

# Simulations Monte Carlo pour la dosimétrie multi-échelle

Joël Daouk

# Contexte & enjeux dosimétriques

- En RT externe : nanoparticules et optimisation
- En RIV / curiethérapie : distribution non-uniforme de la dose
- Défis
  - Définition précise de la source ( $\beta$ ,  $\alpha$ , auger)
  - Modélisation des tissus hétérogènes
  - Variabilité inter-individuelle

Une dosimétrie personnalisée est indispensable pour corréler la dose déposée à la **réponse biologique** et à la **toxicité**

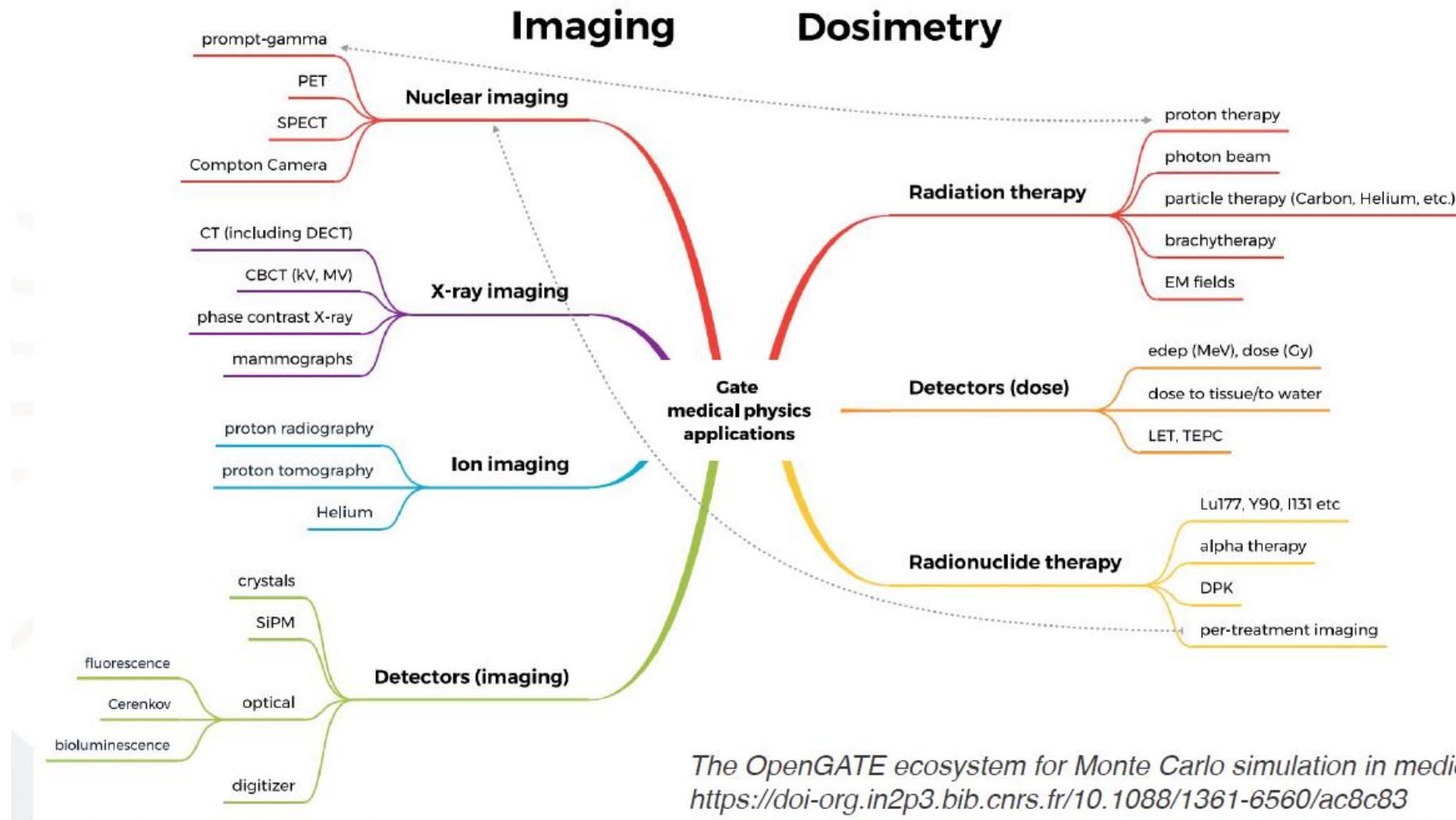
# Principes de la dosimétrie Monte Carlo

- Suivi stochastique des particules émises
- Chaque interaction (ionisation, diffusion, absorption) est simulée individuellement
- Cette approche fournit :
  - la **distribution 3D de dose** dans les tissus
  - des estimations locales (cellule, noyau),
  - une évaluation fine des **incertitudes statistiques.**

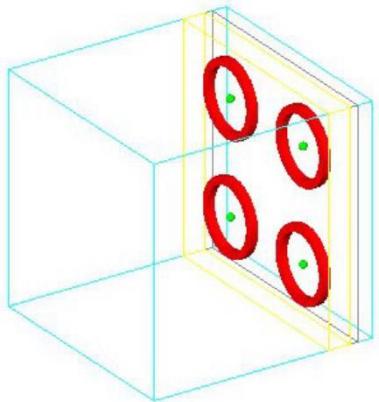
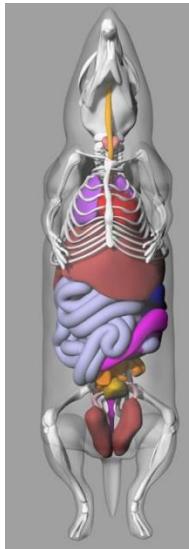
*Notion d'échelle*



