

Publications de la CIPR sur les SAFs et les fantômes pédiatriques (ICRP Publications 155 et 156)

GT CIPR

3 Décembre 2024

IRSN

Charity 1166304 registered with the Charity Commission of England and Wales

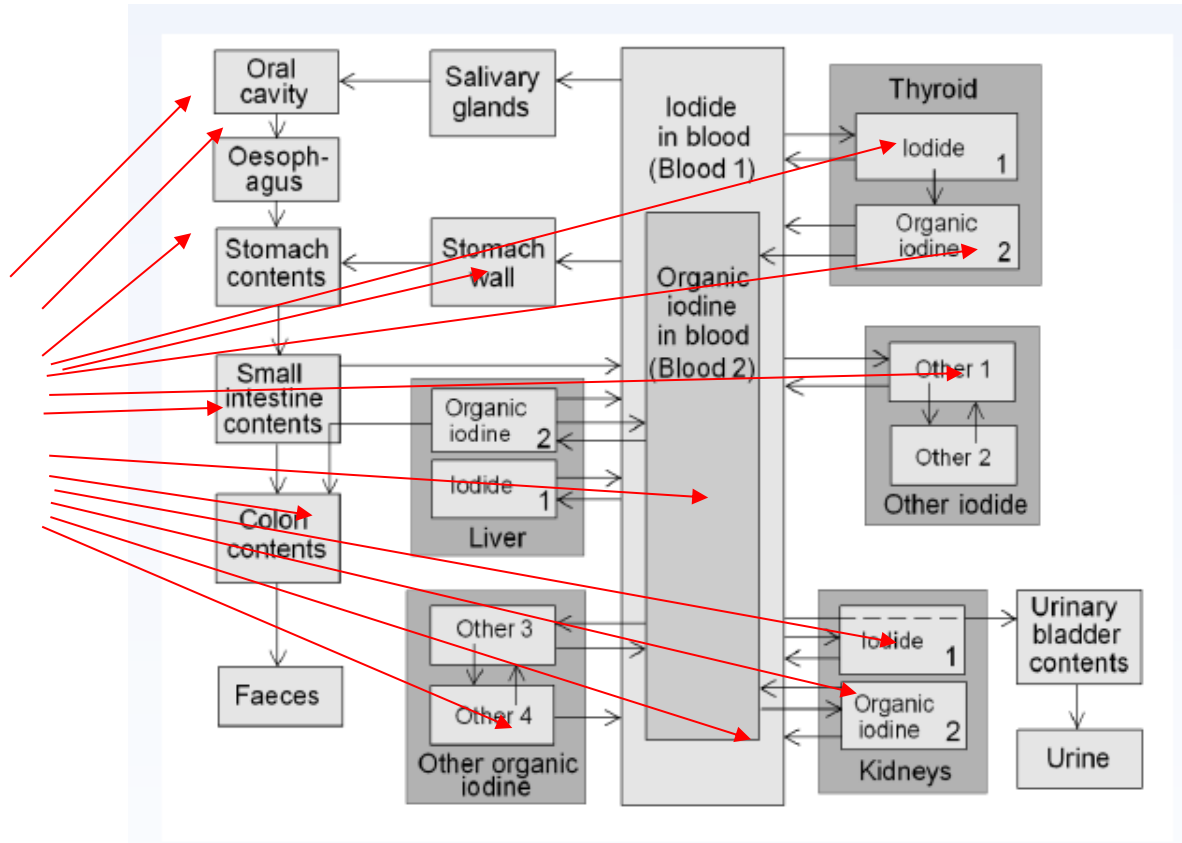
ICRP INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION

François Paquet
IRSN
PSE-ENV

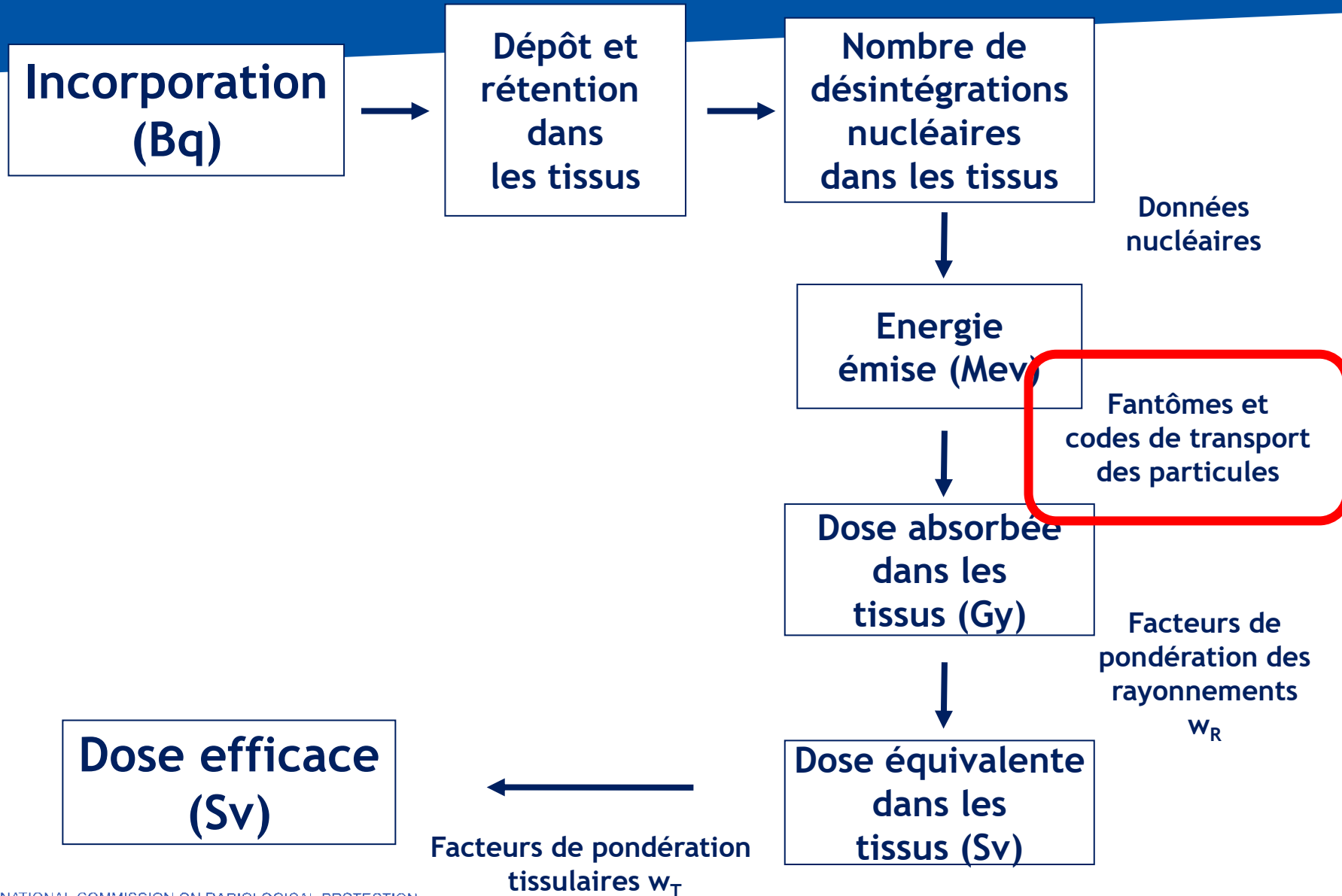
Rappels



Pour chaque compartiment identifié



Rappels



Les fantômes anthropomorphes

A quoi servent-ils ?

Pour calculer une dose après contamination interne il faut :

1/ connaître la masse et la composition des tissus → (ICRP Publication 89, 2002)

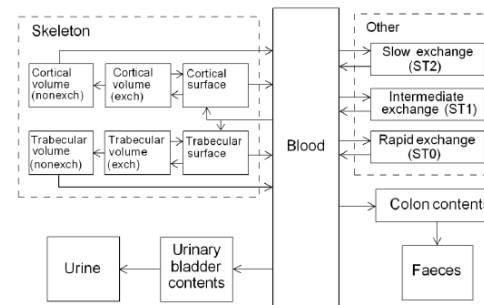
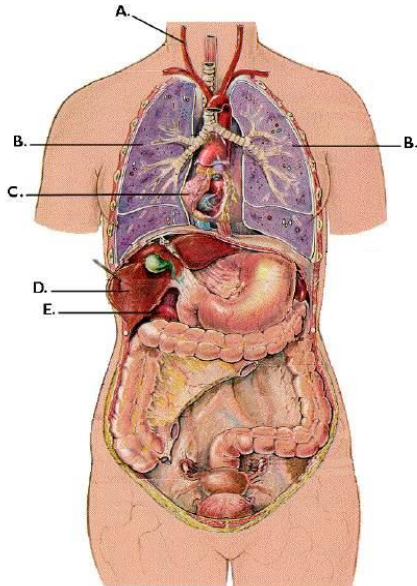
Pour calculer une dose après contamination interne il faut :

1/ connaître la masse, géométrie et la composition des tissus

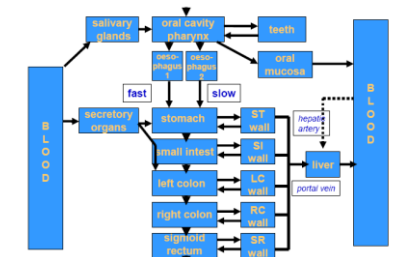
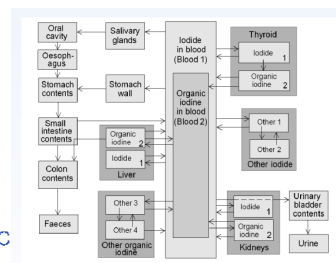


(ICRP Publication 89, 2002)

2/ connaître les positions respectives des régions sources et cibles



région source (79) : organe accumulant les RN (Cf. modèle biocinétique)



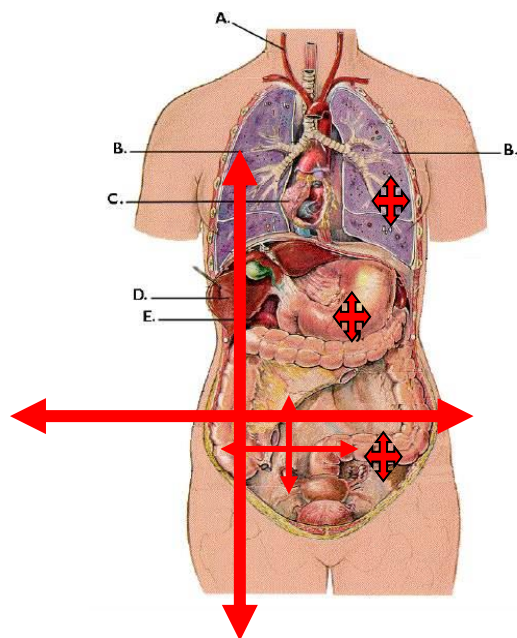
Pour calculer une dose après contamination interne il faut :

1/ connaître la masse, géométrie et la composition des tissus

→ (ICRP Publication 89, 2002)

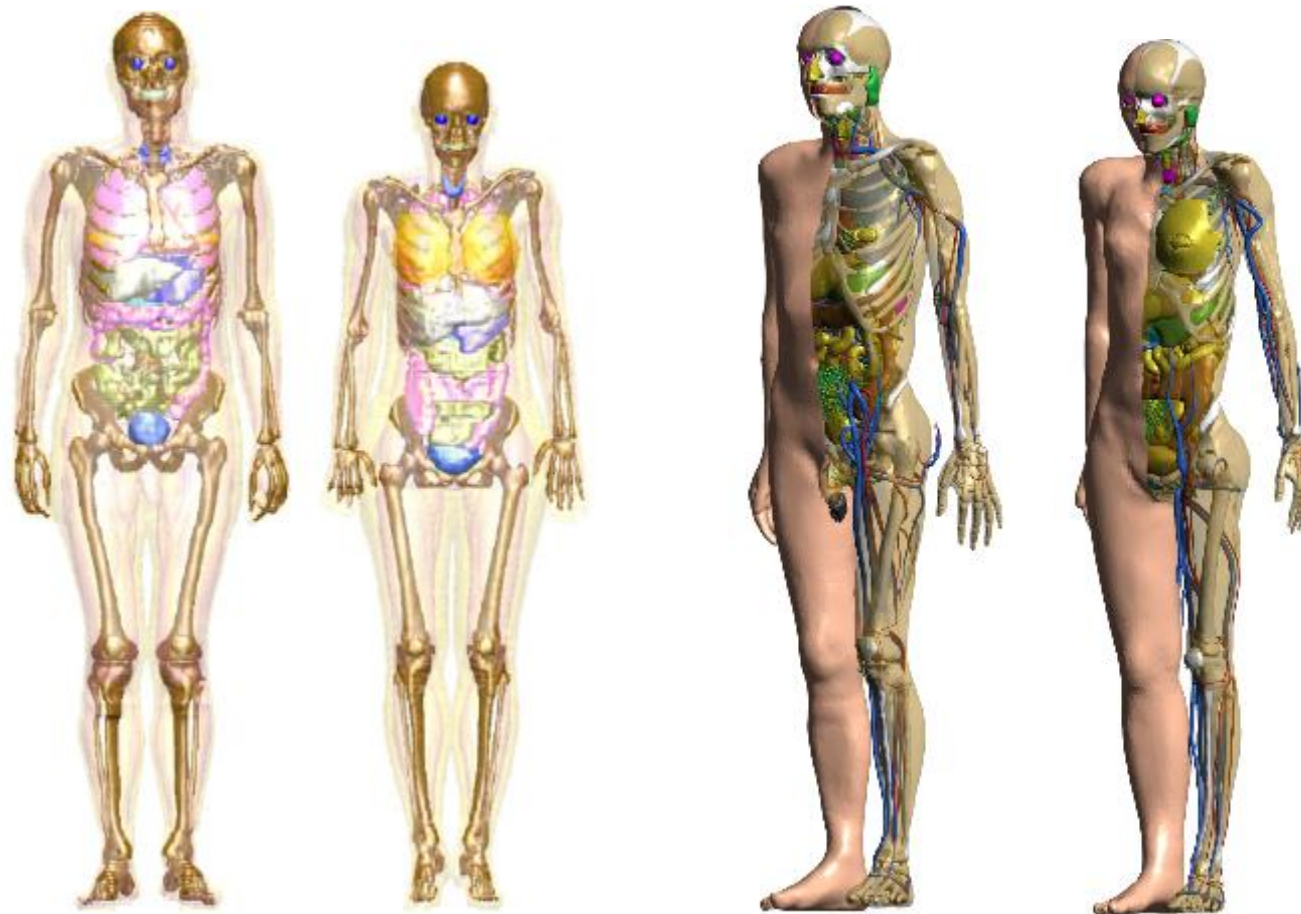
2/ connaître les positions respectives des régions sources et cibles

→ Fantômes anthropomorphes



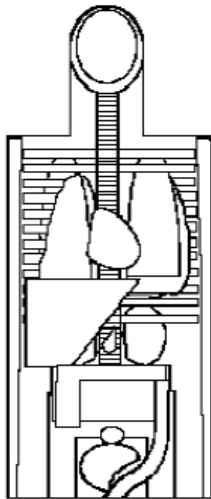
région source (79) : organe accumulant les RN (Cf. modèle biocinétique)
région cible (43) : organe/cellules sensibles aux RI, irradié(es) par désintégration des RN présents dans les régions sources

Les fantômes et leurs évolutions

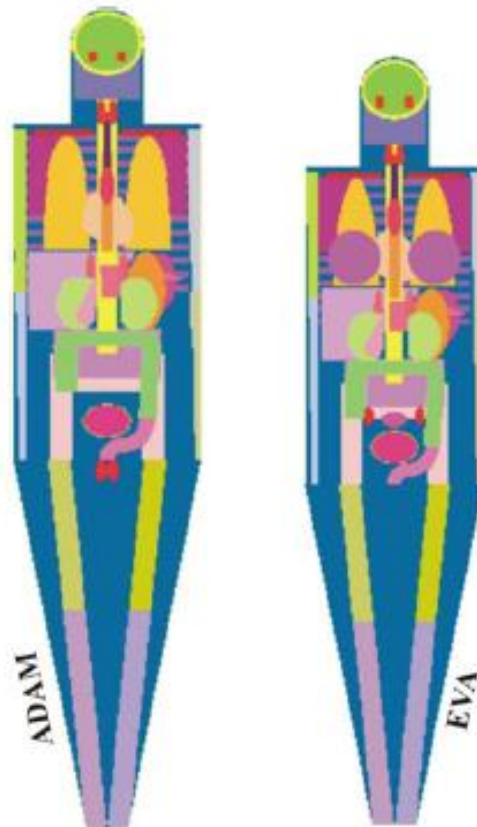


Les premiers fantômes pour la dosimétrie

1970s Les fantômes mathématiques (ou « stylisés »)



68 régions



Fantomes MIRD5 ou ADAM et EVA

Taille et forme des tissus
sont représentés par des équations

The brain is an ellipsoid given by

$$\left(\frac{x}{6}\right)^2 + \left(\frac{y}{9}\right)^2 + \left(\frac{z - 86.5}{6.5}\right)^2 \cong 1,$$

and the volume is 1,470 cm³ (Fig. 4).

