



Modélisation Numérique de la Mère et du Fœtus pour la Dosimétrie

J. Anquez , L. Bibin, J.P. de la Plata, T.
Boubekeur, E. Angelini, I. Bloch

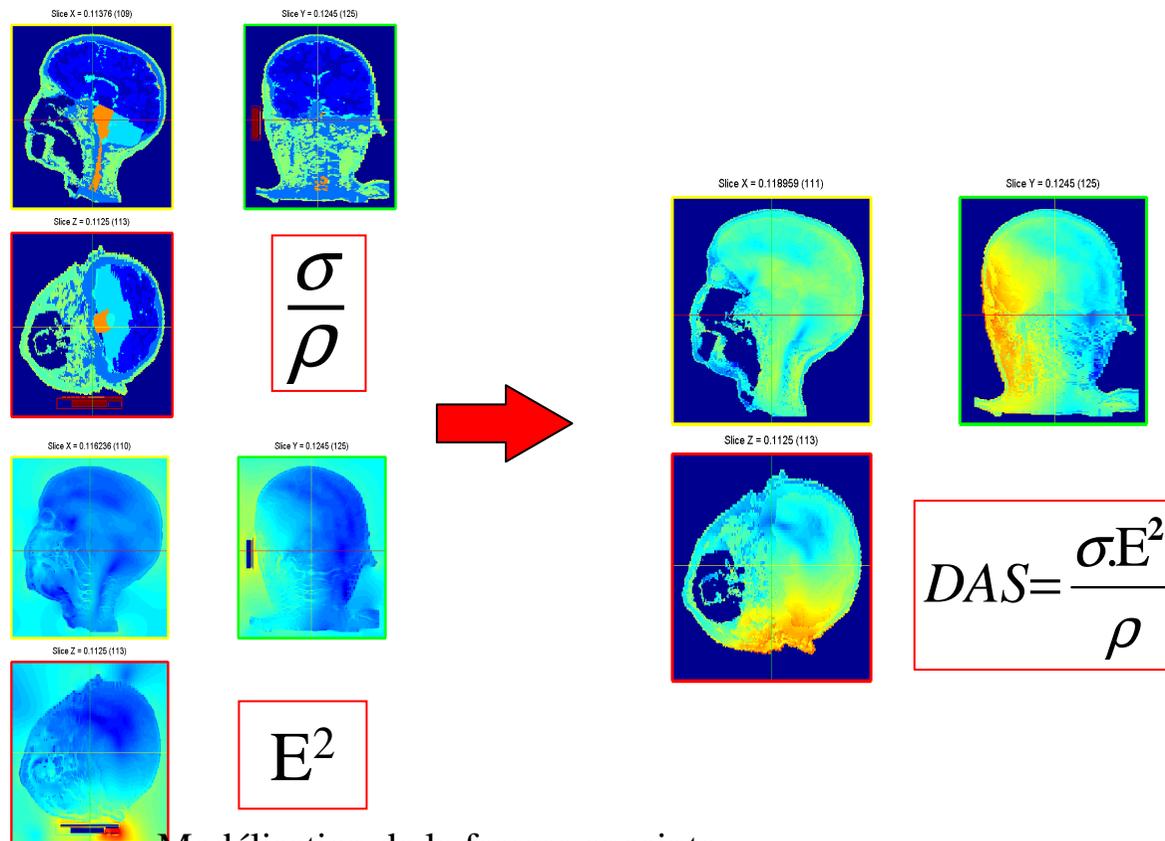
Télécom ParisTech - CNRS UMR 5141 LTCI, 46 rue Barrault, 75013 Paris

Etudes de dosimétrie

- Physiques : mesures de doses sur des fantômes physiques.
- Numériques : simulations de doses sur des modèles numériques.

Modèle anthropomorphique

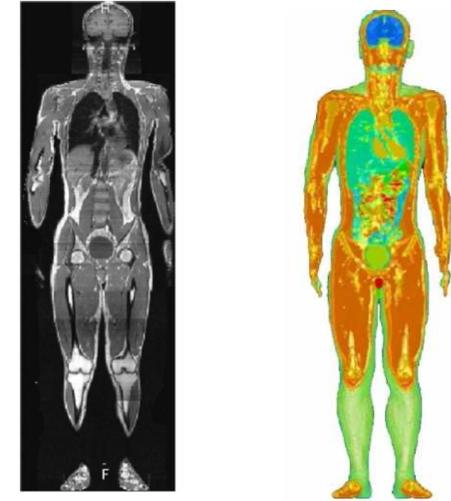
Champ électrique simulé



Modélisation de la femme enceinte

Modèles anthropomorphiques

- Modèles anthropomorphiques nécessaires.
- Modèles adultes : utilisation d'images médicales corps entier (problématique pour la femme enceinte).

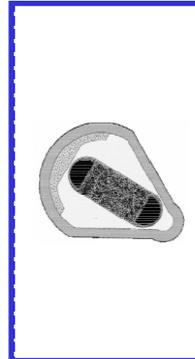
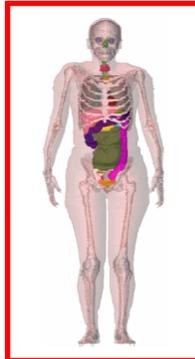


IRM et segmentation
Source : [Nagaoka 02]

- Modèles de femme enceinte : élaboration de **modèles hybrides**, en fusionnant des modèles de femme non gravide et de l'unité utéro-placento-foétale (UUPF).
- Peu de modèles à l'heure actuelle (**modélisation de l'UUPF imparfaite et insertion de l'UUPF interactive**).

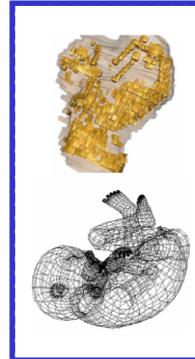
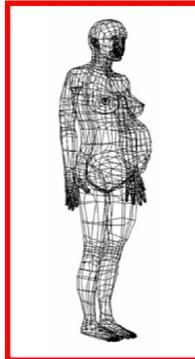
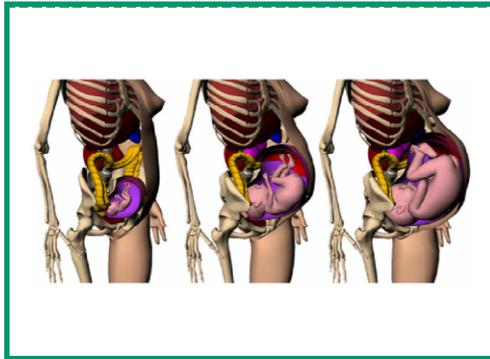
Modèles existants

NAOMI [Dimbylow 07]
PWM [Tanarenko 08]
TANAKO [Nagaoka 08]



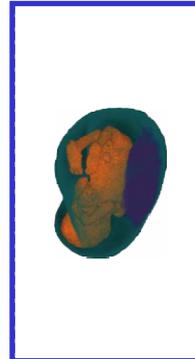
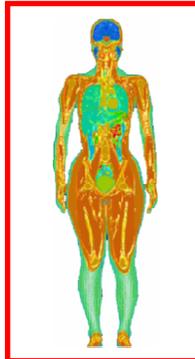
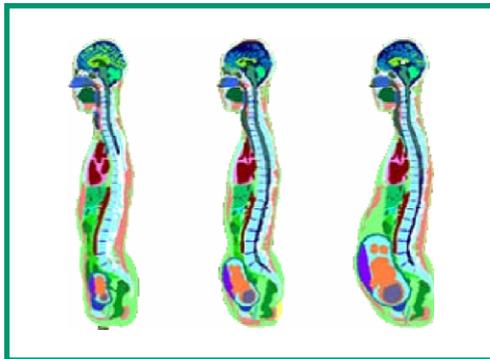
UUPF stylisée :

- + Implantation simple.
- Faible réalisme.



UUPF synthétique et voxelisée :

- +/- Réalisme.
- Singularités.



UUPF voxelisée :

- + Réalisme.
- Modélisation de la grossesse.

Objectifs

- **Automatiser la segmentation d'images médicales anténatales**, pour construire des modèles de l'UUPF dépassant les limites des modèles existants.

- Réalisme.
- Détail anatomique.
- Régularité.