# • GATE : Geant4 Application for Tomographic Emission

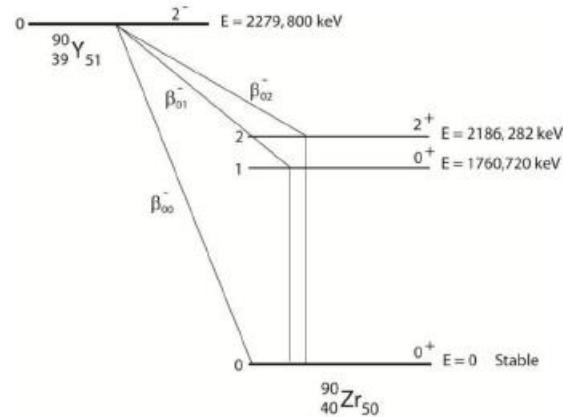


# Chaîne de calcul dosimétrique avec GATE



## Géométrie

- Depuis CT / Phantom
- Analytique
- Densité des matériaux



## Source

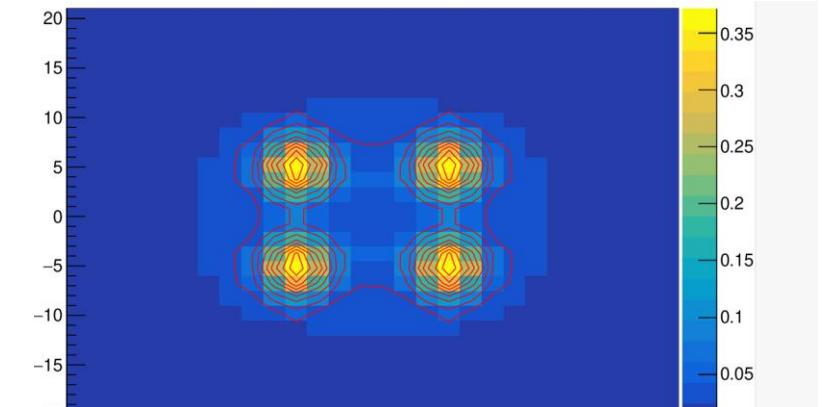
- Particule
- Géométrie
- Emission
- Spectre

PHYSIQUE



## Détecteur

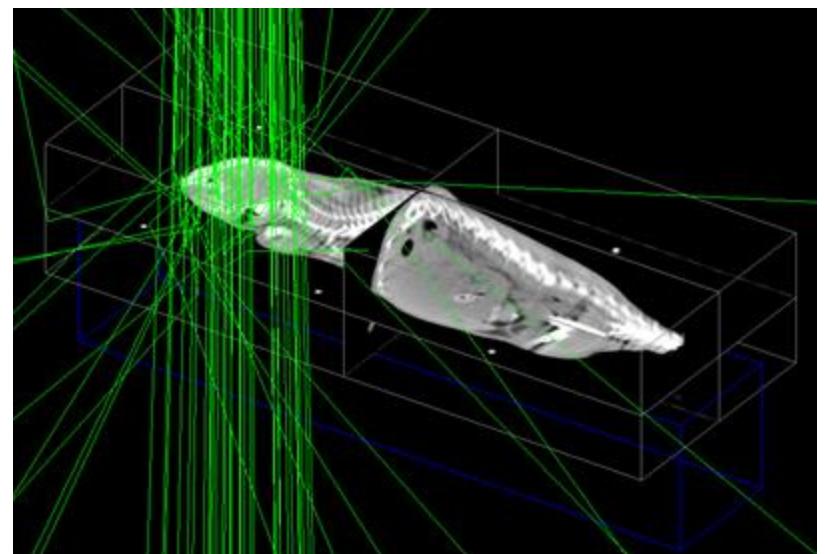
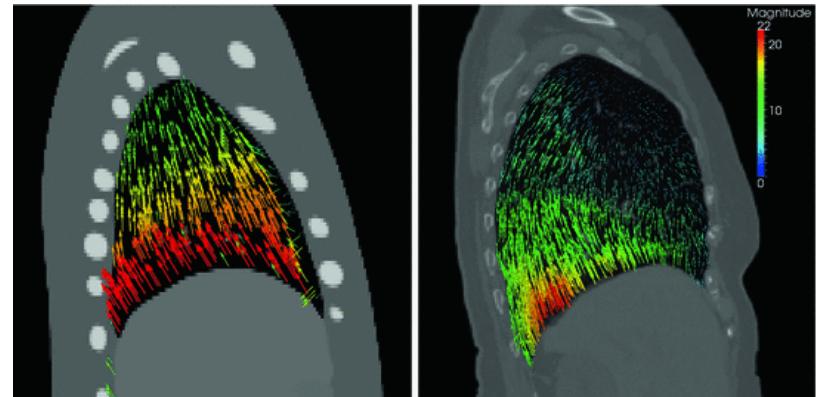
- Dose
- Statistique
- Parcours des particules
- Energie
- Processus physiques



# Echelle macroscopique

## Géométrie : phantom numérique

- Souris / rat
- 1400 structures segmentées / labélisées
- Personnalisation du phantom
  - Taille / poids de l'animal
  - Amplitude & fréquence respiratoire
  - Amplitude & fréquence cardiaque
  - Placement de tumeurs