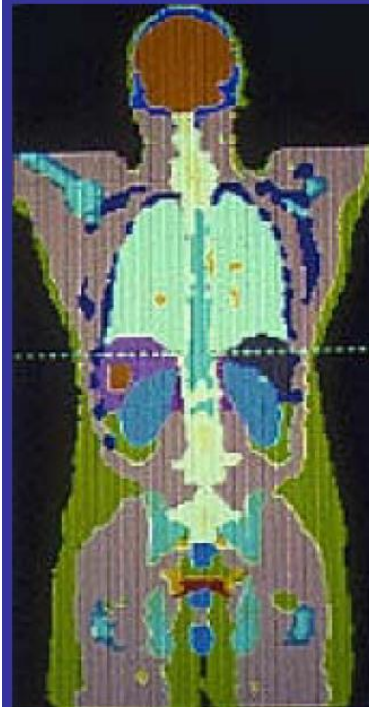
Taille modifiable
Précision discutable

La génération des fantômes voxelisés

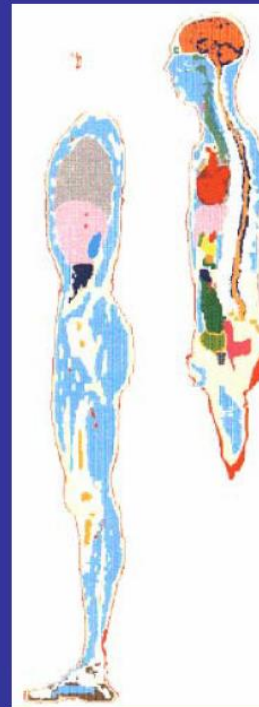
2000s Les fantômes numériques

Construction à partir d'images scanner ou IRM

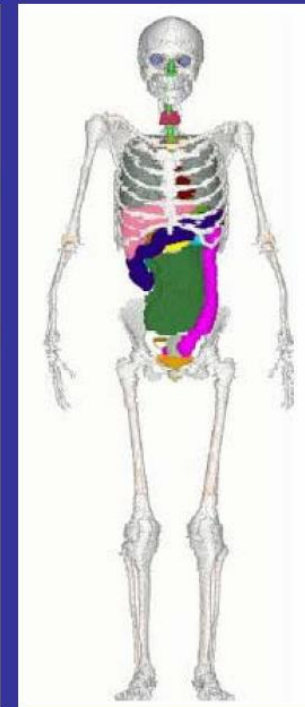
Segmentation des fantômes
(délimitation de chaque organe et attribution d'une composition élémentaire et d'une densité)



Voxelman
(George Zubal, Yale University, USA)

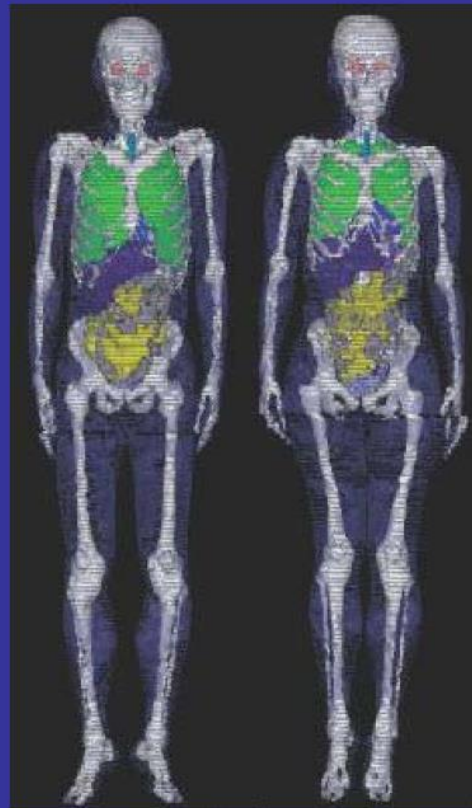


NORMAN and NAOMI
(Peter Dimbylow, HPA, UK)

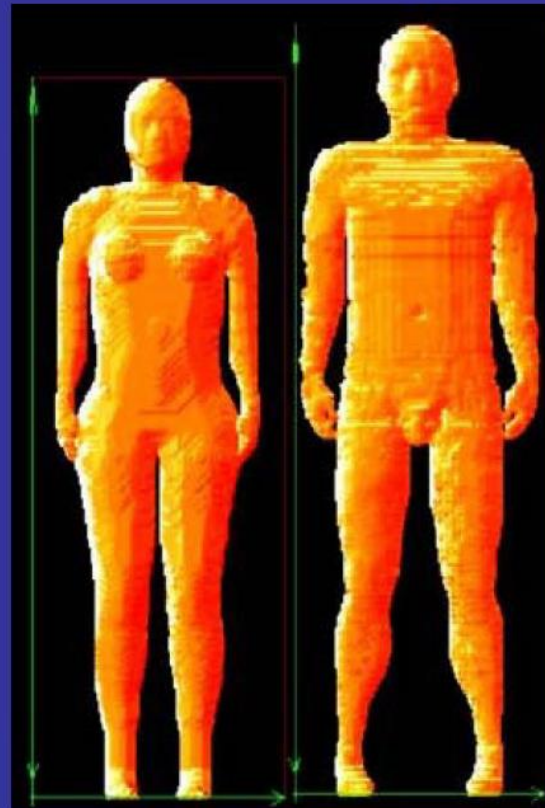


VIP-Man
(X. George Xu, RPI, USA)

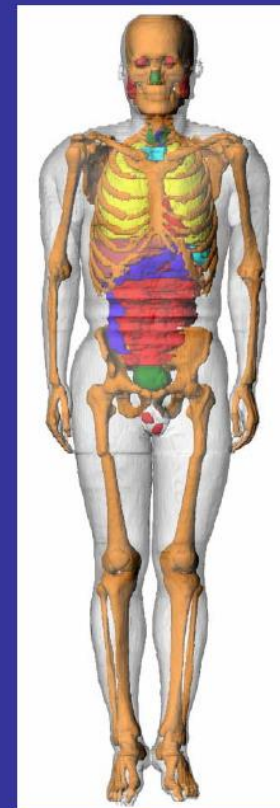
La génération des fantômes voxélisés



Otoko and Onago
(Kimiaki Saito, JAEA, Japan)



FAX06 and MAX06
(Kramer *et al.* 2006 Phys.
Med. Biol. 51, 3331-3346)



KTMAN-2
(Jaiki Lee, Hanyang, Korea
Choonsik Lee, UFL, USA)

Les fantômes voxels de la CIPR

Construits à partir d'images de deux patients, et modifiés pour correspondre aux personnes de référence de la CIPR

140 régions
(dont les 79 régions sources et les 43 régions cibles définies par CIPR)

➔ ICRP Publication 110, 2009

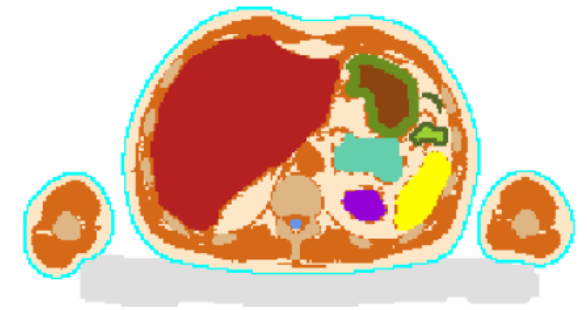
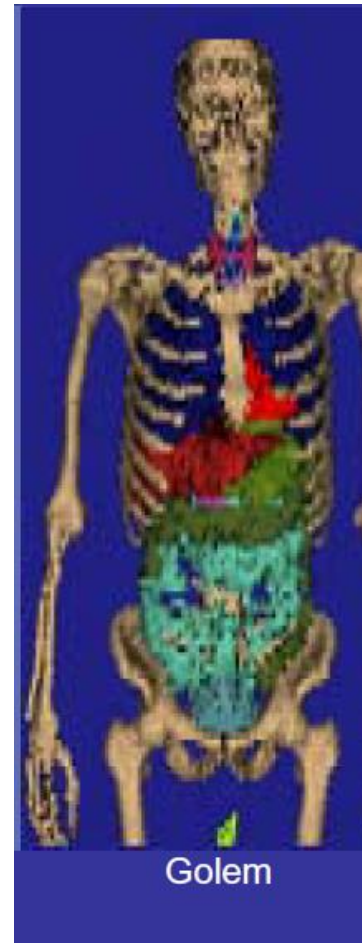
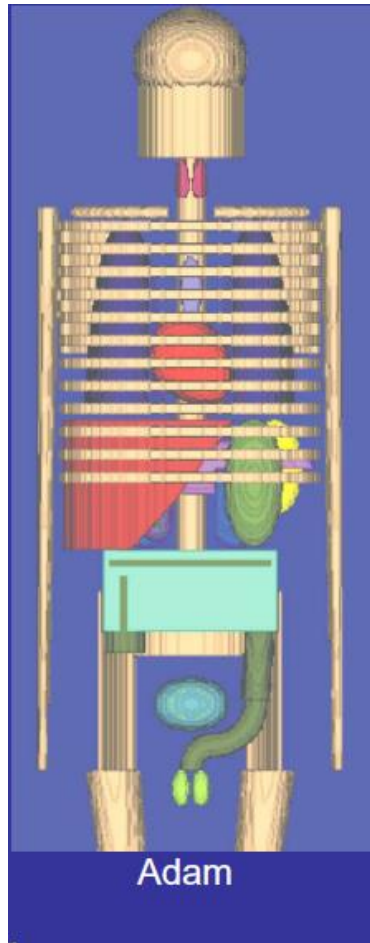


female
163 cm, 60 Kg
3.9 million voxels
voxel size: 15.2 mm³
slice thickness: 4.84 mm
In-plane resolution:
1.775 mm

male
176 cm, 73 Kg
1.9 million voxels
voxel size: 36.5 mm³
Slice thickness: 8 mm
In-plane resolution:
2.137 mm

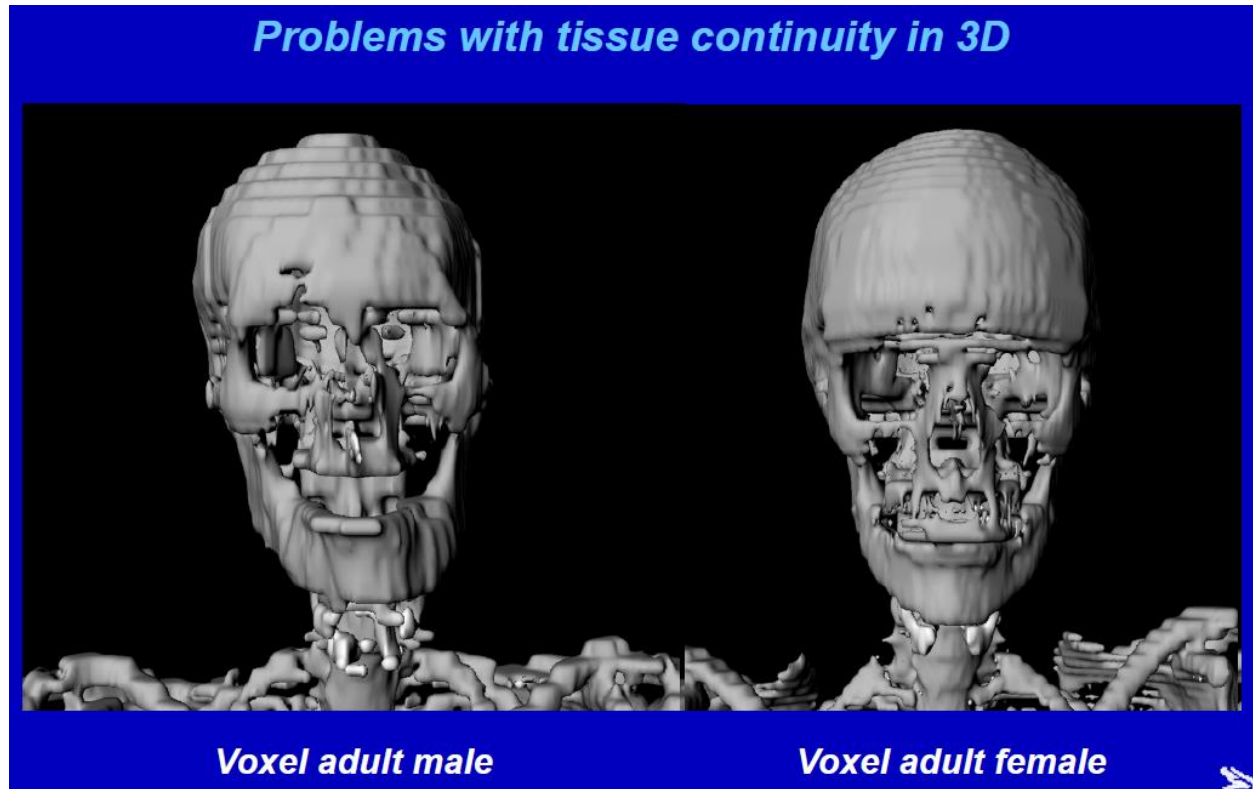
D'après M. Zankl
(Helmholtz)

Comparaison des fantômes voxels et mathématiques



**Précision
accrue**

Les limites des fantômes voxels



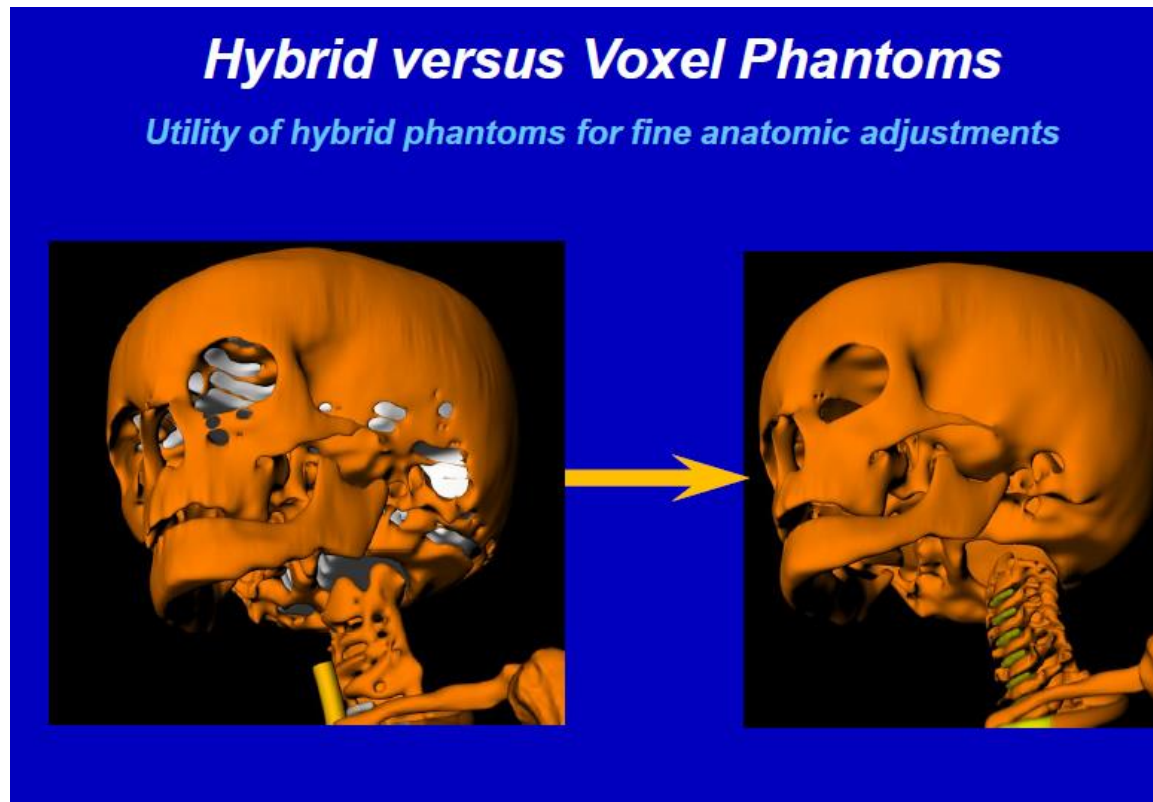
Les limites des fantômes voxels

- **Réalisme « physiologique »**
 - **Fantômes couchés**
 - **Poumons « compressés »**
 - **Sang et tissus lymphatiques pas détectés dans images**
- **Réalisme anatomique**
 - **Cellules cibles pas représentées dans partie extrathoracique, trachée, peau,.. (une seule couche de voxels)**
 - **Certaines structures très fines pas représentées (microstructure squelette, cristallin, vaisseaux sanguins, ..)**
 - **Structure arbre bronchique limitée aux bronches de large diamètre**
 - **Vésicule biliaire et moelle osseuse mal représentées**
 - **Cartilage peu visible**
 - **Ajustement des masses par adjonction tissus adipeux mais pas représentatif**

