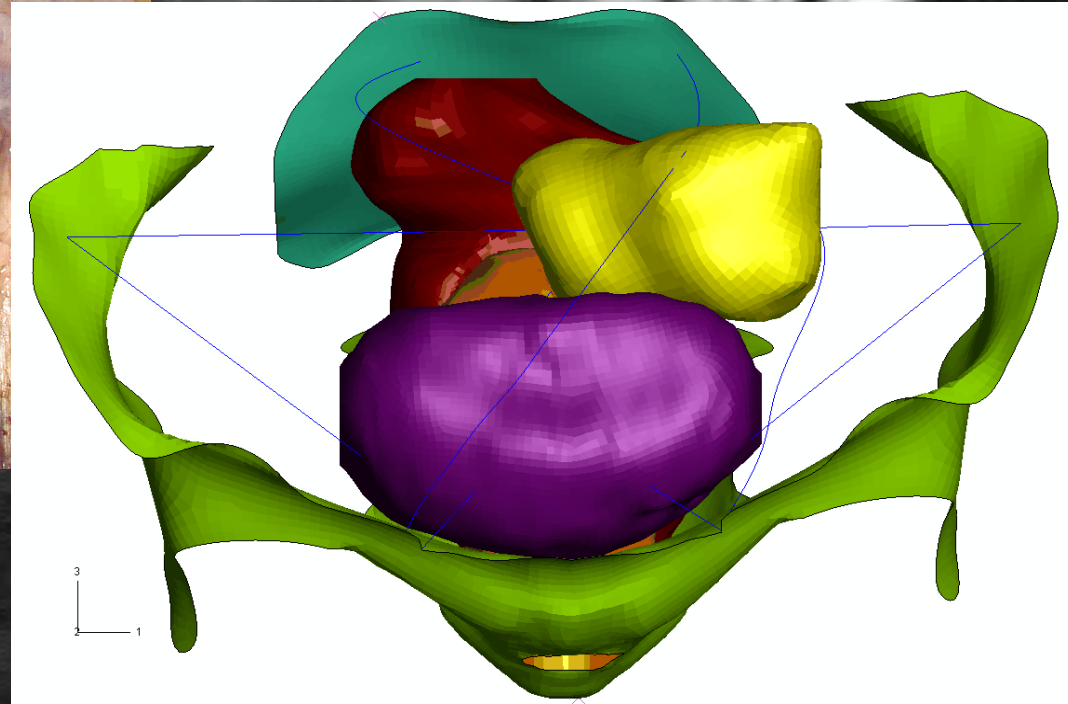
Définition d'un modèle géométrique







Complément par études Anatomiques et bibliographiques





Construction d'un modèle numérique (étape 2)

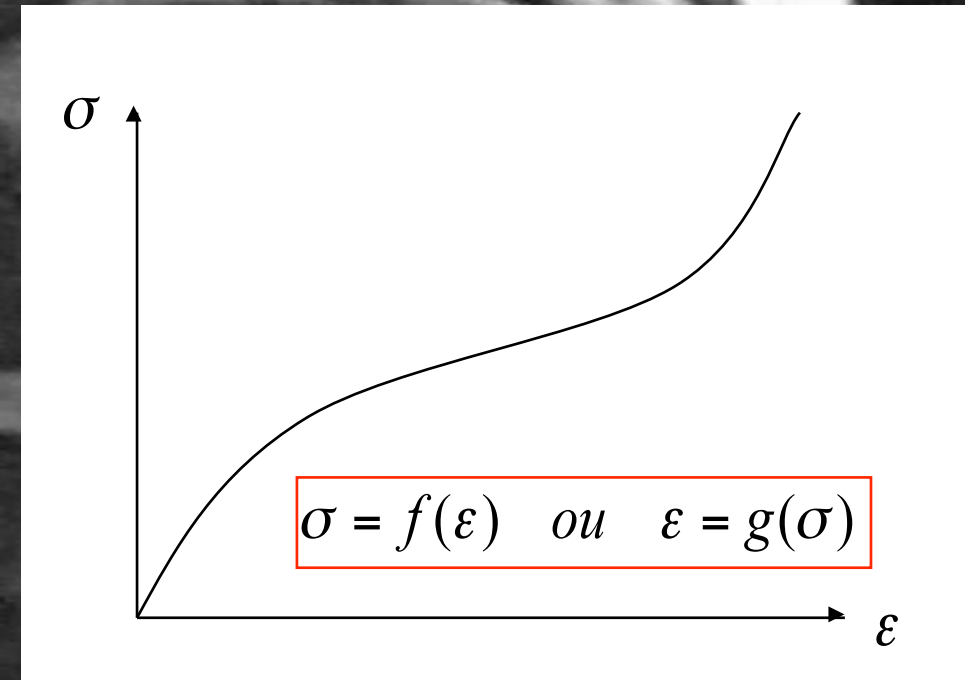
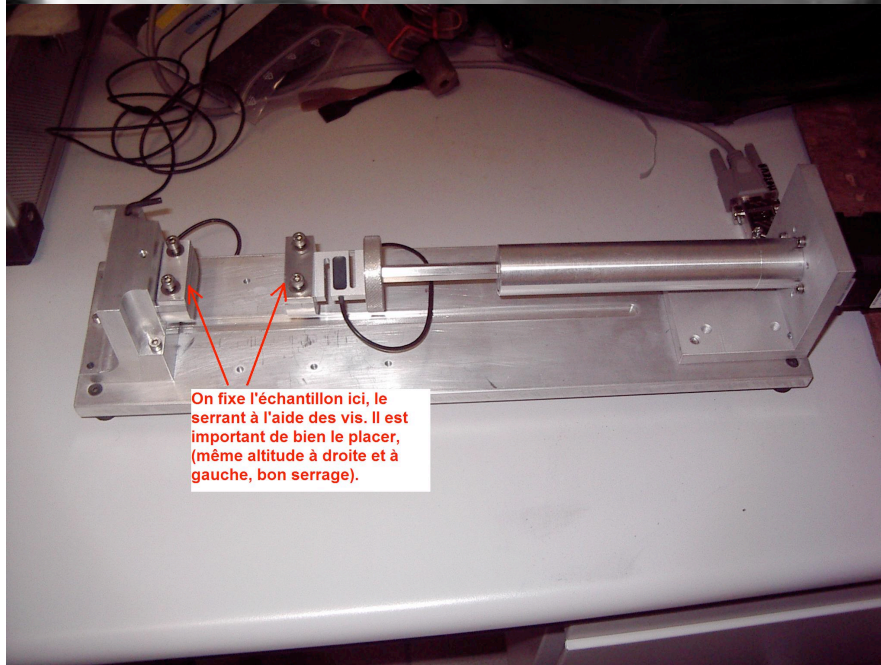


