

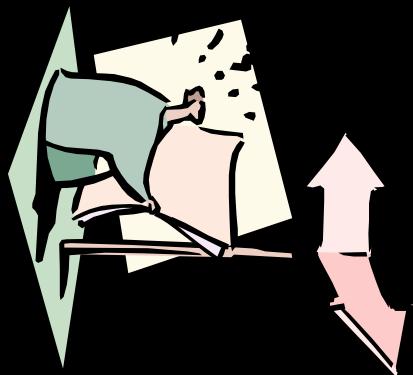
# Simulations Monte Carlo en scintigraphie cérébrale et oncologique



Irène Buvat  
U678 INSERM, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France

[buvat@imed.jussieu.fr](mailto:buvat@imed.jussieu.fr)  
<http://www.guillemet.org/irene>

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



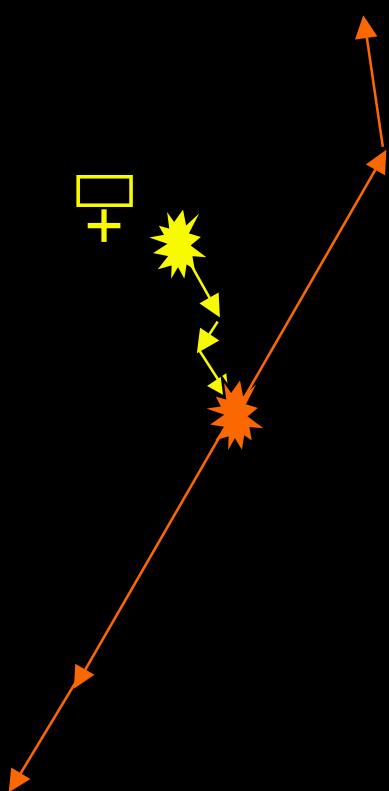
# Introduction : que sont les simulations Monte Carlo ?



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

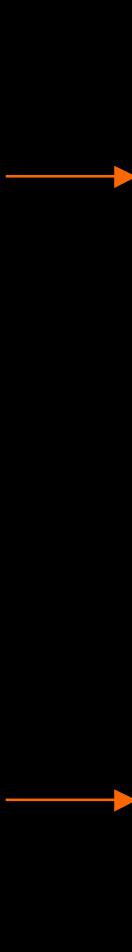
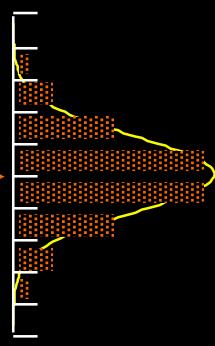
Simulations Monte Carlo : tirages de nombres aléatoires pour modéliser des événements stochastiques régis par des lois de probabilité

Simulations analytiques : équations déterministes décrivant les lois

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

+1 au total

+1 dans un bin



# Pourquoi Monte Carlo?

Projet Manhattan durant la deuxième guerre mondiale

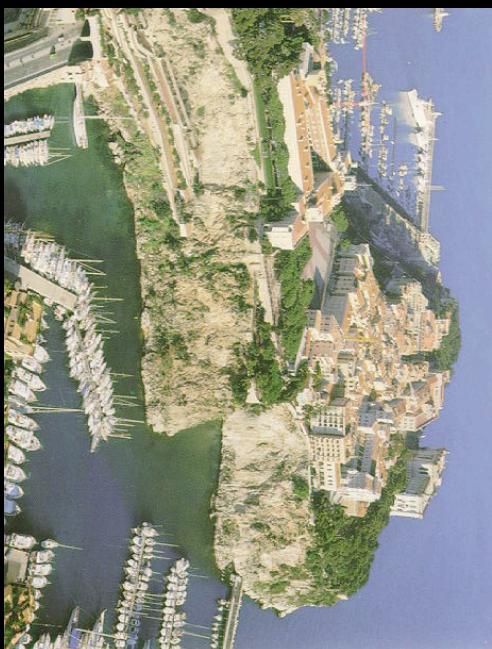
Nicholas Metropolis et Stanislaw Ulam

1915 - 1999



1909 - 1986

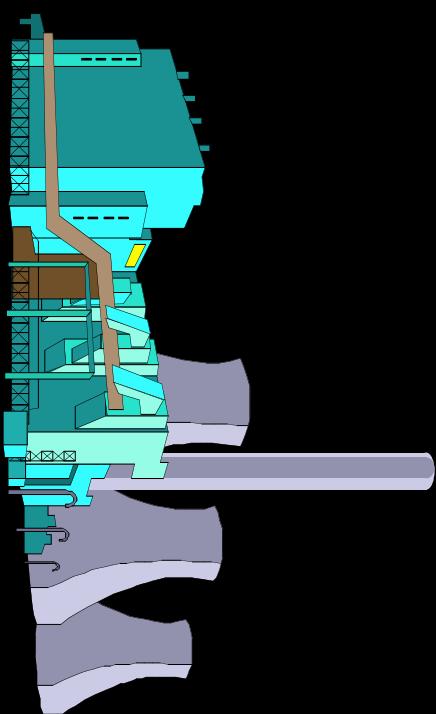
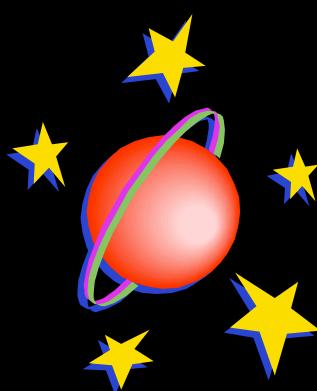
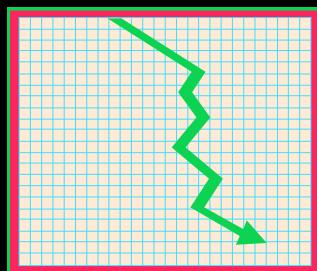
simulations stochastiques → tirages aléatoires → jeux de chance