**Conviennent très bien pour calcul du transport des photons et des neutrons
mais moins bien pour le transport des alpha et beta**

12 modèles spécifiques (tractus alimentaire et respiratoire, squelette,..) ont dû être établis

Les ajustements des modèles



Première étape :

Développement de modèles hybrides (NURBS/PM) ayant flexibilité des modèles mathématiques et précision modèles tomographiques



Série de fantômes adultes et pédiatriques (UF/NCI)

Les fantômes pédiatriques UF/NCI



**Fantômes pédiatriques pour enfants âgés de
3 mois, 1,5, 10, 15 ans**

Les fantômes pédiatriques voxélisés de la CIPR

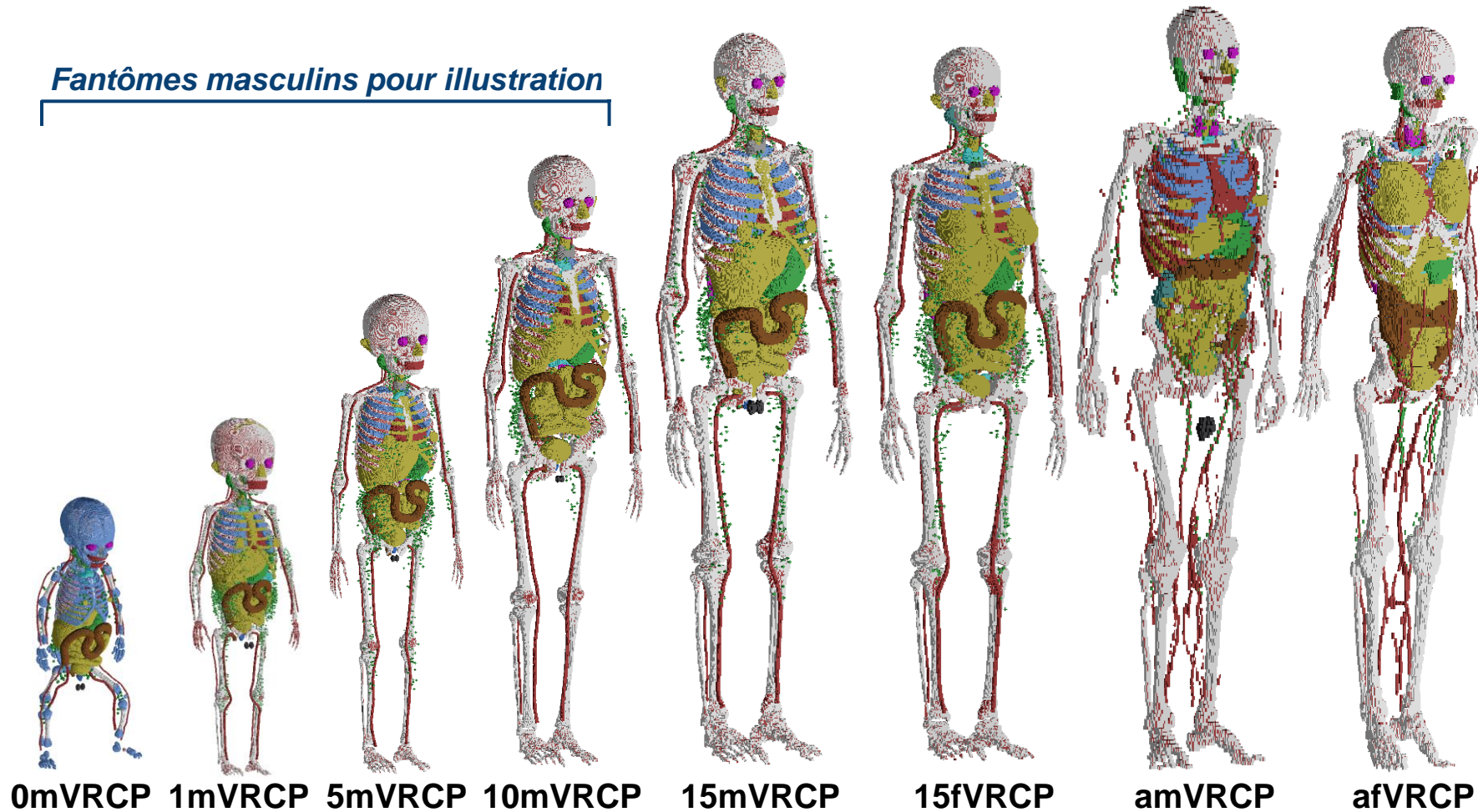
Deuxième étape :

**« Voxélisation » des fantômes UF/NCI
à très haute résolution pour permettre utilisation
dans les codes Monte Carlo
(et conformité avec fantômes adultes de la CIPR 110)**

→ ICRP Publication 143, 2020

Les fantômes pédiatriques voxélisés de la CIPR

Fantômes masculins pour illustration



Les fantômes voxels de la CIPR

Ces fantômes voxels ont été et sont utilisés par la CIPR pour calculer les coefficients de dose

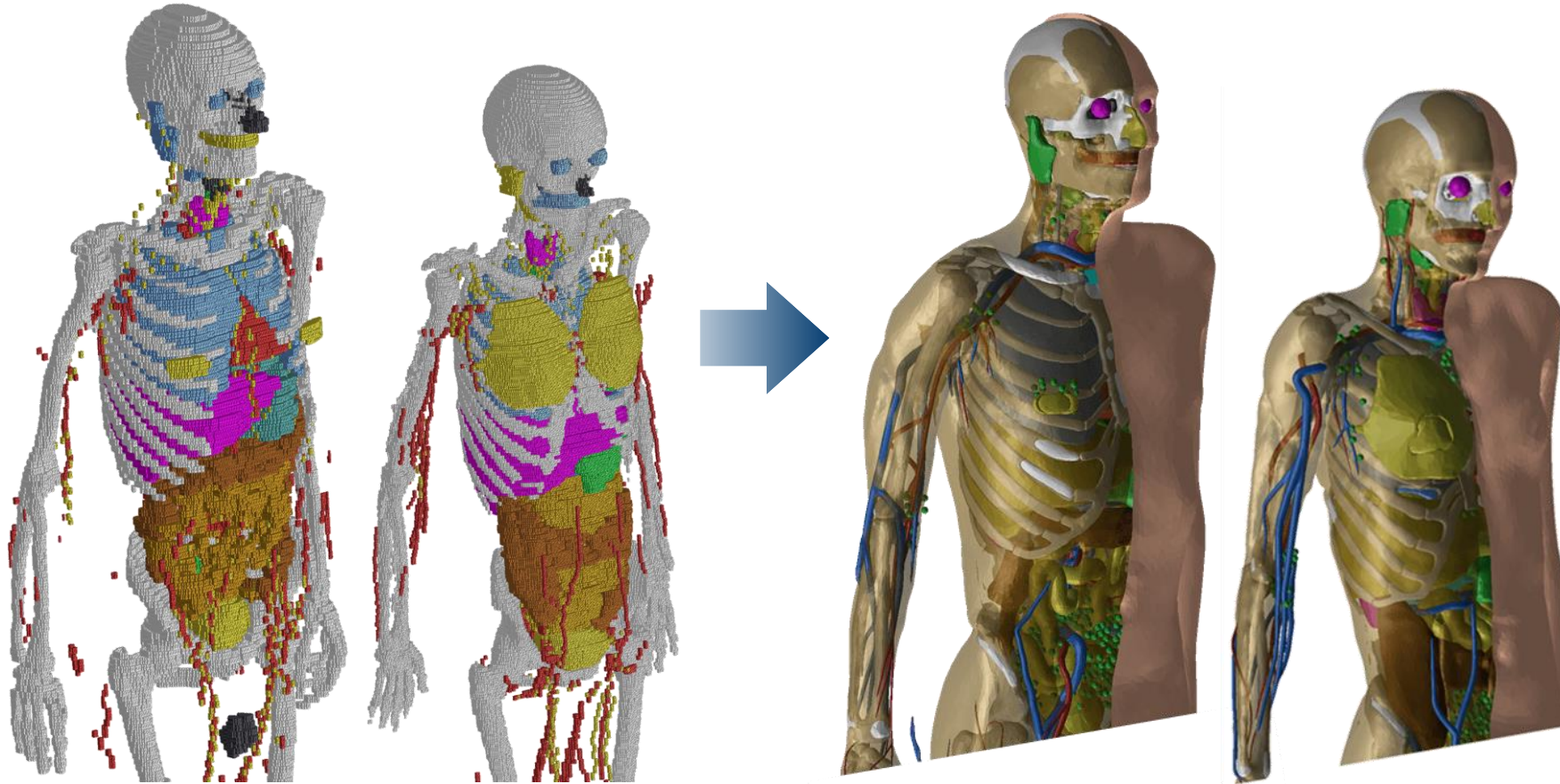
- Exposition externe (ICRP 116, 2010; ICRP 144, 2020)
- Exposition interne travailleurs (ICRP 130, 134, 137, 141, 151 (2007 à 2022))
- Exposition externe aux rayonnement cosmique (ICRU, 2010; ICRP 123, 2013)
- Exposition interne public (en cours)
- Exposition patients aux radiopharmaceutiques (en cours)

Vers une nouvelle génération de fantômes



**Mesh-type reference computational phantoms
MRCPs**

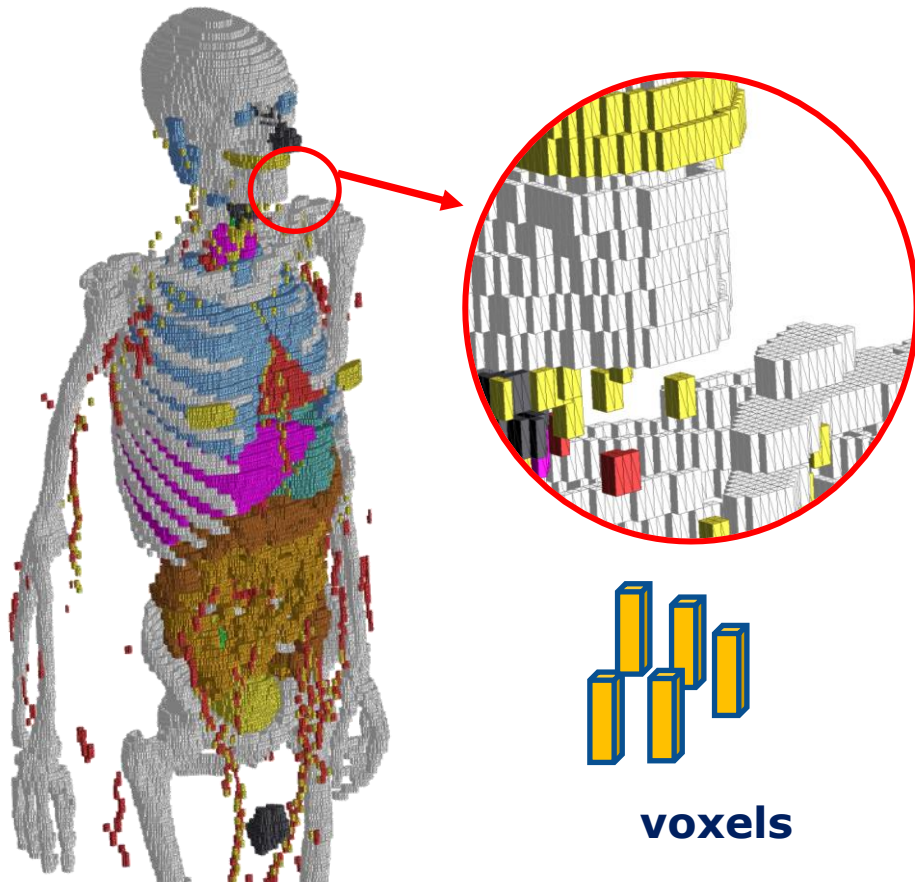
Les fantômes Mesh



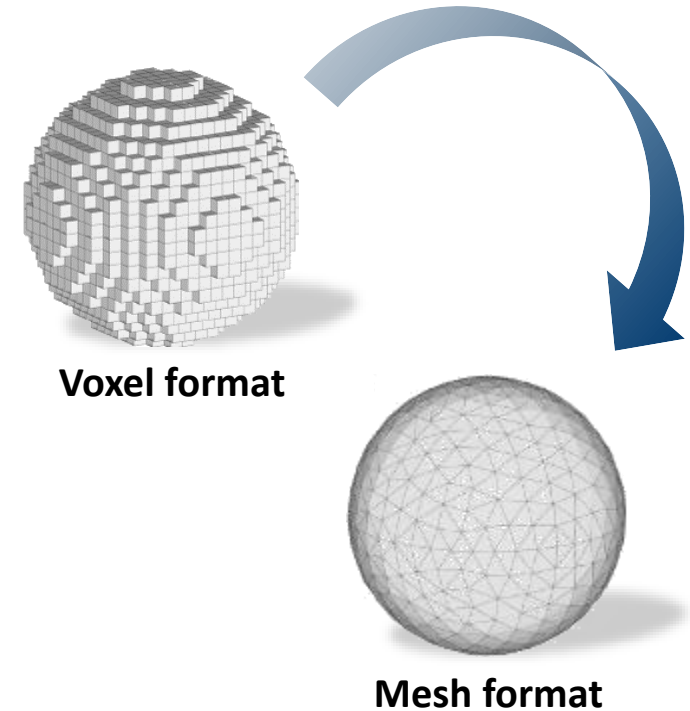
ICRP 110 fantômes de référence

MRCPs Adulte

Avantages des fantômes Mesh



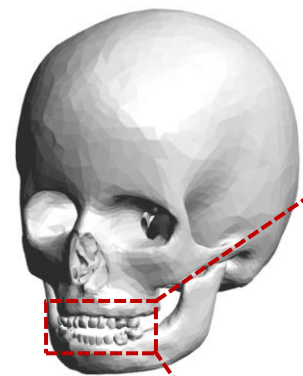
Fantôme mâle
(2.137x2.137x8 mm³)



