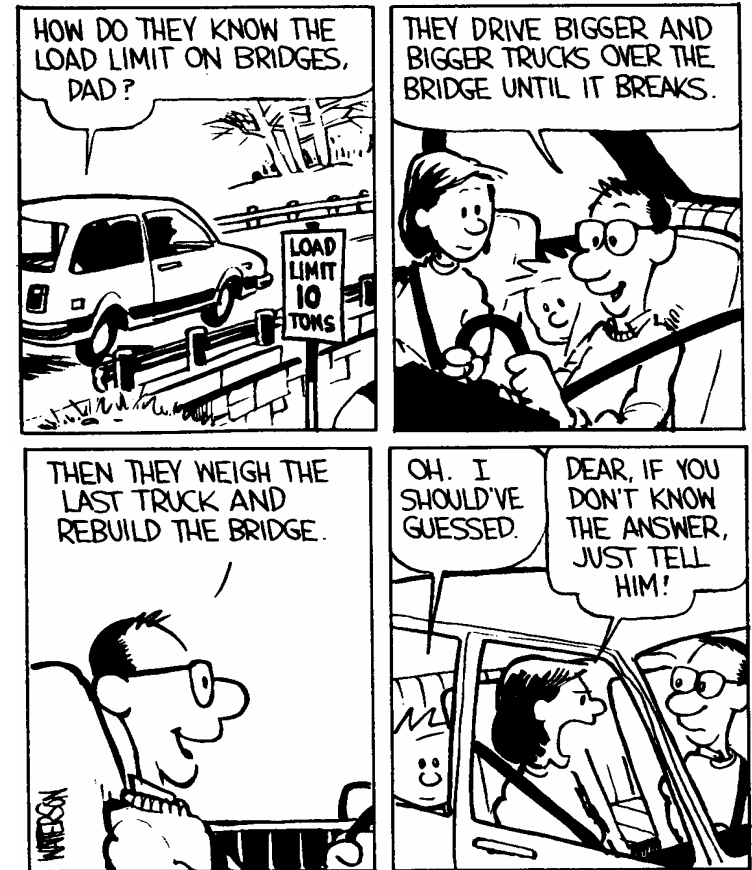
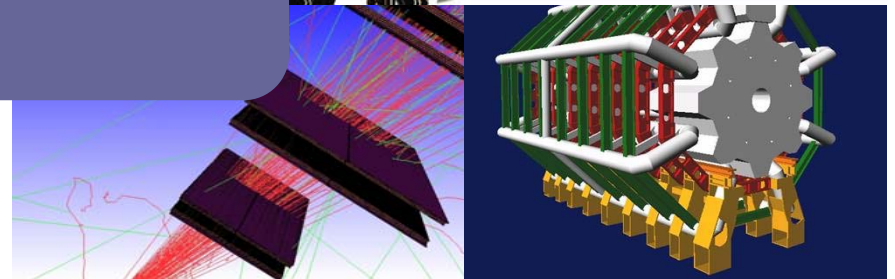
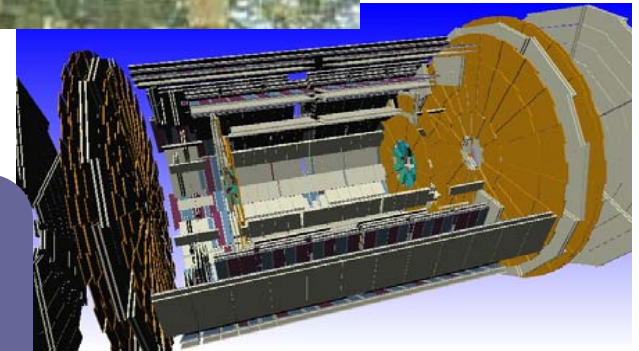


GATE : Code de calcul pour l'imagerie médicale, la radiothérapie et la dosimétrie



Sébastien JAN, PhD
Direction des Sciences du Vivant - I²BM/SHFJ

Présentation de l'artillerie informatique...le 'software'



Geant4

- ✓ Développé au CERN (~ 10 ans)
- ✓ Boite à outils pour la simulation d'interaction particules / matière
- ✓ Environnement de développement C++
- ✓ Physique des hautes énergies ; Spatiale ; Médicale ...