1. Etablir d'un modèle géométrique synthétisant les données obtenues par imagerie et études anat.
2. Définir les propriétés mécaniques des tissus et ligaments
3. Définir les conditions de chargements en efforts et déplacements imposés
4. Mettre en œuvre les outils de simulations
9. Valider par confrontation expérimentale



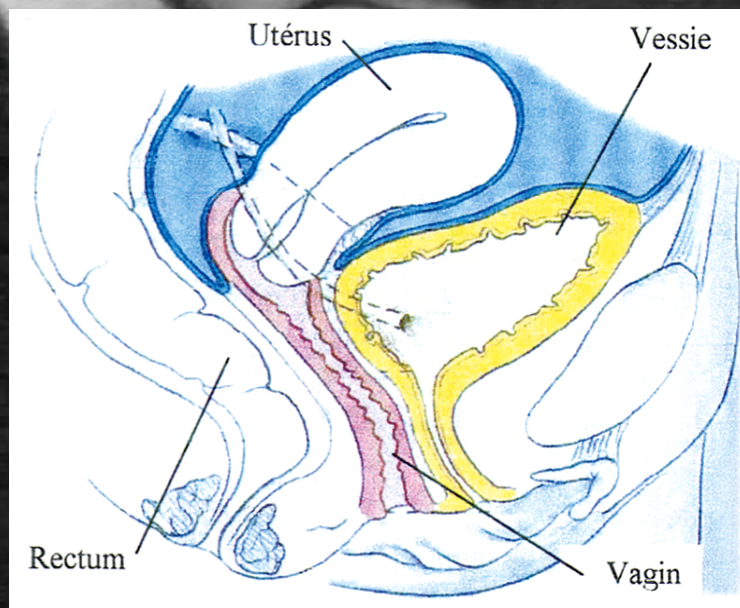


Caractérisation du comportement mécanique des tissus pelviens

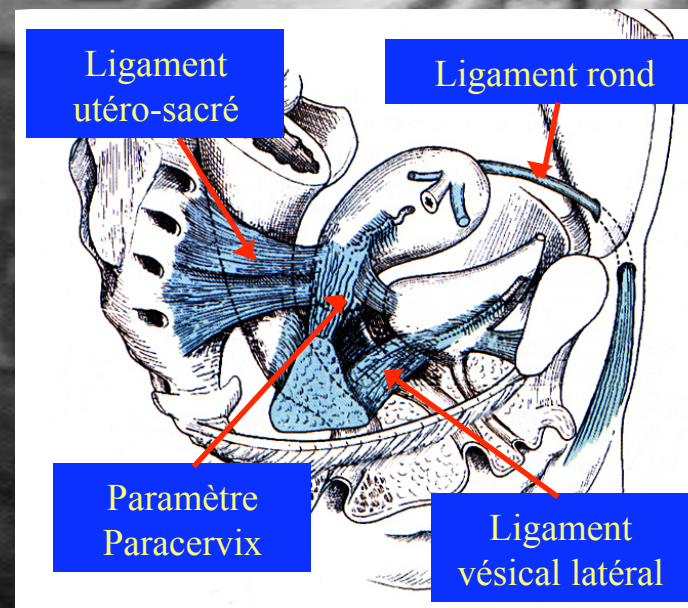


Caractérisation biomécanique des tissus cibles

Tissus pelviens

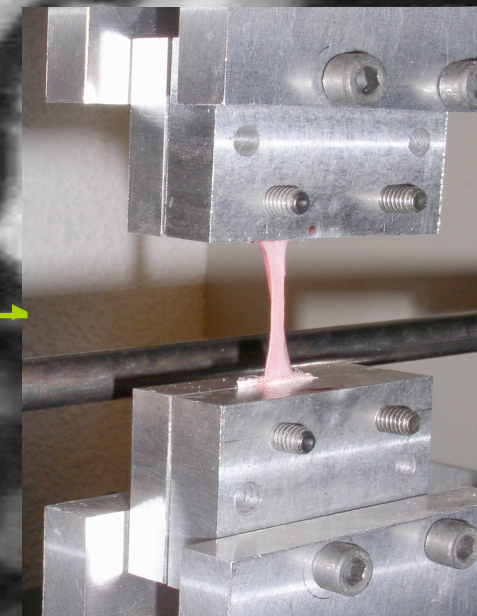
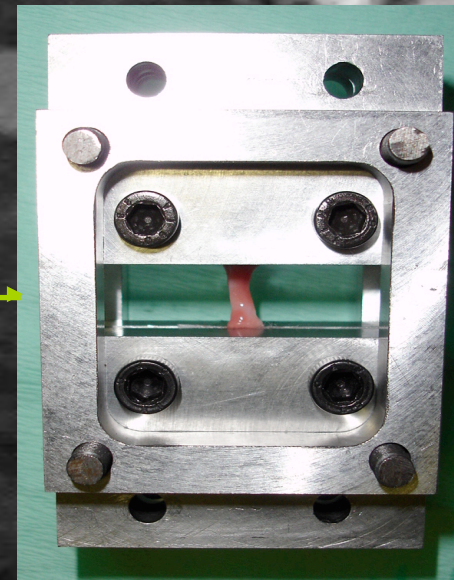
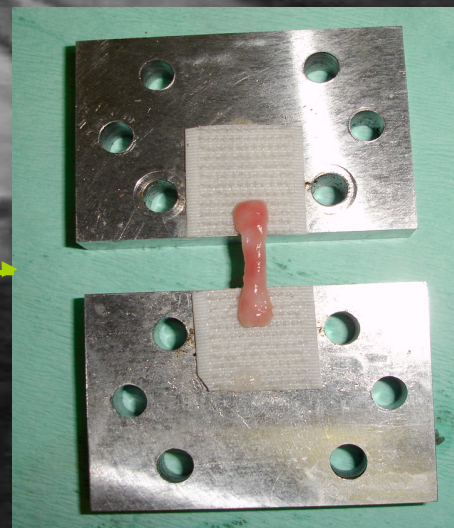