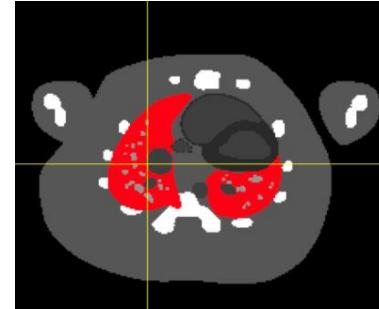


Segars et al. – Mol. Imag. Biol. 2004

# Echelle macroscopique

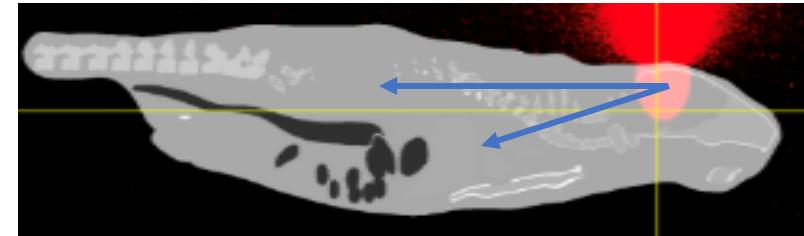
## Géométrie : TDM / phantom

- Organes segmentés



## Source : TEP / SPECT

- Biodistribution
- Cinétique corps entier

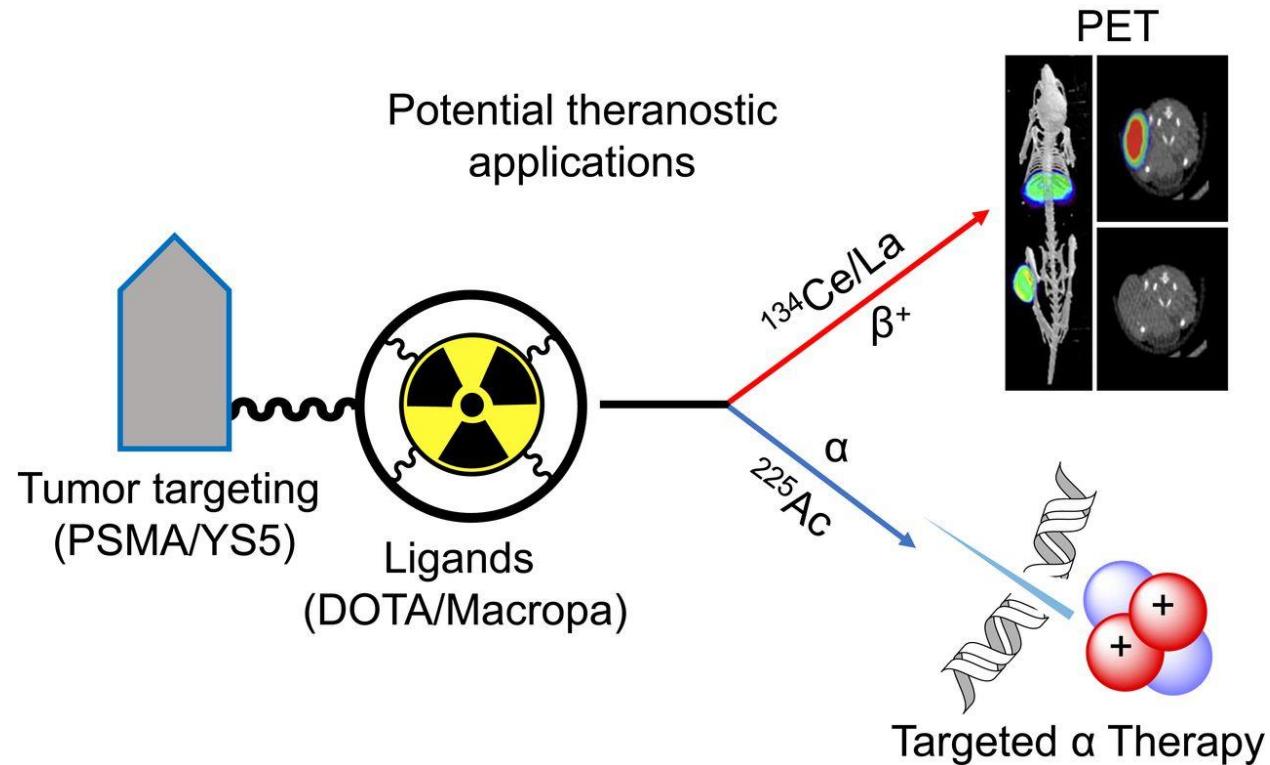


## Détecteurs

- Dose absorbée moyenne par organe (Facteurs S)
- Effets de la diffusion des rayonnements
- Contributions croisées (cross-fire) entre régions irradiées

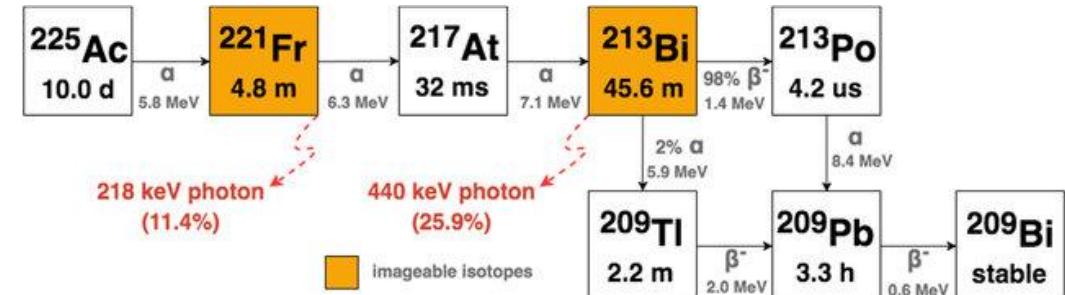
Cible		Gy.MBq <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	Source					
			liver	heart	lungs	pancreas	spleen	kidneys
coeur	coeur	8,1E-06	0,002706	9,86E-05	4,33E-06	1,8E-08	4,42E-08	
foie	foie	0,001989		1E-06	5,99E-05	3,31E-07	5,35E-08	2,47E-06
poumons	poumons	1,06E-05	7,09E-05	0,027627	4,5E-08	3,15E-08		3E-08
estomac	estomac	2,29E-05	1,03E-07	1,3E-07	2,4E-05	4,65E-05	1,48E-07	
pancreas	pancreas	1,12E-06	6,18E-08	6,57E-08	0,072008	1,25E-06	6,41E-05	
rein	rein	3,46E-05	4E-08	5,03E-08	0,000114	3,64E-07	0,019126	