**Modélisation en maillage
polygonal et tétraédrique**

Plus grande précision anatomique

Avantages des fantômes Mesh



5mMRCP



Cementum



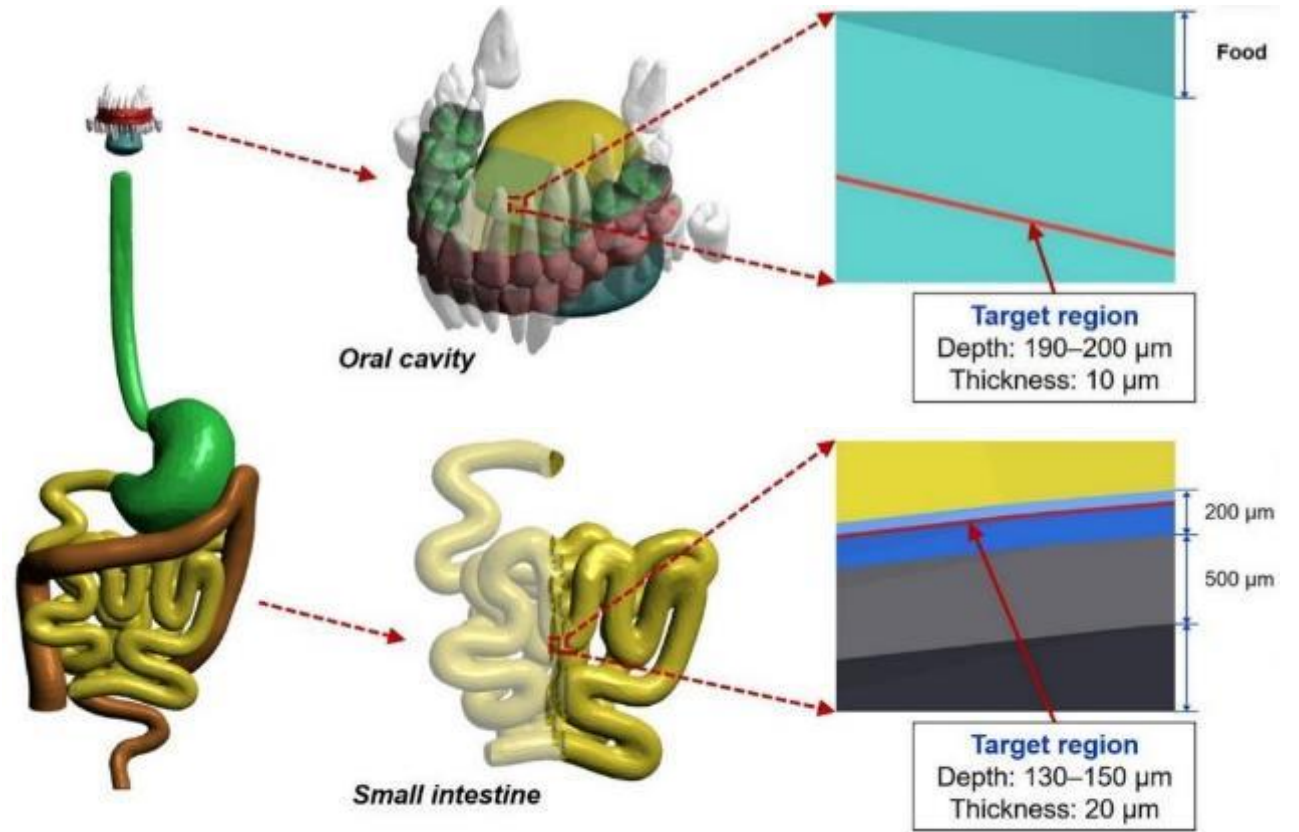
Enamel



Dentin

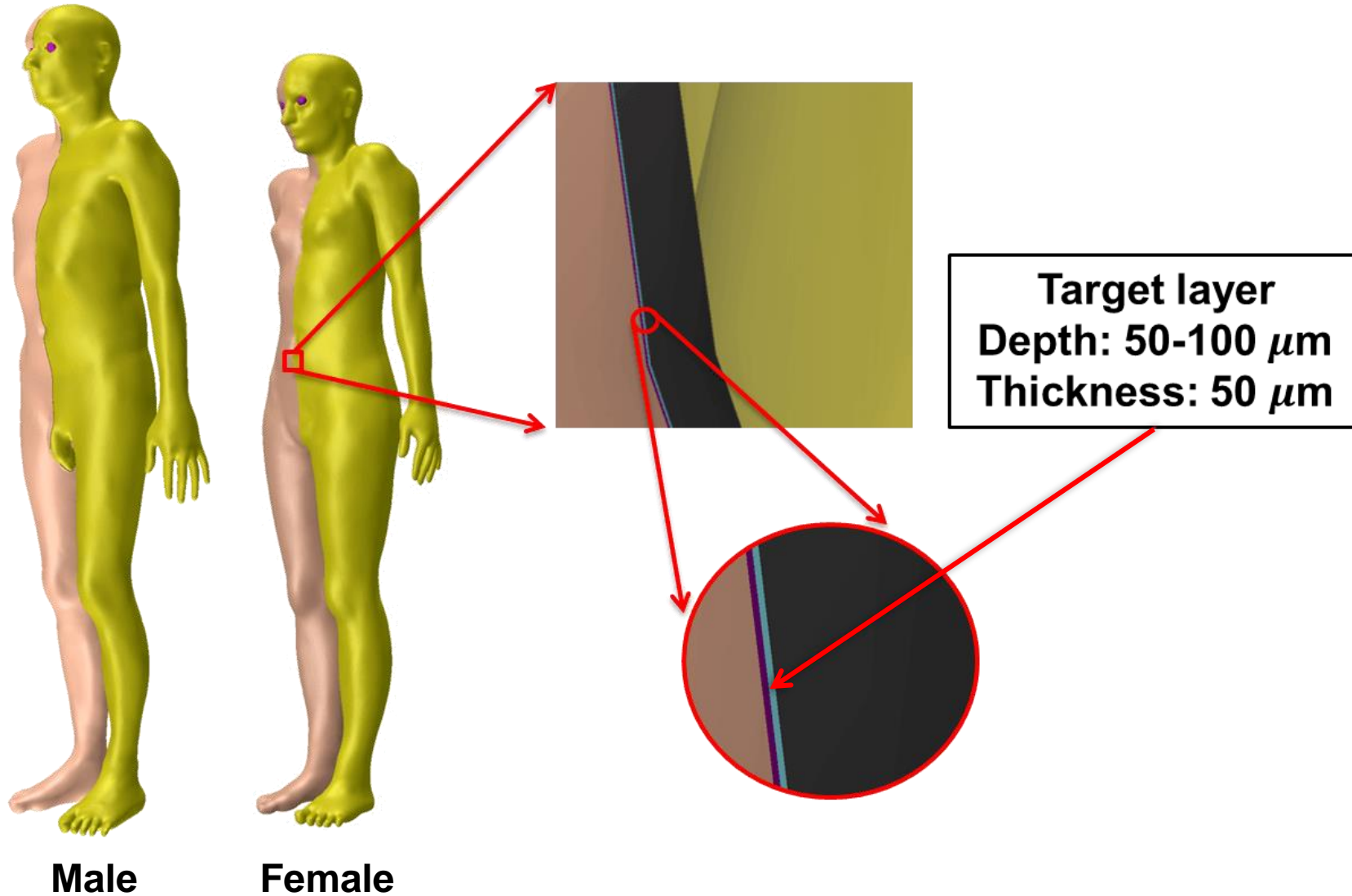


Pulp

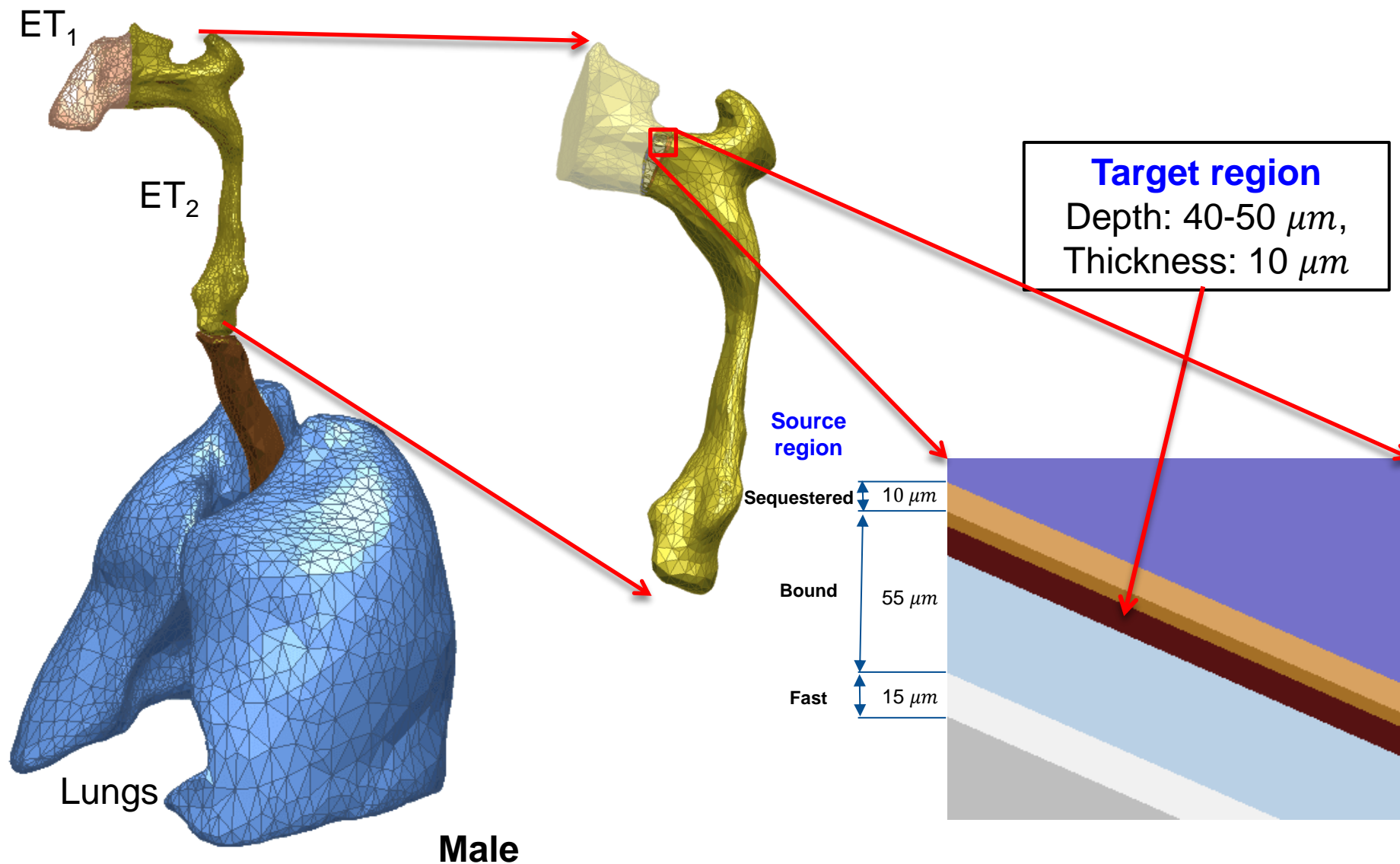


Résolution très fine, permettant la localisation des cellules sensibles

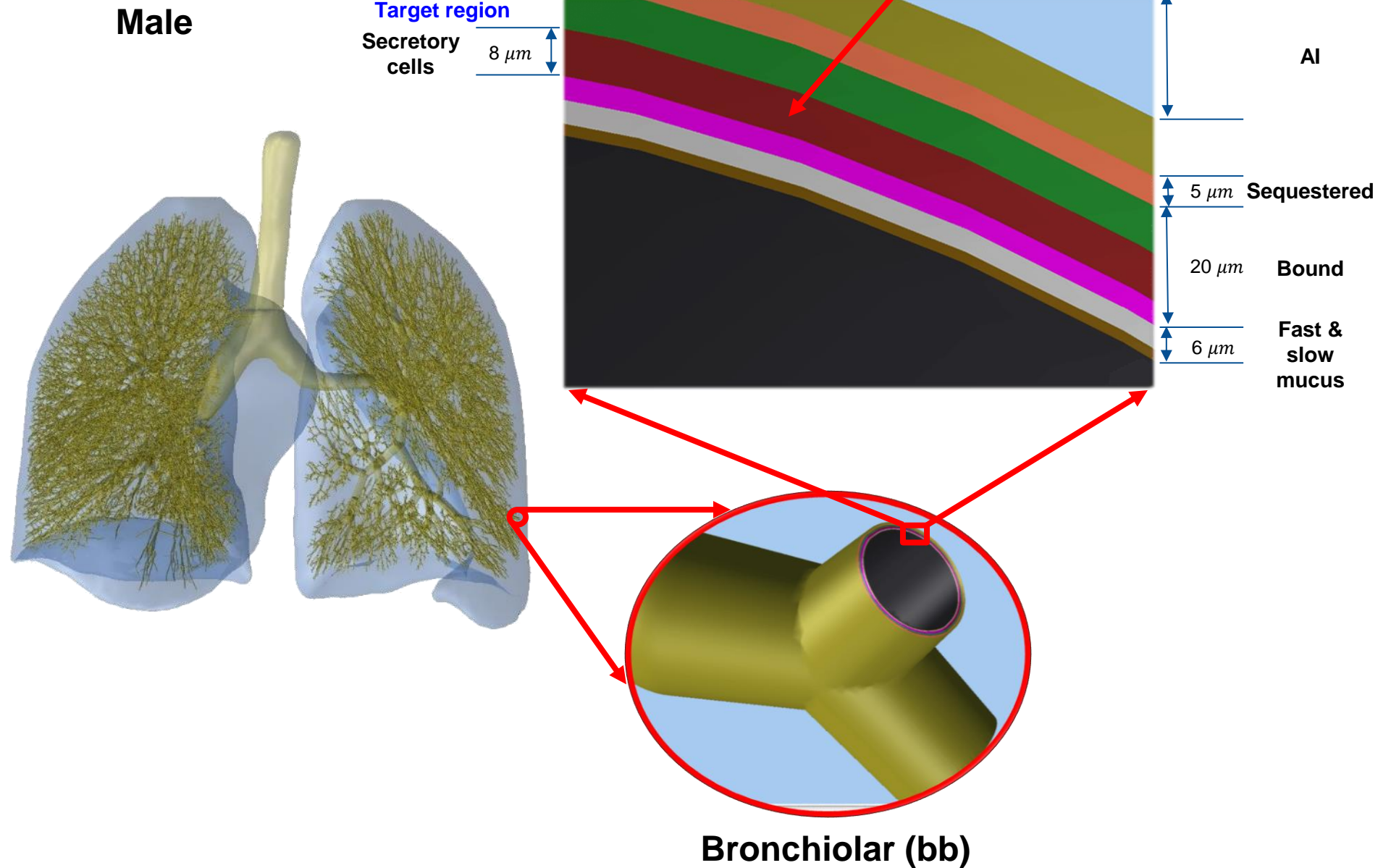
Peau



Poumons

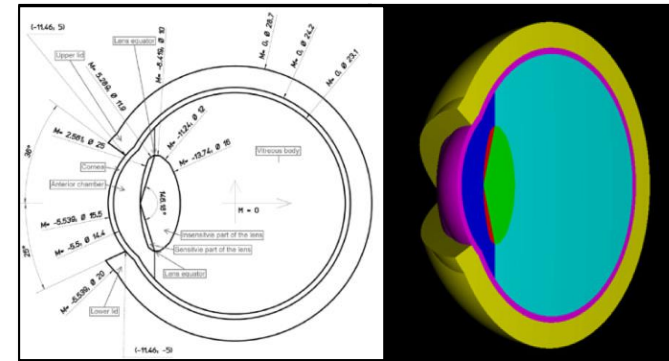
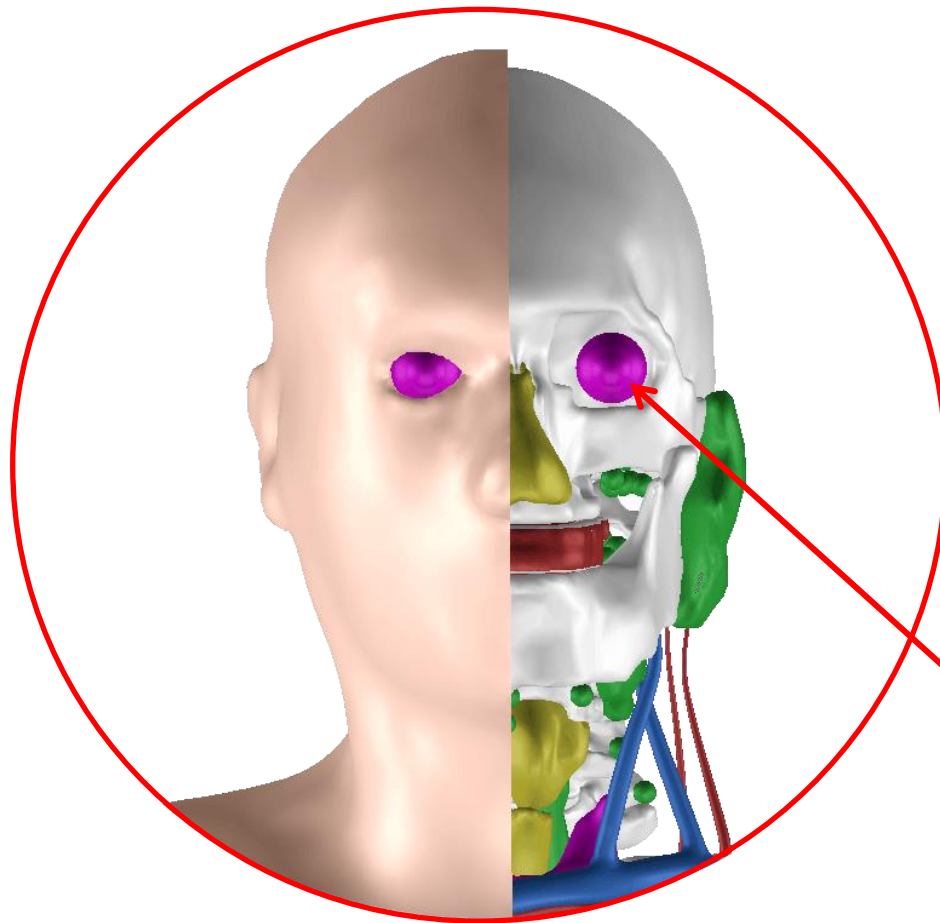