Présentation de l'artillerie informatique...le 'software'



GATE : Geant4 Application for **T**omographic **E**mission

Plate forme de simulation généraliste pour l'imagerie nucléaire et la radiothérapie

❑ Développements au sein d'une collaboration internationale OpenGATE

• 20 laboratoires et 40 scientifiques

France : CEA (*coordination scientifique*) ; CNRS ; INSERM
Europe, USA, Corée

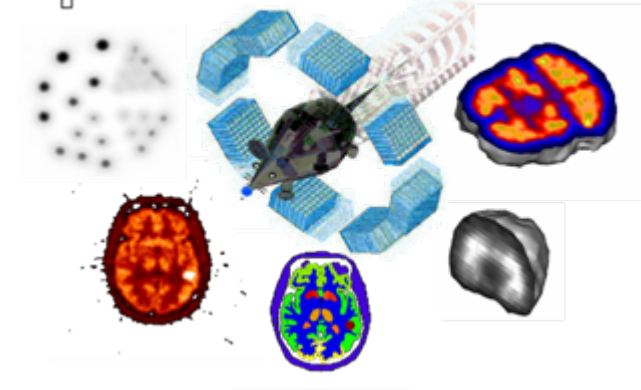
• Les premiers développements : 2002

Logiciel public au 3 mai 2004

❑ Aujourd'hui

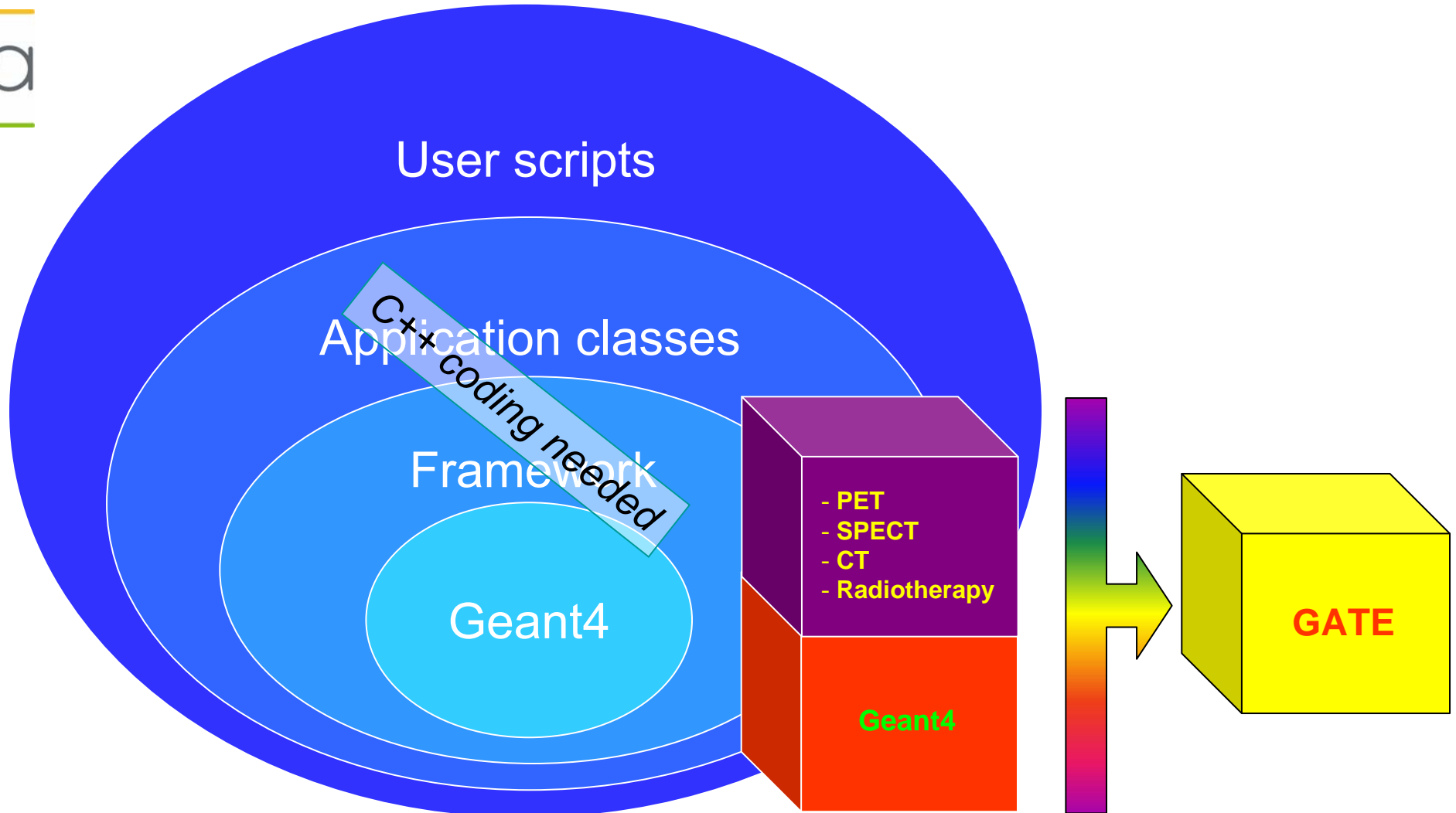
- 13^{ème} version publique
- ~ 1500 utilisateurs dans le monde
- Sources libres et téléchargeables
- <http://www.opengatecollaboration.org>