# Echelle macroscopique : RIV



$^{134}\text{Ce}$  (3.2j) générateur de  $^{134}\text{La}$  (6 min)  
Equilibre séculaire  
TEP sur plusieurs jours

## BIODISTRIBUTION & CINETIQUE



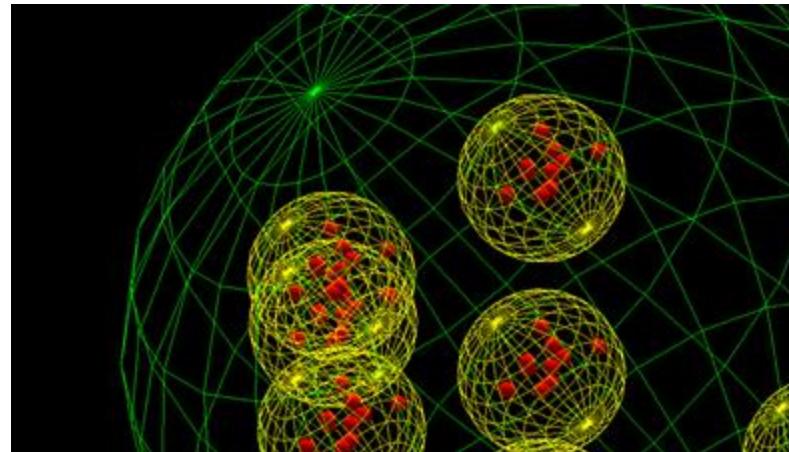
## DOSIMETRIE PROBLEMATIQUE

Naidou-Bobba, JNM 2023

# Echelle cellulaire

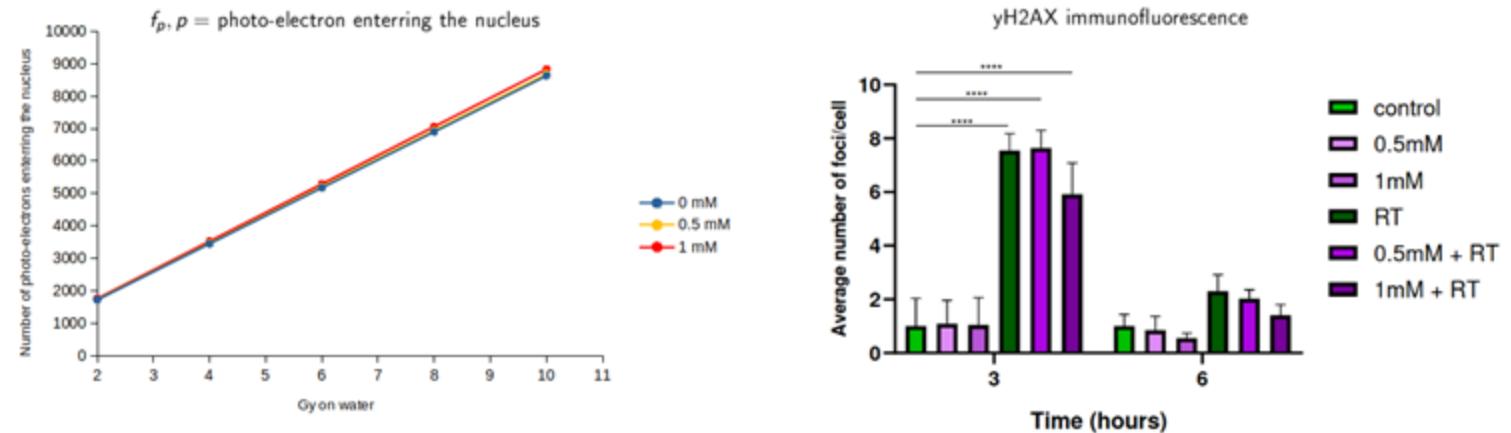
## Géométrie analytique

- Cellules
- Noyau
- Clusters de nanoparticules



## Détecteurs

- Dose absorbée / cellule
- Dose autour des nanoparticules
- Parcours des électrons



Cas des AGUiX : pas d'augmentation des dommages nucléaires

Blind et al, Comput Biol Med 2025

# Echelle cellulaire

?