Poumons



Cristallin

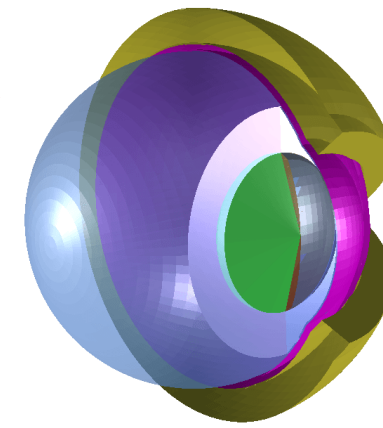
Behrens' eye model (2009)



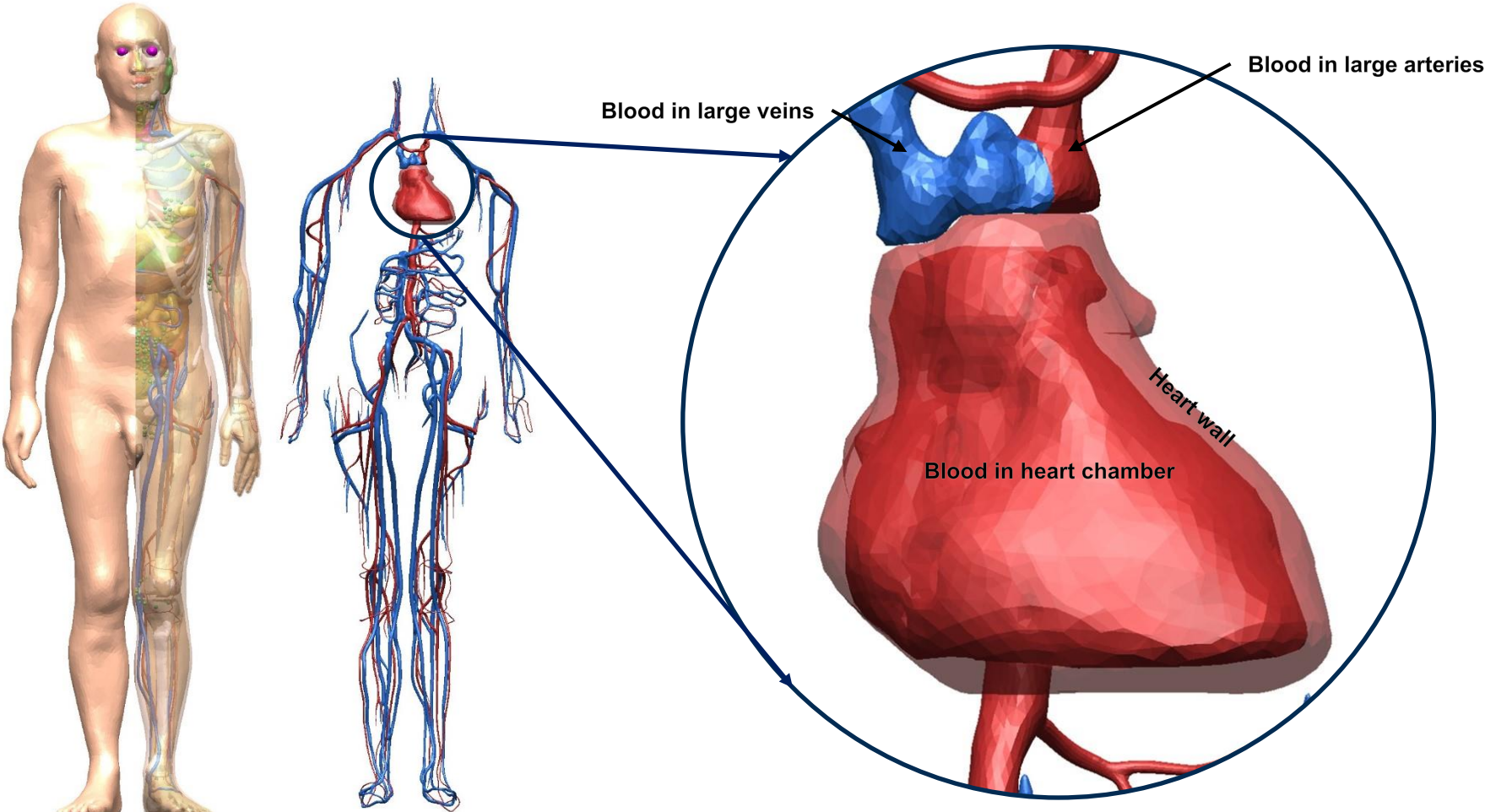
Installed



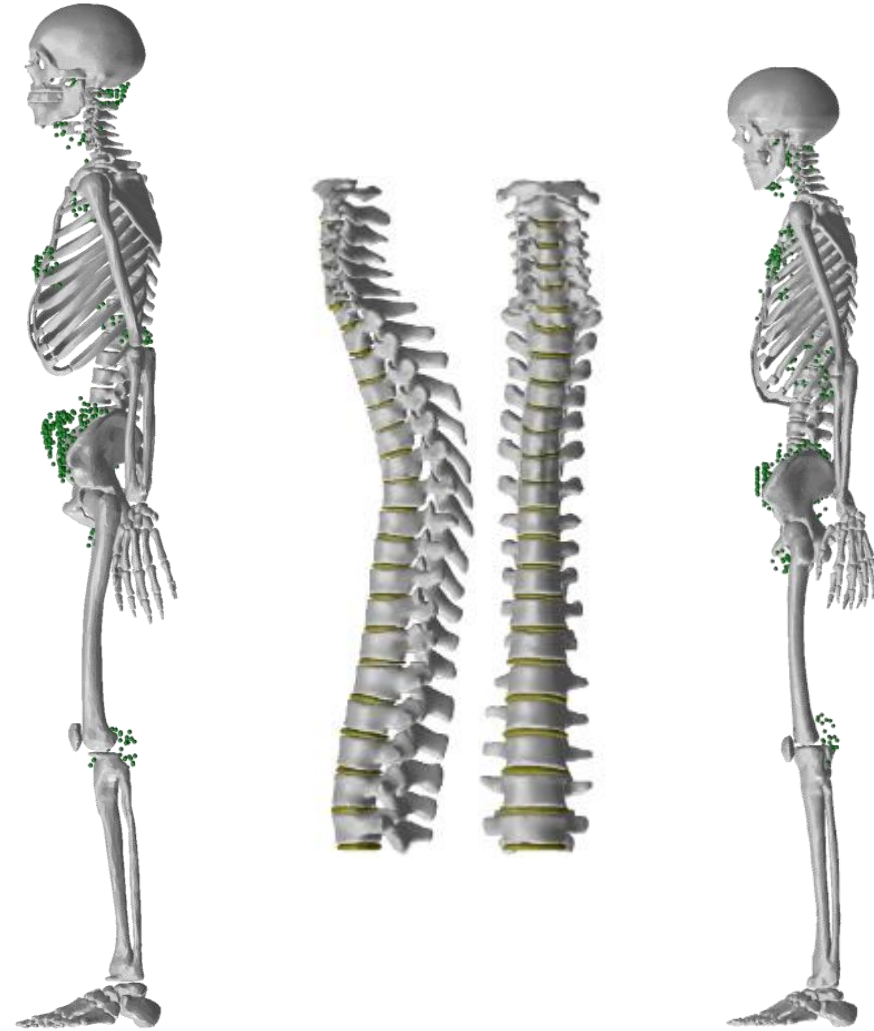
Converted to mesh format



Coeur



Ganglions lymphatiques et squelette



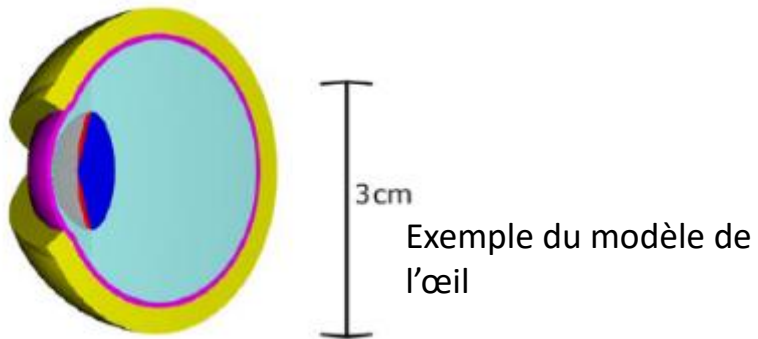
amMRCP

afMRCP

Avantages des fantômes Mesh

Les fantômes Voxel doivent être complétés par d'autres modèles

voies respiratoires
parois du tube digestif
vessie
cristallin de l'œil
épiderme de la peau



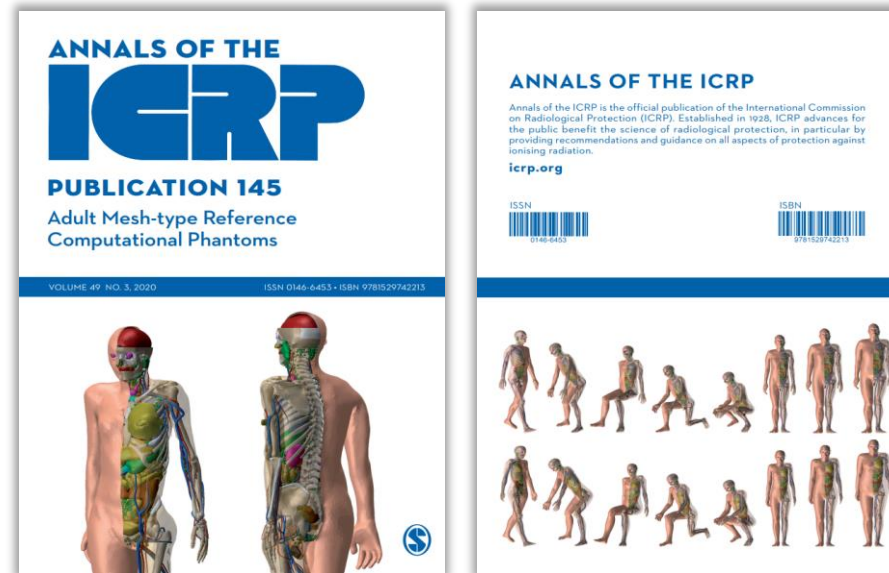
12 fantômes stylisés supplémentaires nécessaires pour le calcul des coefficients de dose

Fantômes Mesh

=

Tout en 1

Les fantômes Mesh adultes de la CIPR



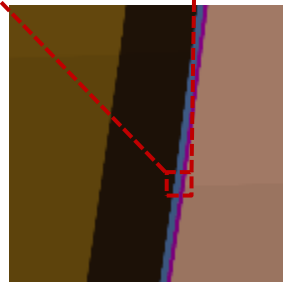
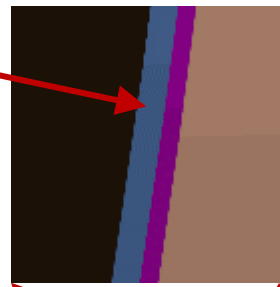
**Fantômes déformables dans toutes les positions
Contiennent toutes les sources et cibles nécessaires pour le calcul des doses
(48 organes et tissus avec 170 sous régions)**

ICRP Publication 145, 2020

Les fantômes Mesh pédiatriques

Adaptation de l'anatomie en fonction de l'âge et du sexe

Target region
Depth: 40–100 μm
Thickness: 60 μm



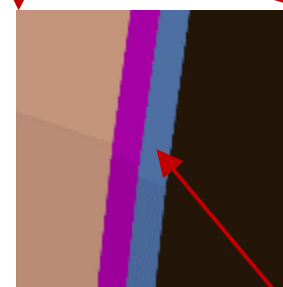
Entire skin



1fMRCP

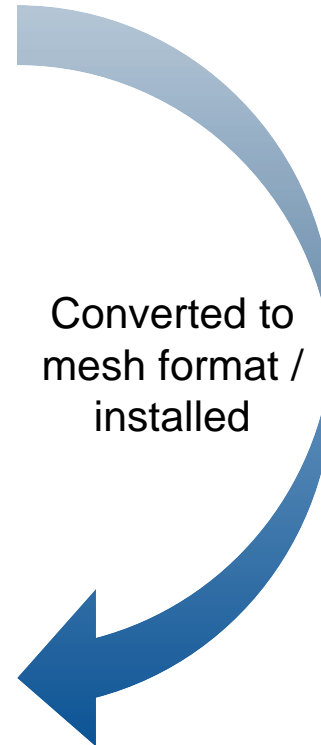
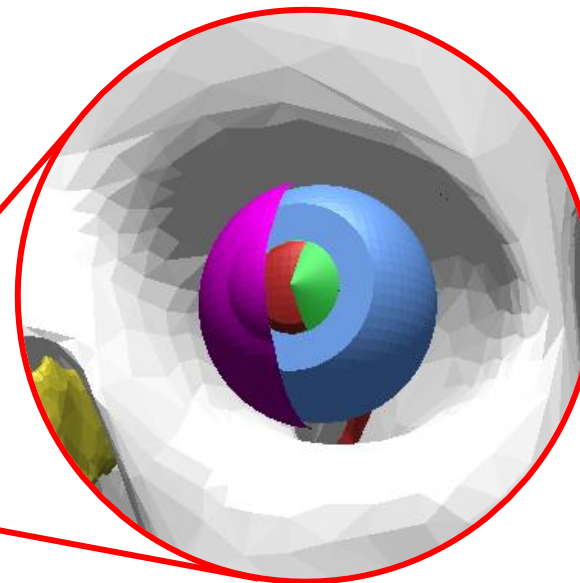
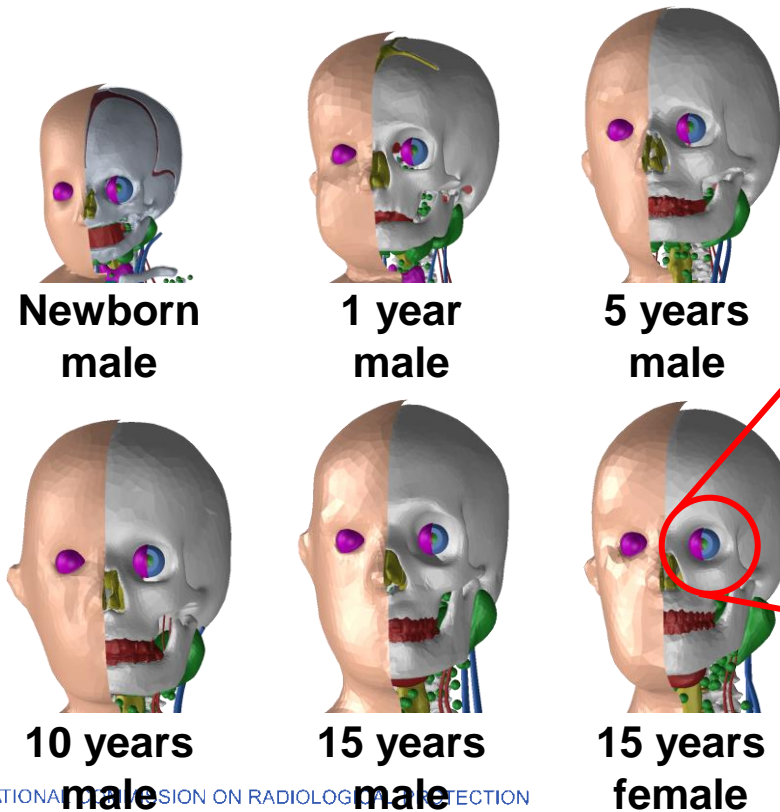
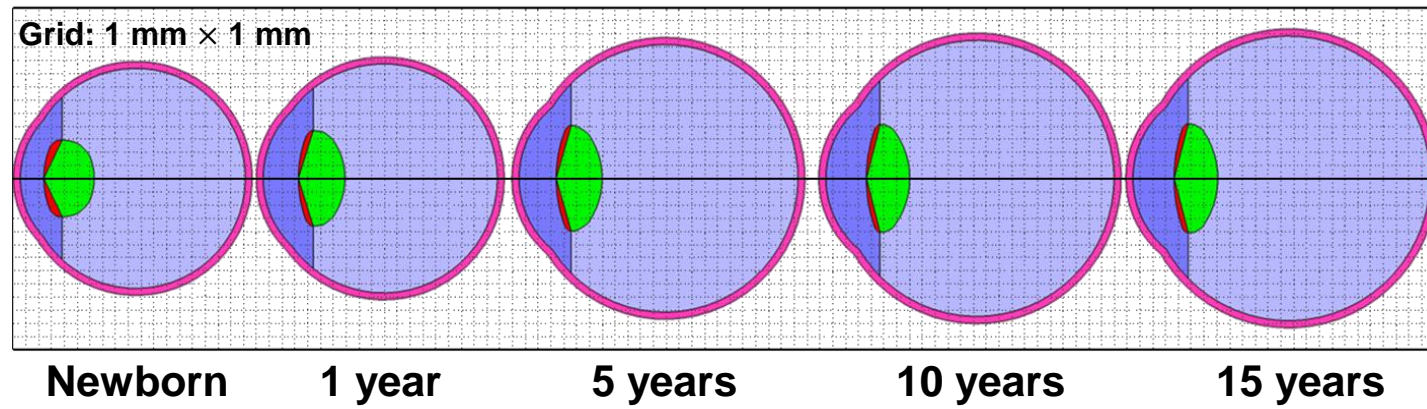