Monte Carlo : capitale des jeux de chances

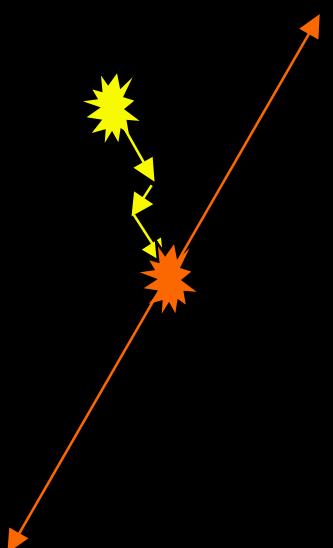
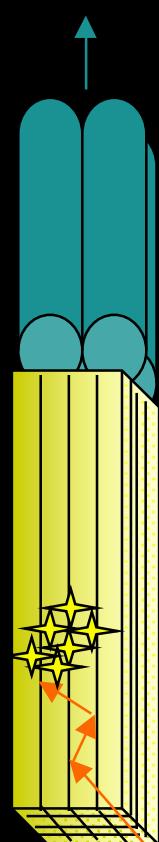
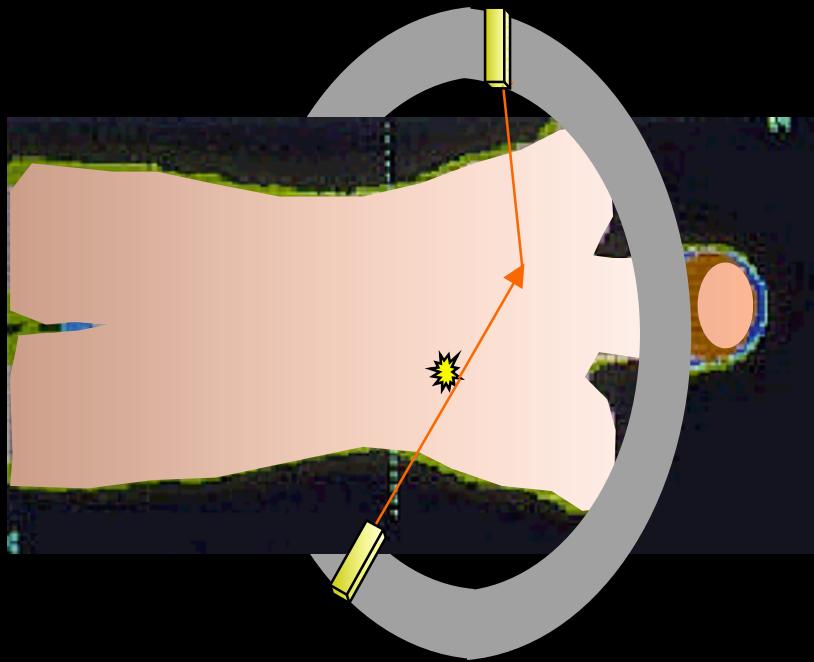
# Applications des simulations Monte Carlo

- Transport de particules dans l'atmosphère terrestre
  - Simulations de processus en physiques des hautes énergies
  - Simulation de la formation de galaxies en astrophysique
  - Conception de jeux de chance
  - 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

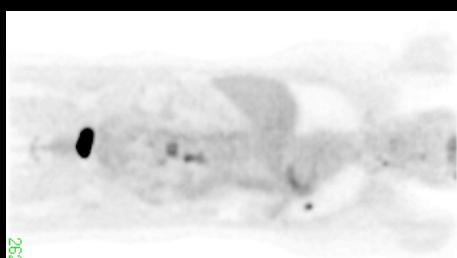
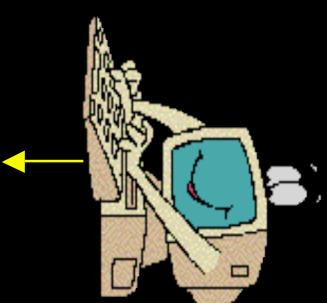