OpenGATE Collaboration



Structure du code GATE

Plateforme de simulation pour les applications médicales

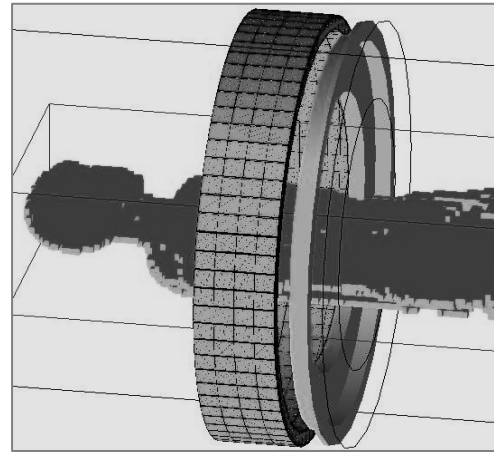
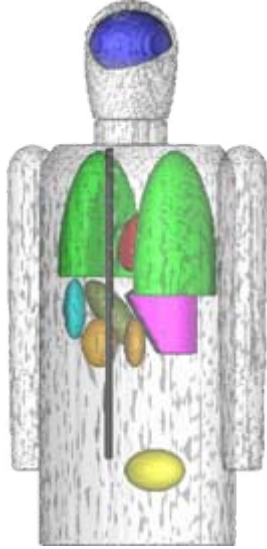




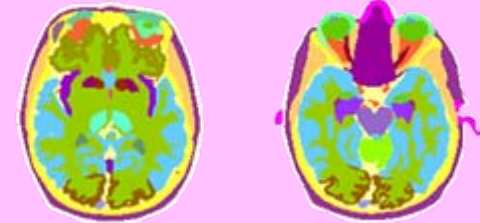
L'imagerie

La modélisation des données en entrée...

cea



Human brain *Zubal & al.*

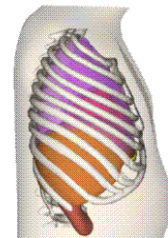
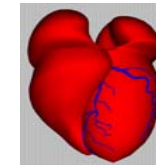
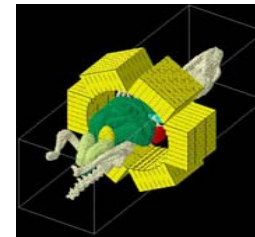
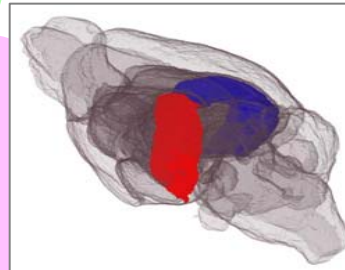
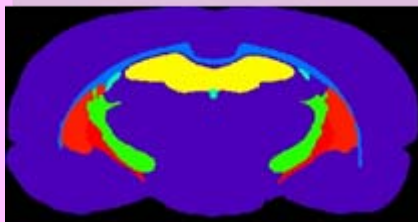


