

Simulations Monte Carlo en scintigraphie cérébrale et oncologique



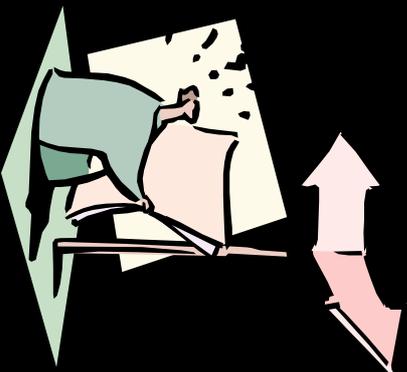
Irène Buvat

U678 INSERM, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France

buvat@imed.jussieu.fr

<http://www.guillemet.org/irene>

Plan



- Introduction : que sont les simulations Monte Carlo ?
- Utilité des simulations Monte Carlo
- Outils de simulations disponibles
- Conclusions

Introduction : que sont les simulations Monte Carlo ?

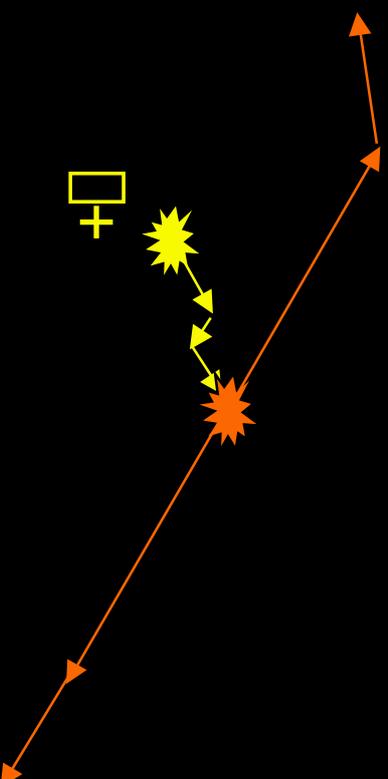


tirages de nombres aléatoires



Simulations Monte Carlo : méthodes de **simulations stochastiques**, utiles pour simuler des configurations trop compliquées à simuler de façon analytique

Exemple : déterminer l'histoire des particules émises par un radiotraceur...

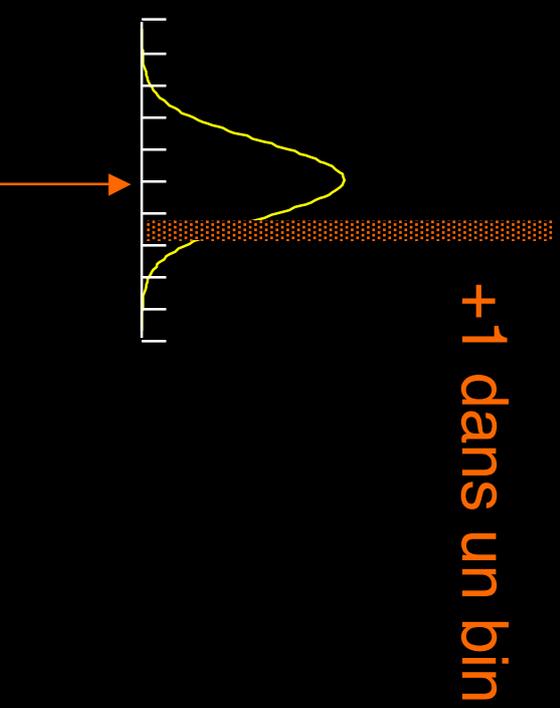
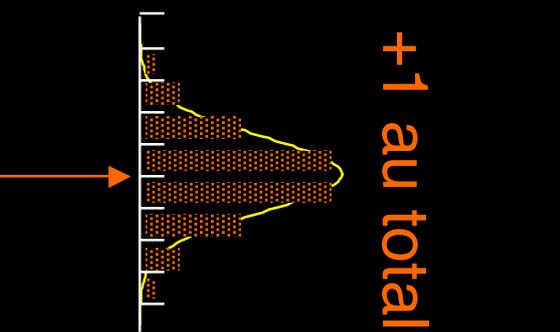


Simulations Monte Carlo / simulations analytiques

Simulations Monte Carlo : tirages de **nombre aléatoires** pour modéliser des événements stochastiques régis par des lois de probabilité

Simulations analytiques : équations **déterministes** décrivant les lois

Exemple : modélisation de la fonction de réponse d'un détecteur



Pourquoi Monte Carlo?

Projet Manhattan durant la deuxième guerre mondiale
Nicholas Metropolis et Stanislaw Ulam