## Principe d'une simulation Monte Carlo en TEMP et en TEP (2)

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/TER



- 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

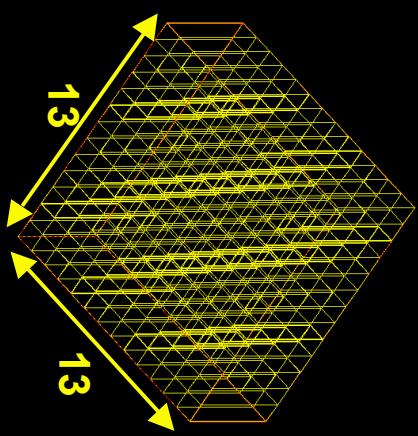
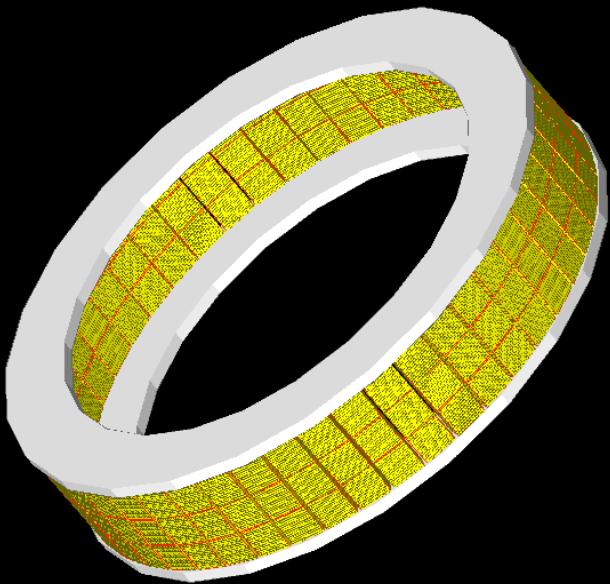


Optimisation de protocoles  
d'acquisition ou de traitement

Evaluation de  
protocoles

# Conception et optimisation de détecteurs

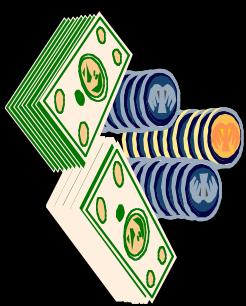
- Tous les constructeurs sont dotés de simulateur
  - pour prévoir les performances des détecteurs
  - pour évaluer l'impact de certaines composantes sur les performances
- Exemple : modélisation de la caméra HiRez de CPS Innovations



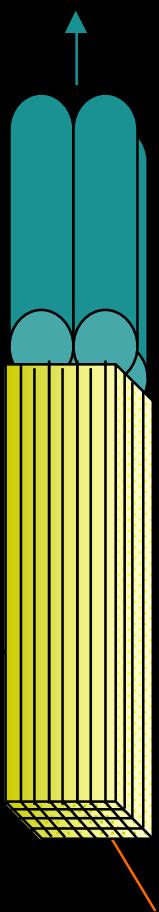
- taille des cristaux
- nature des cristaux

## Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

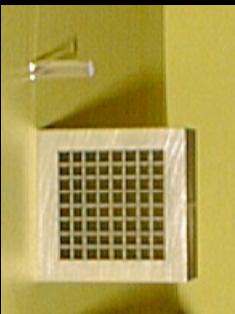
- Evite la construction coûteuse de prototype



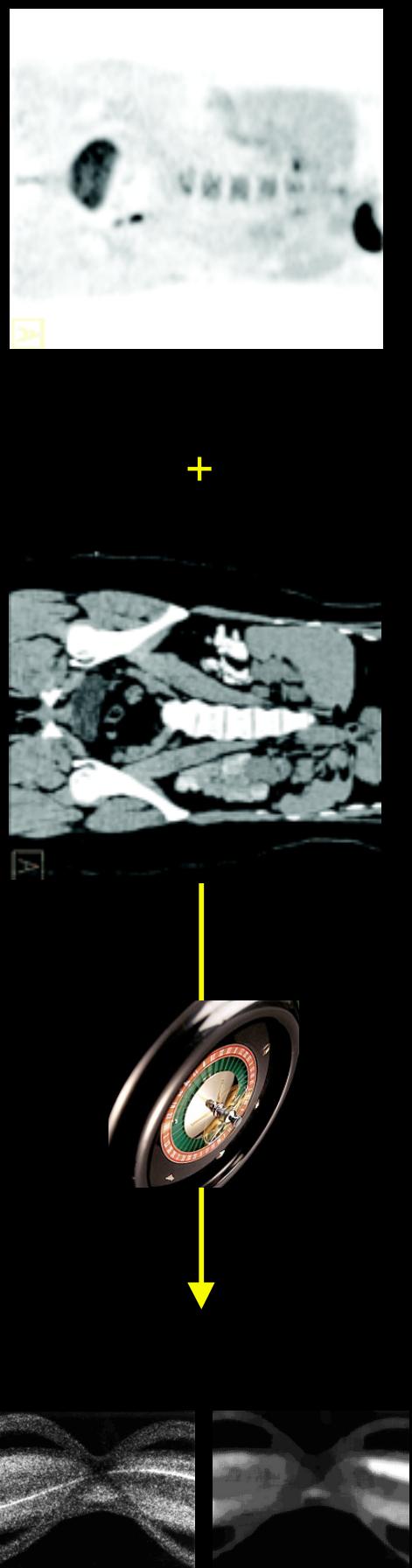
- Permet d'analyser le signal à tous les niveaux de la chaîne de détection