MOBY 4D *Segars & al.*



- Description de la morphologie du sujet
- Description de la distribution du traceur
- Caractéristiques des matériaux
- Description des mouvements
- Approche voxelisée (*grand nombre de volume*)

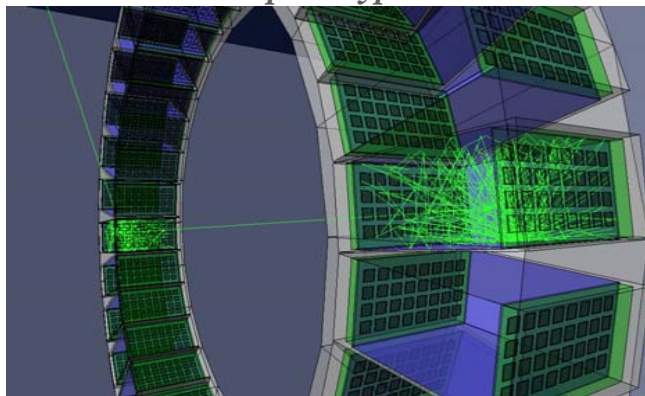
Rat Brain *Pain & al.*



Atlas cerveau souris *Lebenberg et al. CEA*

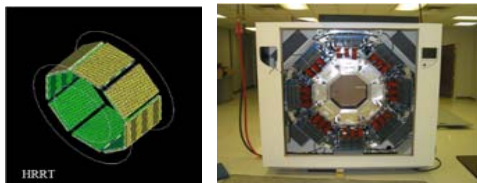
La modélisation des systèmes d'acquisition...

Detector prototype



- Description scanner (géométrie)
- Description matériaux
- Modélisation détecteur (scintillation, collection lumière ...)
- Traitement électronique (front end, coïncidences...)
- Temps mort ; transfert de donnée...

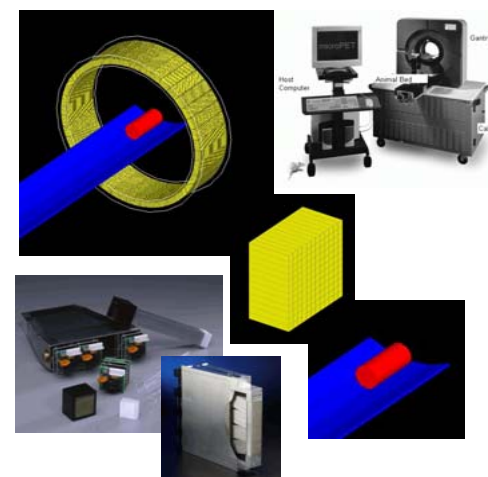
Siemens - HRRT



Siemens - ECAT EXACT HR+

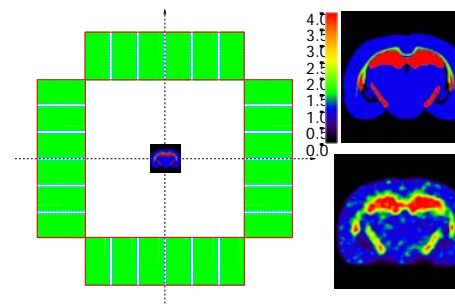


*microPET
FOCUS 220*



2 secteurs se présentent :

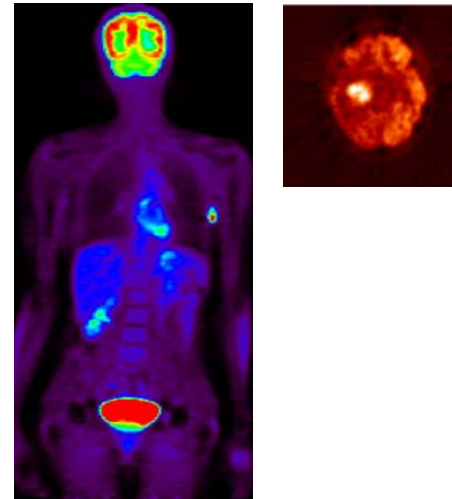
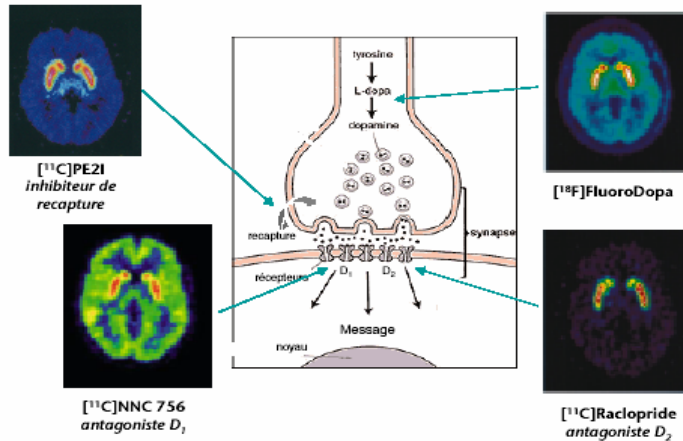
- Reproduire le comportement de détecteur existant
- Concevoir de nouvelle machine