Ligaments pelviens



Détermination d'un protocole d'essais mécanique

- 2 protocoles (*Cosson et al. , 2004 – Ettema et al. , 1998*)
- Eprouvettes normalisées - Dispositif de fixation
- Etude des conditions de prélèvements et de mesures
- Essais à rupture sur tissu vaginal de brebis

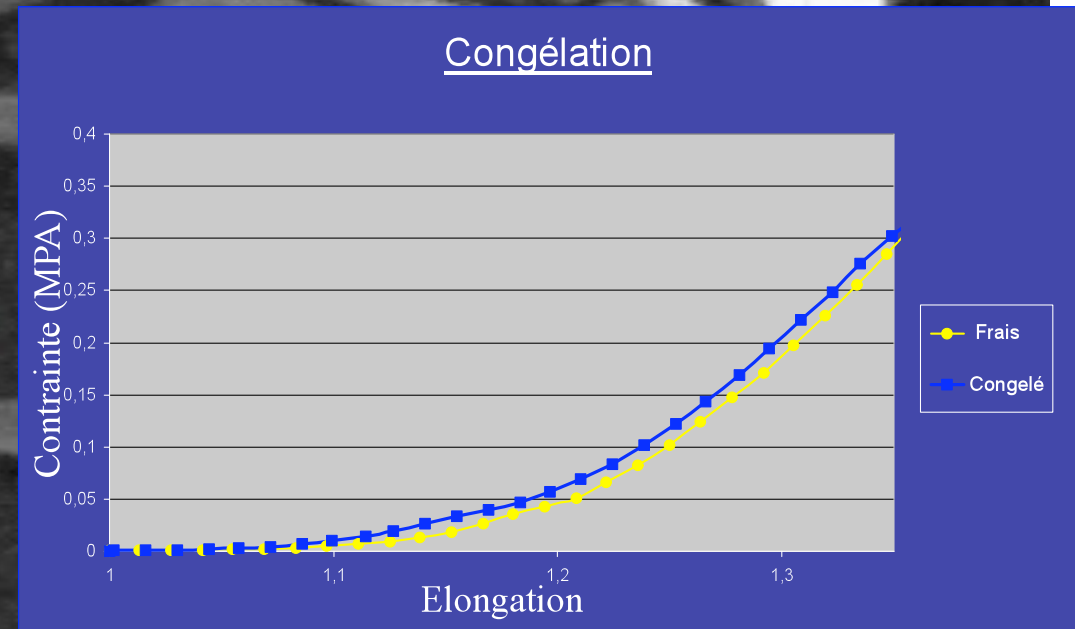


Détermination d'un protocole : *résultats (1/5)*

- Pour les Tissus :
 - Congélation : ?
 - Orientation : ?
 - Localisation : ?
- Au cours de l'essai
 - Hygrométrie : ?
 - Températures : ?
 - Vitesses : ?

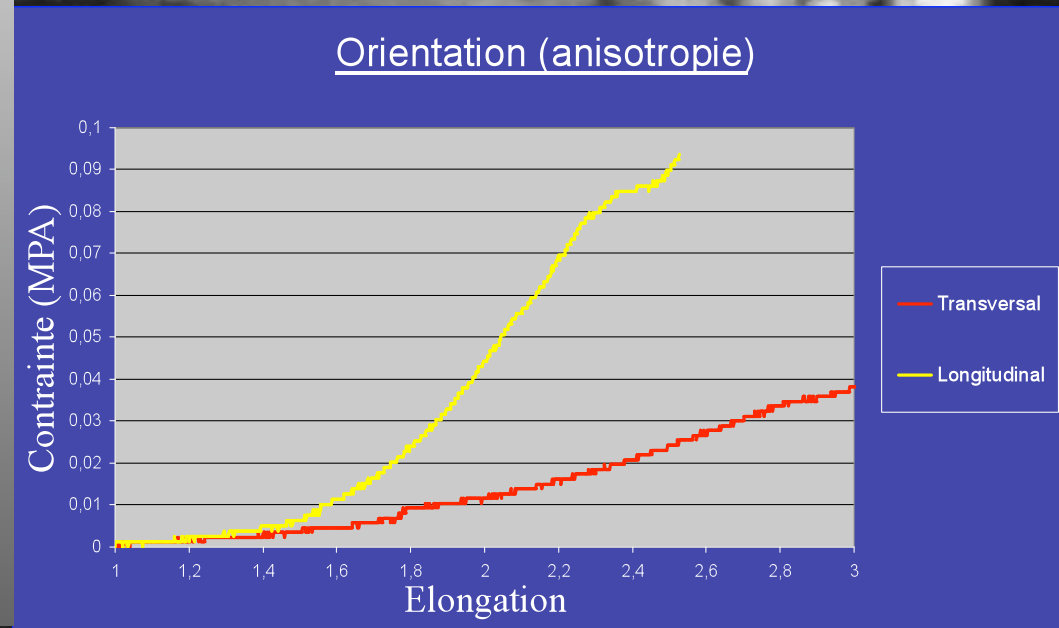
Détermination d'un protocole : résultats (2/5)

- Pour les Tissus :
 - Congélation : =
 - Orientation : ?
 - Localisation : ?
- Au cours de l'essai
 - Hygrométrie : ?
 - Températures : ?
 - Vitesses : ?