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

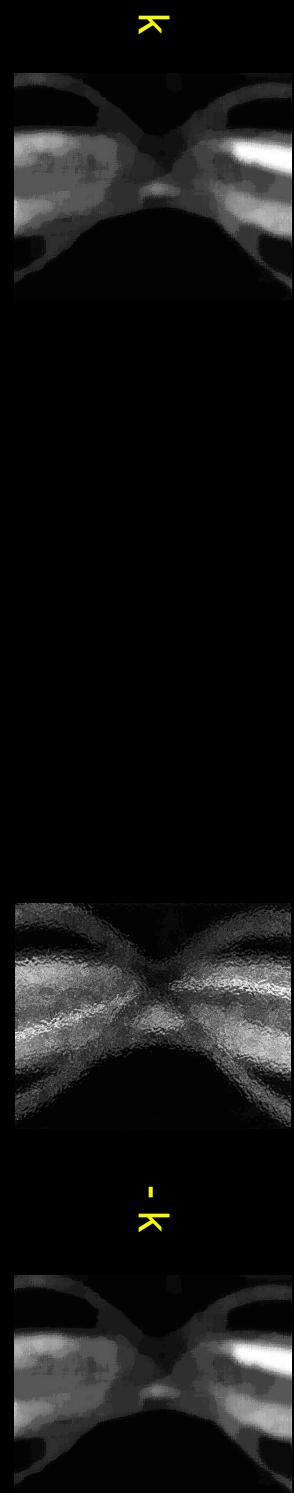


# Corrections : correction de la diffusion en TEP



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  $S_{\text{total}}$  (vrais + diffusés)

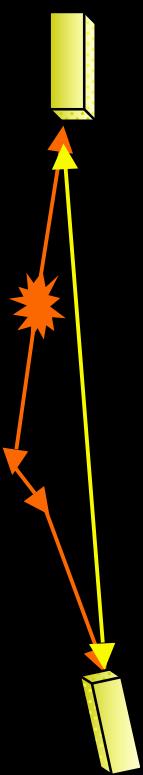


mise à l'échelle du sinogramme  $S_{\text{diffusé}}$  en utilisant  $S_{\text{total}}$  et  $S_{\text{mesuré}}$

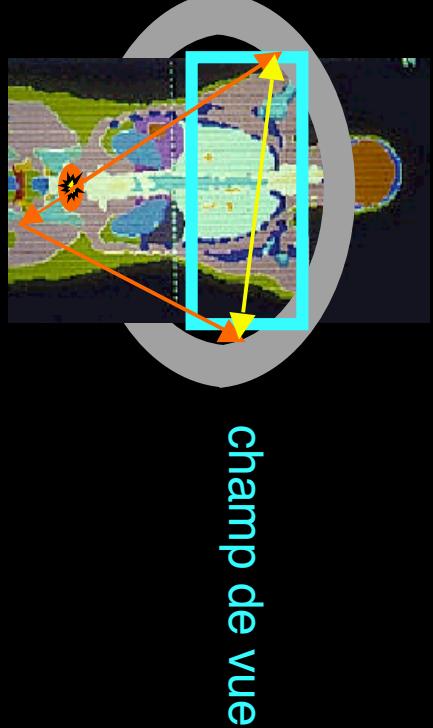
$$S_{\text{corrigé}} = S_{\text{mesuré}} - k \cdot S_{\text{diffusé}}$$

## Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

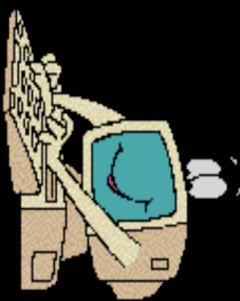
- Modélisation analytique du diffusé impossible dès que l'on considère le diffusé multiple, alors que la modélisation Monte Carlo est précise



