

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 (β , α , 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

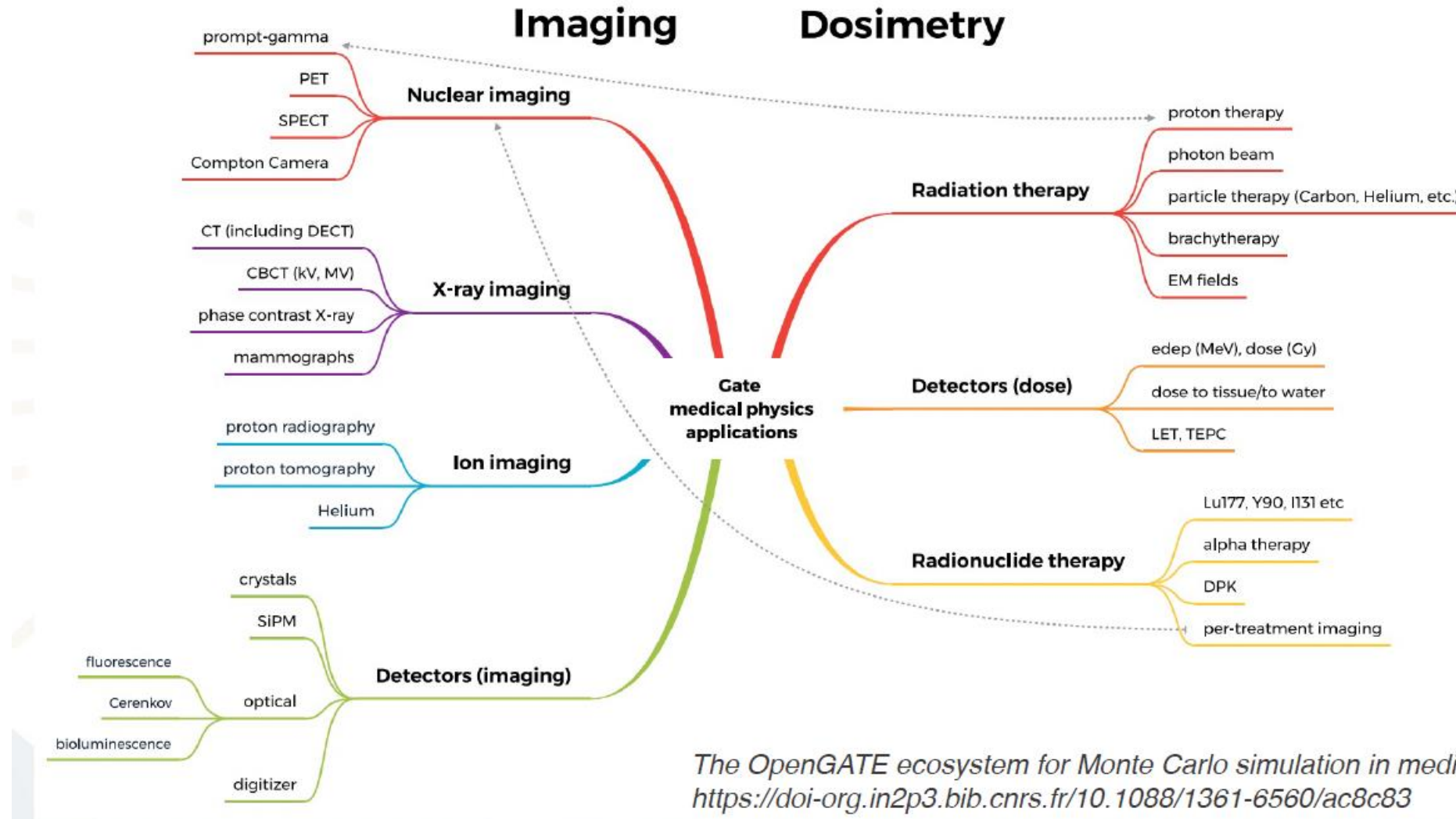
- Suivi stochastique des particules émises
- Chaque interaction (ionisation, diffusion, absorption) est simulée individuellement
- Cette approche fournit :

- la **distribution 3D de dose** dans les tissus
- des estimations locales (cellule, noyau),
- une évaluation fine des **incertitudes statistiques**.

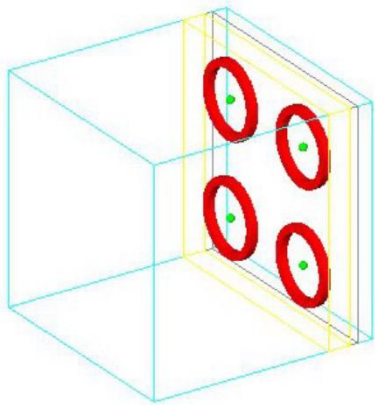
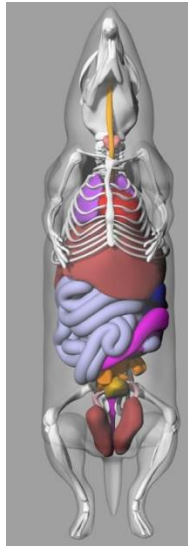
Notion d'échelle