## Géométrie analytique

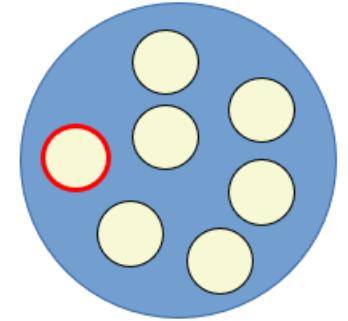
- Cellules
- Noyau
- Clusters de nanoparticules

Local deposited dose around a cluster of NPs

• Sharper vision of the radio-enhancing effect

• Linear in the radiation dose

• Affine in the NPs concentraton



$$q(x, c) = (mc + n)x$$

Disruptive effect of NPs :  $mxc$

## Analyse des phénomènes physiques

- Propriétés des interactions
- Mise au point de nouveaux modèles biophysiques

LQ extension

LQ       $f(x) = e^{-(\alpha x + \beta x^2)}$

radiation dose

$\alpha, \beta$     intrinsic radiosensitivity of the cell line

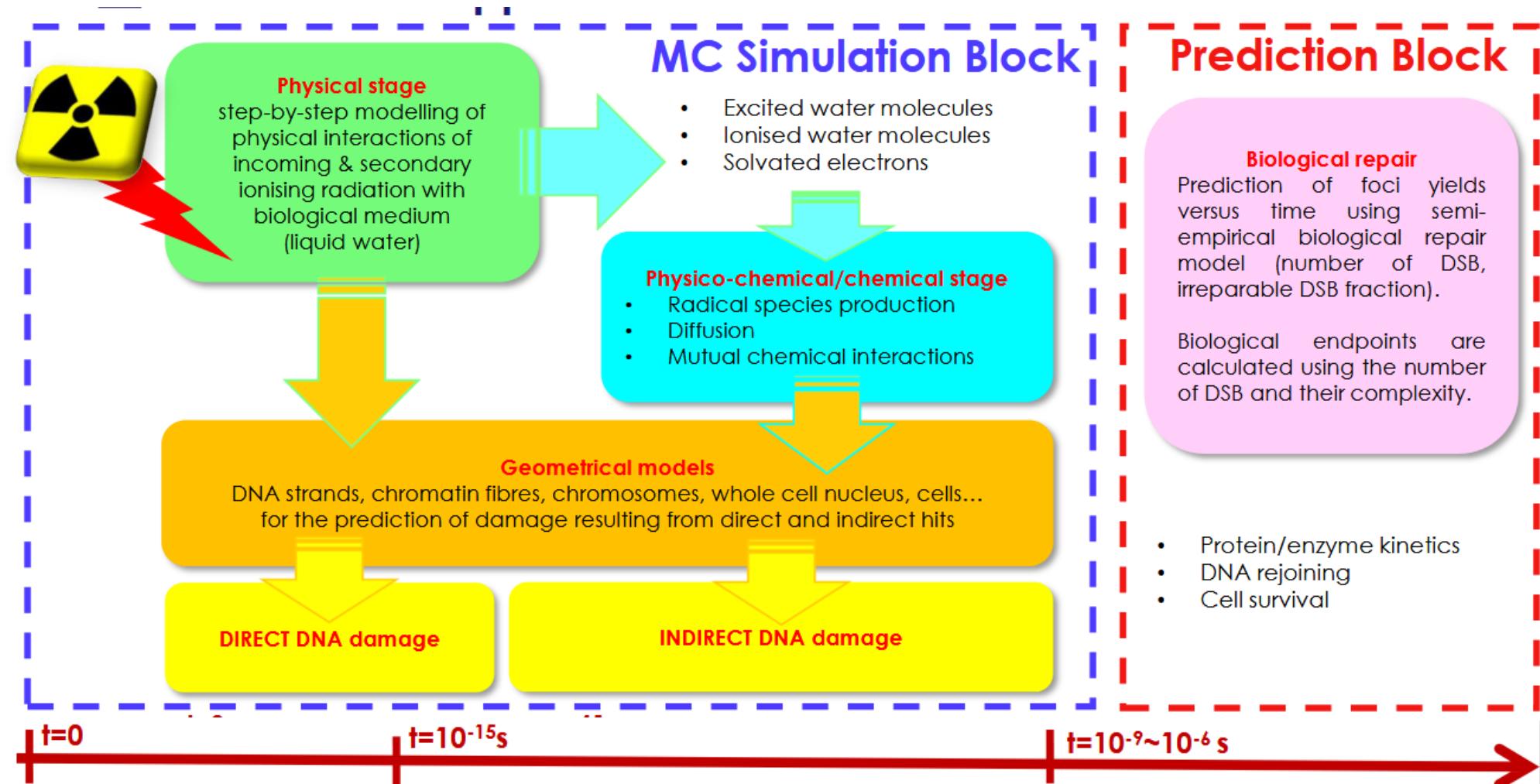
LQ on control

$$f(x, c) = e^{-(\alpha x + \beta x^2)} \times e^{-(\gamma xc)}$$

$\gamma$     intrinsic radio-enhancing effect  
of the NPs

Blind et al, Comput Biol Med 2025

# Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA



Chatzipapas et al. Prec. Rad. Oncol 2023

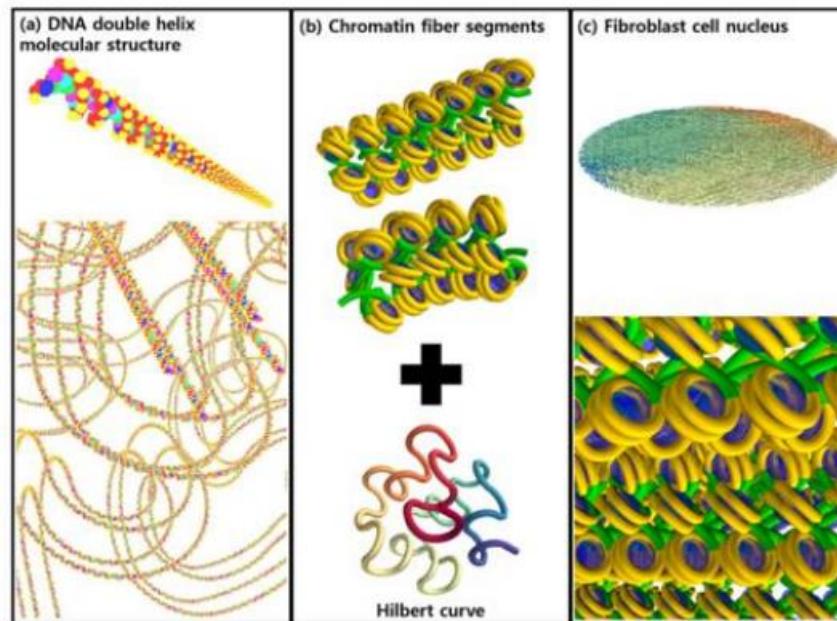
# Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA

## Effets directs

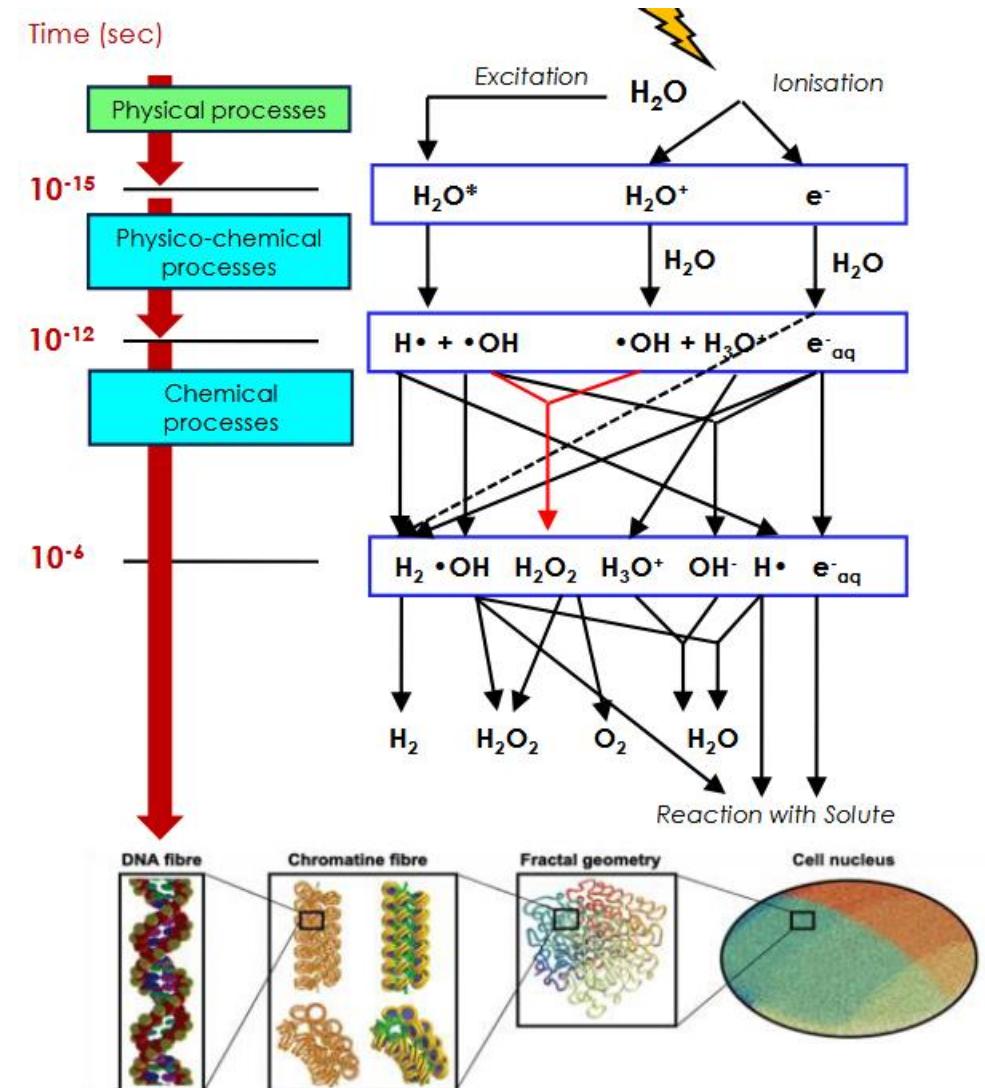
- Energie déposée directement sur l'ADN

## Effets indirects

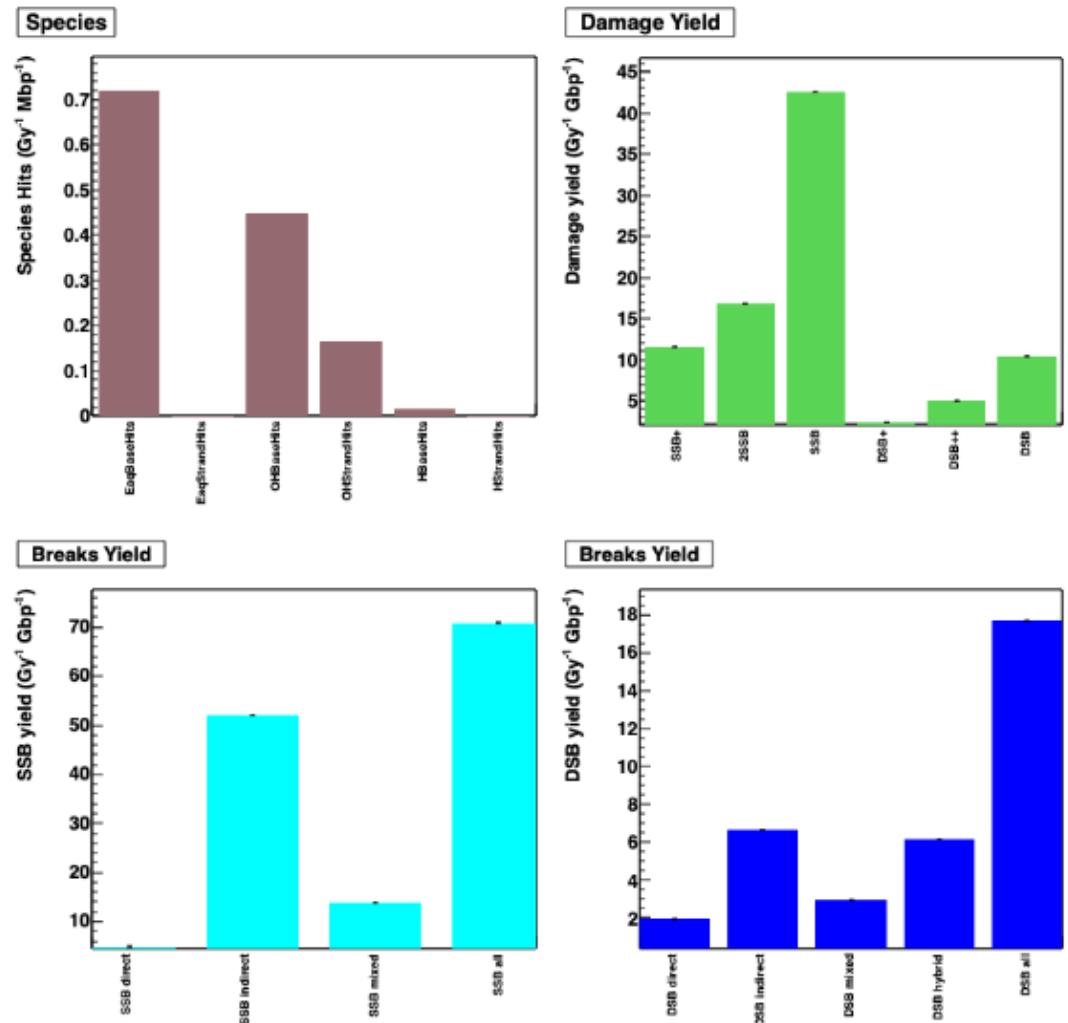
- Excitation / ionisation de l'eau
- Production de ROS conduisant à la cassure