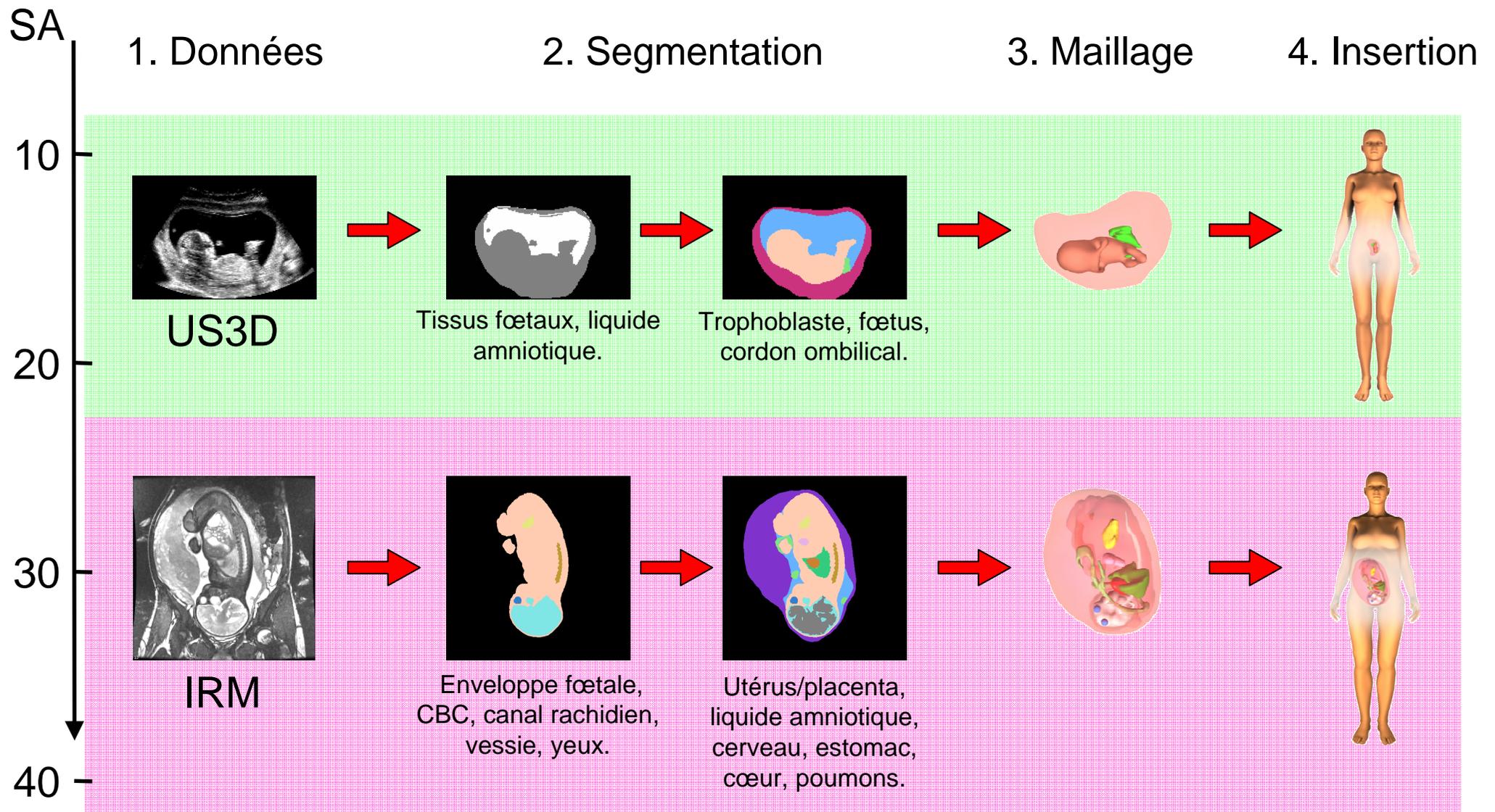
Dosimétrie précise.

- Couverture de l'ensemble de la grossesse.
- Représentativité de la variabilité morphologique et positionnelle du fœtus.

Influence sur la dosimétrie.

- **Automatiser l'élaboration des UUPF et leur insertion dans le modèle de femme**, pour assurer leur positionnement correct.

Approche proposée



1. Données

Constitution d'une base d'images comprenant 19 images US3D (8 à 22 SA) et 43 images IRM (26 à 35 SA).

US3D



9 SA



13 SA

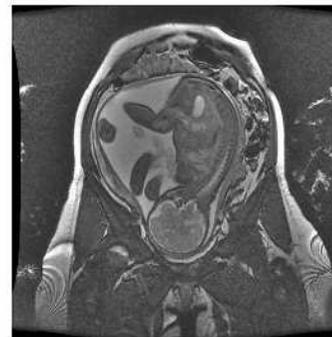


22 SA

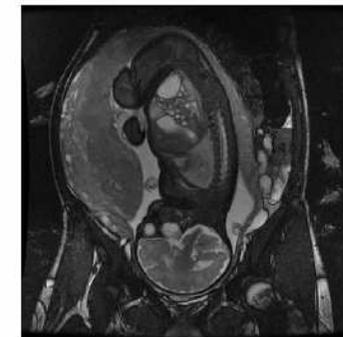
IRM



26 SA



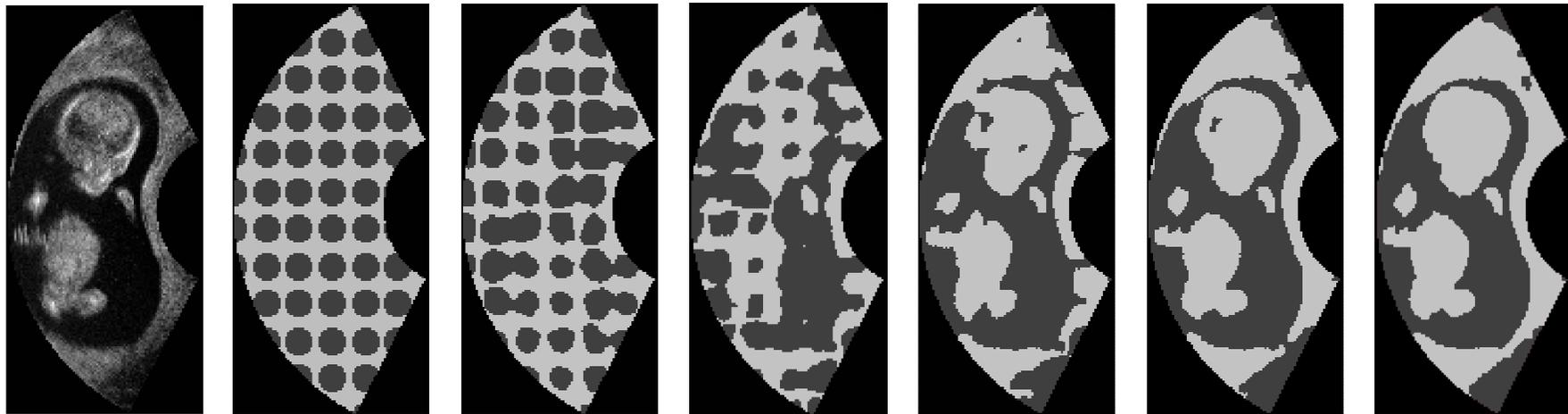
30 SA



34 SA

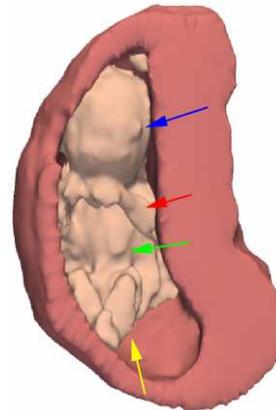
2. Segmentation des images US3D

- Modélisation de la distribution des intensités dans les tissus fœtaux et dans le liquide amniotique, et segmentation dans le cadre des modèles déformables.

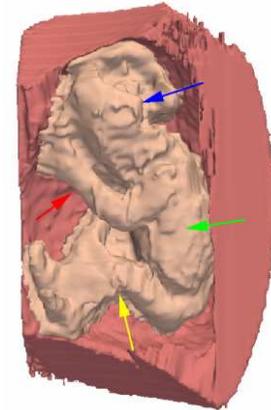


- Reconstructions 3D :