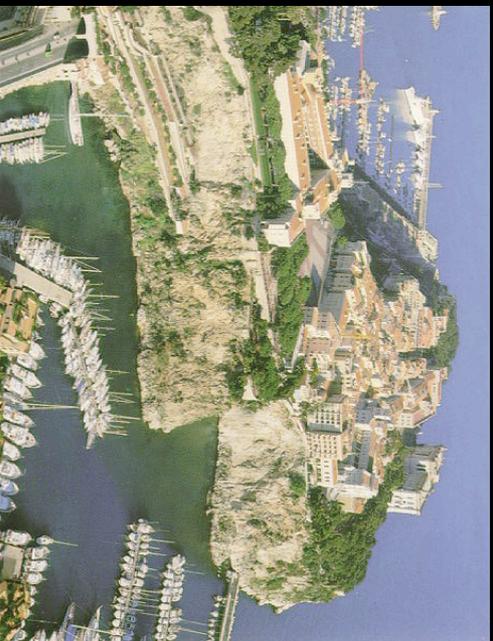


1915 - 1999



1909 - 1986

simulations stochastiques → tirages aléatoires → jeux de chance



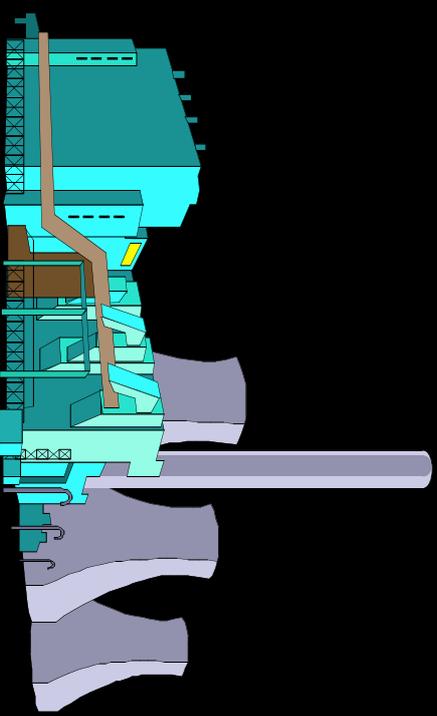
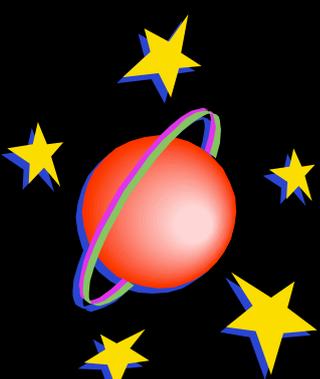
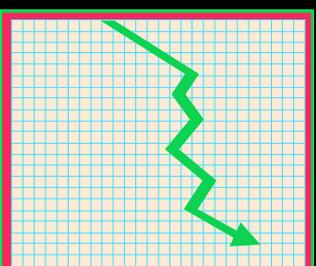
Monte Carlo : capitale des jeux de chances

Applications des simulations Monte Carlo

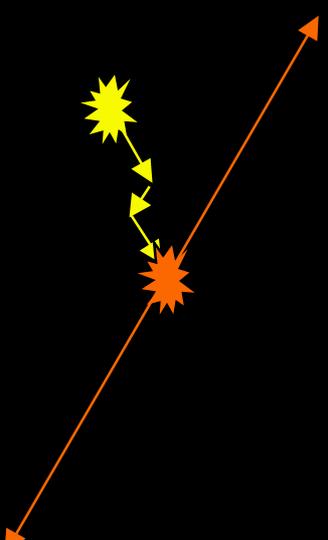
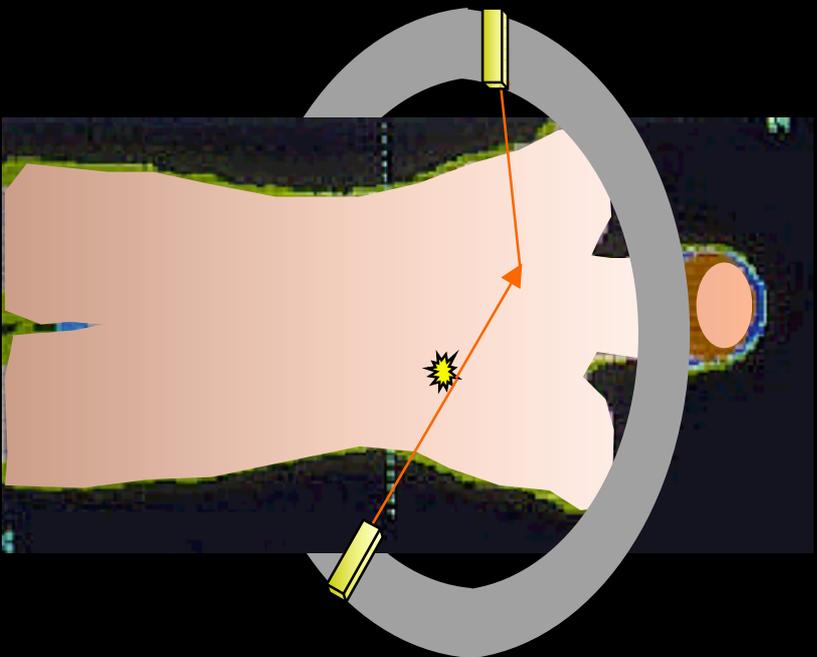
- Transport de particules dans l'atmosphère terrestre
- Simulations de processus en physiques des hautes énergies
- Simulation de la formation de galaxies en astrophysique
- Simulation de jeux de chance
- Conception de réacteurs nucléaires
- Flux de circulation
- Prévisions financières
- etc

Et :

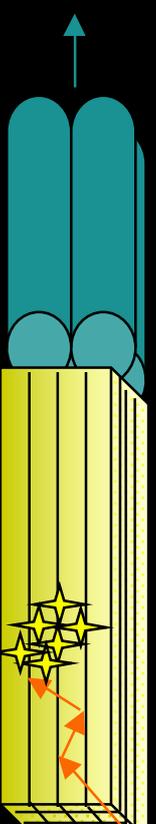
- Dosimétrie
- Imagerie TEMP et TEP



Principe d'une simulation Monte Carlo en TEMP et en TEP (1)



position et énergie de
l'événement correspondant à
la particule initiale

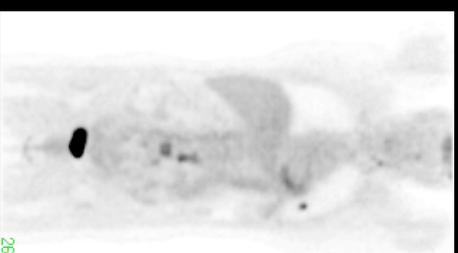
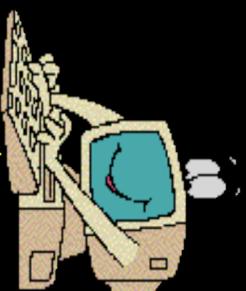