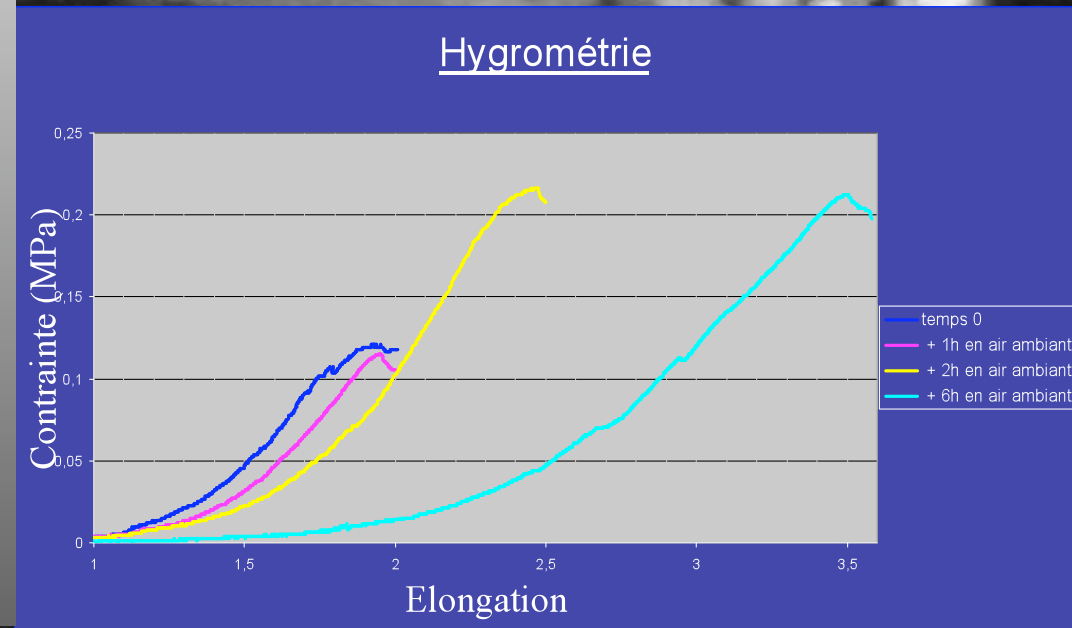
Détermination d'un protocole : résultats (3/5)

- Pour les Tissus :
 - Congélation : =
 - Orientation : ++
 - Localisation : +/-
- Au cours de l'essai
 - Hygrométrie : ?
 - Températures : ?
 - Vitesses : ?



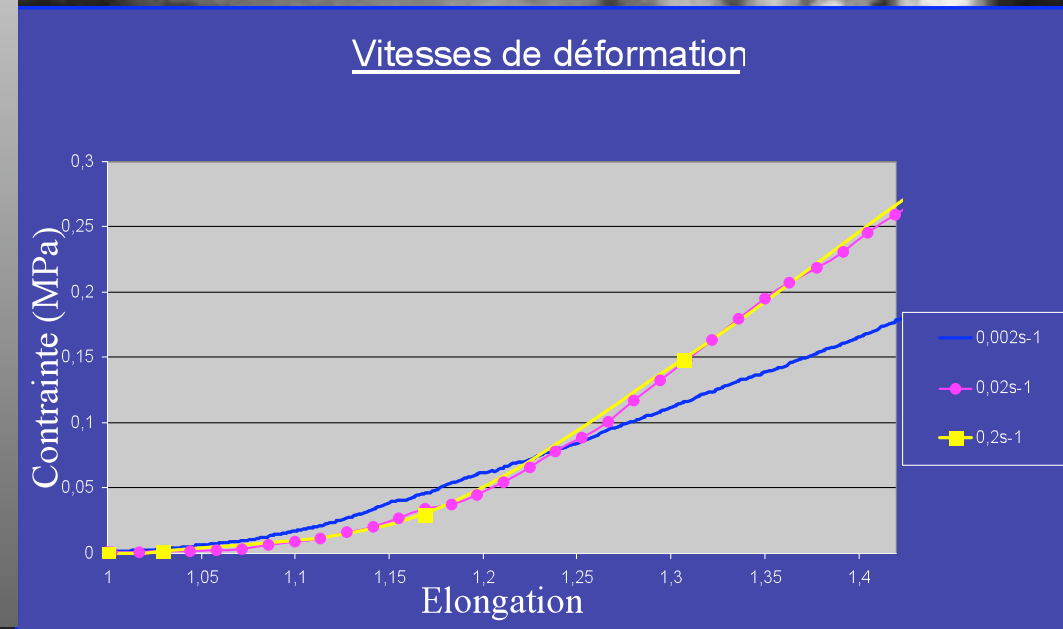
Détermination d'un protocole : résultats (4/5)

- Pour les Tissus :
 - Congélation : =
 - Orientation : ++
 - Localisation : +/-
- Au cours de l'essai
 - Hygrométrie : +
 - Températures : ?
 - Vitesses : ?