• GATE : Geant4 Application for Tomographic Emission

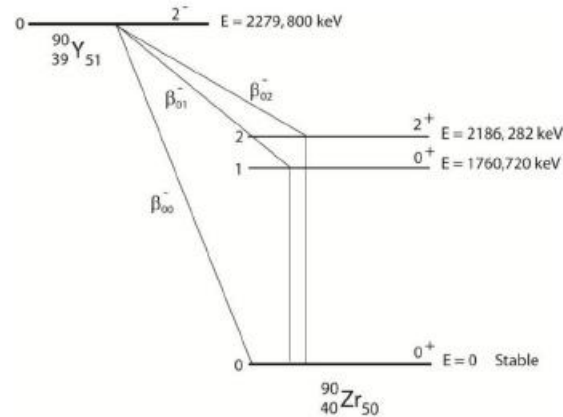


Chaîne de calcul dosimétrique avec GATE



Géométrie

- Depuis CT / Phantom
- Analytique
- Densité des matériaux

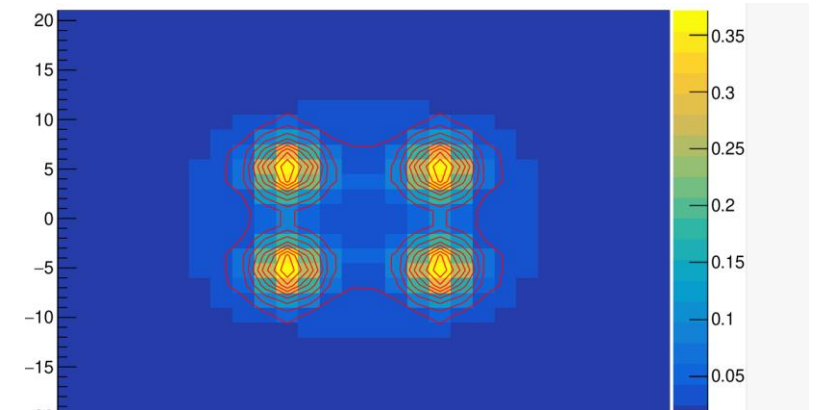


Source

- Particule
- Géométrie
- Emission
- Spectre

Détecteur

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



PHYSIQUE

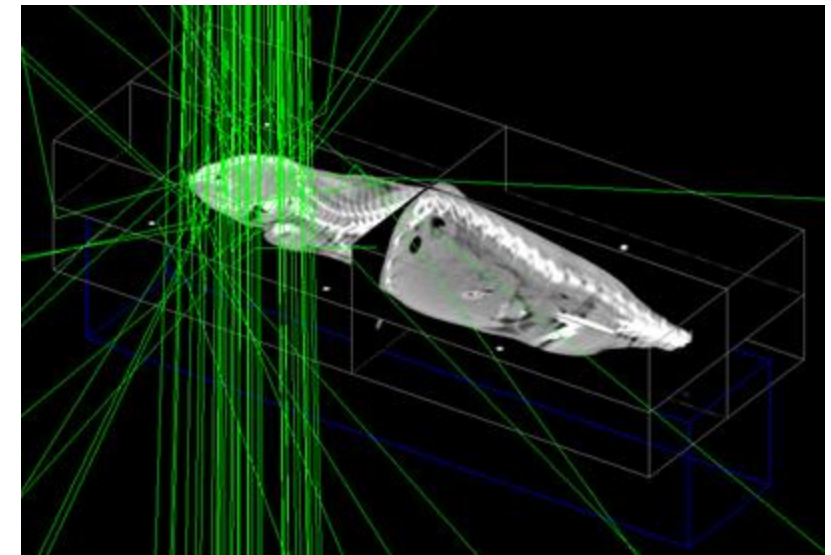
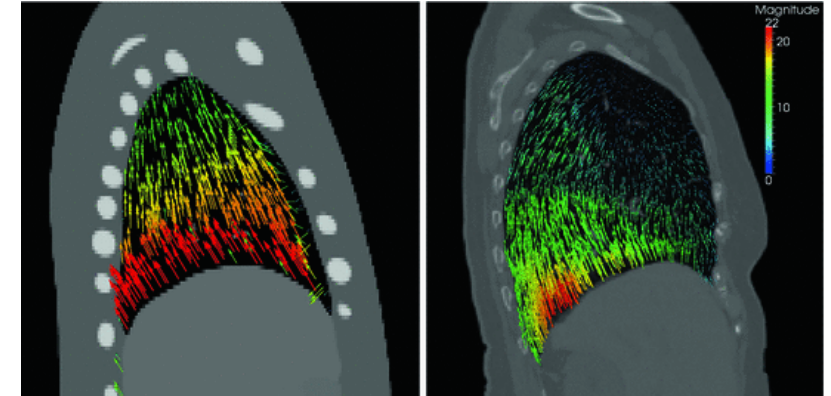
Echelle macroscopique

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

Simulation plan RT externe

- Calcul d'erreurs et incertitude
- Optimisation des plans
- IGRT ?