Principe d'une simulation Monte Carlo en TEMP et en TEP (2)

position et énergie de l'événement correspondant à la particule initiale



$LOR\ i_1, E_1, E'_1, t_1, LOR\ i_2, E_2, E'_2, t_2, \dots$



Potentiels et limites des simulations Monte Carlo en TEMP/TEP



- La qualité dépend de la finesse des modèles
- Possibilités de modéliser précisément : l'isotope, les interactions particules-matière, le détecteur, les effets statistiques (nature aléatoire de l'émission, réponse stochastique des détecteurs), les phénomènes dynamiques, etc



- Difficile modélisation des imperfections des détecteurs (réponse non parfaitement homogènes des cristaux)
- Temps de calcul...

Applications des simulations Monte Carlo en TEMP et TEP

Conception et optimisation de détecteurs

Correction
de diffusion



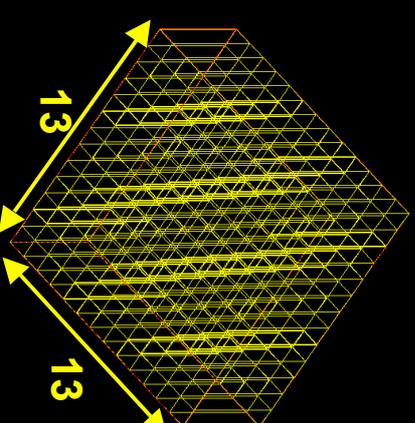
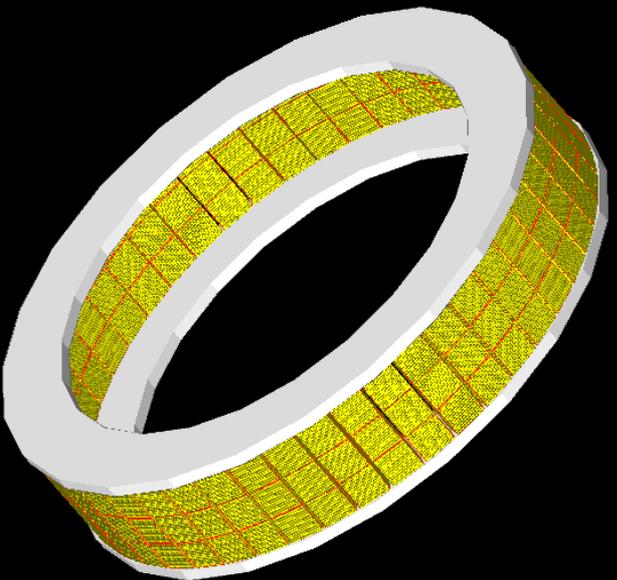
Reconstruction
tomographique

Optimisation de protocoles
d'acquisition ou de traitement

Evaluation de
protocoles

Conception et optimisation de détecteurs

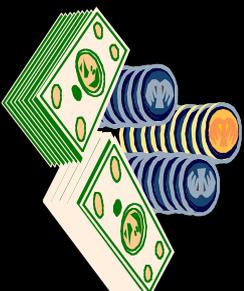
- Tous les constructeurs sont dotés de simulateur
 - pour prévoir les performances des détecteurs
 - pour évaluer l'impact de certaines composantes sur les performances
- Exemple : modélisation de la caméra HiRez de CPS Innovations



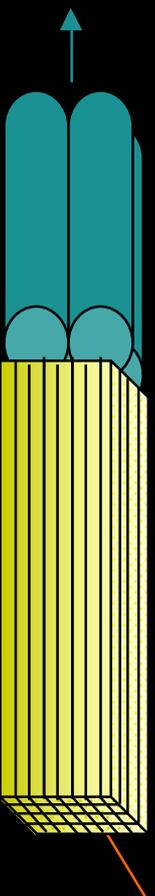
- taille des cristaux
- nature des cristaux

Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

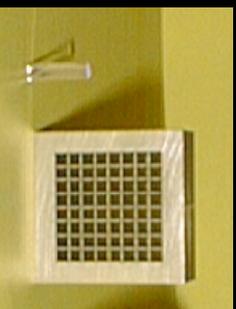
- Evite la construction coûteuse de prototype



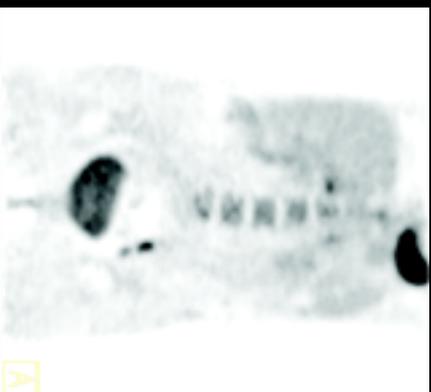
- Permet d'analyser le signal à tous les niveaux de la chaîne de détection



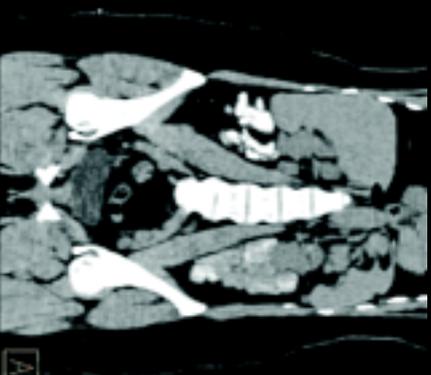
- Impossibilité de reproduire les défauts de certaines composantes, par exemple les inhomogénéités entre cristaux (plus de 10 000 détecteurs)