13 SA

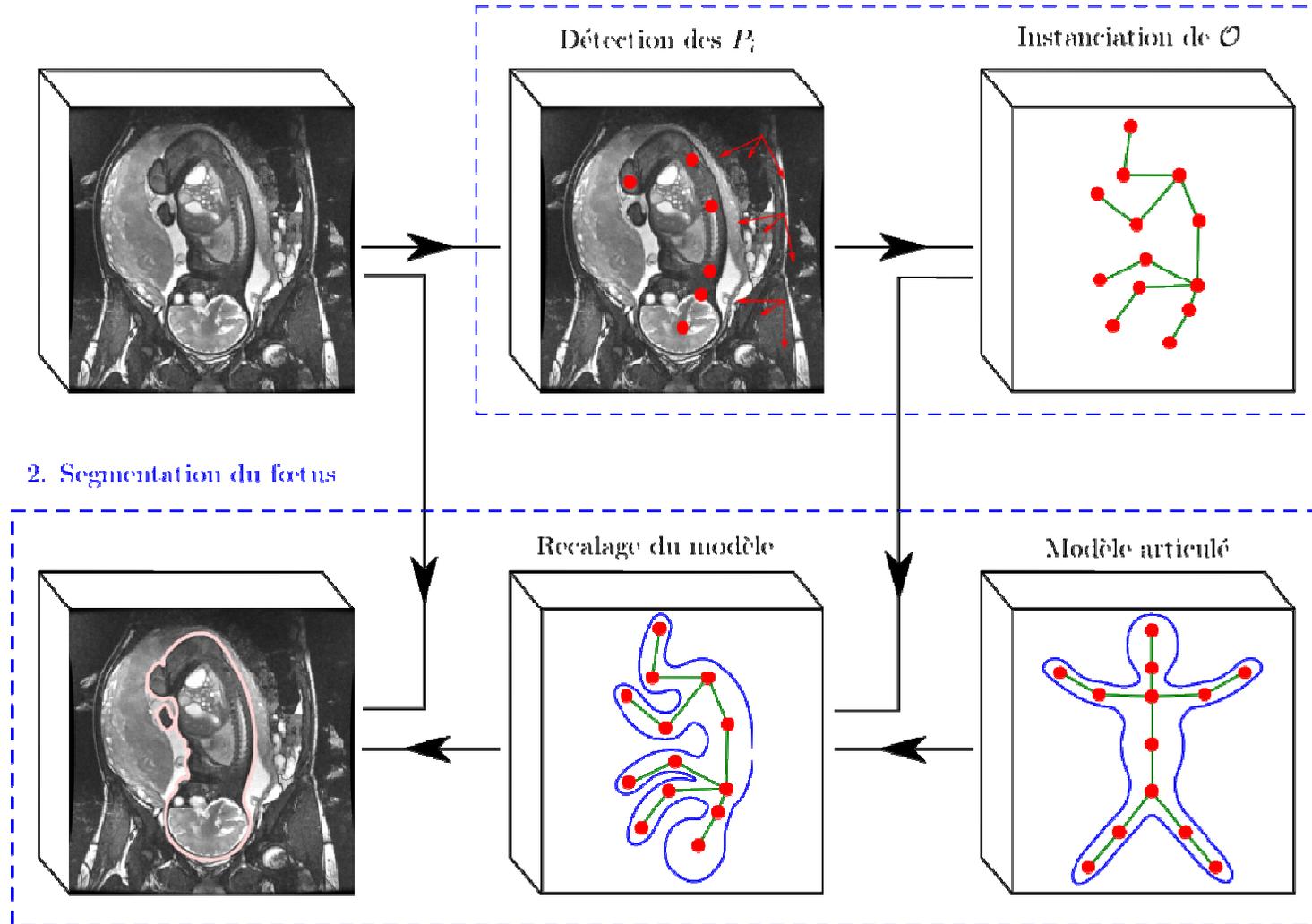


22 SA



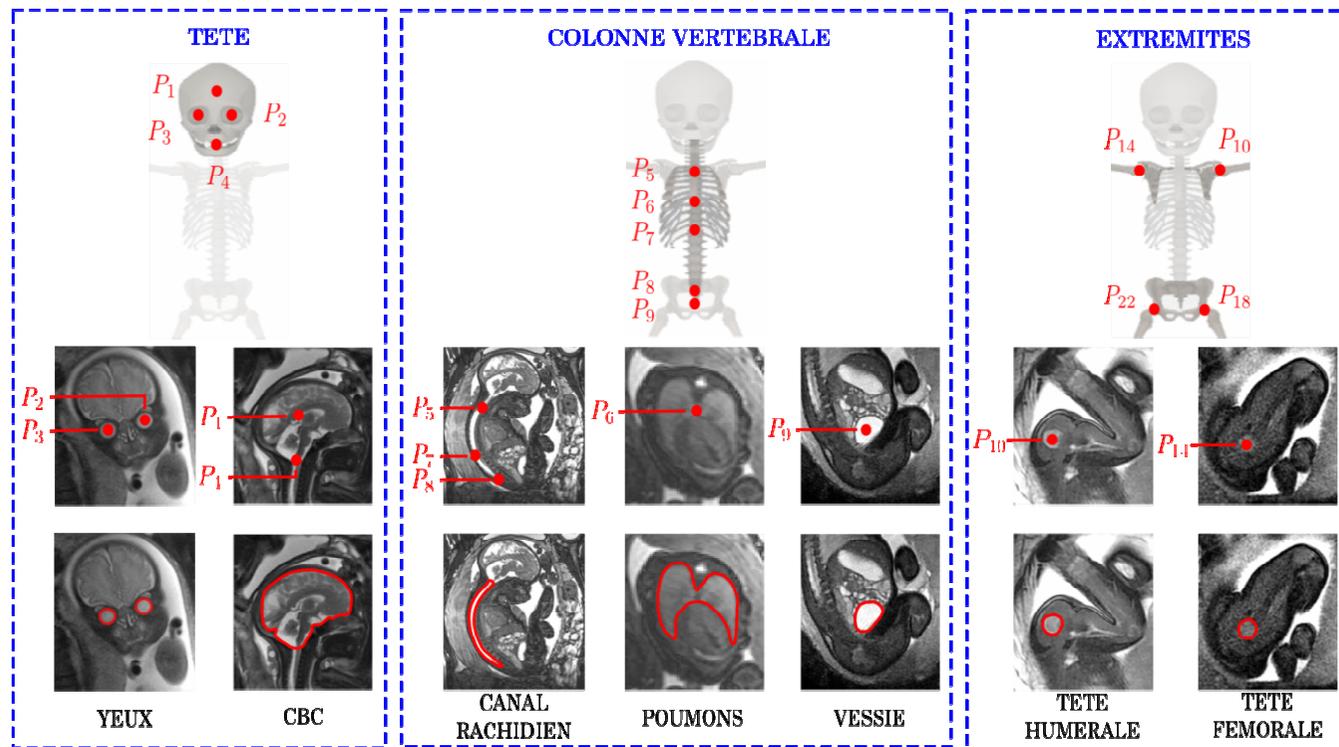
2. Segmentation des images IRM (1/4)

1. Caractérisation de la position fœtale



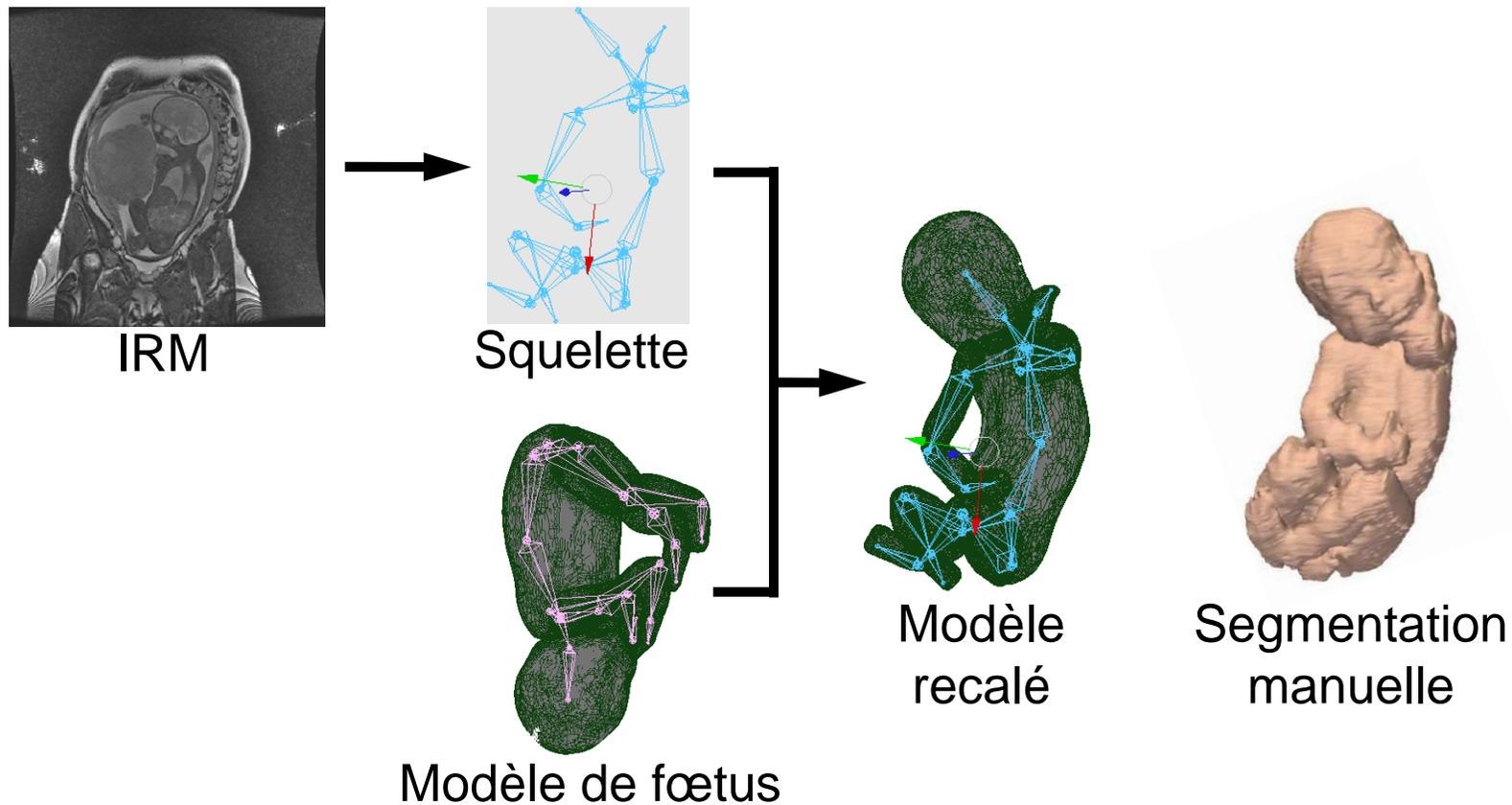
2. Segmentation des images IRM (2/4)

- Détection des points remarquables en segmentant les structures dans lesquelles ils sont localisés.
- Exploitation de connaissances **biométriques**, d'informations sur la **forme** et le **contraste**.