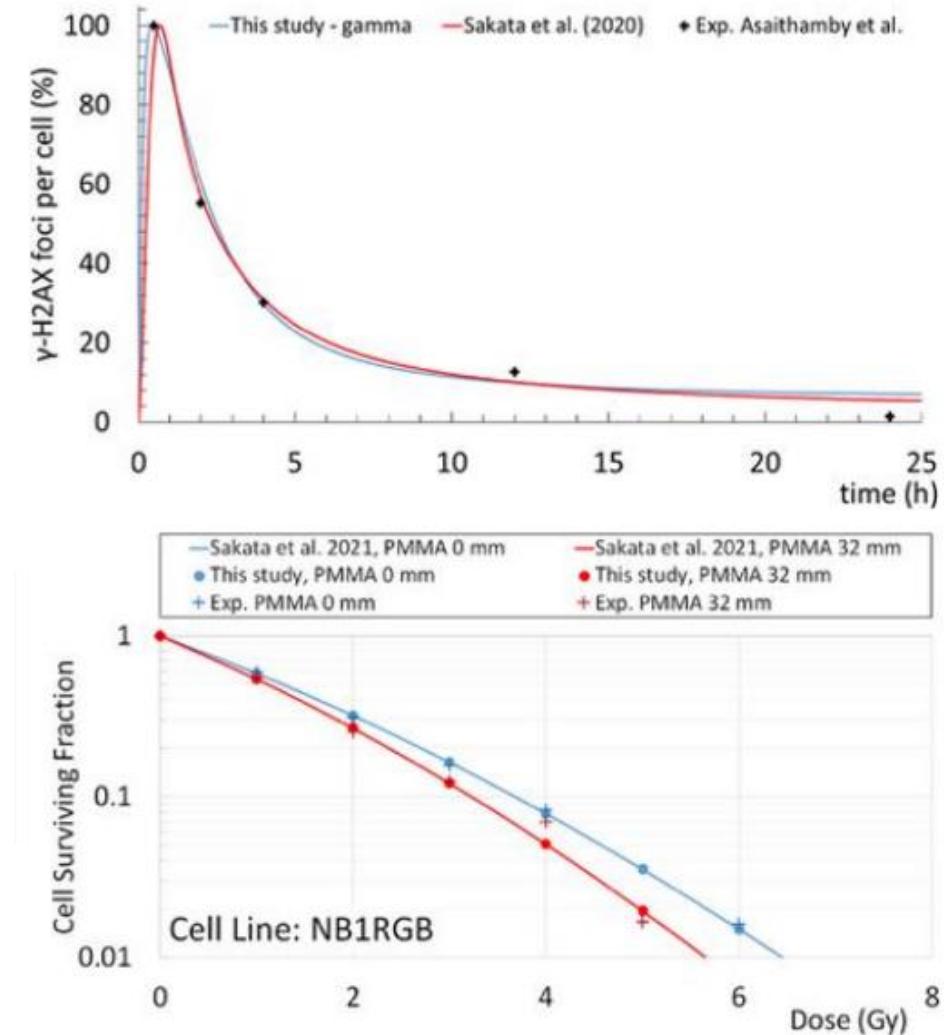
Chatzipapas et al. Physica Medica 2024



# Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA

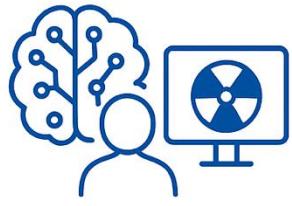


Output from G4-DNA/examples/extended/medical/dna

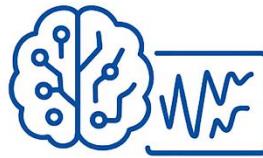


Chatzipapas et al. Prec. Rad. Oncol 2023

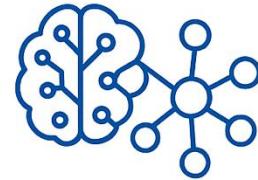
# IA et simulations



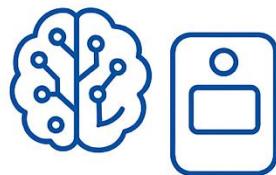
IA pour le calcul de dose



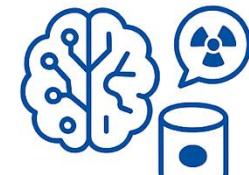
IA et débruitage des simulations



IA et modèles de diffusion



IA et réponse des détecteurs



IA et modélisation des sources

## Les Grands Challenges

### Qualité des data d'entraînements

- Validation expérimentale toujours nécessaire

### Métriques et incertitudes

- On évalue des grandeurs physiques