Détermination d'un protocole : résultats (5/5)

- Pour les Tissus :
 - Congélation : =
 - Orientation : ++
 - Localisation : +/-
- Au cours de l'essai
 - Hygrométrie : +
 - Températures : =
 - Vitesses : +/-



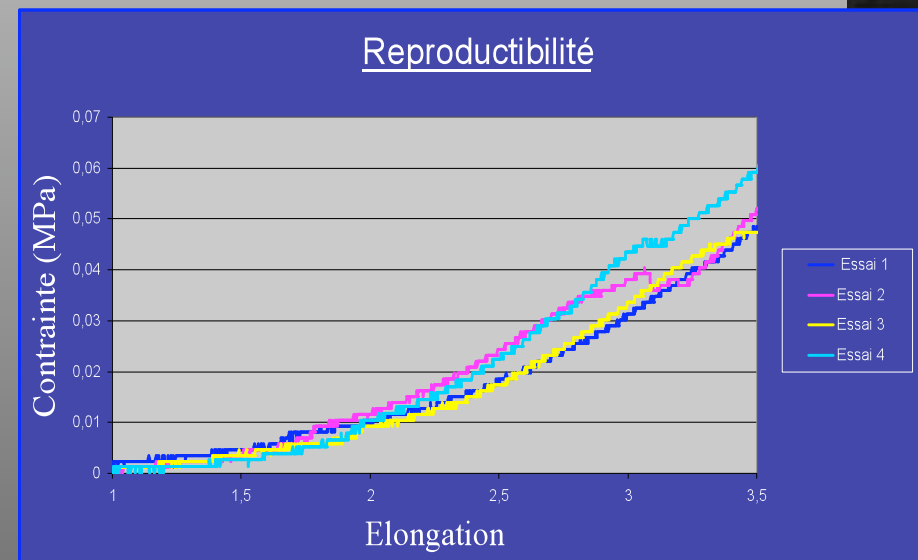
⇒ **Protocole**

Détermination d'un protocole

Conclusions

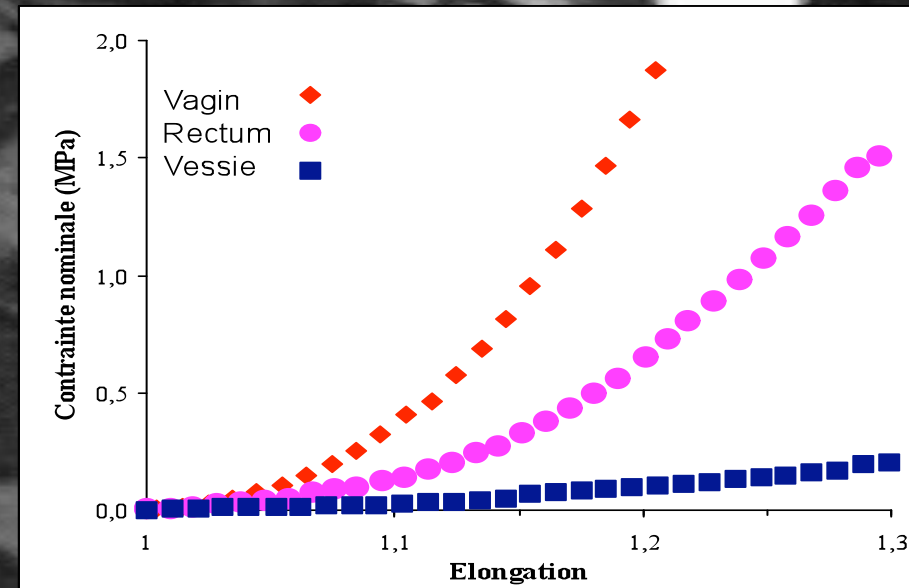
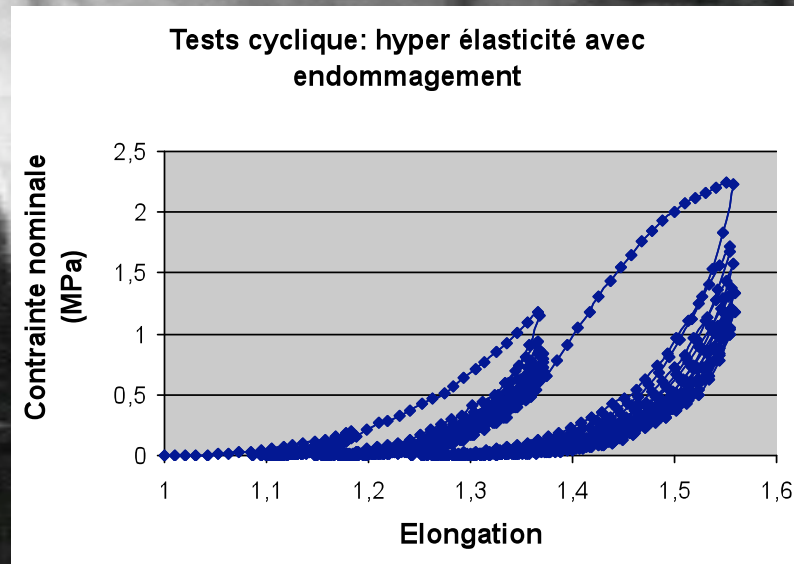
- **Protocole** (Rubod *et al.*, Uro-Gyneco Conf. Hawaï 2006, J Urol. A-2007)

- Orientation des échantillons
- Congélation (-18°C) dans sérum physiologique
- Décongélation de 9H
- Stockage maximum 24H dans sérum physiologique
- Température ambiante
- Vitesse de déformation constante ($2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)



⇒ **Reproductibilité** (brebis et patientes)

Caractérisation des tissus *non prolabé (cadavre)*



- ⇒ **Reproductibilité intra patiente,**
- ⇒ **Comportement quasi incompressible hyper élastique avec effet Mullins,**
- ⇒ **Différences de rigidité selon les organes,**

(Rubod *et al.*, J Urol. B-2007)



pelvie

Nécessité d'introduire une modélisation hyperélastique quasi incompressible du comportement pour poursuivre la caractérisation et les comparaisons entre tissus pathologiques et non pathologiques