Segars et al. – Mol. Imag. Biol. 2004

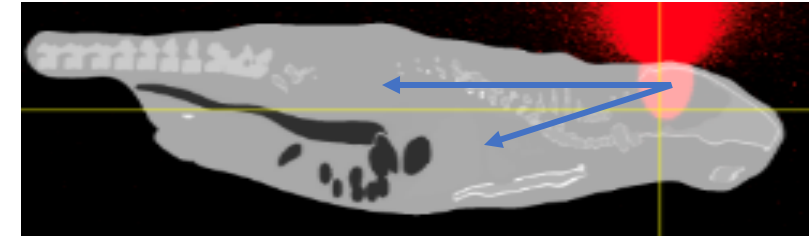
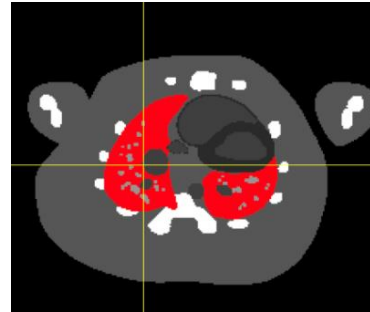
Echelle macroscopique

Géométrie : TDM / phantom

- Organes segmentés

Source : TEP / SPECT

- Biodistribution
- Cinétique corps entier

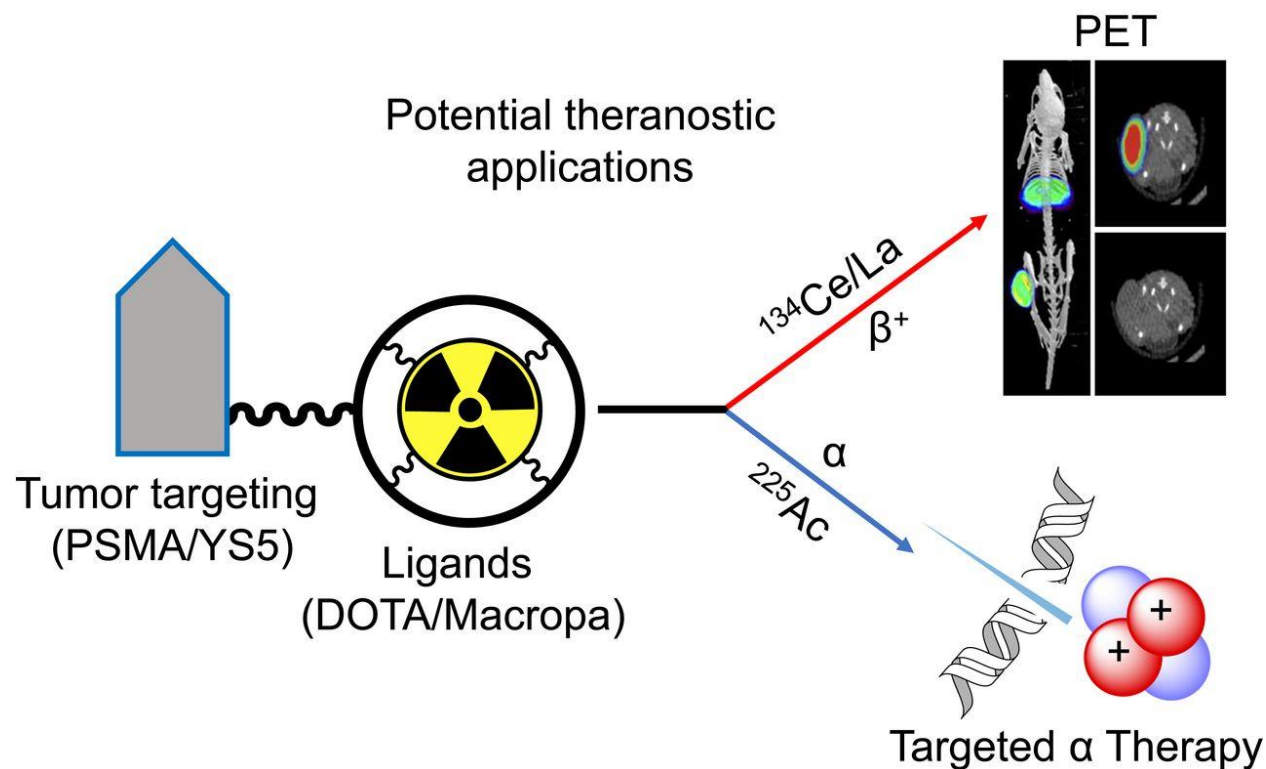


Détecteurs

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

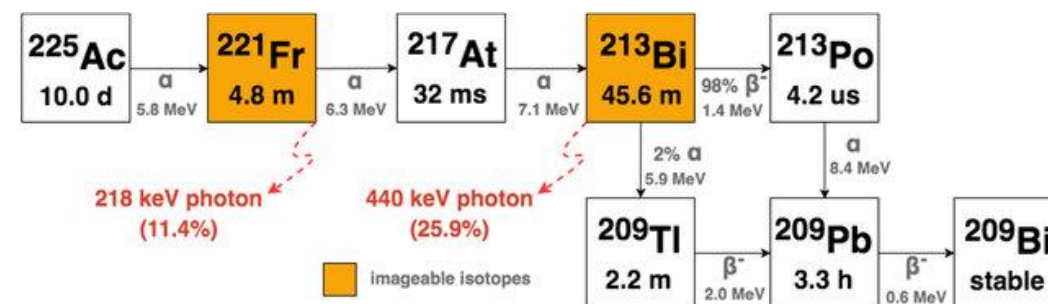
		Source						
Gy.MBq ⁻¹ .s ⁻¹								
		liver	heart	lungs	pancreas	spleen	kidneys	
Cible	coeur	coeur	8,1E-06	0,002706	9,86E-05	4,33E-06	1,8E-08	4,42E-08
	foie	foie	0,001989	1E-06	5,99E-05	3,31E-07	5,35E-08	2,47E-06
	poumons	poumons	1,06E-05	7,09E-05	0,027627	4,5E-08	3,15E-08	3E-08
	estomac	estomac	2,29E-05	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}Ce (3.2j) générateur de ^{134}La (6 min)
Equilibre séculaire
TEP sur plusieurs jours