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

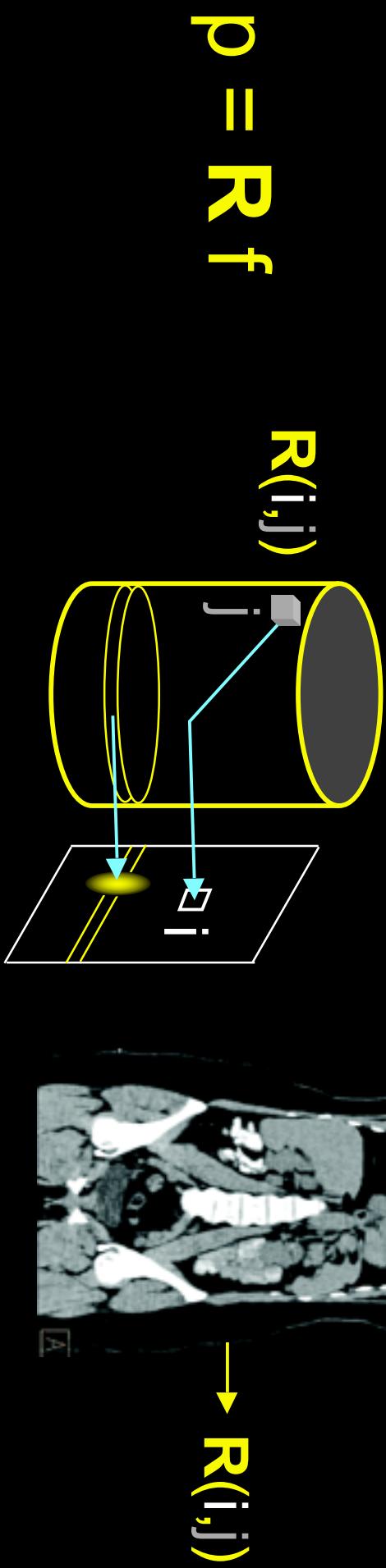


- Temps de calcul



# Reconstruction tomographique

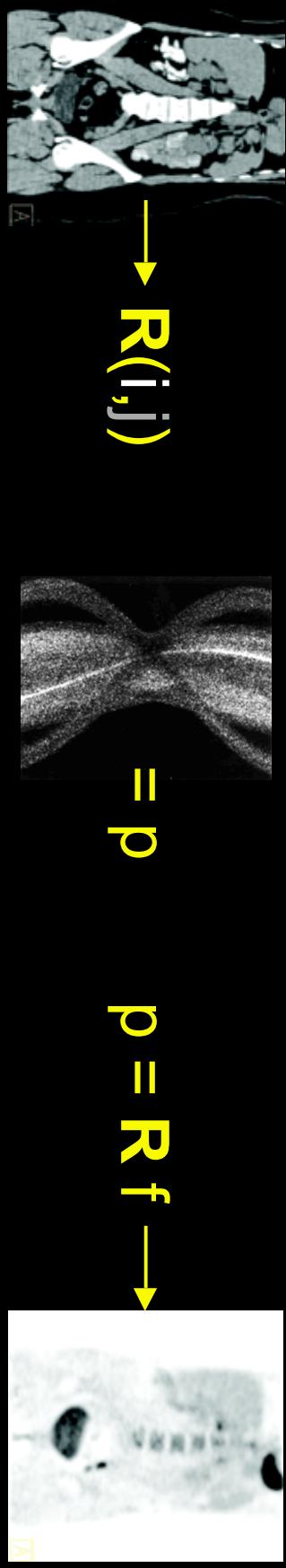
- Calcul du projecteur impliqué dans la reconstruction tomographique par simulation Monte Carlo (depuis 1985)



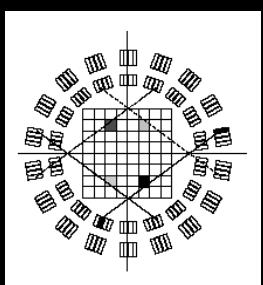
- Différents niveaux de complexité :
  - 2D ou 3D
  - effets détecteur seulement (fonction de réponse du détecteur) ou effets dépendant du patient (atténuation, diffusion, volume partiel)

## Discussion : apport et limites de l'approche Monte Carlo

- Précision : possible reconstruction individualisée pour chaque patient



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



Rafecas *et al.*, IEEE MIC 2003

- Taille du problème :  
en «**Fully 3DE**» : plusieurs millions de lignes de réponse et plusieurs millions de valeurs à reconstruire...

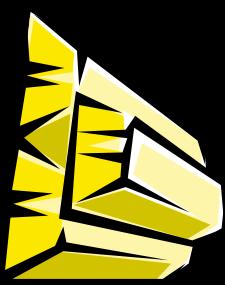
## Optimisation de protocoles d'acquisition ou de traitement

- Permet de tester un grand nombre de protocoles à partir d'un jeu de données pour déterminer «**le meilleur**» protocole pour la tâche considérée
- Exemple : optimisation d'un protocole de quantification d'images TEMP à  $\text{In-111}$  pour la dosimétrie d'exams 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 la TEMP)
  - 4 façons d'utiliser les 2 photopics de  $\text{In-111}$  (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