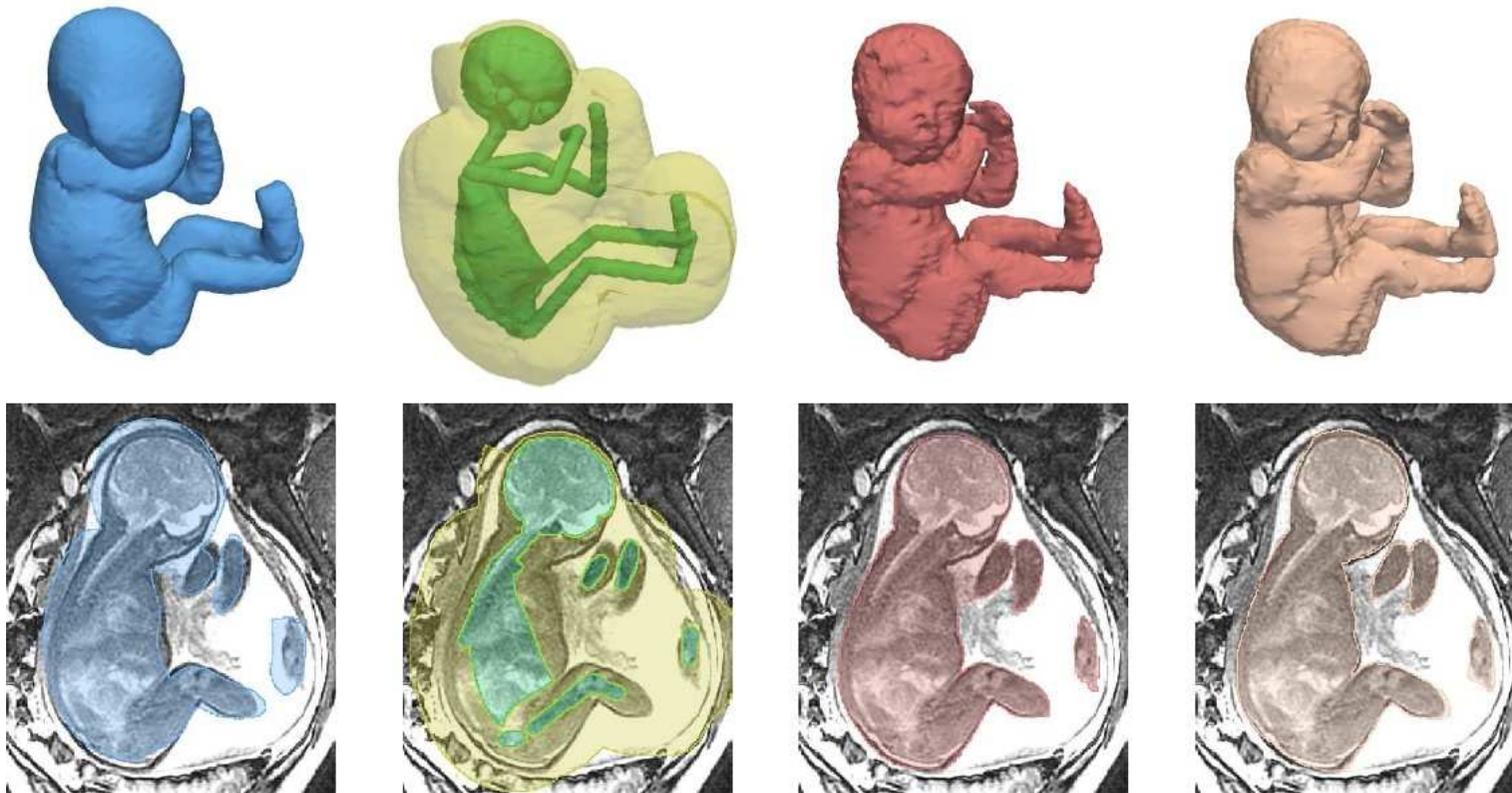
2. Segmentation des images IRM (3/4)

- Recalage du squelette d'un modèle articulé de fœtus sur le squelette extrait dans l'image.

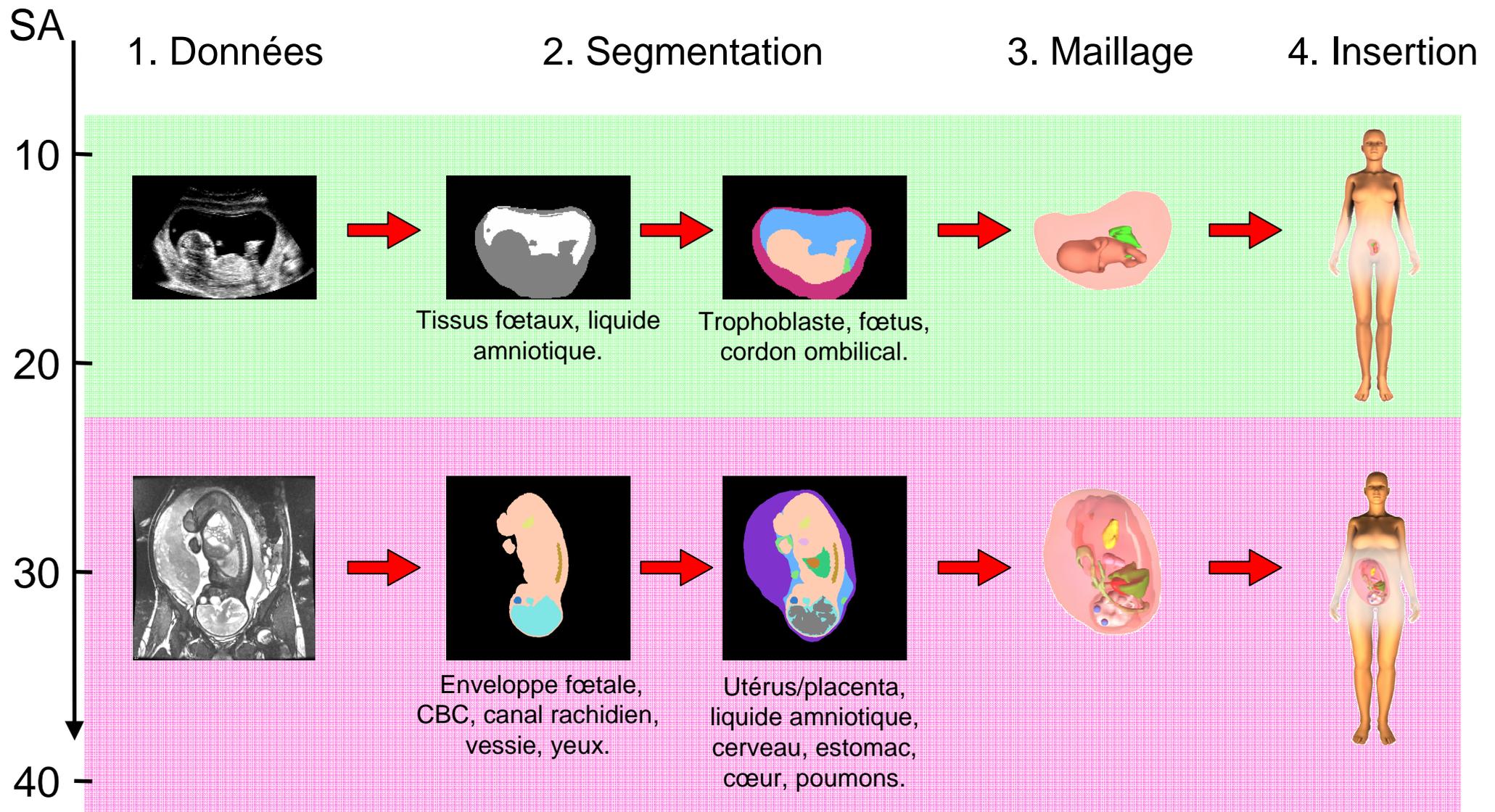


2. Segmentation des images IRM (4/4)

- Définition d'une bande étroite de segmentation.
- Segmentation par coupure de graphe.