BIODISTRIBUTION & CINETIQUE



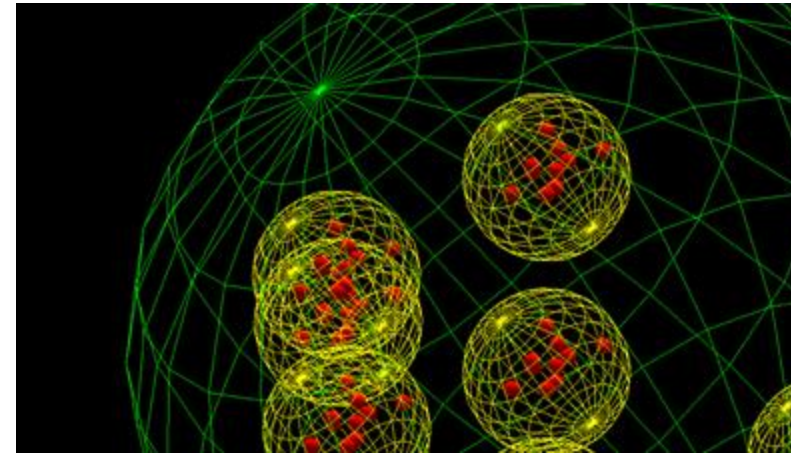
DOSIMETRIE PROBLEMATIQUE

Naidou-Bobba, JNM 2023

Echelle cellulaire

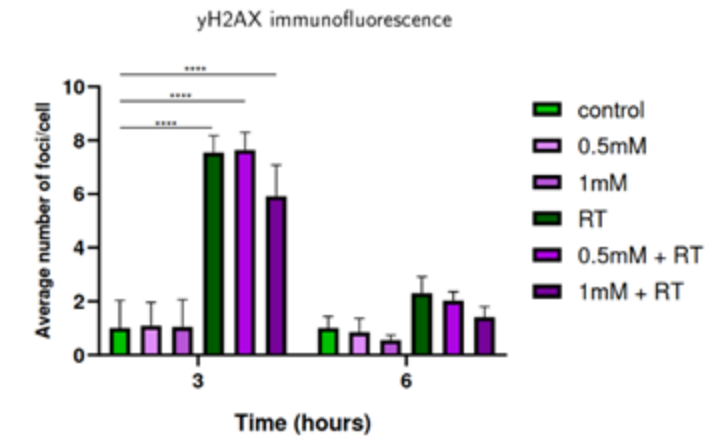
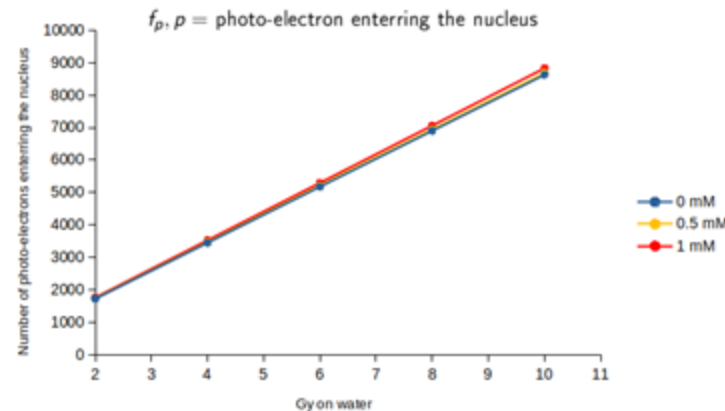
Géométrie analytique

- Cellules
- Noyau
- Clusters de nanoparticules



Détecteurs

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



Blind et al, Comput Biol Med 2025

Cas des AGUiX : pas d'augmentation des dommages nucléaires

Echelle cellulaire

Géométrie analytique

- Cellules
- Noyau
- Clusters de nanoparticules

Analyse des phénomènes physiques

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

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

α, β intrinsic radiosensitivity of the cell line

Local deposited dose around a cluster of NPs

?