$\underline{\underline{\tau}}$ Tenseur des contraintes de Piola Kirchhoff 1, $\underline{\underline{F}}$ Tenseur gradient de la déformation, p Pression hydrostatique

$$\underline{\underline{\tau}} = \frac{\partial W(I_1, I_2)}{\partial \underline{\underline{F}}} - p \underline{\underline{F}}^{-t}$$

$$W(I_1, I_2) = \sum C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$



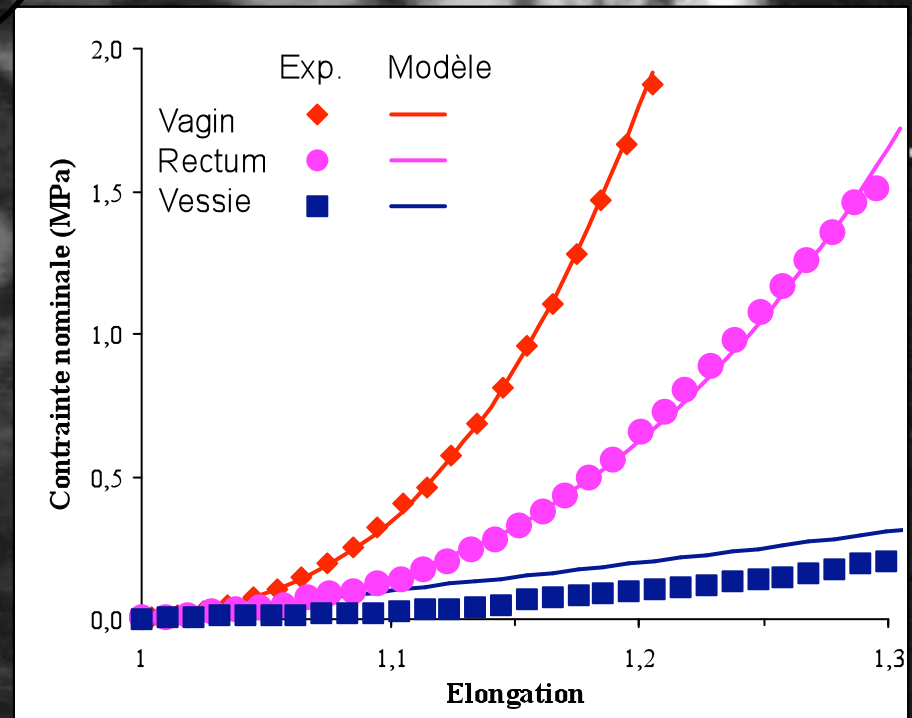
Choix de la densité d'énergie

$$W(I_1, I_2) = C_0(I_1 - 3) + C_1(I_1 - 3)^2$$

$$\tau_{11} = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left[C_0 + C_1 \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right]$$

Rigidité à faible déformation

Rigidité à forte déformation



Tissus non pathologique :
(vagin, rectum, vessie de 15 cadavres frais)

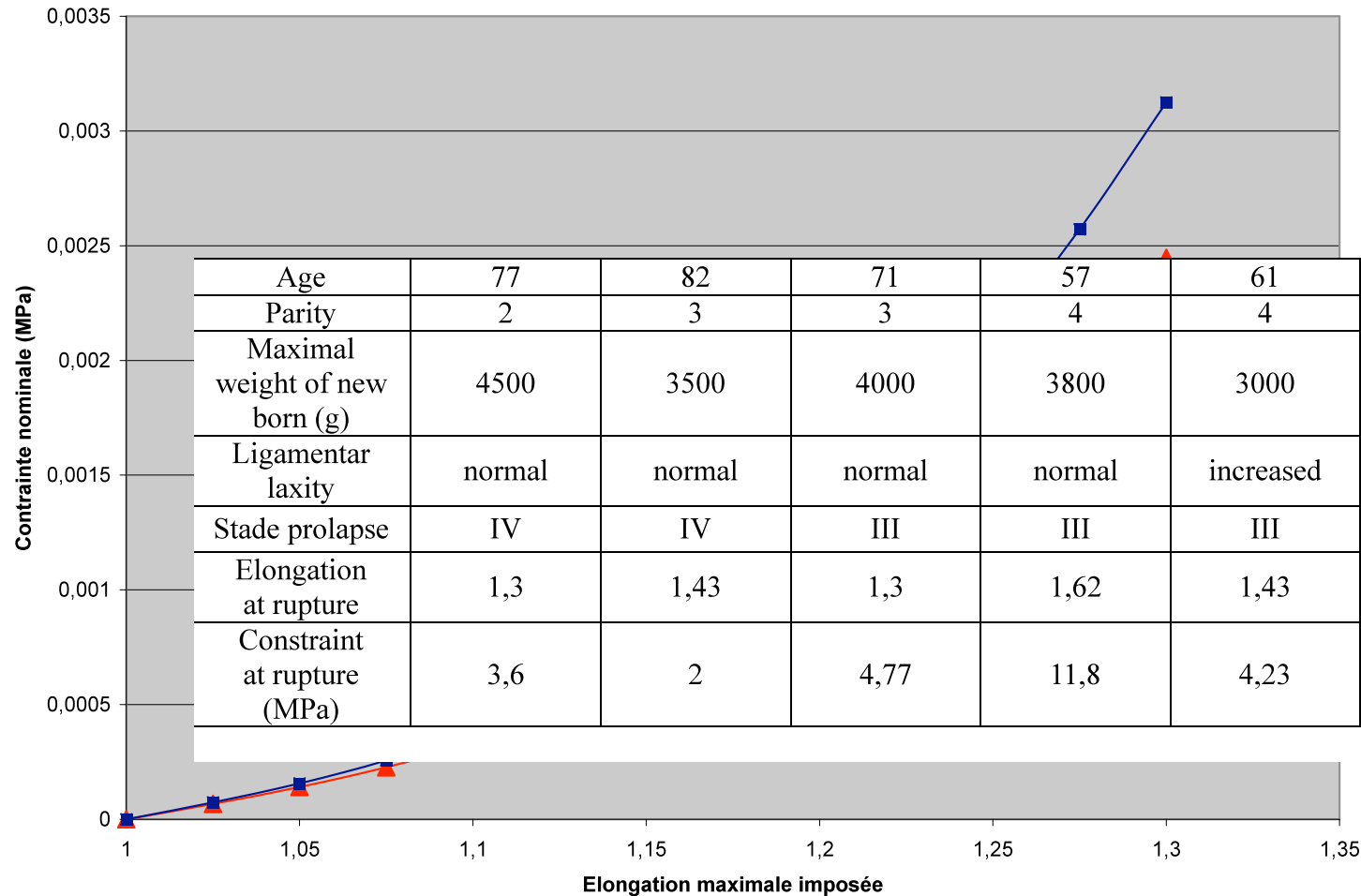
- Avis éthique
- Législation en vigueur
- Cadavres
- Vagin, rectum, vessie
- Protocole validé
- Essais cycliques et à rupture