*Prototype
CZT*

Monte Carlo *versus* Imagerie clinique & pré-clinique

Applications en oncologie - neurologie



- Comment optimiser la détection d'une fixation spécifique ?
- Comment l'interpréter / l'analyser ?
- Comment relier cette analyse à un modèle bio-physiologique ?

Protocole patient

- Optimisation de la dose injectée (vers le low dose)
- Acquisition des données (statistique - framing)
- Reconstruction et correction des données pour optimiser la quantification
- Outils d'analyse, de détection et de diagnostique

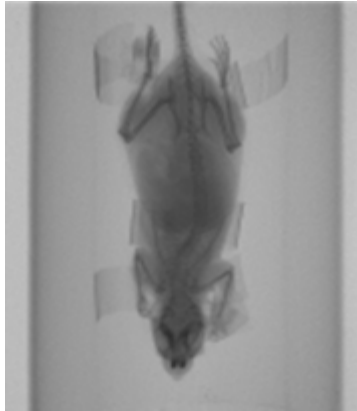


Vers un examen à la carte (acquisition + analyse)

GATE & Imagerie pré-clinique : validation



Atténuation CT

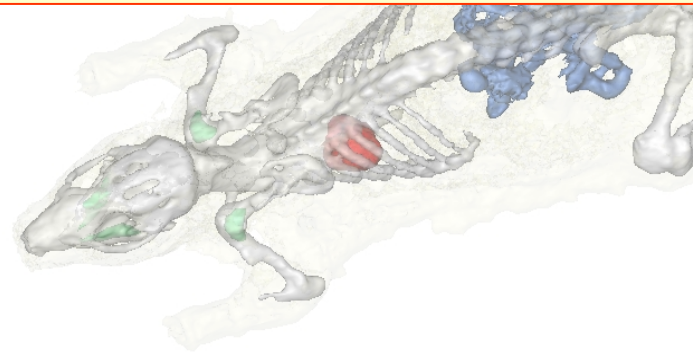