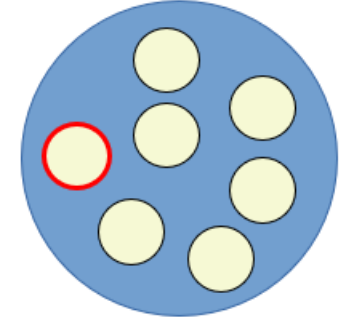
• Sharper vision of the radio-enhancing effect

• Linear in the radiation dose

• Affine in the NPs concentration

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

Disruptive effect of NPs : mx



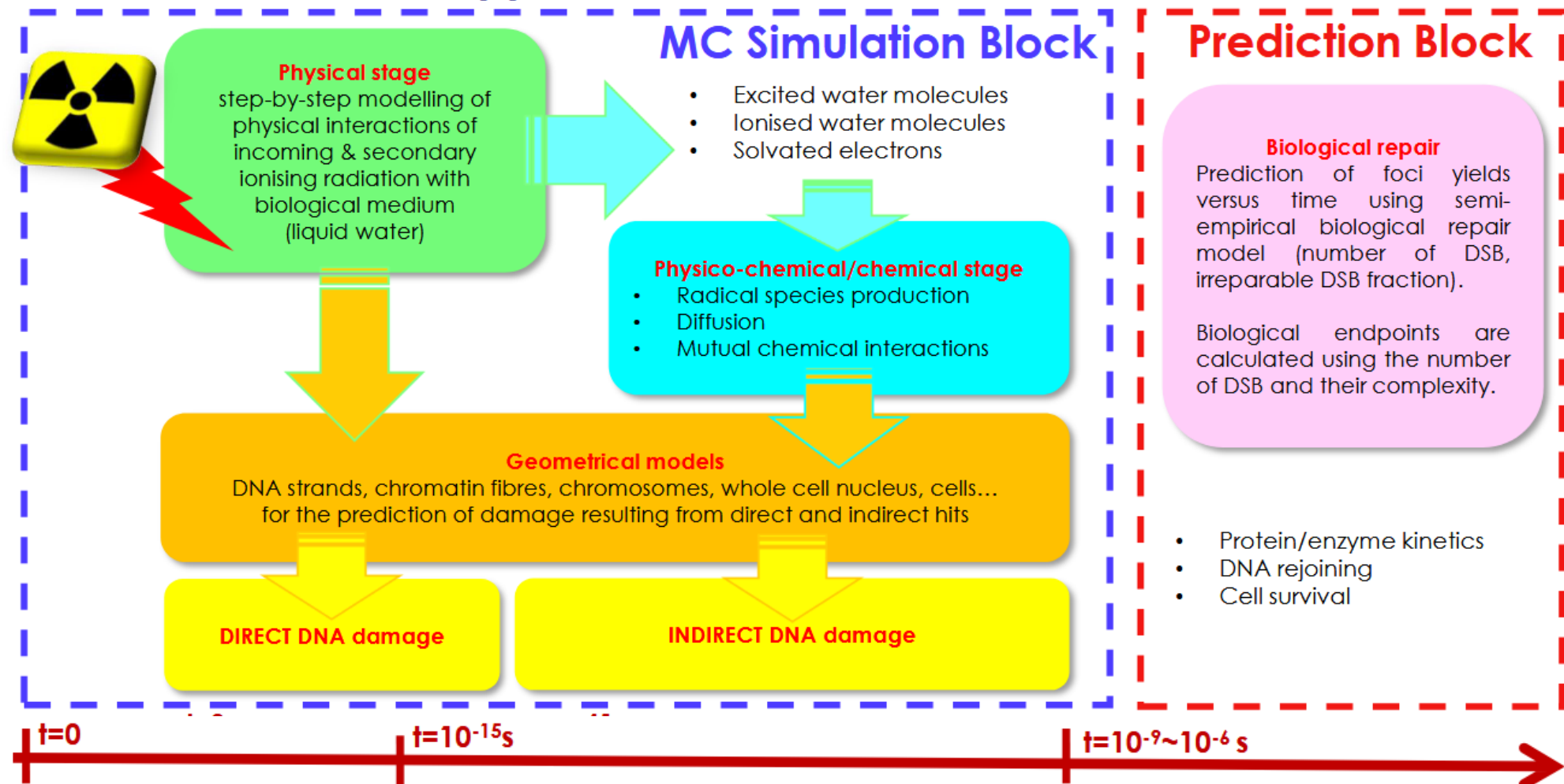
LQ extension

LQ on control

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

γ intrinsic radio-enhancing effect of the NPs

Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA



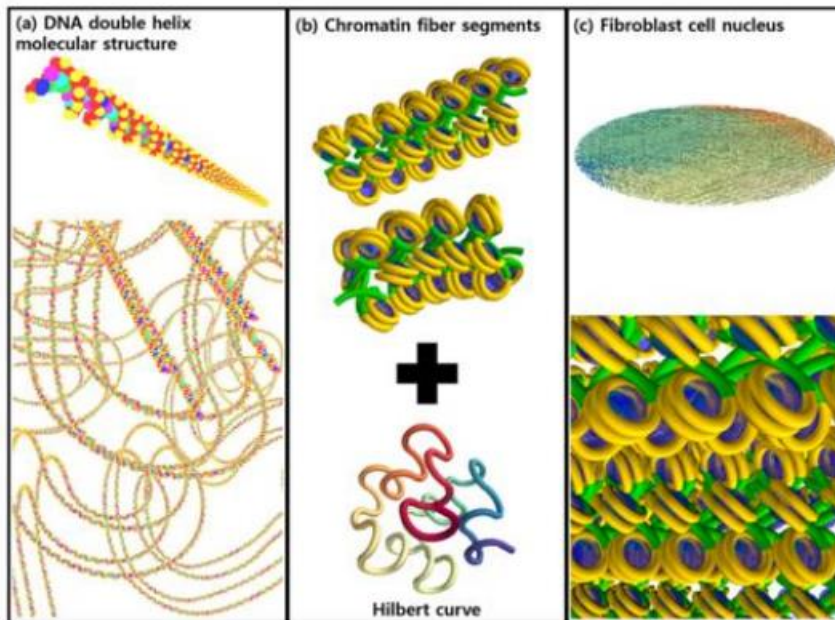
Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA

Effets directs

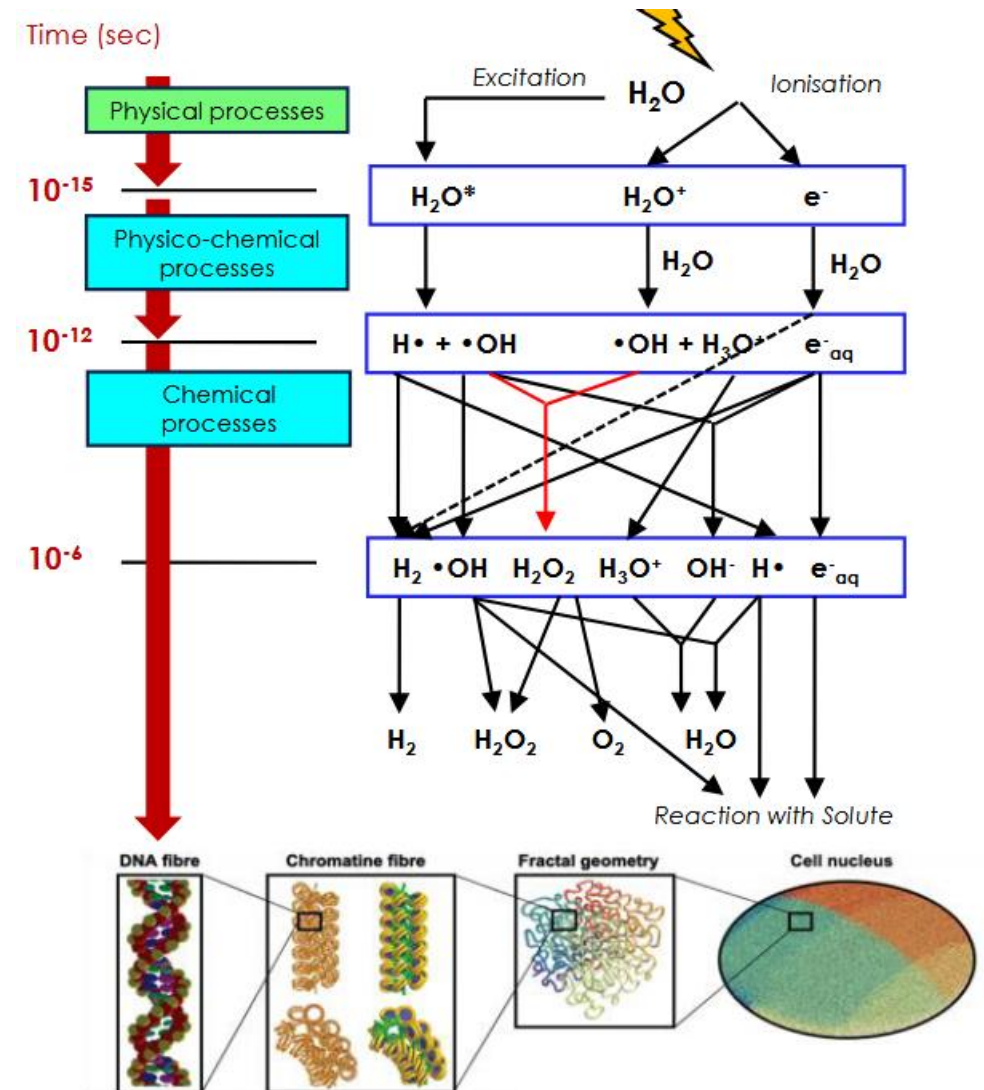
- Energie déposée directement sur l'ADN

Effets indirects

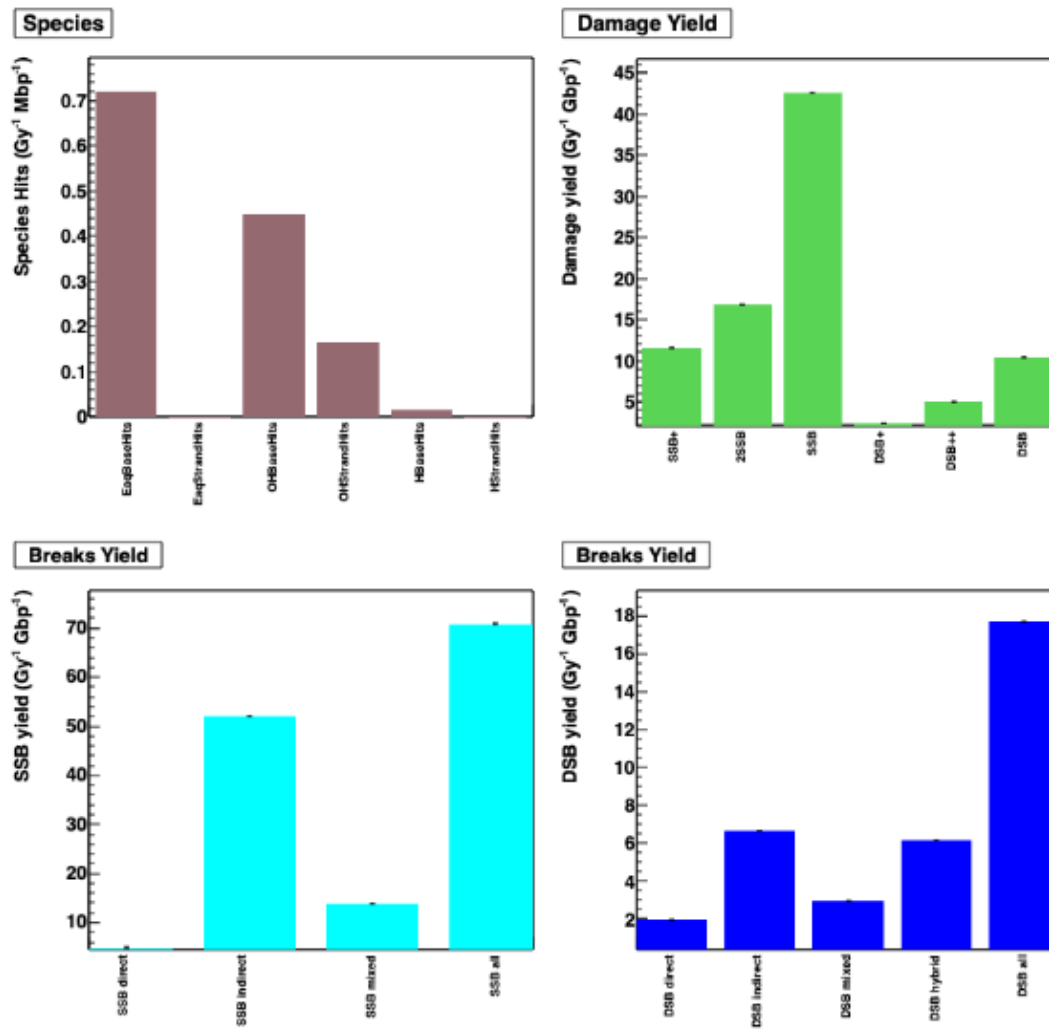
- Excitation / ionisation de l'eau