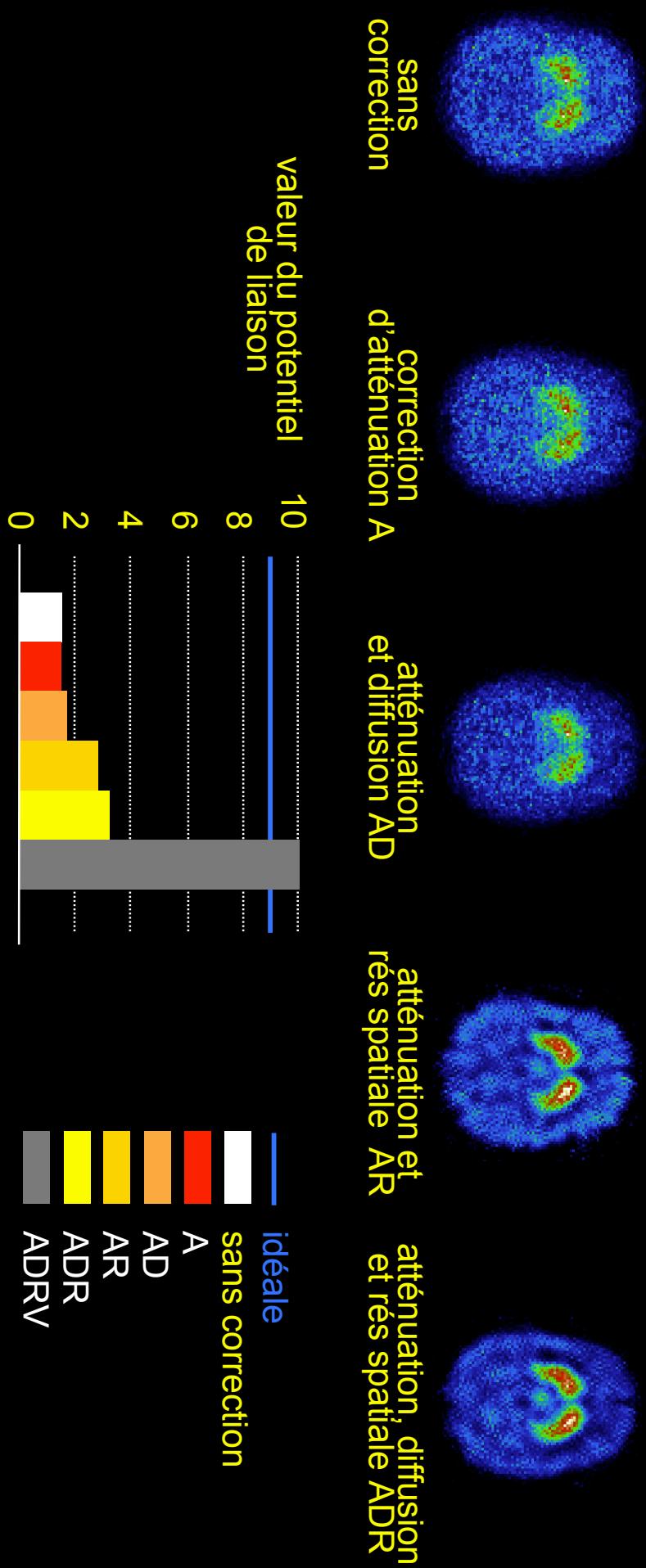
- Possibilité d'analyser précisément l'origine des erreurs

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	-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

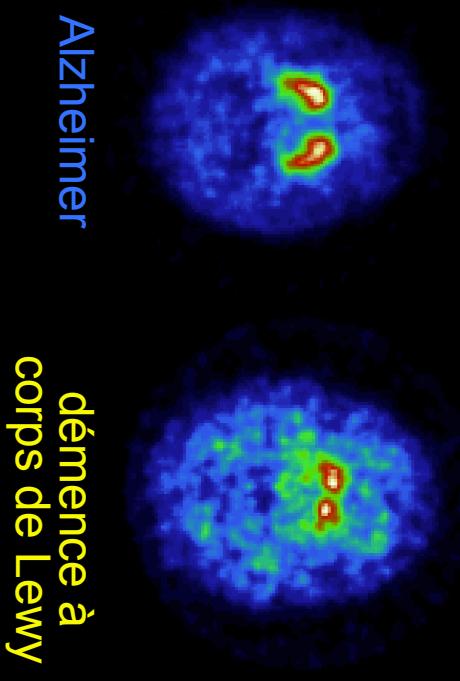
- Gold standard parfaitement connu



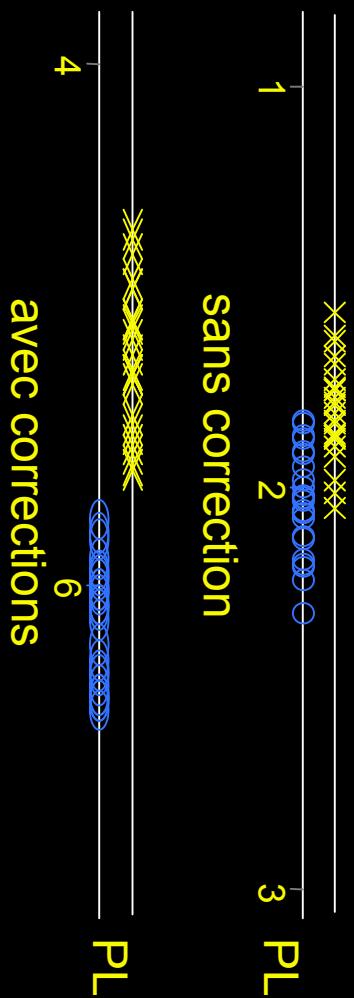
- Possibilité d'analyser précisément l'origine des erreurs

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

Diagnostic différentiel



Alzheimer  
démence à  
corps de Lewy



# 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...



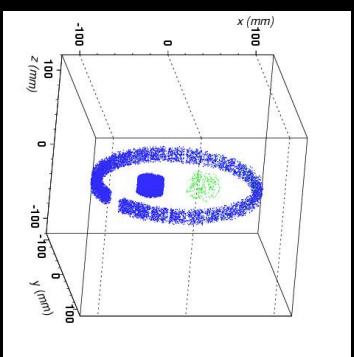
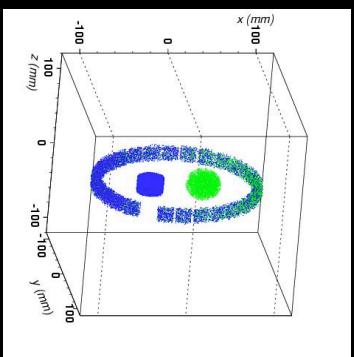
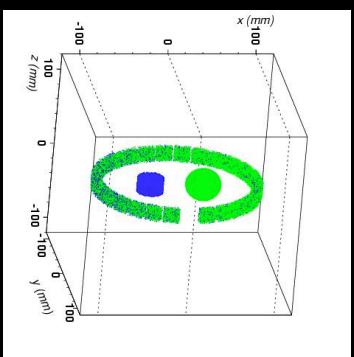
# Logiciels actuels de simulations Monte Carlo