amMRCP

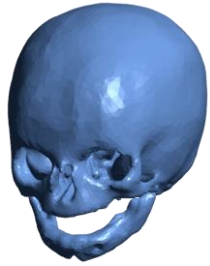


Target region
Depth: 50–100 μm
Thickness: 50 μm

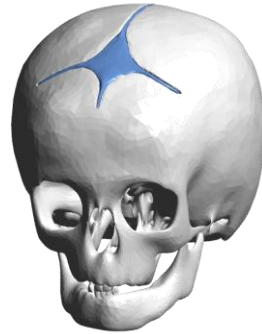
Cristallin



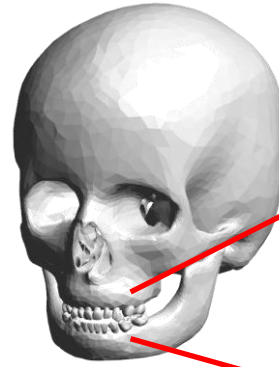
Dents



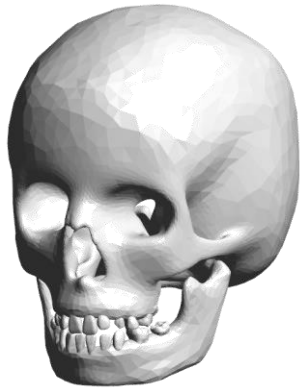
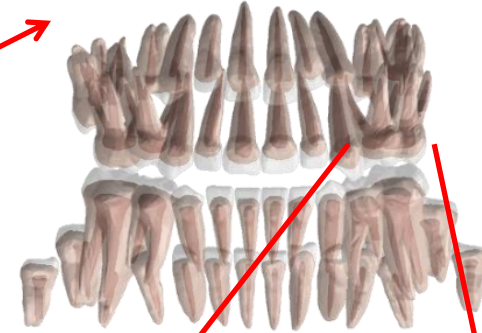
**Newborn
female**



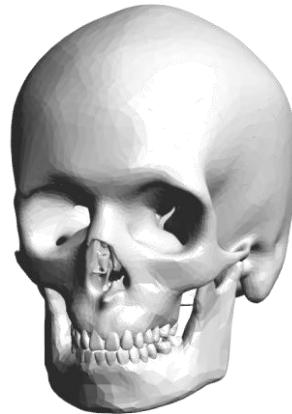
**1 year
female**



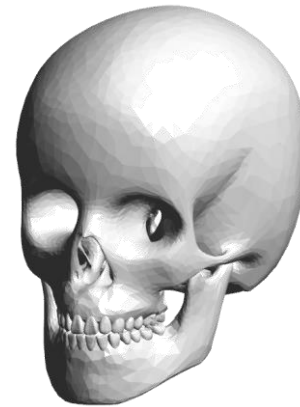
**5 years
female**



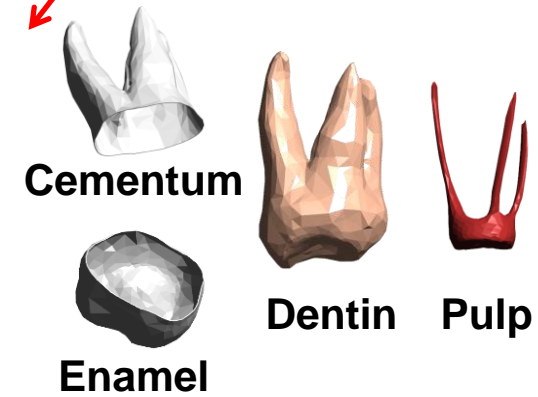
**10 years
female**



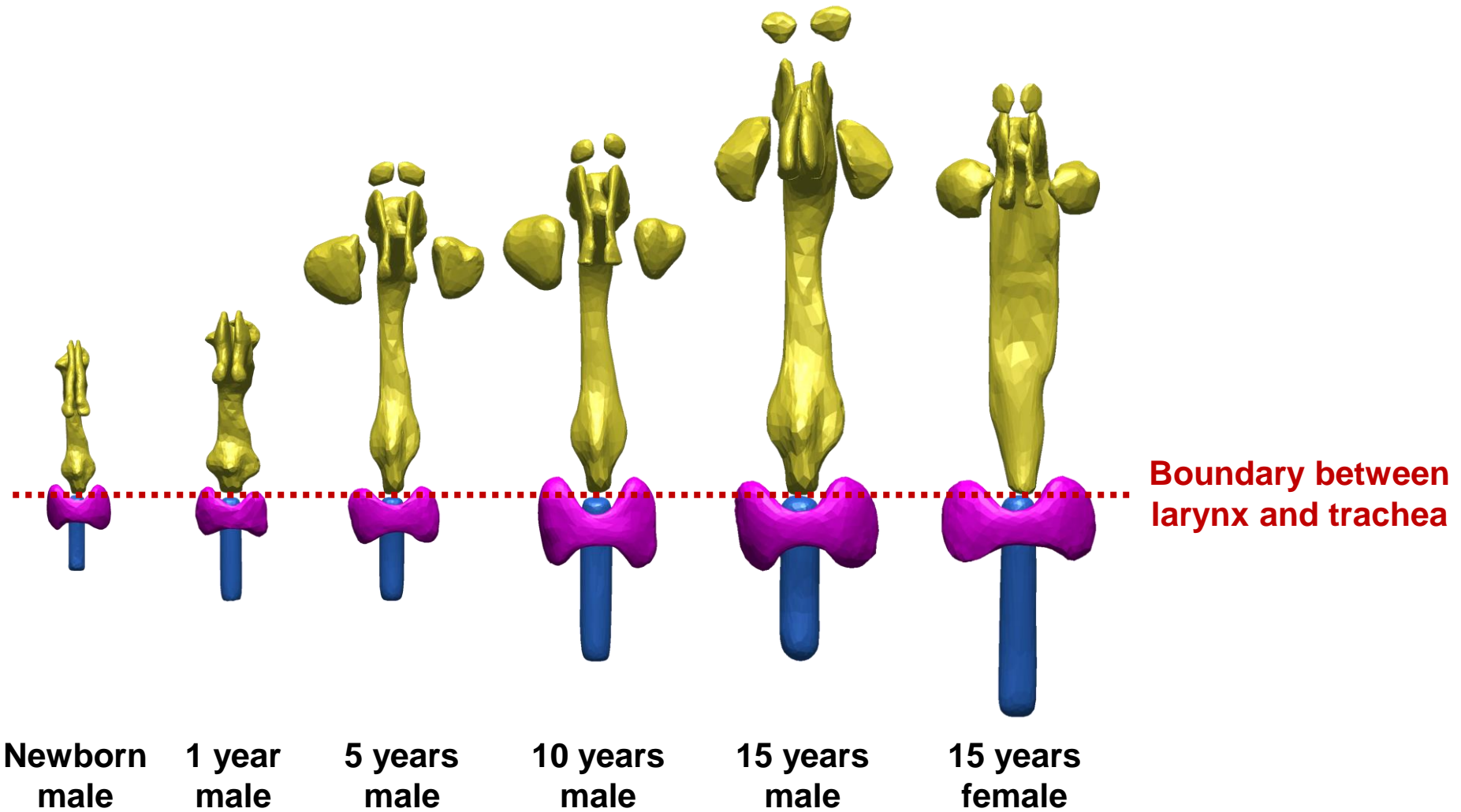
**15 years
male**



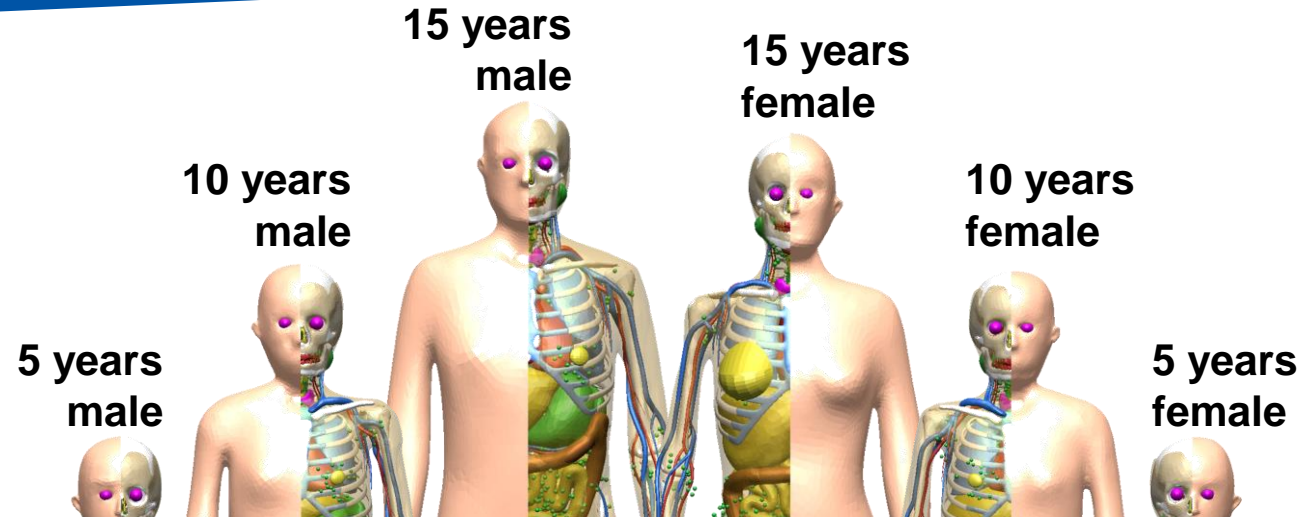
**15 years
female**



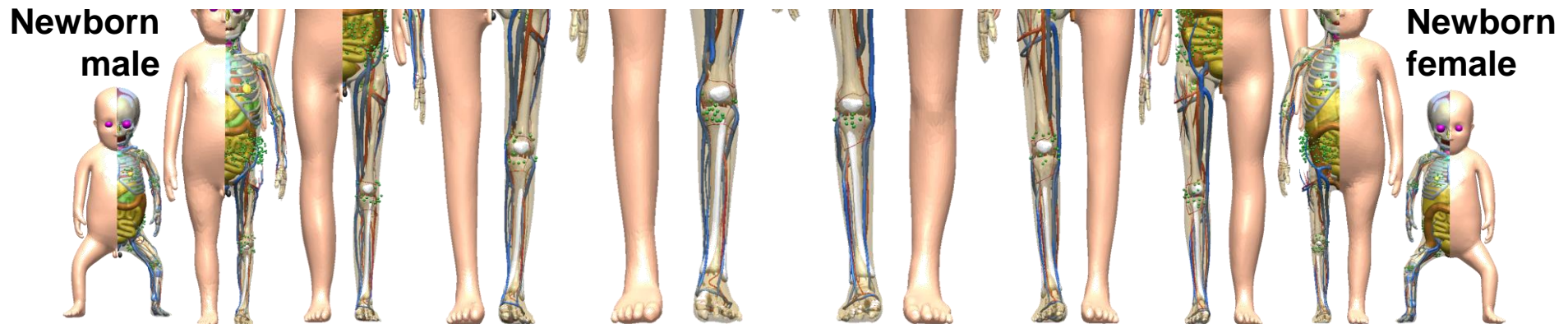
Thyroïde



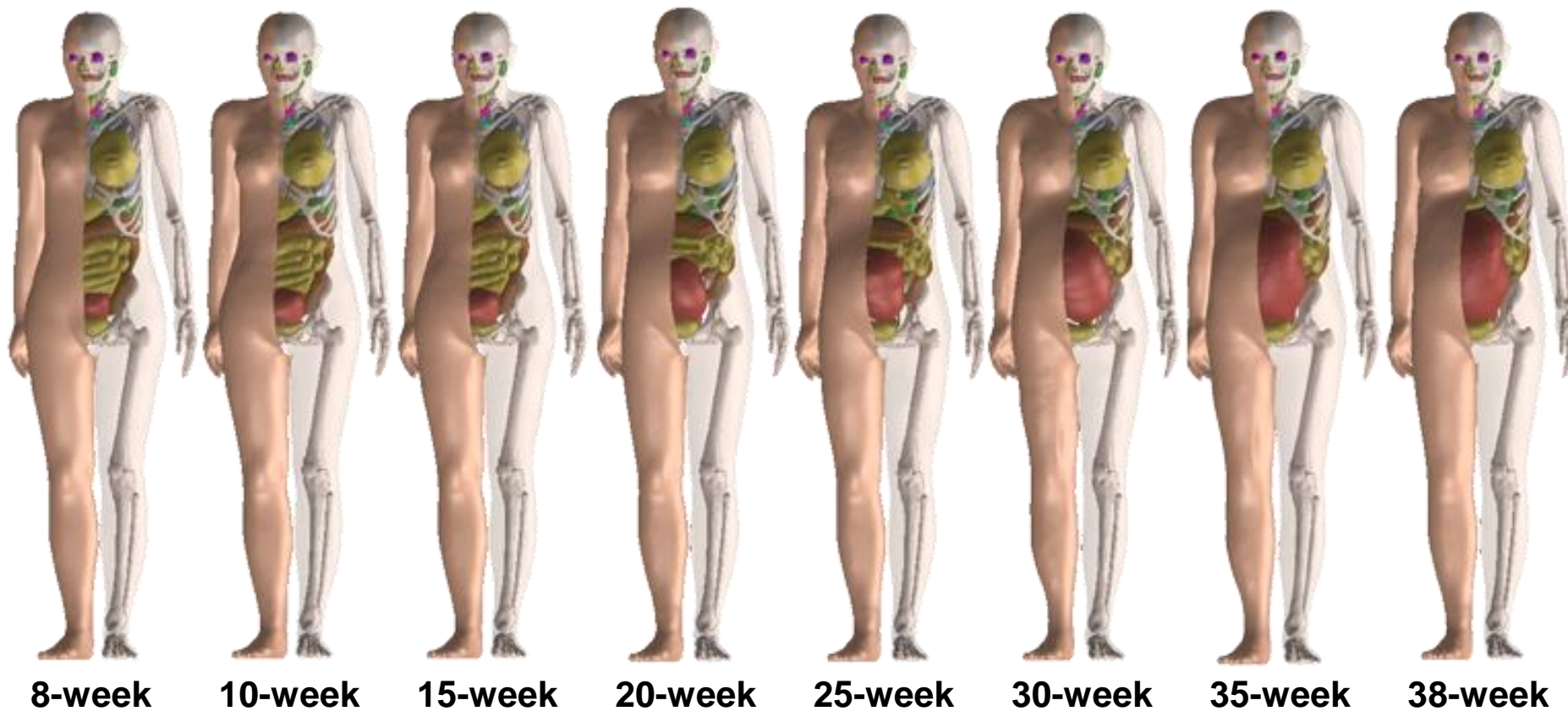
Les fantômes MESH pédiatriques de la CIPR