- Les métriques doivent faire partie de l'entraînement
- Attention aux incertitudes IA en plus des incertitudes statistiques

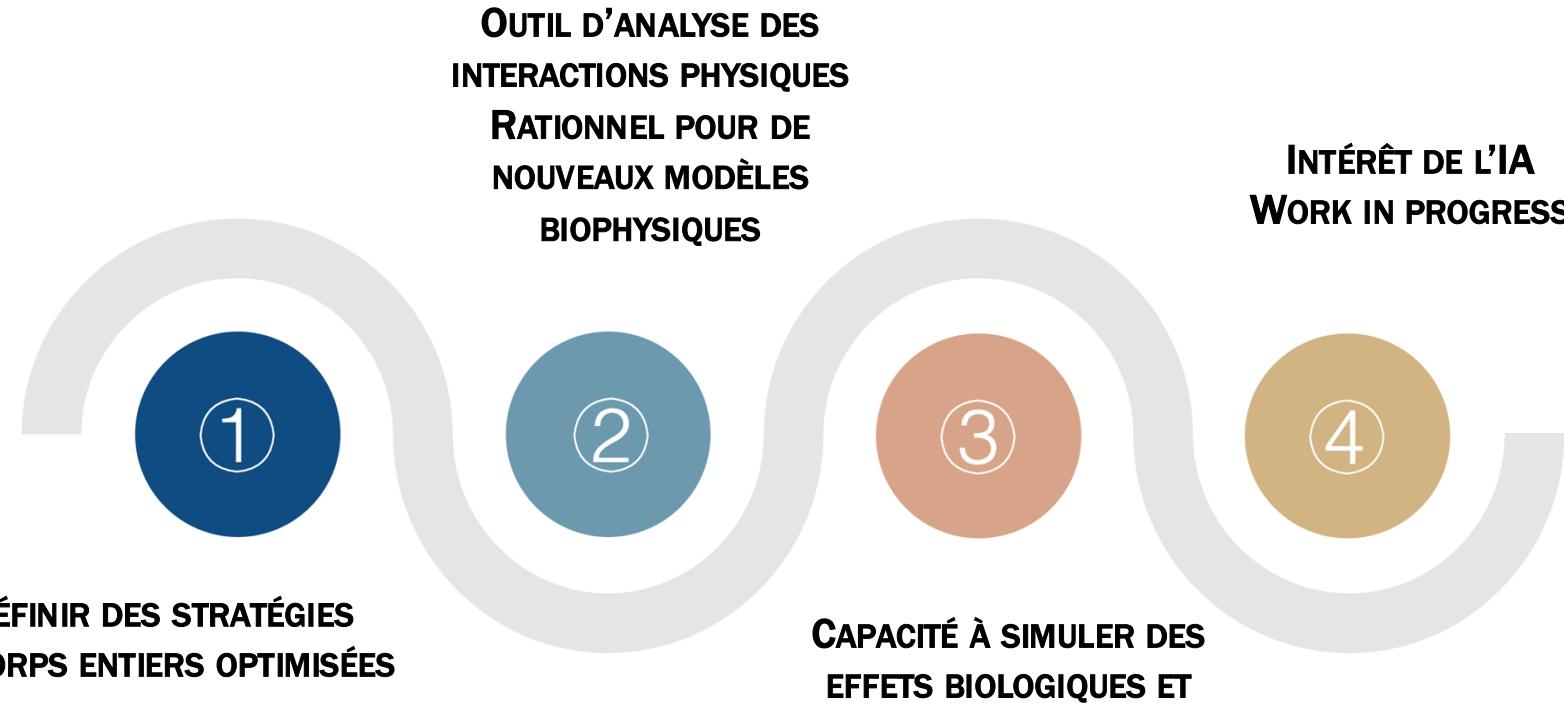
### Modèles génératifs

- Entraînements instables
- Précision physique statistique et non individuelle

### Explicabilité - interprétabilité

- Réseaux « boîtes noires »
- Pourquoi telle prédiction ?
- Il faut développer les outils d'explication pour vérifier la cohérence physique

# Conclusion





AU CŒUR DES SYSTÈMES  
& DE LA SANTÉ

A venir...

« Il ne faut pas confondre la radiothérapie avec un coucher de Soleil »

A partir de mars 2026

Théâtre-débat

Sur tout le territoire du Cancéropôle Est



cran-direction@univ-lorraine.fr

Tél : +33 3 72 74 52 30

[www.cran.univ-lorraine.fr](http://www.cran.univ-lorraine.fr)

Labo\_CRAN CRAN Nancy CRAN