	SimSET <sub>PET</sub>	SimSET <sub>SPECT</sub>	Sorteo <sub>PET</sub>	Simind <sub>SPECT</sub>	GatesPECT/PET
Description source	●				
Interactions ds détecteur		●			
Langage et plateforme	●				
Parallélisation	●				
Validation					
Domaine public					
Convivialité	●	●	●	●	●
Efficacité	●	●	●	●	●
Flexibilité	●	●	●	●	●

## Discussion : ce qui distingue vraiment les codes

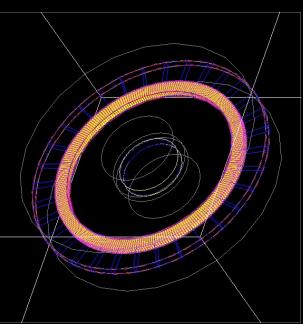
- Possibilité de simuler des processus dynamiques (cinétiques, mouvement du détecteur, décroissance radioactive) : Gate, Sorteo

O15 ( $\tau=2$  min)  
C11 ( $\tau=20$  min)



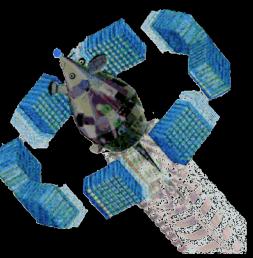
*HiRez, CPS*

*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 «~~hard~~» (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

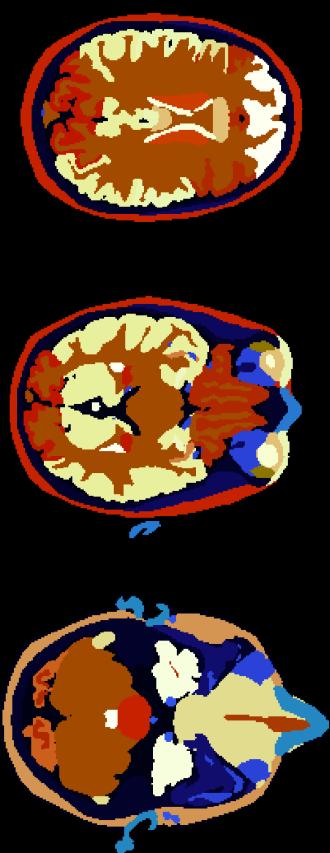
# Outils pour la simulation : fantômes anthropomorphiques



- 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://hoodle.med.yale.edu/phant.html>

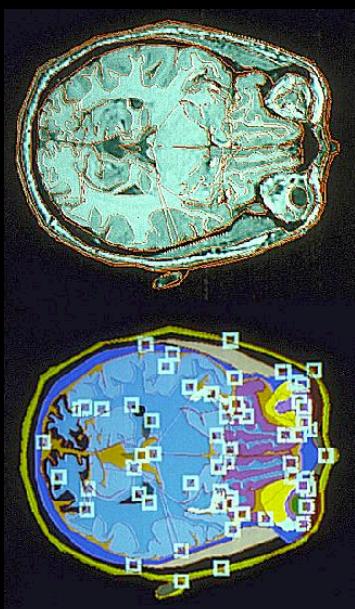
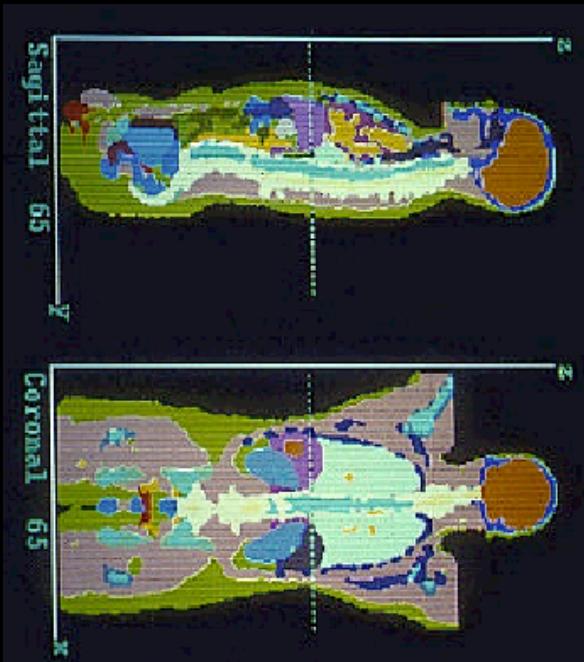
Torse + tête CT d'un patient (1.78 m, 70 kg) :