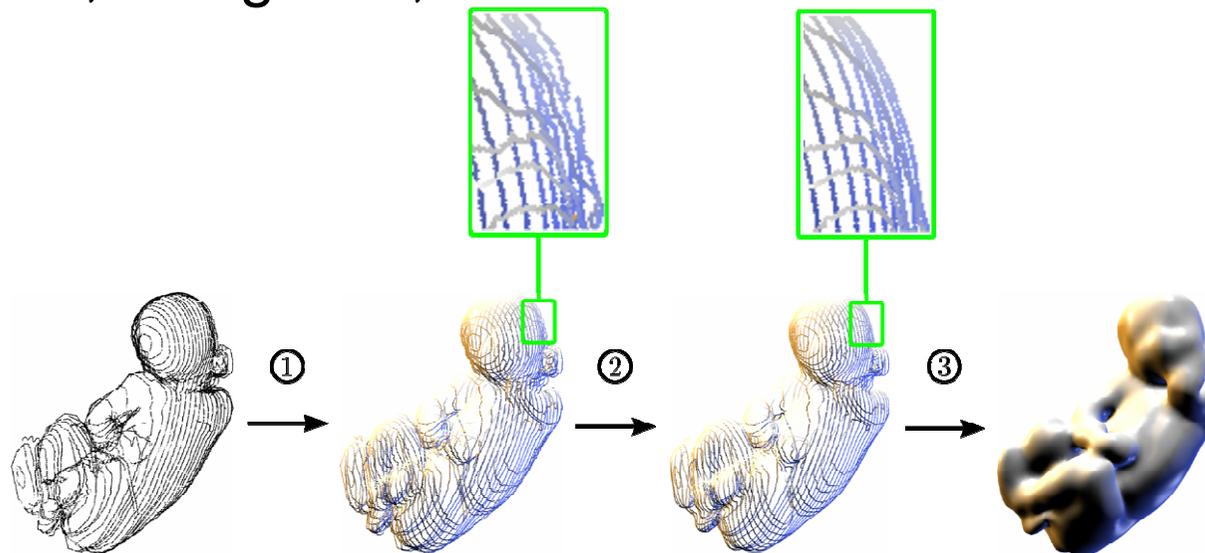


Approche proposée



3. Géométrie Numérique

- Simulation = **modèle géométrique** + modèle physique
- **Objectif** : générer des modèles géométrique de qualité et faciliter la construction des modèles de femme enceinte.
- **Méthode** : *reconstruction de maillages surfaciques polygonaux denses et réguliers des structures de l'UUPF.*
- **Outils** : analyse statistique, opérateur des moindres carrés glissants, filtrage 3D, extraction de contours



Modélisation de la femme enceinte

3. Géométrie Numérique

Reconstruction de surface

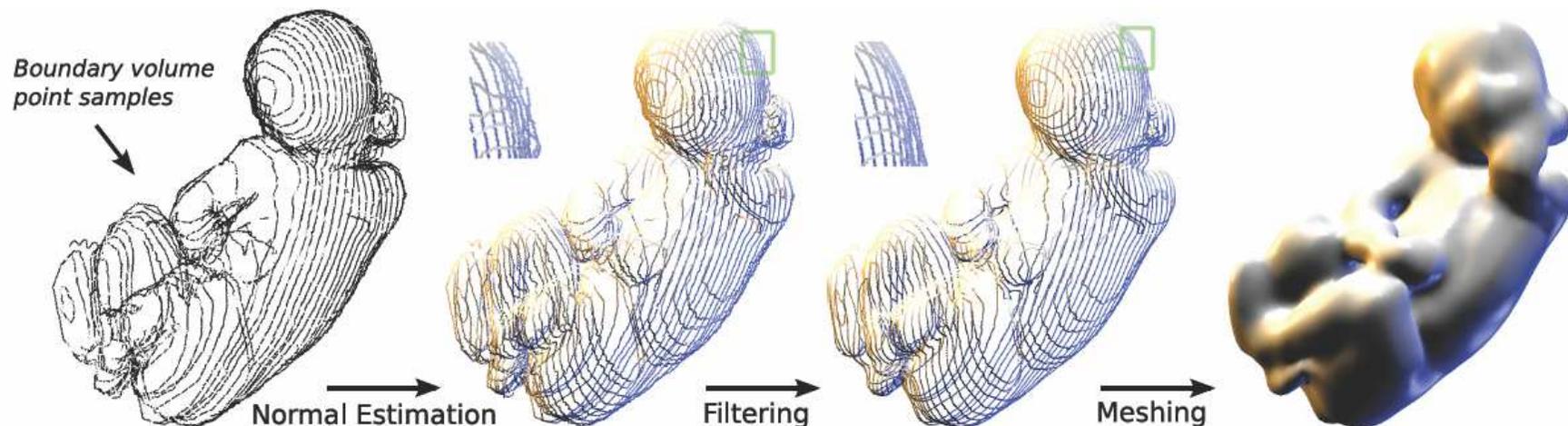
- **Entrée** : P ensemble de points sur la surface 3D
 - Position
 - Vecteur normal
- **Sortie** : Génération d'un maillage triangulaire à partir d'un ensemble de points 3D
- **Objectif** : surface lisse de qualité

Méthodes utilisées fréquemment en géométrie numérique et informatique graphique 3D

3. Géométrie Numérique

Séquence

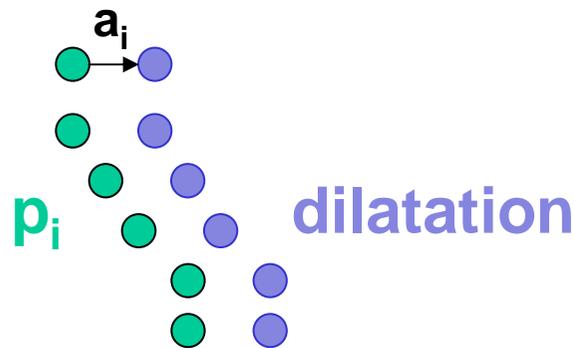
1. Echantillonnage des surfaces de points à partir des volumes segmentés
2. Evaluation d'un vecteur normal pour chaque point 3D
3. Filtrage de l'ensemble pour éliminer:
 - a. Bruit de haute fréquence et de faible amplitude.
 - b. *Outliers*
4. Extraction d'un maillage par *tracé de contours*



3. Géométrie Numérique

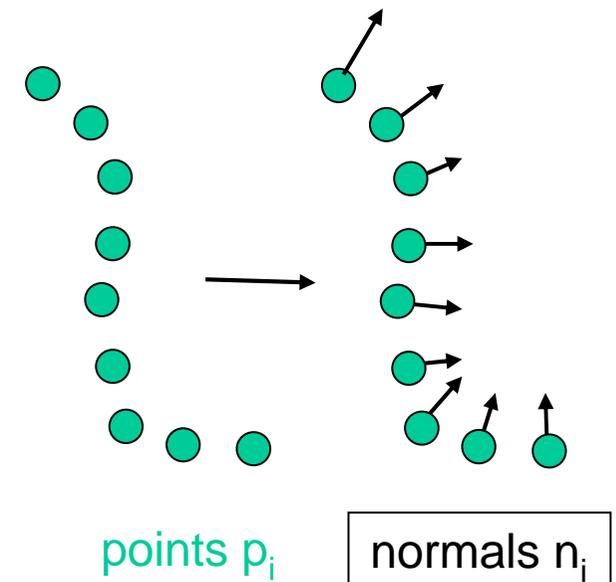
Extraction d'un ensemble de points

- p_i : segmentation supervisée.
- a_i : vecteur associé à p_i définissant l'orientation de la surface (contrainte extérieure).
 - Dilatation de l'objet segmenté initial



Evaluation du vecteur normal

- **Orientation de la normale** : ACP par point [Hoppe 92]
 - Matrice de covariance sur les k-voisins.
 - Vecteur propre associé à la plus petite valeur propre.
- **Direction** : déterminée par la contrainte extérieure



$$\mathbf{n}_i = \frac{\overline{\mathbf{n}}_i}{\|\overline{\mathbf{n}}_i\|} \quad \text{with} \quad \overline{\mathbf{n}}_i = \begin{cases} \mathbf{u}_i & \text{if } \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{a}_i > 0 \\ -\mathbf{u}_i & \text{otherwise} \end{cases} .$$

Surface de Points

Point Set Surface ou *PSS*

- **Définition** : représentation de surface lisse à partir d'un nuage de points.
- **Opérateur** : Moindre Carrés Glissants (*Moving Least Square*, MLS).
- **Propriétés** : Approximation ou interpolation du nuage 3D.
- **Evaluation** :
 - Point stationnaire sous la projection MLS
 - Forme implicite : iso-surface $f(p)=0$.

3. Géométrie Numérique

Opérateur MLS

Variation de l'opérateur simplifié
d'Adamson et Alexa [PBG 2004]

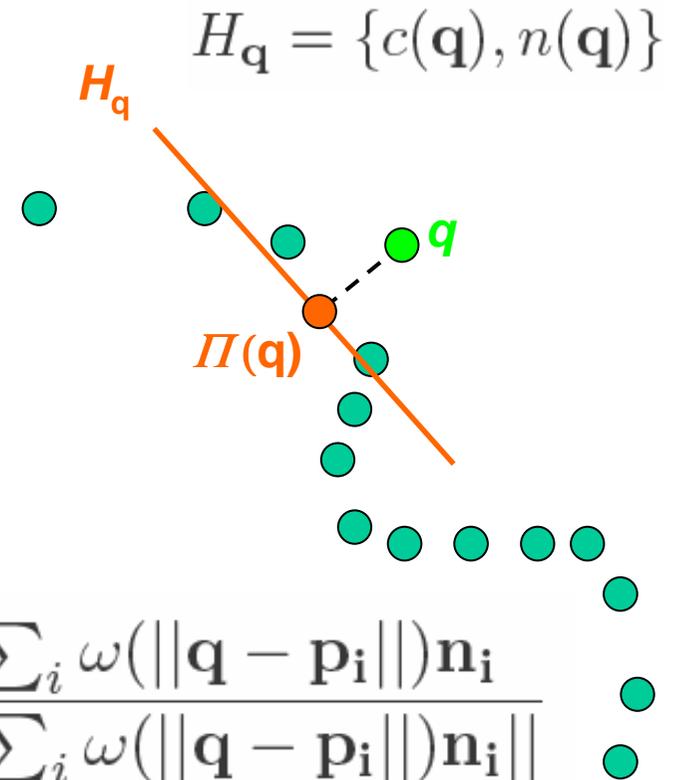
Opérateur de projection

$$MLS^{\mathcal{P}^N} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, \mathbf{q} \rightarrow \Pi^\infty(\mathbf{q})$$

$$\Pi(\mathbf{q}) = \mathbf{q} - \frac{\langle \mathbf{q} - \mathbf{c}(\mathbf{q}), \mathbf{n}(\mathbf{q}) \rangle}{\|\mathbf{n}(\mathbf{q})\|^2} \mathbf{n}(\mathbf{q})$$

$$\Pi^{i+1}(\mathbf{q}) = \Pi(\Pi^i(\mathbf{q}))$$

$$\mathbf{c}(\mathbf{q}) = \frac{\sum_i \omega(\|\mathbf{q} - \mathbf{p}_i\|) \mathbf{p}_i}{\sum_i \omega(\|\mathbf{q} - \mathbf{p}_i\|)} \quad \mathbf{n}(\mathbf{q}) = \frac{\sum_i \omega(\|\mathbf{q} - \mathbf{p}_i\|) \mathbf{n}_i}{\|\sum_i \omega(\|\mathbf{q} - \mathbf{p}_i\|) \mathbf{n}_i\|}$$