Tissus pathologiques :
(prélèvements de vagin sur 30 patientes)

- Avis favorable du CCPPRB
- Patientes atteintes d'un prolapsus
- Information adaptée
- Consentement éclairé
- Exérèse d'un excès de tissu vaginal
- Protocole validé
- Essais cycliques et à rupture

Analyse des résultats sur le vagin

• Impossible de définir un comportement moyen de tissus



Ligaments non pathologique :

- Avis éthique
- Législation en vigueur
- Cadavres
- Don de leur corps,
- Protocole validé
- Essais cycliques et à rupture

Ligaments Patientes	Rond		Utéro sacré		Paramètre		Vesico-Utérin		Large
	Droit	Gauche	Droit	Gauche	Droit	Gauche	Droit	Gauche	
C1	2	2	2	2	1	2	1	1	0
C2	1	1	0	0	1	1	0	0	0
C3	2	2	1	1	1	0	0	0	1

Analyse des résultats sur les ligaments

- Impossible de définir un comportement moyen de l'ensemble des ligaments
- Présomption de comportement distincts entre gauche et droite :

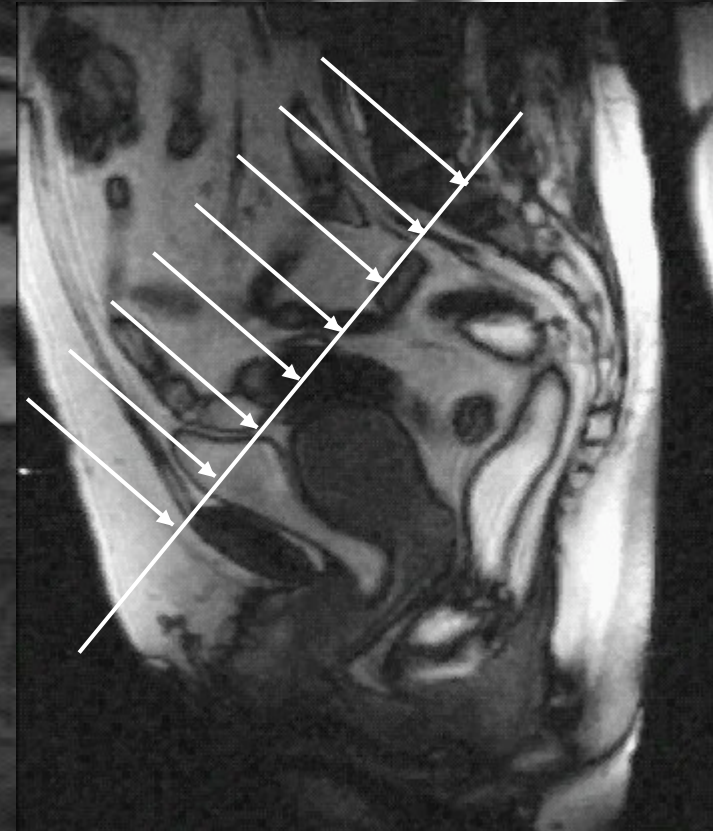
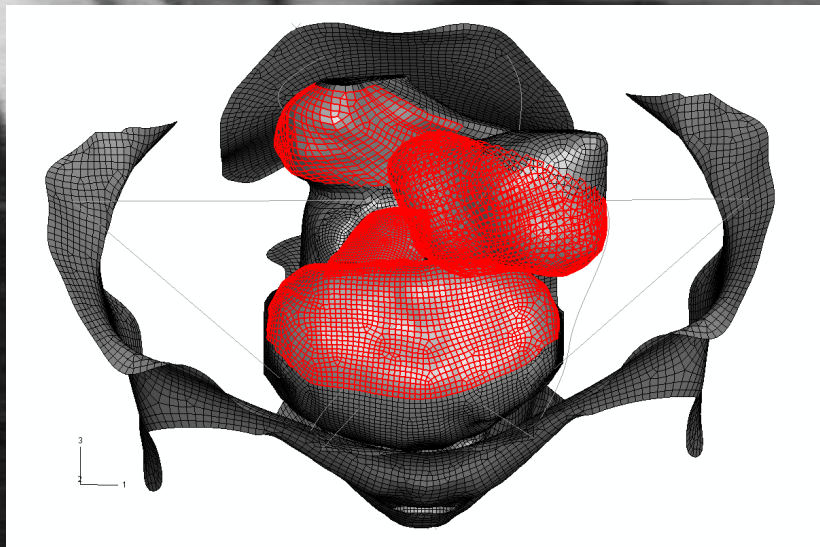
Population trop faible pour conclure de façon certaine

Construction d'un modèle numérique (étape 3)

1. Etablir d'un modèle géométrique synthétisant les données obtenues par imagerie et études anat.
2. Définir les propriétés mécaniques des tissus et ligaments
3. Définir les conditions de chargements en efforts et déplacements imposés
4. Mettre en œuvre les outils de simulations
9. Valider par confrontation expérimentale