ICRP Publication 156, 2024



Les travaux en cours



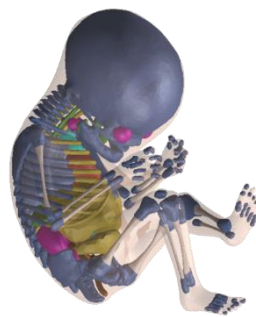
Les travaux en cours



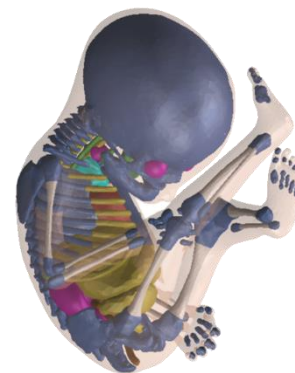
8-week



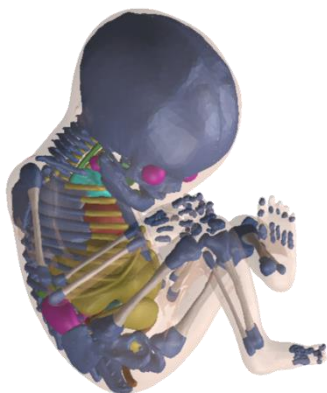
10-week



15-week



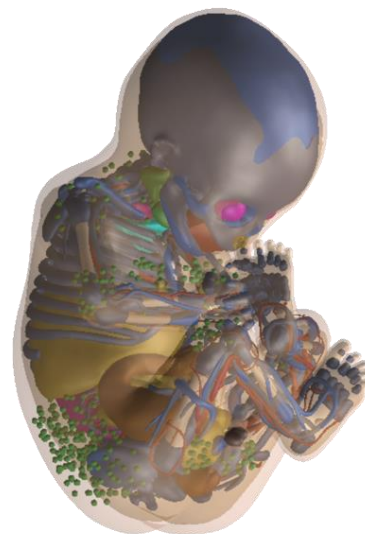
20-week



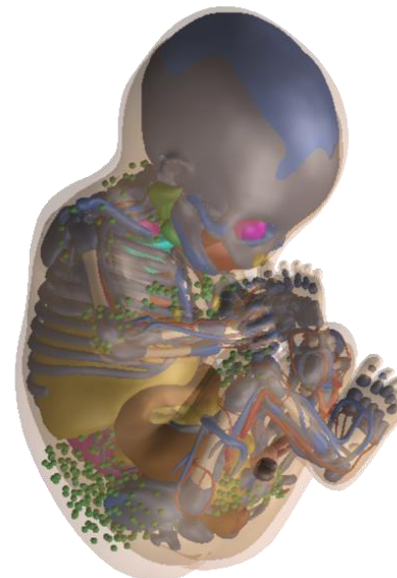
25-week



30-week



35-week



38-week

Les SAFs

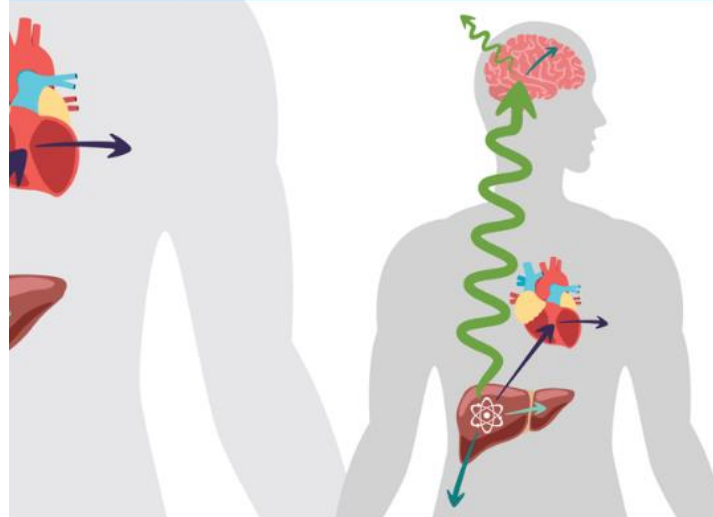
ANNALS OF THE **ICRP**

PUBLICATION 155

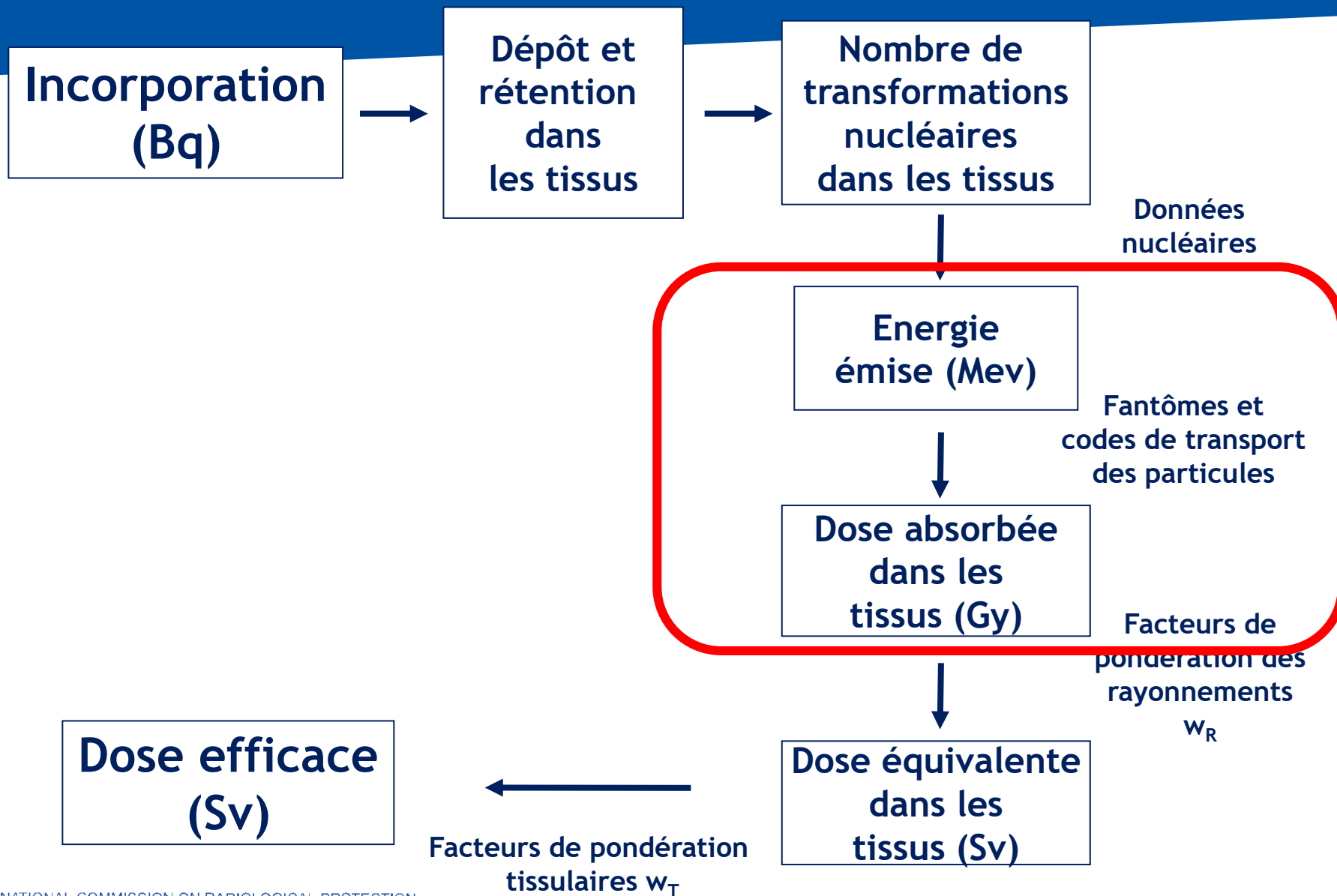
Specific Absorbed Fractions for
Reference Paediatric Individuals

VOLUME 52 NO. 4, 2023

ISSN 0146-6453 • ISBN 9781036209070



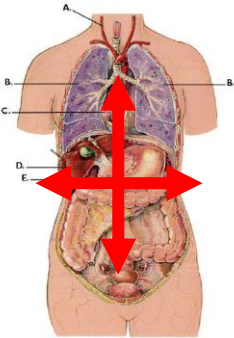
Les SAFs



Les SAFs

SAF : Specific Absorbed Fractions

La fraction absorbée spécifique (SAF) est la fraction de l'énergie émise par un organe source qui est absorbée par unité de masse d'un organe cible.



Fraction absorbée

$$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i}) = \frac{\phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})}{m_T} \quad (\text{en kg}^{-1})$$

Masse de la cible

L'utilisation des SAFs

$$\dot{H}_T = \sum_{r_S} A_S S_w(r_T \leftarrow r_S)$$

Dose équivalente **Activité intégrée dans le temps** **Coefficient S**

$$S_w(r_T \leftarrow r_S) = \sum W_R \sum_i E_{R,i} Y_{R,i} \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$$

Coefficient S

Facteur de pondération des rayonnements

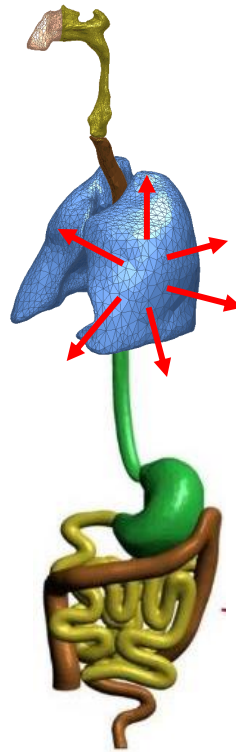
Energie et rendement

SAF

Les SAFs

Organe source

Energie émise à partir de cet organe



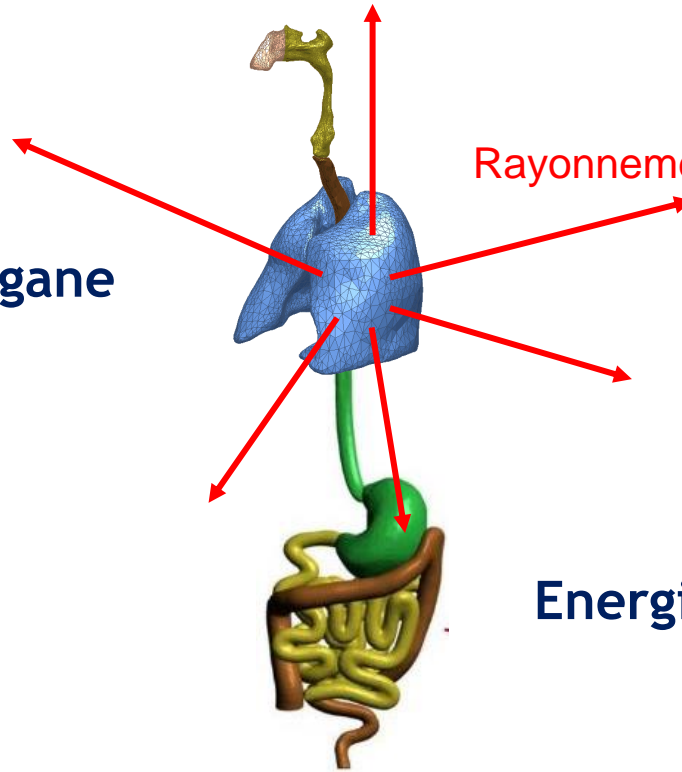
Rayonnement faiblement pénétrant

Organe cible

Energie reçue par cet organe

Les SAFs

Organe source
Energie émise à partir de cet organe



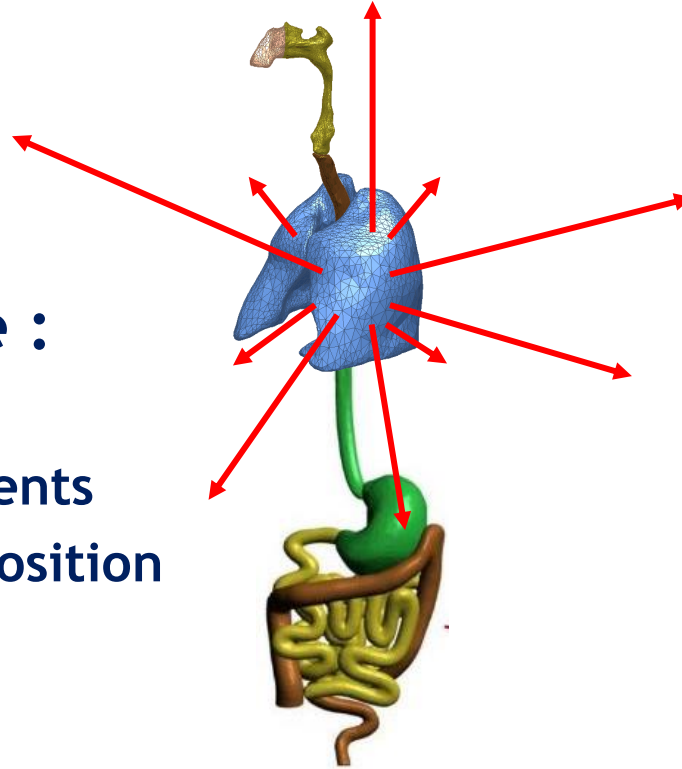
Rayonnement fortement pénétrant

Organe cible
Energie reçue par cet organe

Les SAFs

Les SAFs dépendent de :

- L'énergie des rayonnements
- La géométrie et la composition des tissus (et la masse)



Les SAFs pour les series OIR et EIR

SAFs pour :

79 régions sources (cf. modèles biocinétiques)

43 régions cibles (fantômes voxels adultes et pédiatriques ou modèles spécifiques)

6 âges (NN, 1, 5, 10, 15 ans et adultes)

2 sexes

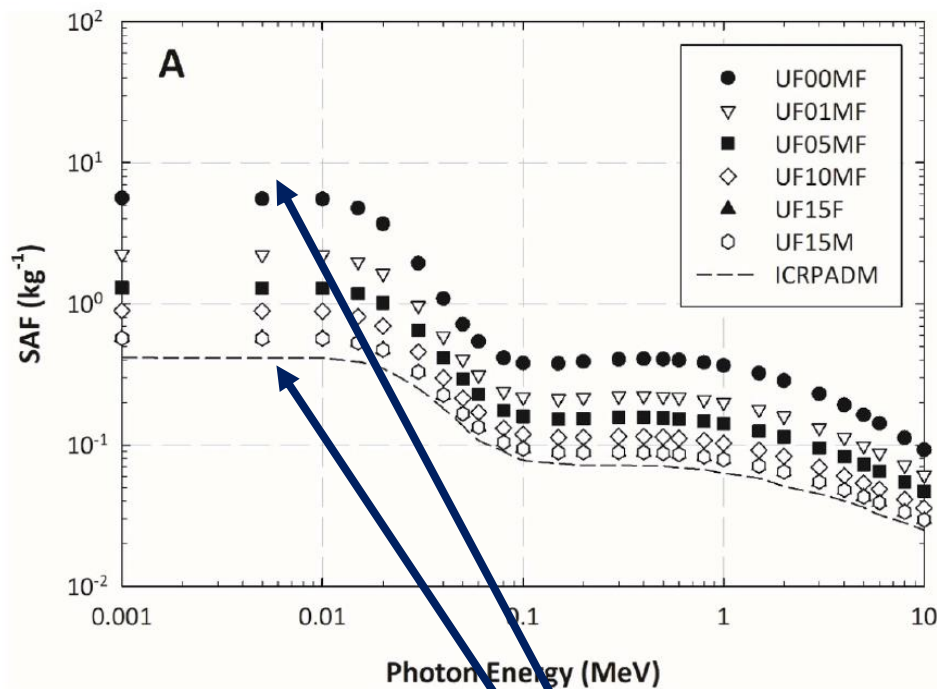
4 types de rayonnements (alpha, électrons, photons, neutrons de fission)

28 (électrons, photons) ou 24 (alpha) énergies différentes (New !!)