Noyau quartique de Wendland

$$\omega(t) = \begin{cases} (1 - \frac{t}{h})^4 (\frac{4t}{h} + 1) & \text{if } 0 \leq t \leq h \\ 0 & \text{if } t > h \end{cases}$$

3. Géométrie Numérique

Filtrage de surface de points

- **Elimination du bruit** : projection MLS directement appliquée aux échantillons points.
- ***Outliers*** : méthode itérative construite sur un critère de planéité [Weyrich 2003]
 - Itération par seuillage borné à décroissance quadratique

Génération de Maillage Polygonal

- **Cas général**

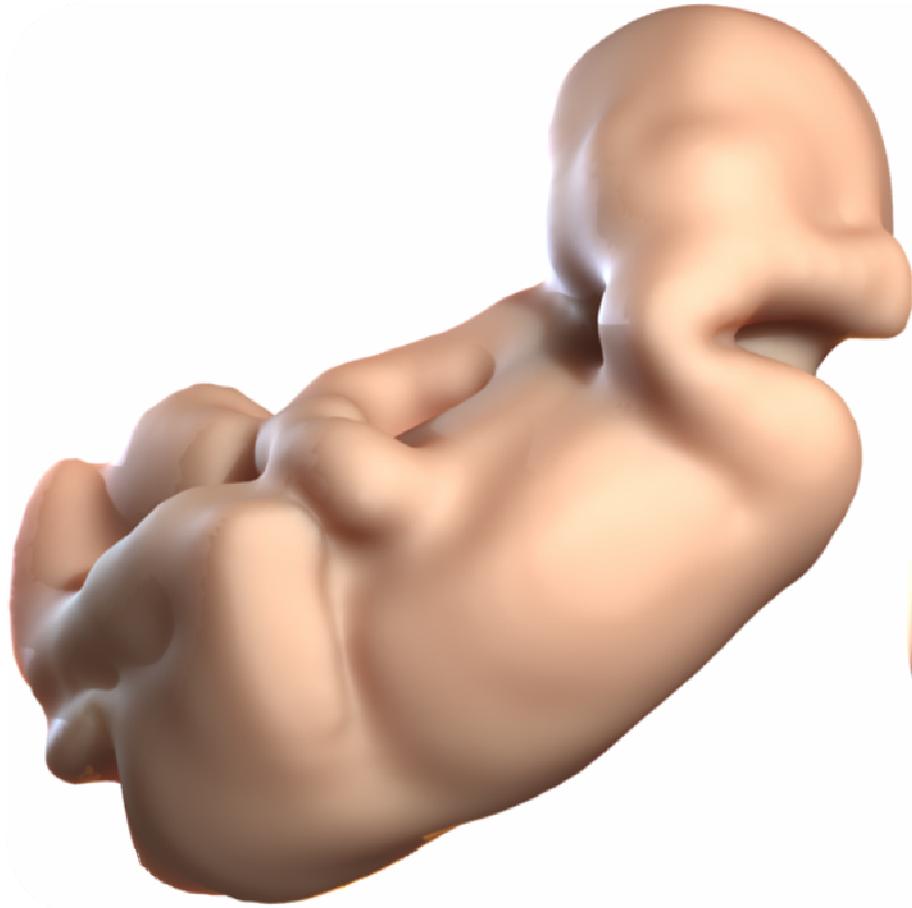
- PSS implicite
- Tracé de contours type *Marching Cube*

- **Cas très détériorés**

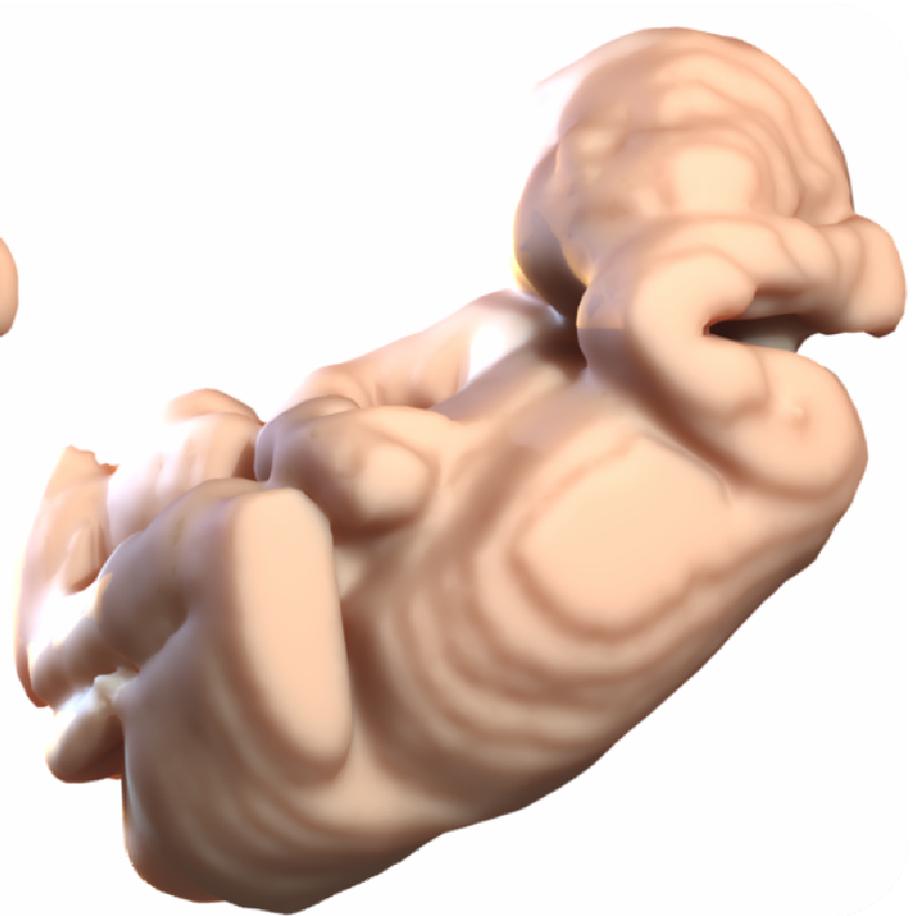
- Grandes zones manquantes
- Reconstruction de Poisson [Kazhdan 2006]