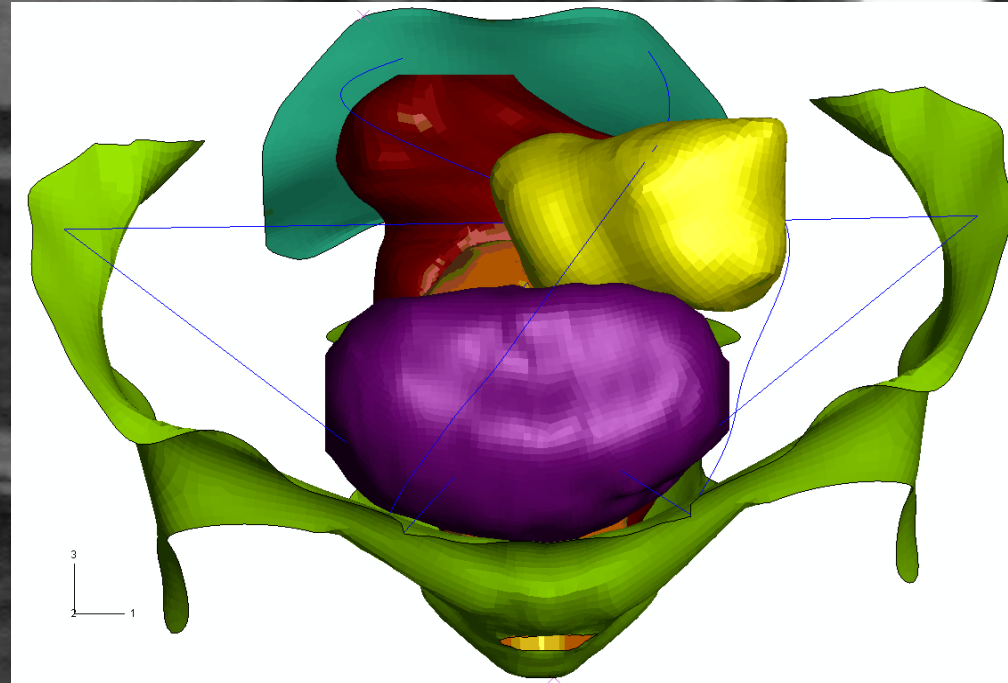
Définition des conditions de chargements (1/2)

Efforts



Définition des conditions de chargements (2/2)

Déplacements



- 14 ligaments,
- Rigidité du muscle pelvien postulé

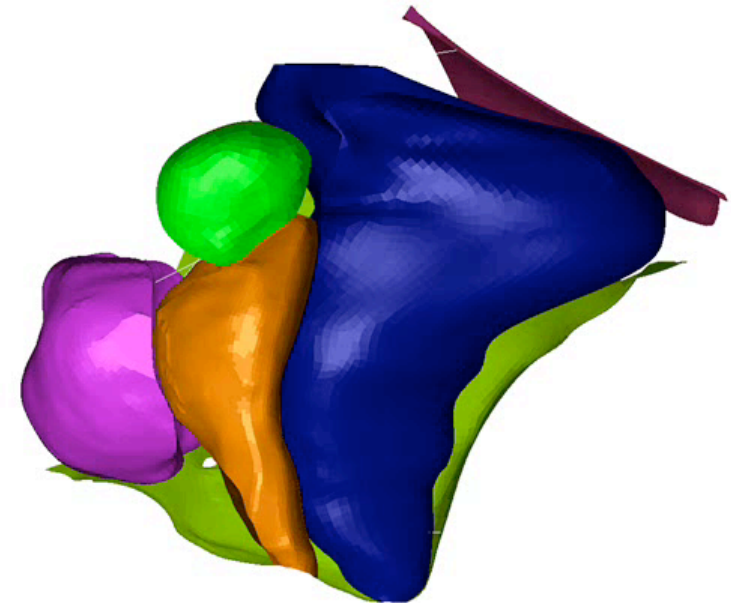
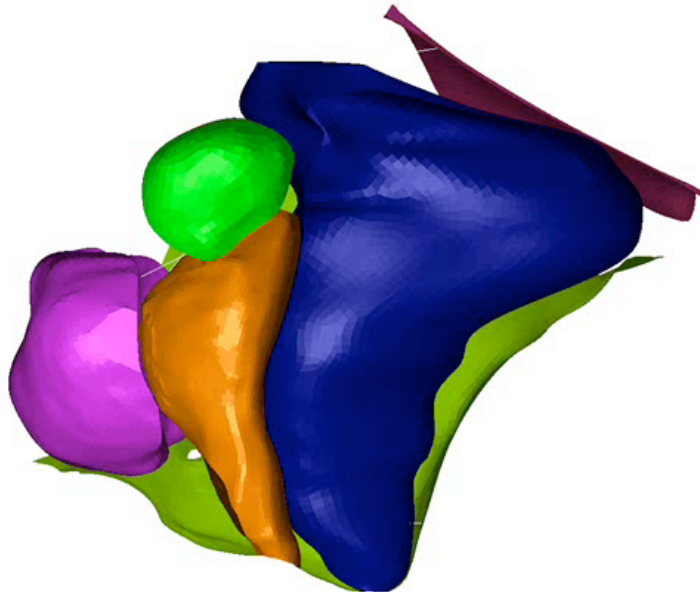
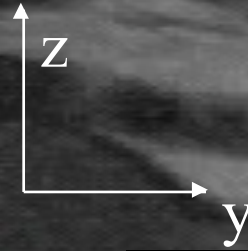
Construction d'un modèle numérique (étape 4)

1. Etablir d'un modèle géométrique synthétisant les données obtenues par imagerie et études anat.
2. Définir les propriétés mécaniques des tissus et ligaments
3. Définir les conditions de chargements en efforts et déplacements imposés
4. Mettre en œuvre les outils de simulations
9. Valider par confrontation expérimentale

Résultats préliminaires

Déplacement verticaux

Contrainte σ_{zz}



Construction d'un modèle numérique (étape 5)

1. Etablir d'un modèle géométrique synthétisant les données obtenues par imagerie et études anat.
2. Définir les propriétés mécaniques des tissus et ligaments
3. Définir les conditions de chargements en efforts et déplacements imposés
4. Mettre en œuvre les outils de simulations
9. Valider par confrontation expérimentale

Conclusions et Perspectives

De grosses hypothèses sont faites :

- Direction des efforts,
- Nb de ligaments impliqués,
- Comportement des muscles,

Comment vérifier ces hypothèses :

IRM Dynamique

Mesures des :

- Déplacements et déformations.
- Et par méthodes inverse des contraintes et chargements

Une telle confrontation nous permettra d'améliorer notre modèle