- Production de ROS conduisant à la cassure



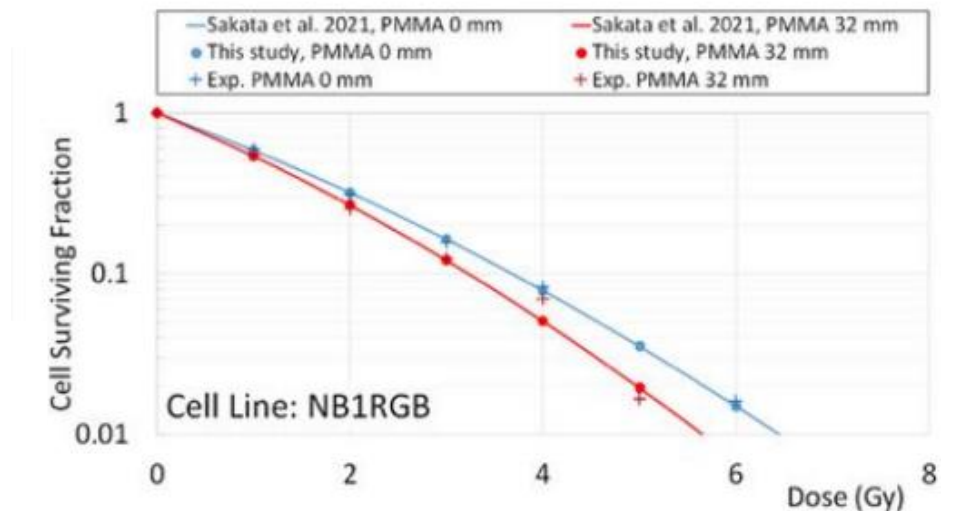
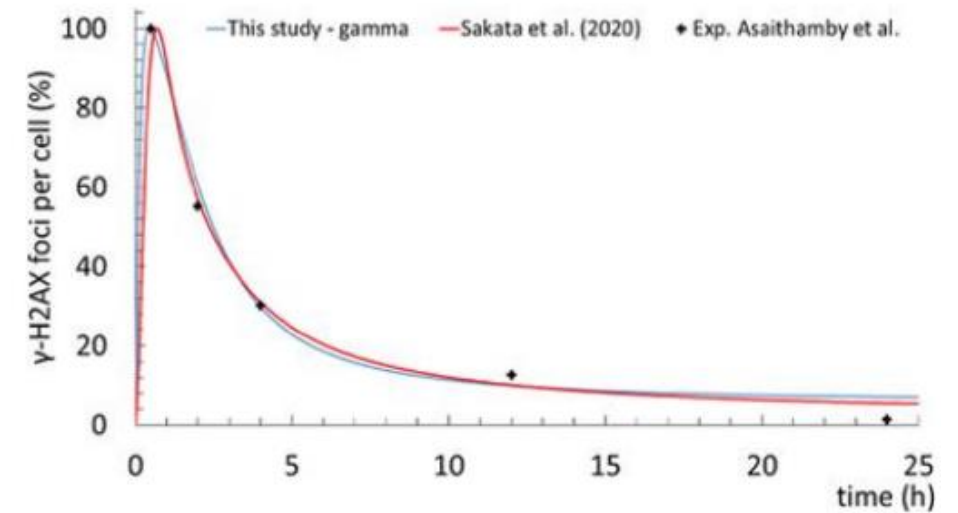
Chatzipapas et al. Physica Medica 2024