Corrections : correction de la diffusion en TEP

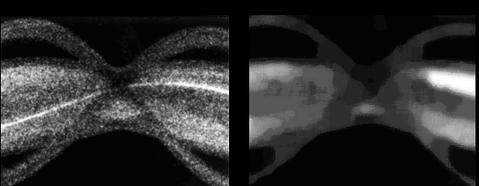


+



estimation de la distribution d'activité (image reconstruite sans correction de la diffusion)

milieu de propagation des photons (à partir d'un CT)

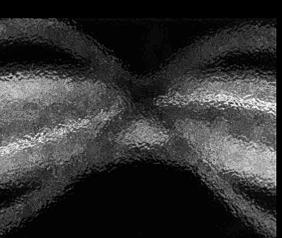


- sinogrammes $S_{\text{diffusé}}$
- des photons diffusés
- sinogrammes S_{total}
(vrais + diffusés)



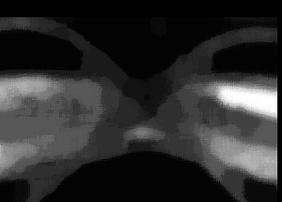
k

mise à l'échelle du sinogramme $S_{\text{diffusé}}$ en utilisant S_{total} et $S_{\text{mesuré}}$



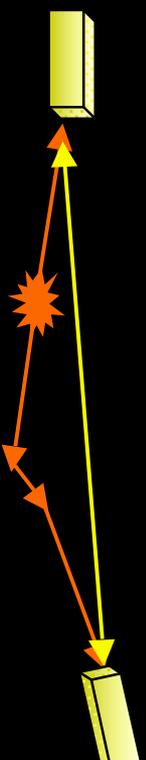
- k

soustraction
 $S_{\text{corrigé}} = S_{\text{mesuré}} - k \cdot S_{\text{diffusé}}$

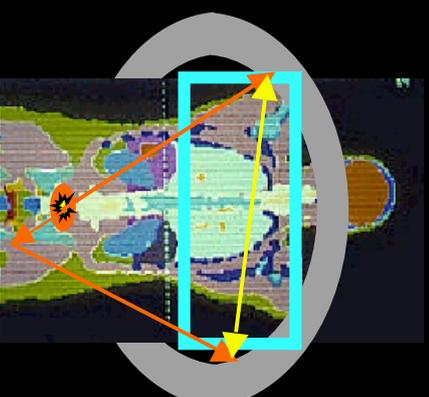


Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

- Modélisation analytique du diffusé impossible dès que l'on considère le diffusé multiple, alors que la modélisation Monte Carlo est précise

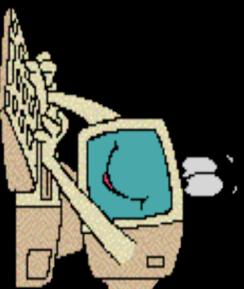


- Difficulté à prendre en compte de diffusé extérieur au champ de vue (examen corps entier indispensable)



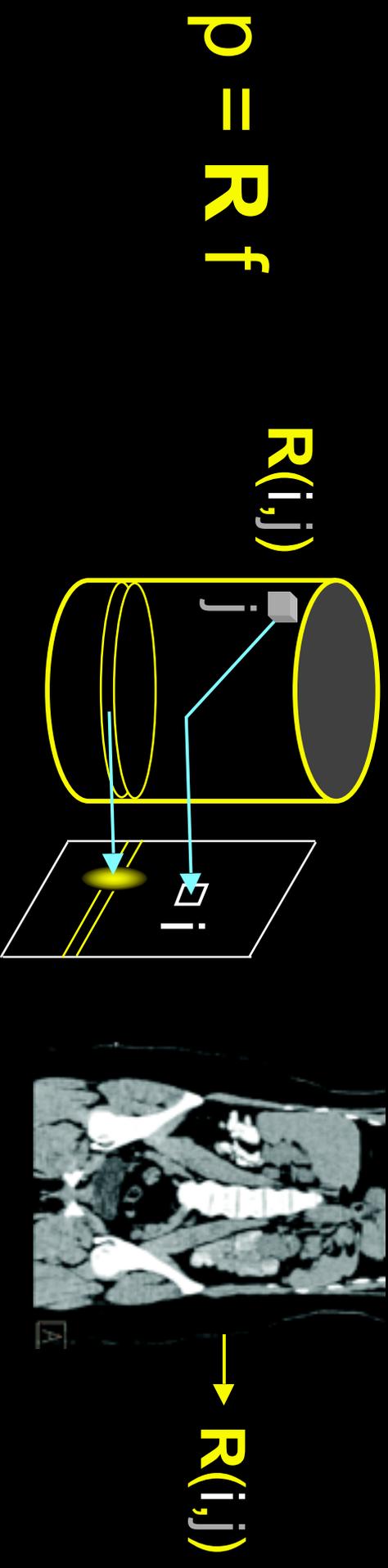
champ de vue

- Temps de calcul



Reconstruction tomographique

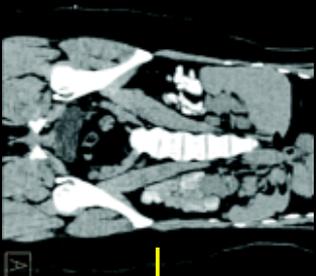
- Calcul du projecteur impliqué dans la reconstruction tomographique par simulation Monte Carlo (depuis 1985)



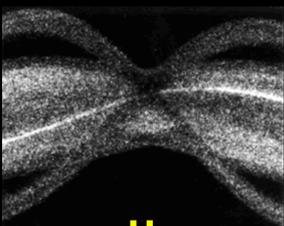
- Différents niveaux de complexité :
 - 2D ou 3D
 - effets détecteur seulement (fonction de réponse du détecteur) ou effets dépendant du patient (atténuation, diffusion, volume partiel)

Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

- Précision : possible reconstruction individualisée pour chaque patient

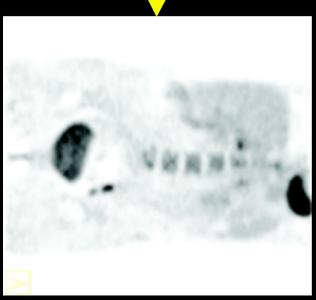


→ $R(i,j)$

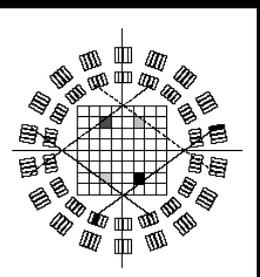


= p

p = R f →



- Flexibilité : possibilité de modéliser précisément la réponse de détecteurs à géométrie non conventionnelle



Rafecas et al, IEEE MIC 2003

- Taille du problème :
en « Tully 3D » : plusieurs millions de lignes de réponse et
plusieurs millions de valeurs à reconstruire...

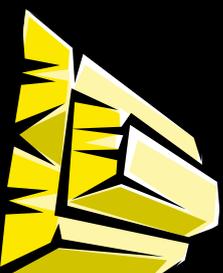
Optimisation de protocoles d'acquisition ou de traitement

- Permet de tester un grand nombre de protocoles à partir d'un jeu de données pour déterminer « Le meilleur » protocole pour la tâche considéré
- Exemple : optimisation d'un protocole de quantification d'images TEMP à l' ^{111}In pour la dosimétrie d'examen au Zevalin chez des patients atteints de NHL
 - 4 méthodes de correction de la diffusion (DEW, TEW, QEW, multispectrale)
 - 2 méthodes de correction d'atténuation (dans OSEM, uniforme et non-uniforme)
 - 2 méthodes de correction de volume partiel (coefficients de recouvrement et inversion d'une matrice de contamination croisée)
 - 3 méthodes de tracé de VOI (idéal, recalage TEMP/CT, recalage TEMP/CT guidé par le TEMP)
 - 4 façons d'utiliser les 2 photopics de l' ^{111}In (171 keV seulement, 245 keV seulement, sommes de 2 pics avant ou après reconstruction)

Protocole optimal : DEW, correction d'atténuation non uniforme, correction de volume partiel par coefficients de recouvrement, recalage TEMP/CT guidé par la TEMP, somme des 2 photopics avant reconstruction

Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

- Gold standard (valeurs idéales) parfaitement connu



- Possibilité d'analyser précisément l'origine des erreurs

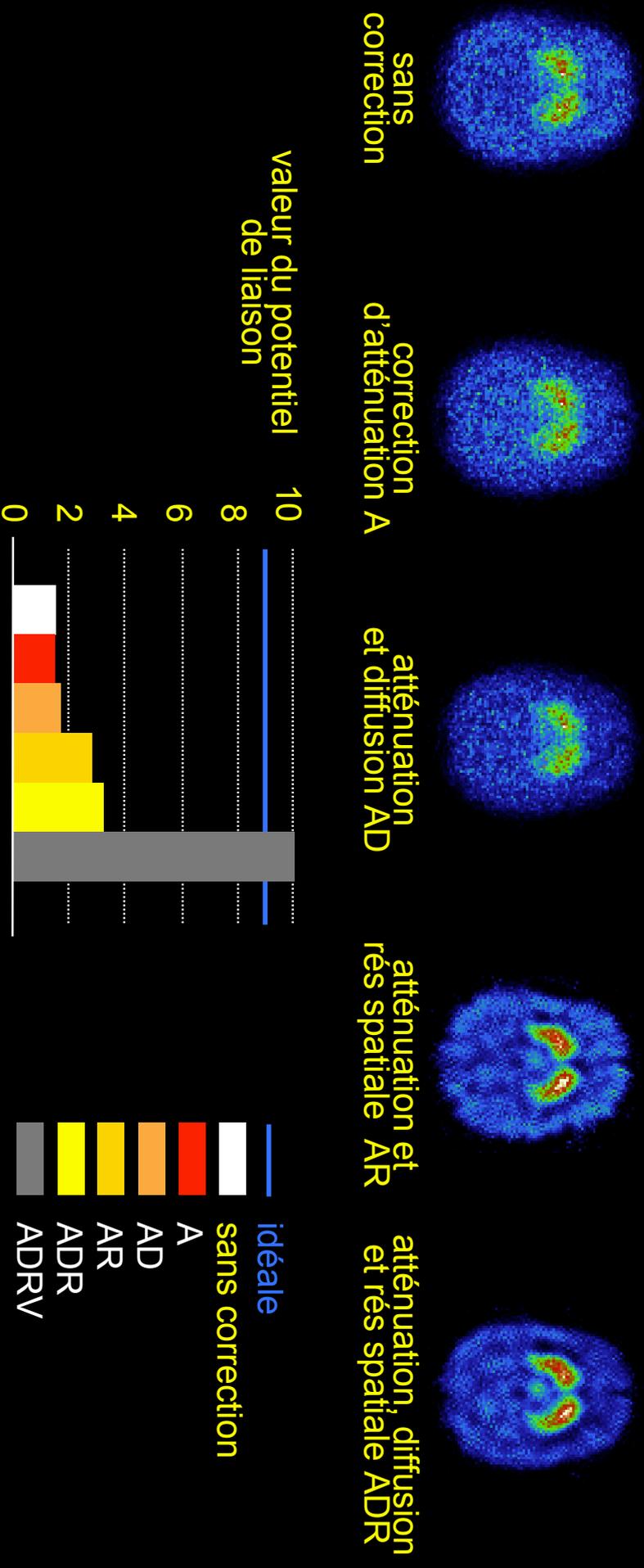
Erreurs d'estimation de l'activité (%)

	diamètre des sphères (mm)			
VOI CT guidés par TEMP	33.5	28	16	13.5
VOI idéales	14	16	-10	-17
	7	9	0	0
				10.5
				-51
				-35