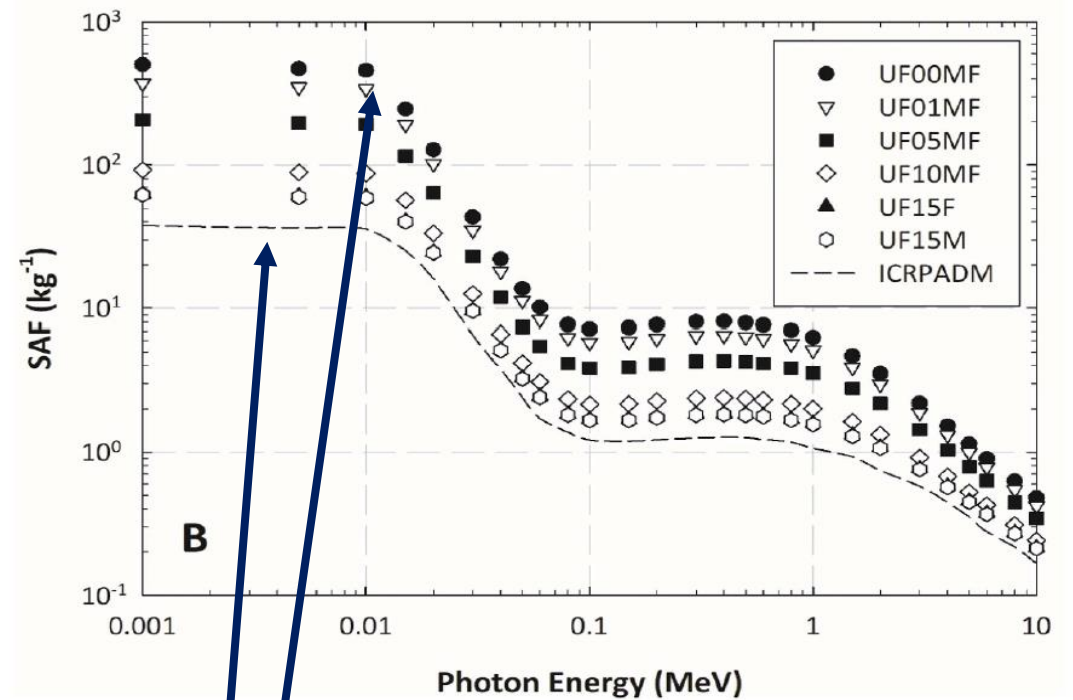
Plus de 3 millions de données !!!!!

Quelques exemples, photons

Foie ← Foie



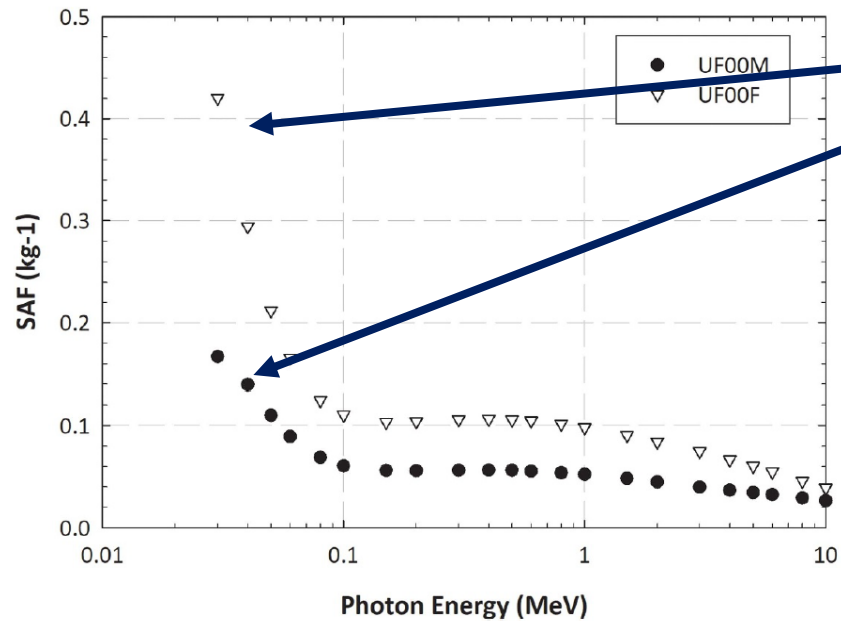
Thyroïde ← Thyroïde



Différences en fonction de l'âge

Quelques exemples, photons

Thyroïde ← Ganglions thoraciques



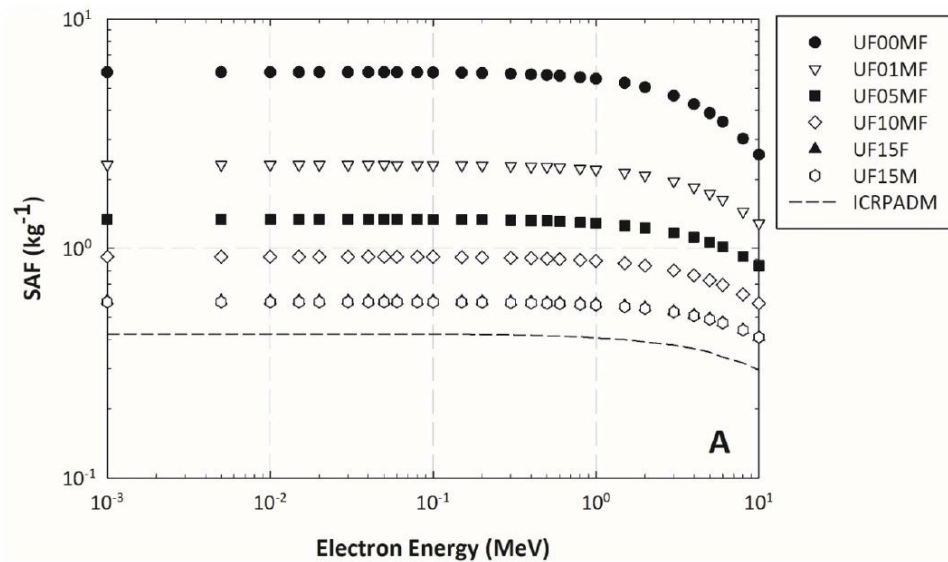
Différences garçon/fille aux faibles énergies



Figure 14. Photon SAFs for thyroid ← thoracic lymph node cross-irradiation in the revised UF00M and UF00F computational phantoms.

Quelques exemples, electrons

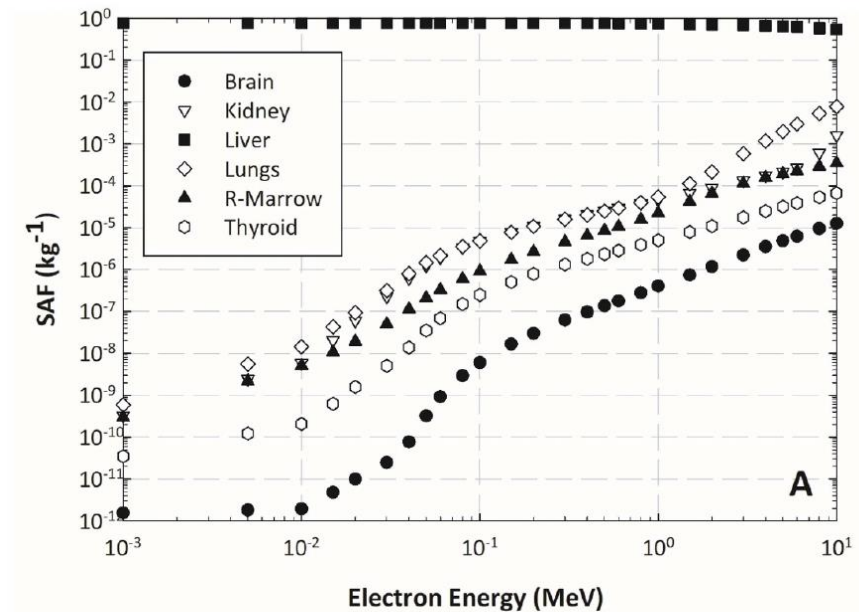
Foie ← Foie



Différences en fonction de l'âge

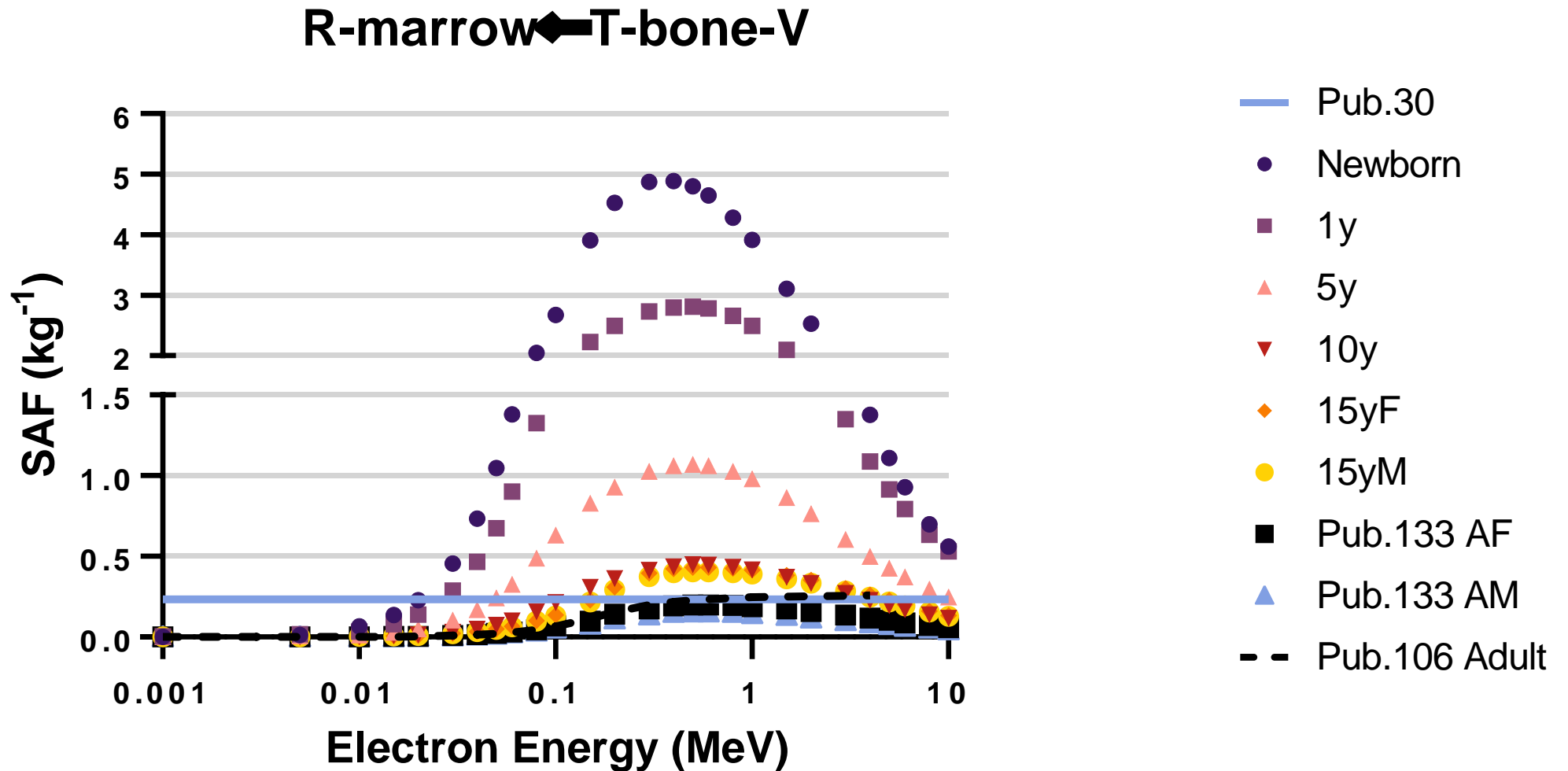
Homme 15 ans

Autres ← Foie



Différences selon les tissus

Quelques exemples, electrons



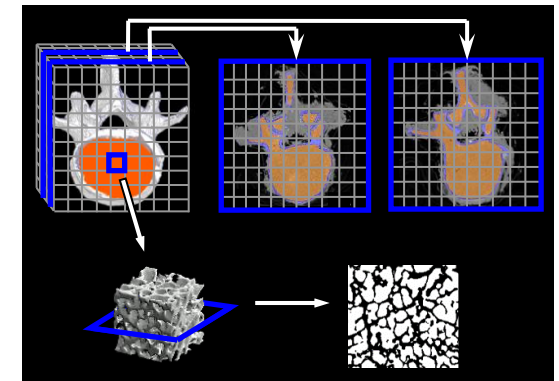
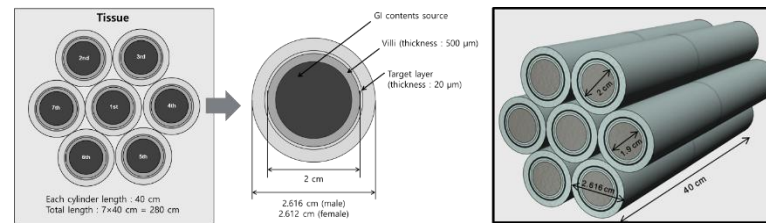
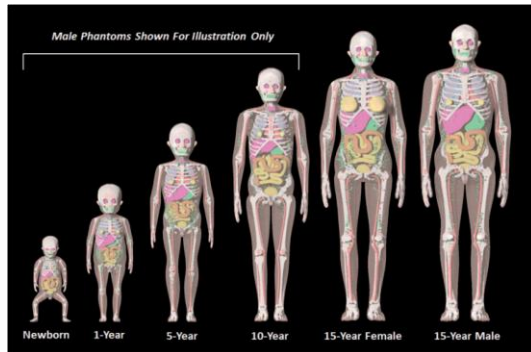
Les SAFs pour les series OIR et EIR

Quelques points d'attention :

- SAFs donnés pour des énergies spécifiques. Nécessite interpolation complexe entre les points et vers les énergies proches de 0
- Evolution des SAFs avec l'âge. Nécessité d'intégrer ces évolutions et d'interpoler entre les âges de référence pour le calcul des doses engagées pour les enfants
- Données manquantes sur les masses de certains tissus des NN (syst. respiratoire notamment)
Extrapolation complexe
- Calcul des SAF se fait pour des organes perfusés de sang (ajustement des masses de référence)

Récapitulatif

- Fantômes voxels adultes (ICRP 110) et pédiatriques (ICRP 143)
12 modèles stylisés (HRTM, HATM,..) ou numériques (squelette)
- SAF adultes (ICRP 133) et pédiatriques (ICRP 155)



Ont été et sont utilisés pour le calcul des doses externes et internes travailleurs et public adultes et enfants

- Exposition externe, ICRP 116, 2010; ICRP 123, 2013; ICRP 144, 2020,
- Exposition interne travailleurs, ICRP 130, 134, 137, 141, 151 (2007 à 2022)
- Exposition interne public EIR P1à P3

Récapitulatif

Pour les prochains calculs :

- Fantômes MESH adultes (ICRP 145) et pédiatriques (ICRP 156) seront utilisés lors de la révision des coefficients de dose (ex. prochaines recommandations CIPR)
- Utilisation de ces fantômes MESH pour la dosimétrie en situation d'urgence (fantômes ajustables)
- Production fantômes MESH femmes enceintes/embryon pour la fin de la série EIR
- Nouveaux SAFs adaptés à ces fantômes. Pas de grosses différences hormis pour les rayonnements faiblement pénétrants photons < 50 keV et électrons et pour les tissus avec identification des cellules cibles

ICRP

www.icrp.org