Echelle sub-cellulaire : Geant4-DNA

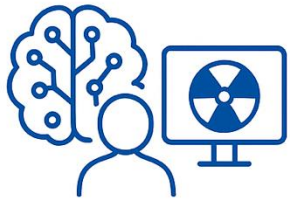


Output from G4-DNA/examples/extended/medical/dna



Chatzipapas et al. Prec. Rad. Oncol 2023

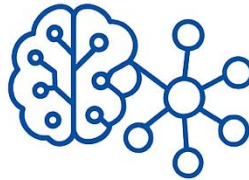
IA et simulations



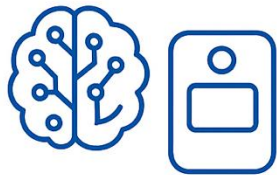
IA pour le
calcul de dose



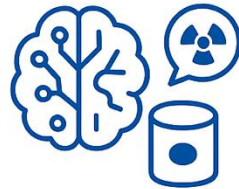
IA et débruitage
des simulations



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

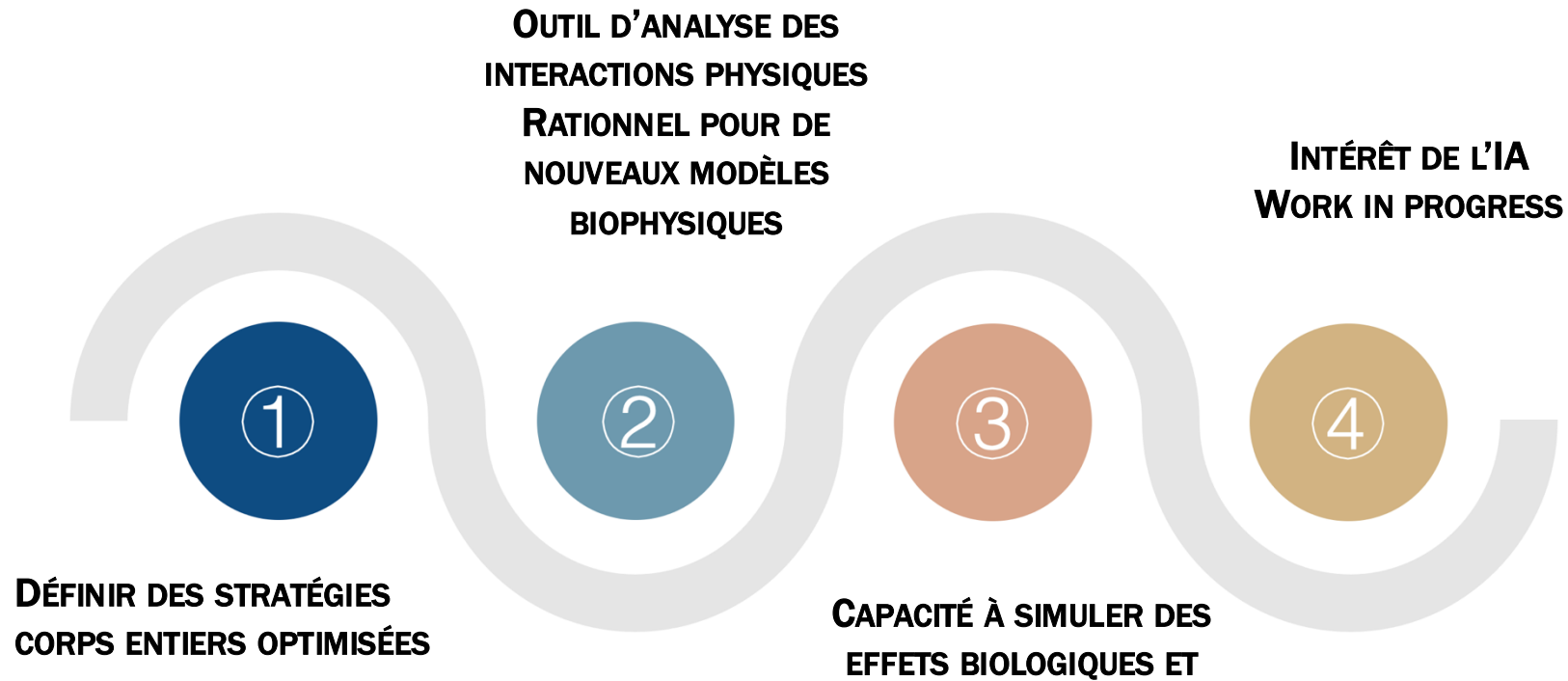
- Entraînements instables
- Précision physique statistique et non individuelle

Explicabilité - interprétabilité

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

Sarrut et al. Frontiers in Physics 2021

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 canceropôle Est



cran-direction@univ-lorraine.fr

Tél : +33 3 72 74 52 30

www.cran.univ-lorraine.fr

Labo_CRAN CRAN Nancy CRAN