3. Géométrie Numérique

Fœtus



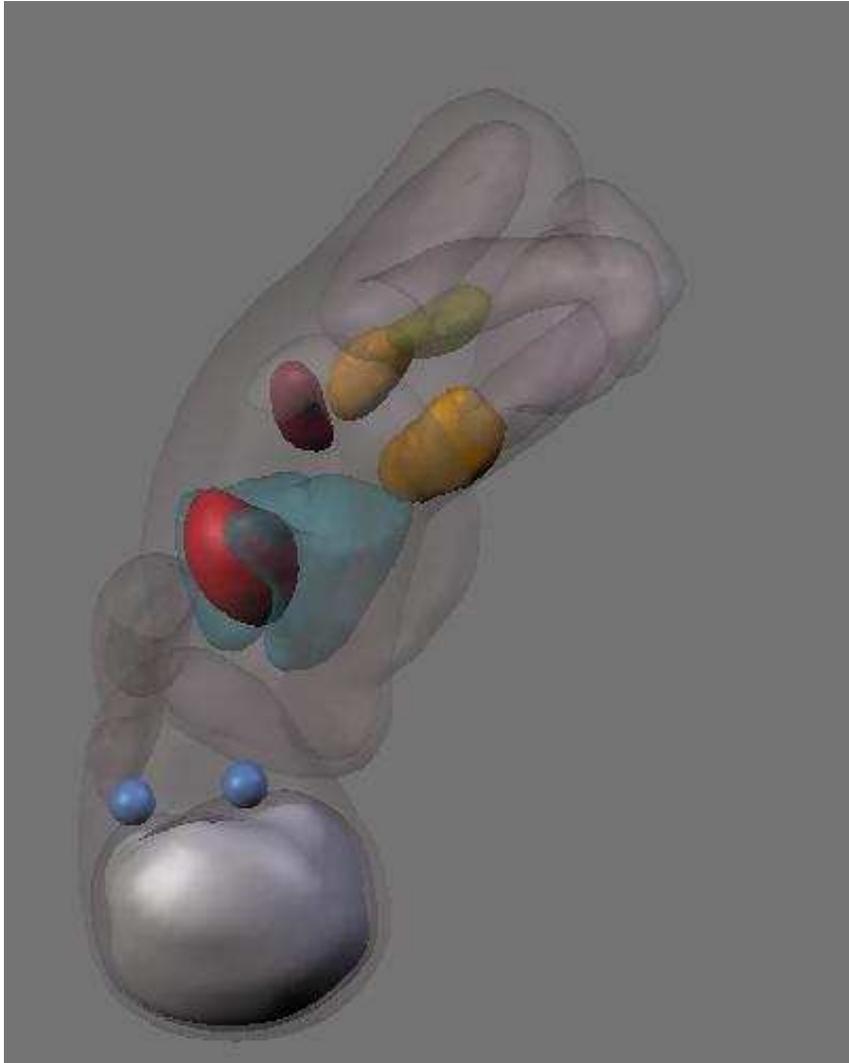
Notre reconstruction



Maillage direct

3. Géométrie Numérique

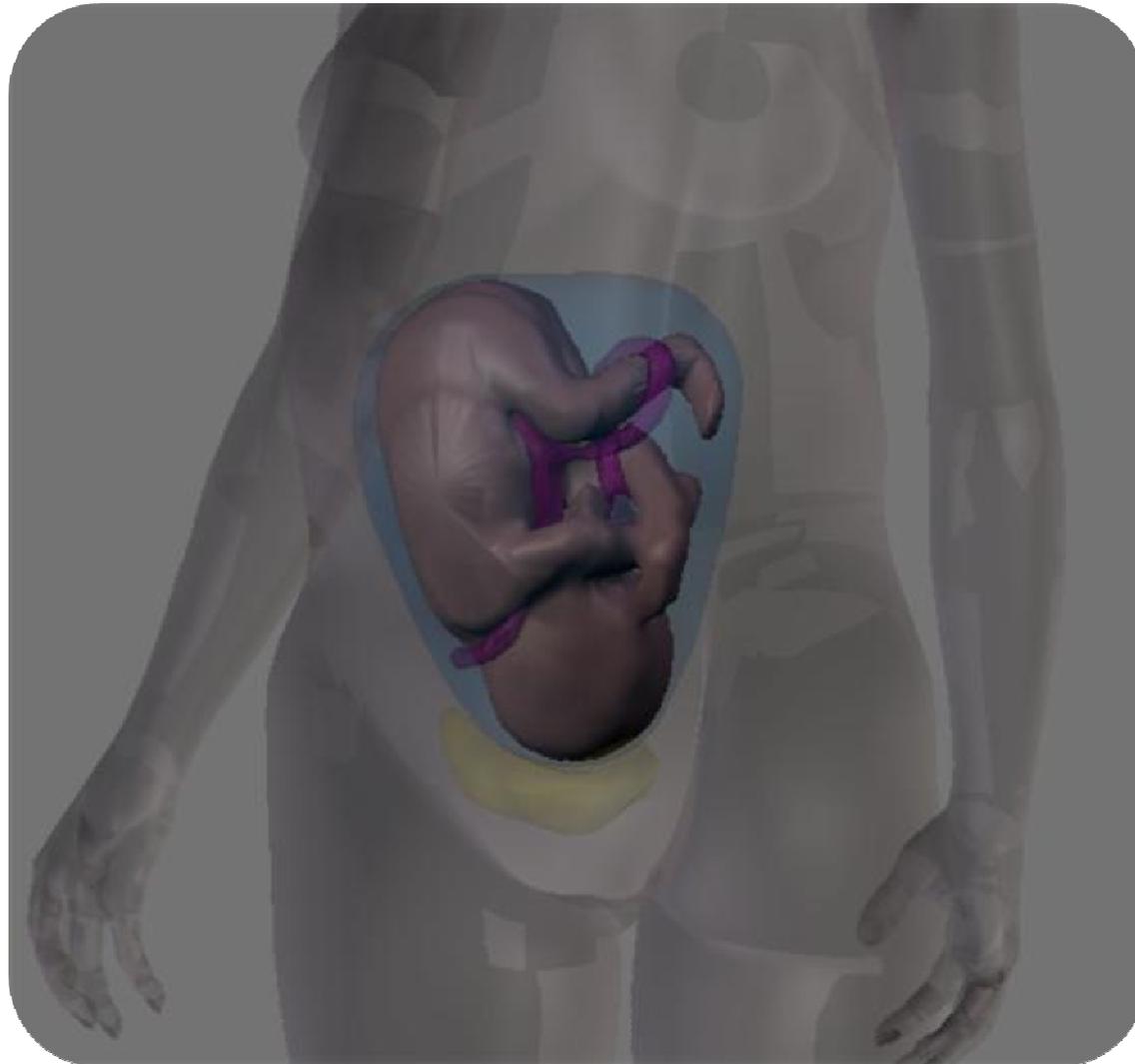
Organes foëtaux



-  Cerveau
-  Yeux
-  Coeur
-  Poumons
-  Estomac
-  Reins
-  Poche urinaire

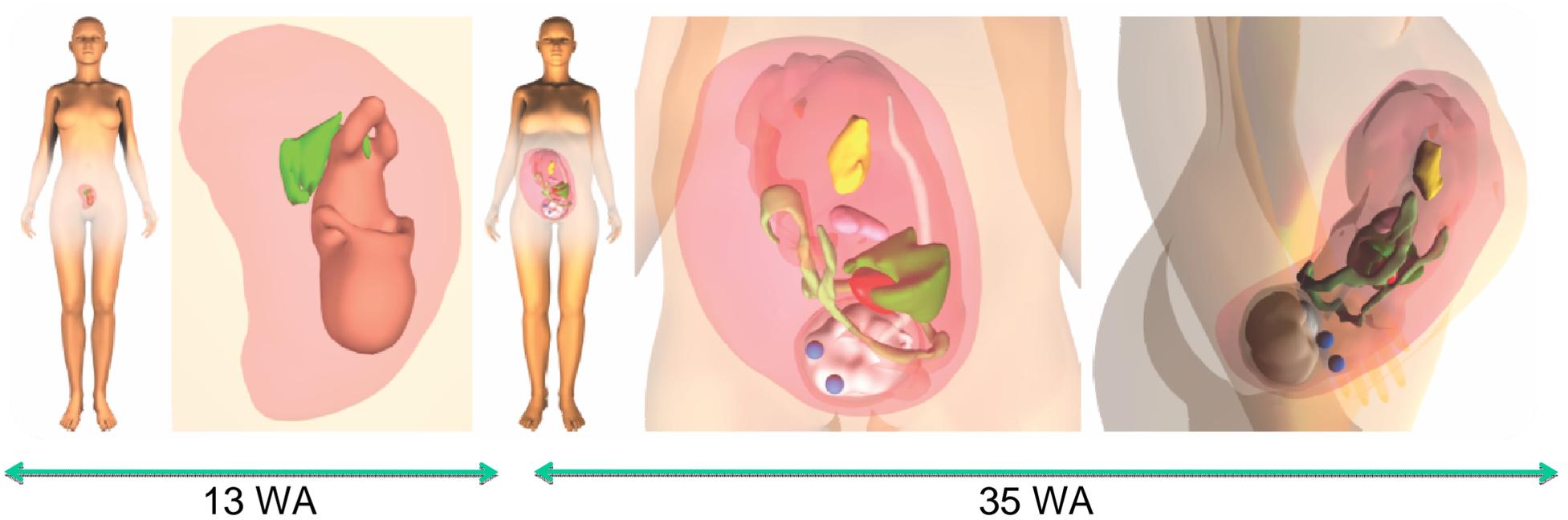
3. Géométrie Numérique

Positionnement du fœtus



3. Géométrie Numérique

Femme enceinte + foetus



3. Géométrie Numérique

Exemples supplémentaires



13 SA (US3D)



23 SA (IRM)



31 SA (IRM)

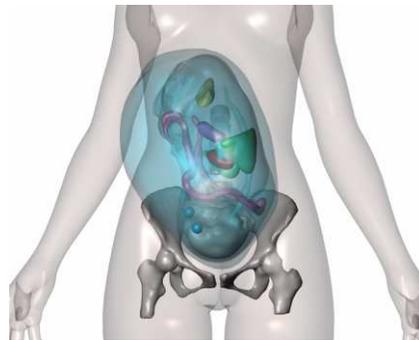
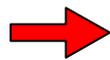
jumeaux

4. Insertion (1/2)

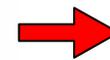
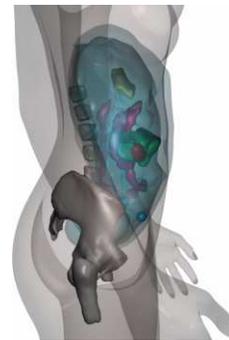
- Modèle de femme synthétique : Victoria (www.daz3d.com).
- Automatisation de l'insertion des modèles de l'UUPF dans Victoria et déformation avec le logiciel SOFA (www.sofa-framework.org).