Evaluation de protocoles de détection ou de quantification

- Possibilité de générer un grand nombre de cas ou des cas précisément documentés pour des travaux d'évaluation

- Exemple : évaluation de la précision de la quantification en imagerie TEMP de la neurotransmission dopaminergique



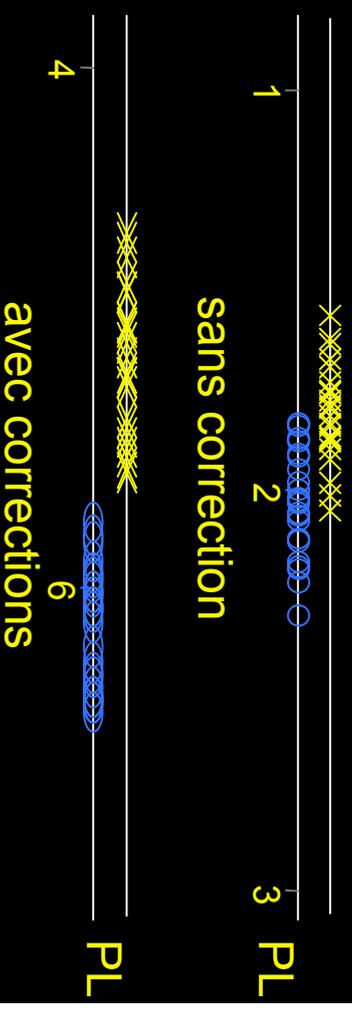
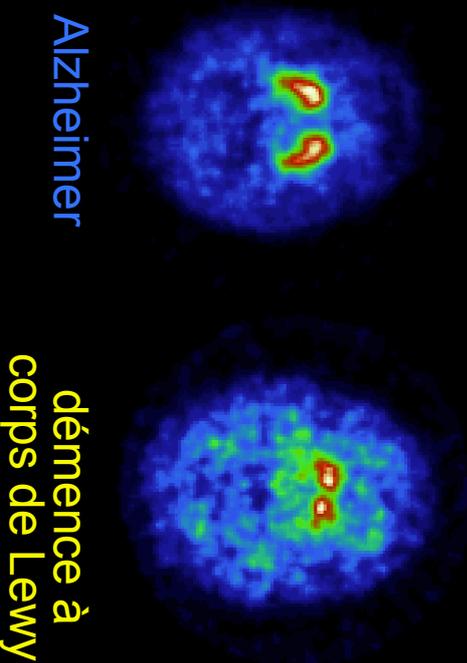
Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

- Gold standard parfaitement connu



- Possibilité d'analyser précisément l'origine des erreurs
- Possibilité d'évaluer l'impact clinique de protocoles en modélisant des cas difficiles à recruter (par exemple, pathologies débutantes)

Diagnostic différentiel



Outils pour la simulation : est-ce réservé à un cercle d'initiés ?



- Logiciels actuels dédiés aux simulations Monte Carlo TEMP et/ou TEP
 - SimSET (TEMP & TEP)
 - Gate (TEMP & TEP)
 - Simind (TEMP)
 - Sorteo (TEP)
- SIMSPECT, MCMATV, PETSIM, EIDOLON...

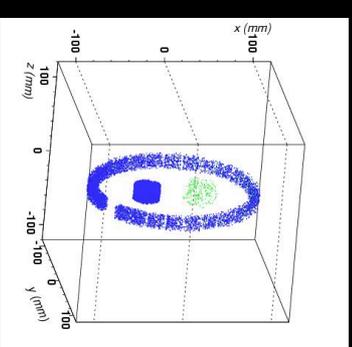
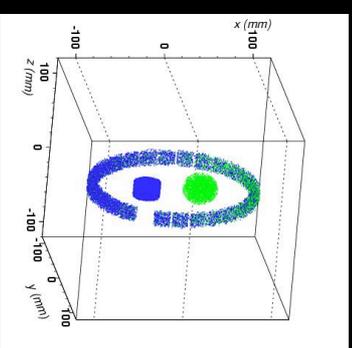
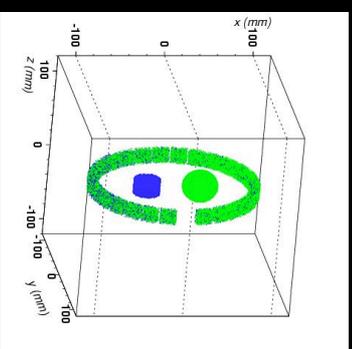
Logiciels actuels de simulations Monte Carlo

	SimSET _{PET}	SimSET _{SPECT}	Sorteo _{PET}	Simind _{SPECT}	Gate _{SPECT/PET}
Description source	●	●	●	●	●
Interactions simulées	●	●	●	●	●
Interactions ds détecteur	●	●	●	●	●
Langage et plateforme	●	●	●	●	●
Parallélisation	●	●	●	●	●
Validation	●	●	●	●	●
Domaine public	●	●	●	●	●
Convivialité	●	●	●	●	●
Efficacité	●	●	●	●	●
Flexibilité	●	●	●	●	●