78 coupes du cou jusqu'à mi-cuisse (1 mm x 1 mm x 10 mm)

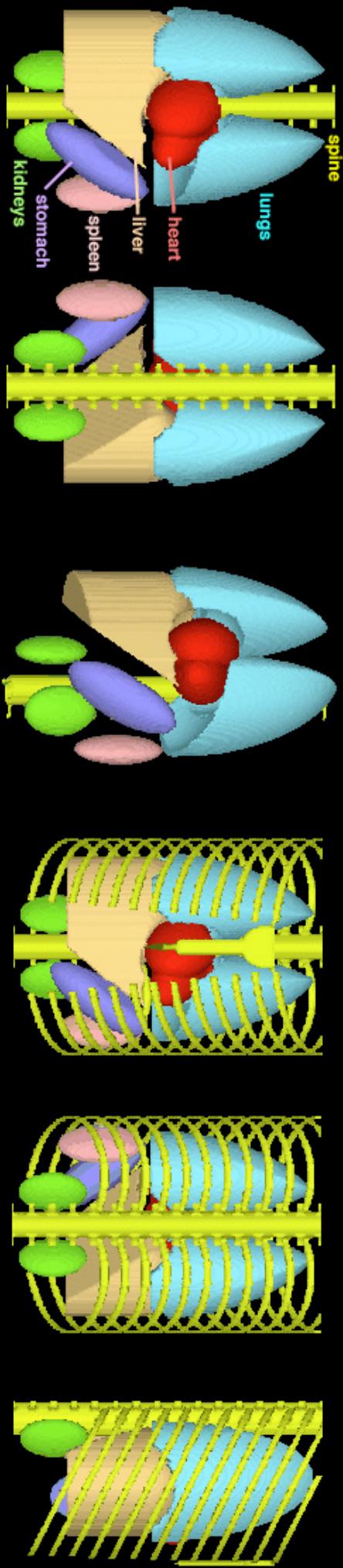
51 coupes tête et cou (0,5 mm x 0,5 mm x 5 mm)

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)

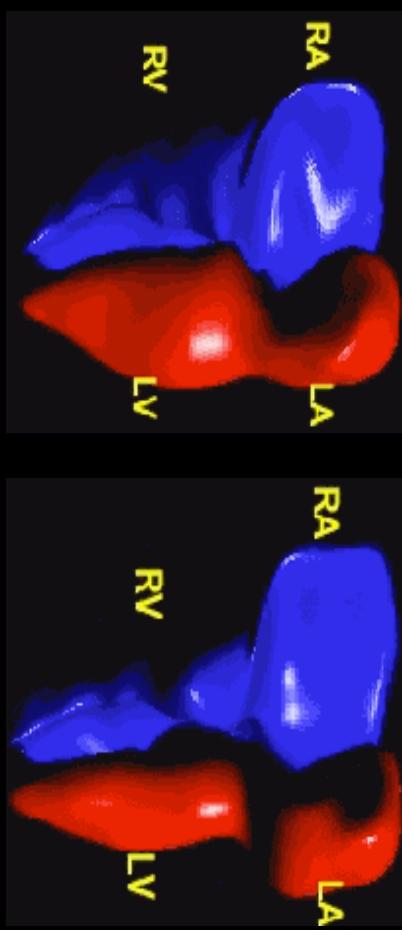
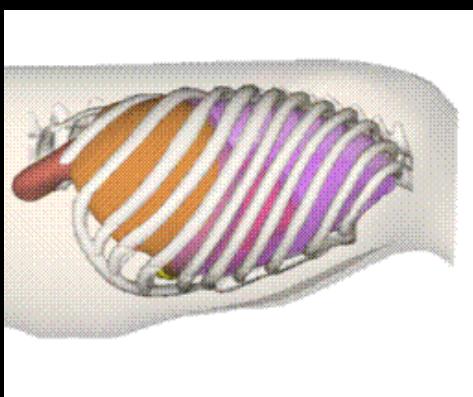
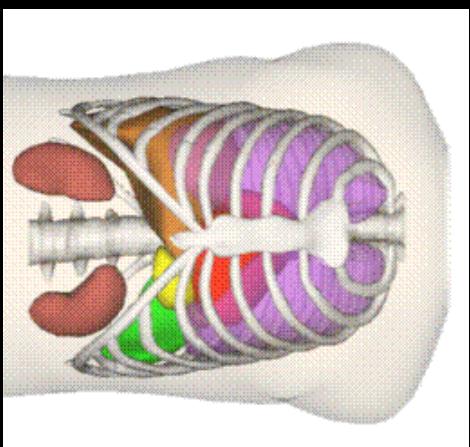


- [www.bme.unc.edu/mirg/mcat](http://www.bme.unc.edu/mirg/mcat)
- 3 versions :
  - anatomie fixe
  - anatomie fixe avec cœur battant
  - anatomie variable avec cœur battant (modélise des modifications d'épaisseur de la paroi ventriculaire, des modifications de volumes des ventricules, le mouvement de l'apex, la rotation du cœur)
- 5 types de tissus : muscle, graisse, os trabéculaire, os cortical, poumons
- Versions analytique et voxellisée

# 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 voxellisées 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