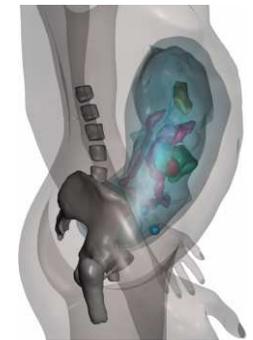
Insertion d'un squelette partiel dans Victoria



Recalage automatique de l'UUPF

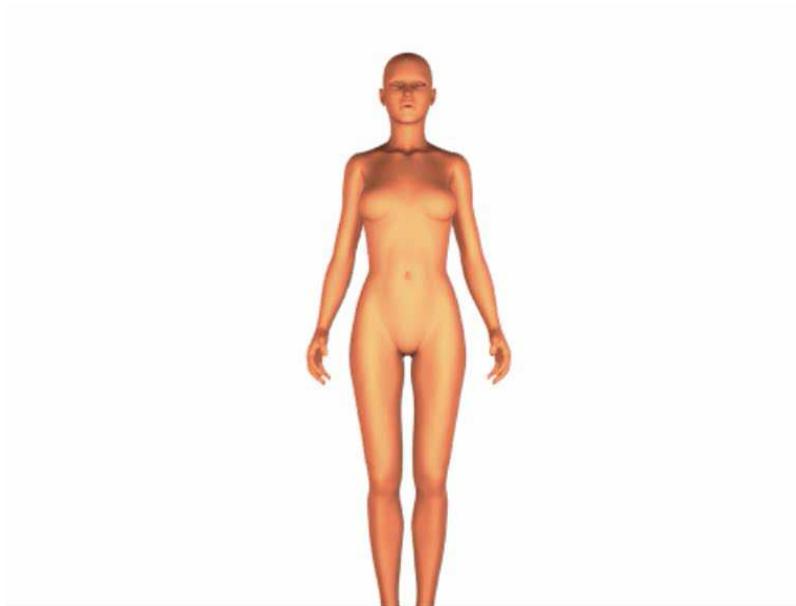


Déformation automatique de l'abdomen

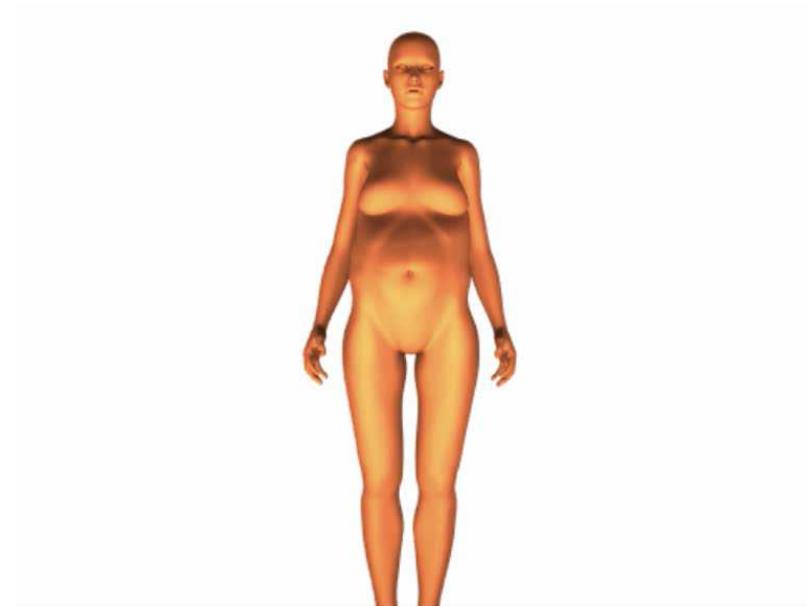


4. Insertion (2/2)

- 4 modèles construits à partir d'images US3D (8 à 12 SA).
- 12 modèles construits à partir d'images IRM (26 à 35 SA).



Ultrasons 3D (12 SA)



IRM (35 SA)

Dosimétrie (1/3)

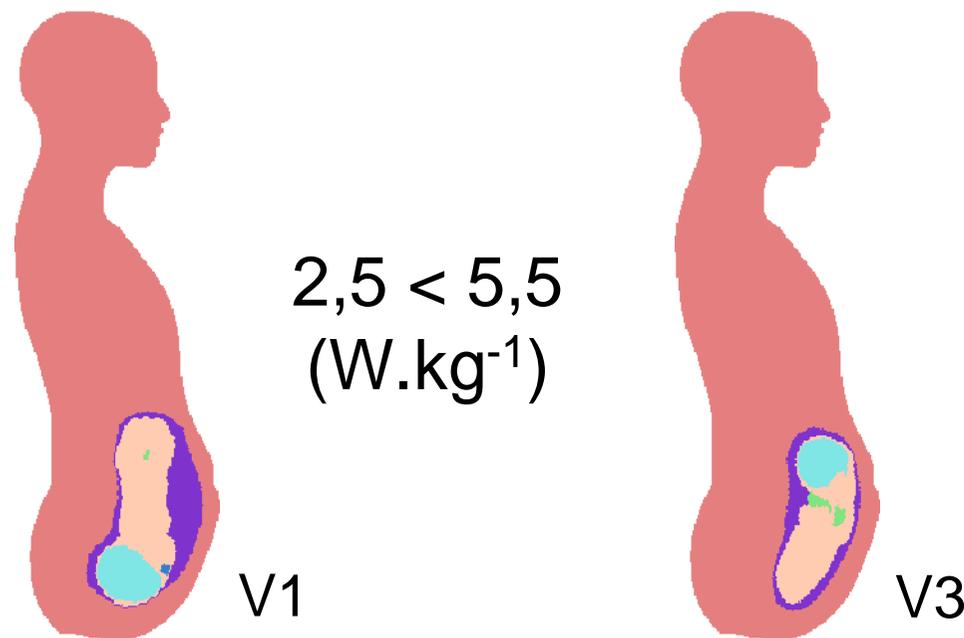
- Résultats préliminaires obtenus sur les 5 premiers modèles construits à partir d'IRM (A. Hadjem, J. Wiart – Orange Labs).
- Exposition du fœtus et de la mère cohérente avec les résultats présentés dans la littérature [Dimbylow 09].

Modèle	V1	V2	V3	V4	V5	M2	M3	M5
Age Gestationnel (SA)	30	32	32	33	34	38	38	26
DAS corps entier - fœtus ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	2,5	4	5,5	2,5	3	3,5	6	2
DAS corps entier - mère ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	17	17	17	14	16	20	18	21
DAS 10 g maximum - fœtus ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	15	21	28	21	16	20	38	7
DAS 10 g maximum - mère ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	591	739	676	651	658	-	-	-

Evaluation du DAS. Champ électromagnétique émis par une source lointaine (1 V/m ; 900 MHz)

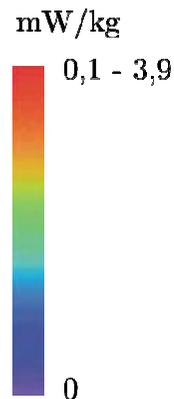
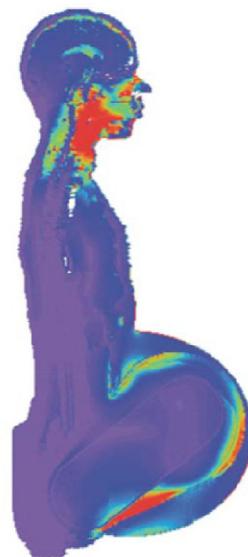
Dosimétrie (2/3)

- Mise en évidence de l'influence de la position foétale et de l'agencement des structures de l'UUPF.
- DAS plus élevé dans V3 que dans V1 :

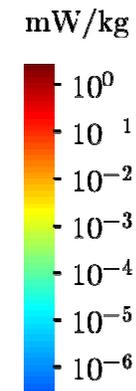
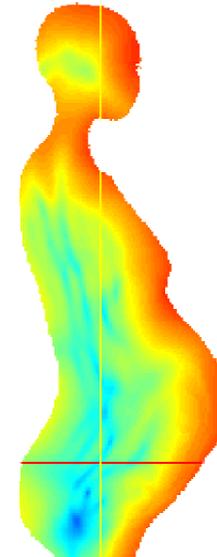


Dosimétrie (3/3)

- L'utilisation d'un modèle de femme homogène a une influence sur la distribution du DAS.
- Sous-estimation du DAS corps entier de la mère dans les modèles ?



NAOMI (hétérogène)



VICTORIA (homogène)



Perspectives



- Automatisation accrue de la méthodologie de construction des modèles à partir d'images obstétriques.
- Variabilité anatomique maternelle : ajout de la graisse.
- Exploitation clinique des modèles et des outils de segmentation (évaluation du poids fœtal, simulation d'examen échographique...).

Merci à nos partenaires !

- Hôpitaux St Vincent de Paul (C. Adamsbaum, V. Merzoug, A. Bellaïche-Millischer , C. Falip), Cochin Port-Royal (G. Grangé) et Beaujon (D. Luton, D. Pognot, G. Ducarme, A. Ottenwaelter) : construction de modèles représentatifs, obtention de données, validation des segmentations, évaluation des modèles.
- Philips Healthcare (O. Gérard, A. Collet-Billon) : obtention de données.