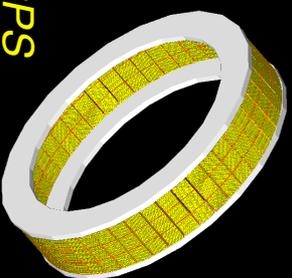
Discussion : ce qui distingue vraiment les codes

- Possibilité de simuler des processus dynamiques (cinétiques, mouvement du détecteur, décroissance radioactive) : Gate, Sorteo

O15 (T=2 min)
C11 (T=20 min)

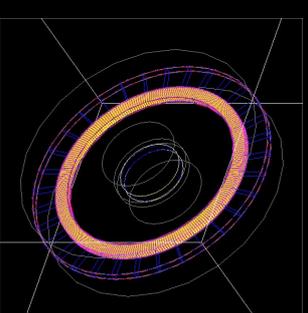


- Flexibilité (détecteurs non conventionnels) : Gate



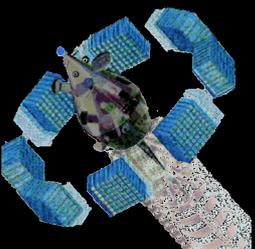
HiRez, CPS

microPET, Sherbrooke



- Efficacité de simulation : SimSET, Sorteo, Simind
- Validation

Discussion : Gate, en passe de devenir un standard ?



- Conçu pour pallier aux déficiences des autres simulateurs et mieux répondre aux besoins des utilisateurs
- Domaine public
- Simple d'utilisation : pas de programmation « `HardC` » (utilisation de macros)
- Grande flexibilité (modélisation de géométries non conventionnelles)
- Importance donnée à la validation
- A priori pérenne



- Collaboration OpenGATE (<http://www-lphe.epfl.ch/~PET/>)
- plus de 200 utilisateurs actuellement, nouvelles versions annuelles
 - 4 groupes de travail : modélisation de systèmes, dosimétrie, cluster, optimisation

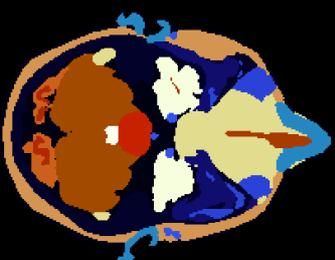
Outils pour la simulation : fantômes anthropomorphiques



- Caractéristiques désirées : proches de la réalité, puisque la pertinence des données simulées dépend de la pertinence de la configuration simulée
- Fantômes anthropomorphiques utilisables pour les simulations
 - Fantômes cérébraux
 - Fantômes thoraco/abdominal

Fantômes cérébraux

- Fantôme de Zubal : <http://noodle.med.yale.edu/phant.html>
IRM d'un sujet sain (1,78 m, 77 kg)
124 coupes (1,1 mm x 1,1 mm x 1,4 mm)
segmentées en 62 compartiments et volumes associés



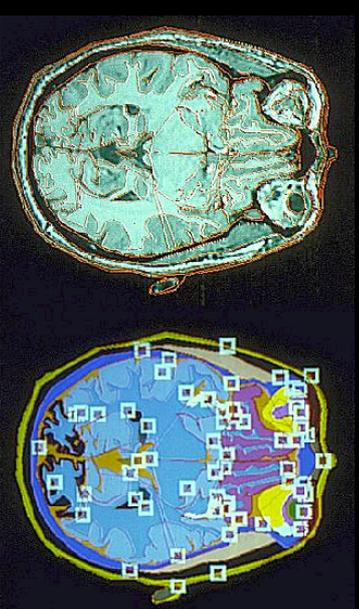
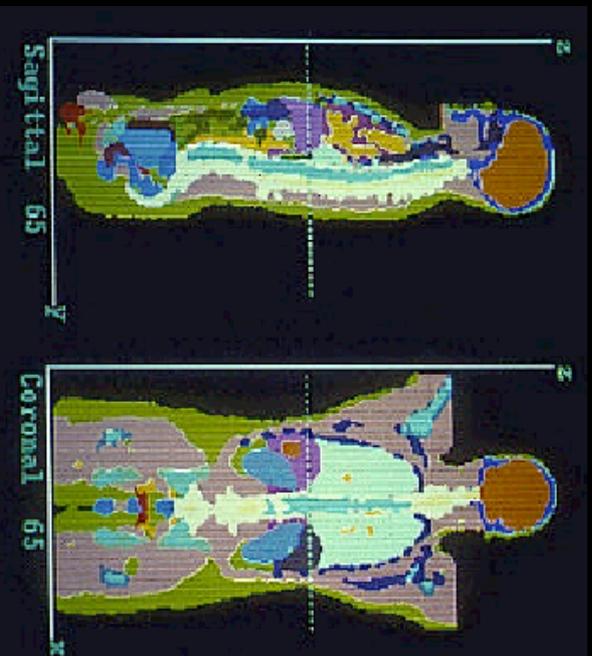
- Fantôme de Hoffman 3D numérique
Hoffman et al. IEEE Trans Nucl Sci, 37, 616–620, 1990.



Fantômes tête et torse de Zubal

- Torse + tête <http://noodle.med.yale.edu/phant.html>
 - Torse + tête CT d'un patient (1.78 m, 70 kg) :
 - 78 coupes du cou jusqu'à mi-cuisse (1 mm x 1 mm x 10 mm)
 - 51 coupes tête et cou (0,5 mm x 0,5 mm x 5 mm)
- Tête IRM du même patient

Torse et tête segmentés en 57 compartiments: 1 mm x 1 mm x 10 mm
Tête IRM segmentée en 67 compartiments : 1 mm x 1 mm x 5 mm



Fantômes MCAT (Mathematical Cardiac Torso phantom)

- www.bme.unc.edu/mirg/mcat

- 3 versions :

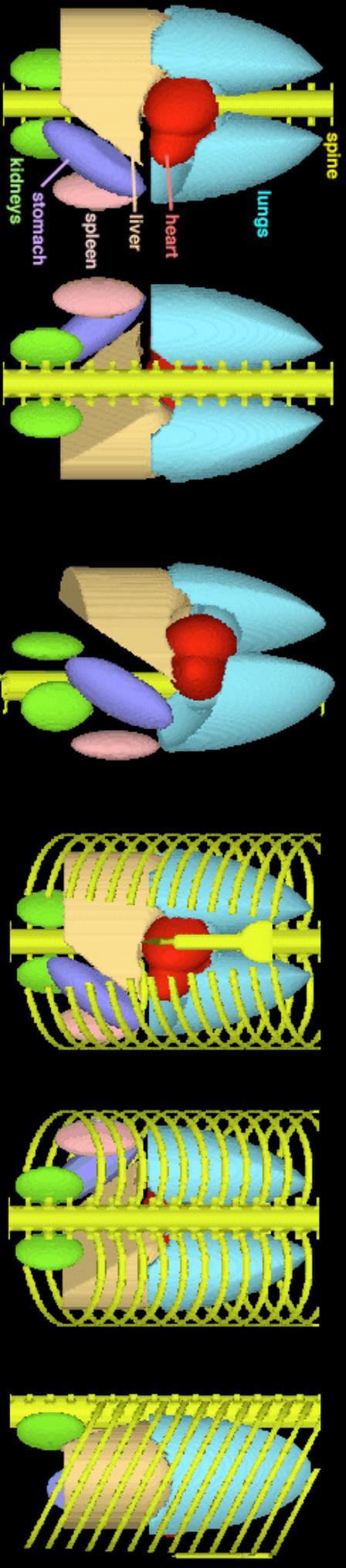
 - anatomie fixe

 - anatomie fixe avec coeur battant

 - anatomie variable avec coeur battant (modélise des modifications d'épaisseur de la paroi ventriculaire, des modifications de volumes des ventricules, le mouvement de l'apex, la rotation du coeur)

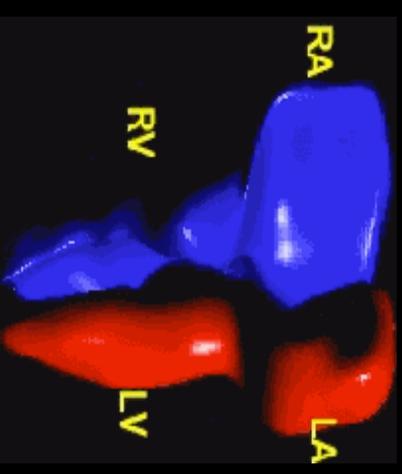
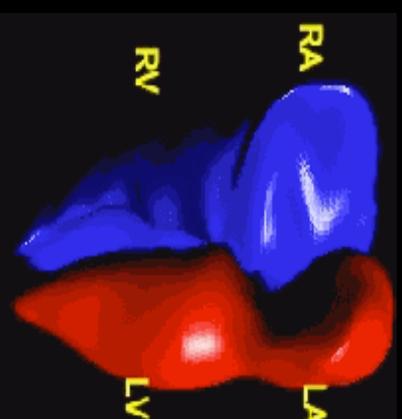
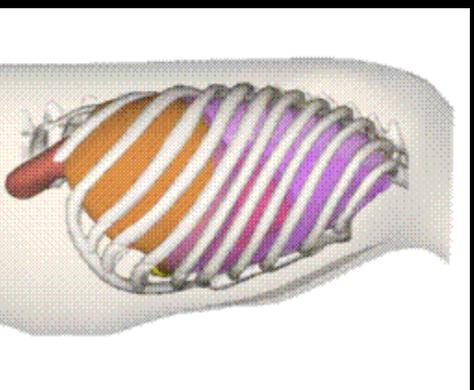
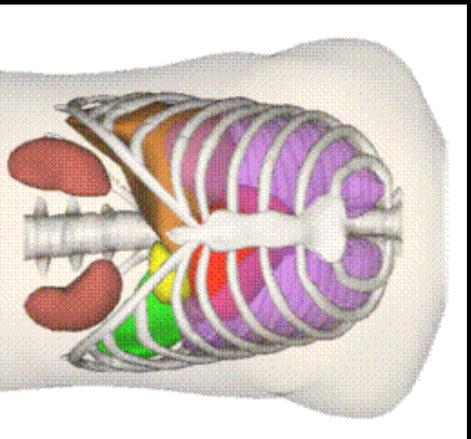
 - 5 types de tissus : muscle, graisse, os trabéculaire, os cortical, poumons

 - Versions analytique et voxelisée



Fantôme NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)

- Torse <http://www.bme.unc.edu/~wsegars/index.html>
- Conçu à partir d'une IRM cardiaque réalisée chez un sujet sain: 15 images par cycle cardiaque, 1,56 mm x 1,56 mm x 10 mm
- Modèles d'organes et de squelette issus du CT du Visible Man
- Modèle cardiaque issu de l'IRM cardiaque
- Inclut les mouvements cardiaques et les mouvements respiratoires
- Défini par un ensemble d'équations, mais versions voxelisées possibles



Conclusions



- Les simulations Monte Carlo sont devenues un outil indispensable en Médecine Nucléaire
- Des outils de simulations accessibles au plus grand nombre existent
- Il est possible de simuler des configurations d'examen de plus en plus réalistes, grâce à la flexibilité des simulateurs, à la disponibilité de fantômes anthropomorphiques, et la possibilité de modéliser des phénomènes dynamiques

Remerciements

Karine Assié

Juliette Feuardent

Delphine Lazaro

Marine Soret

La collaboration OpenGATE