Fantôme numérique complet

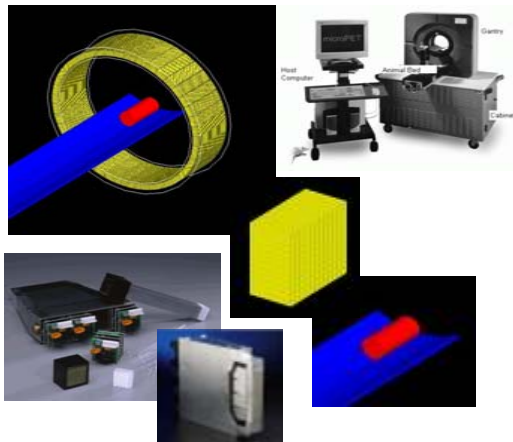


Simulation examen [^{18}F]FDG

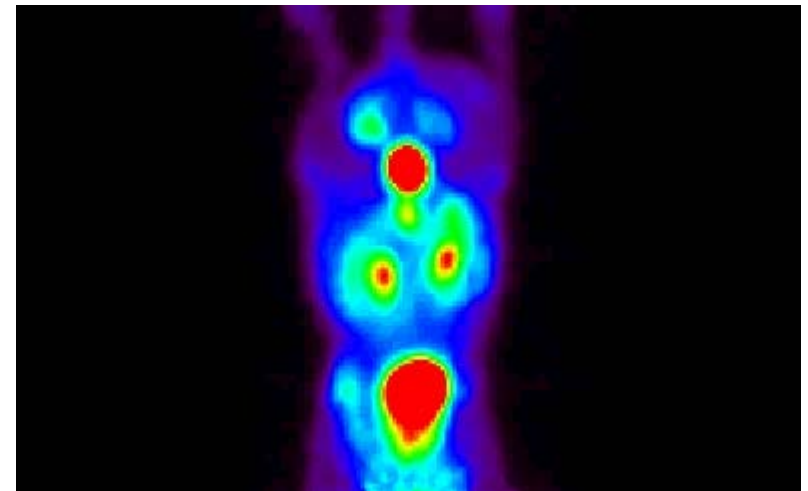
- Système microPET FOCUS 220
- Dose injectée : 200 μCi
- Départ acquisition: 45 min. après injection
- Temps d'acquisition : 15'



simulation GATE

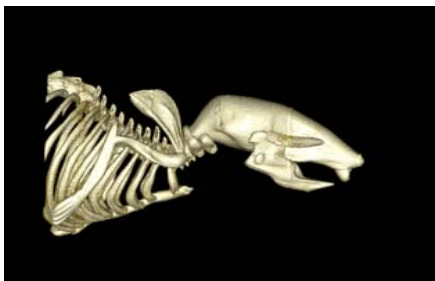


Résultat



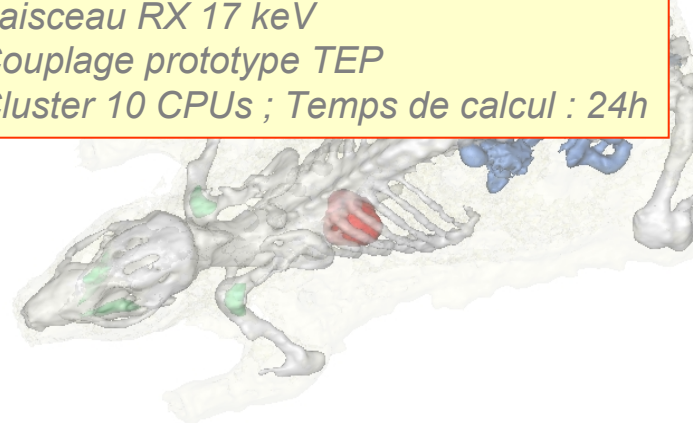
GATE & Imagerie pré-clinique : validation

Fantôme 4D MOBY

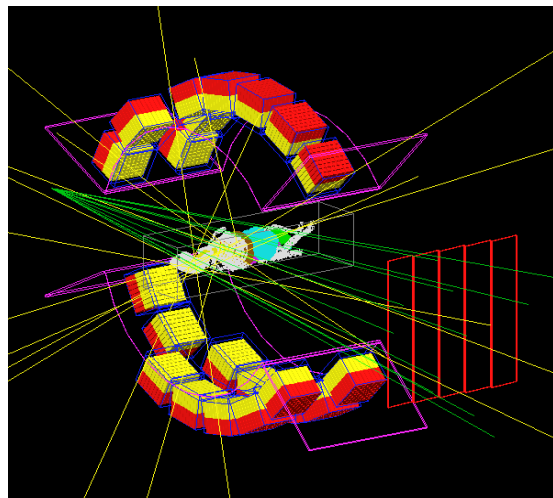


Simulation examen CT

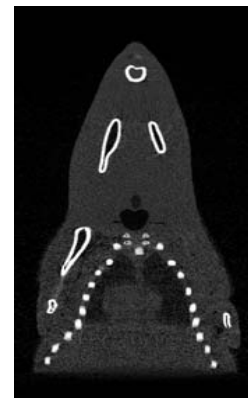
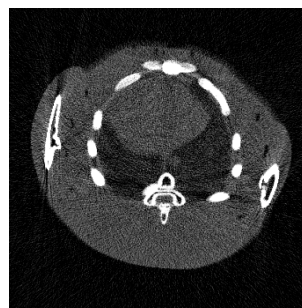
- PIXSCAN-XPAD3
développé au CPPM, Marseille
- Faisceau RX 17 keV
- Couplage prototype TEP
- Cluster 10 CPUs ; Temps de calcul : 24h



Simulation
GATE



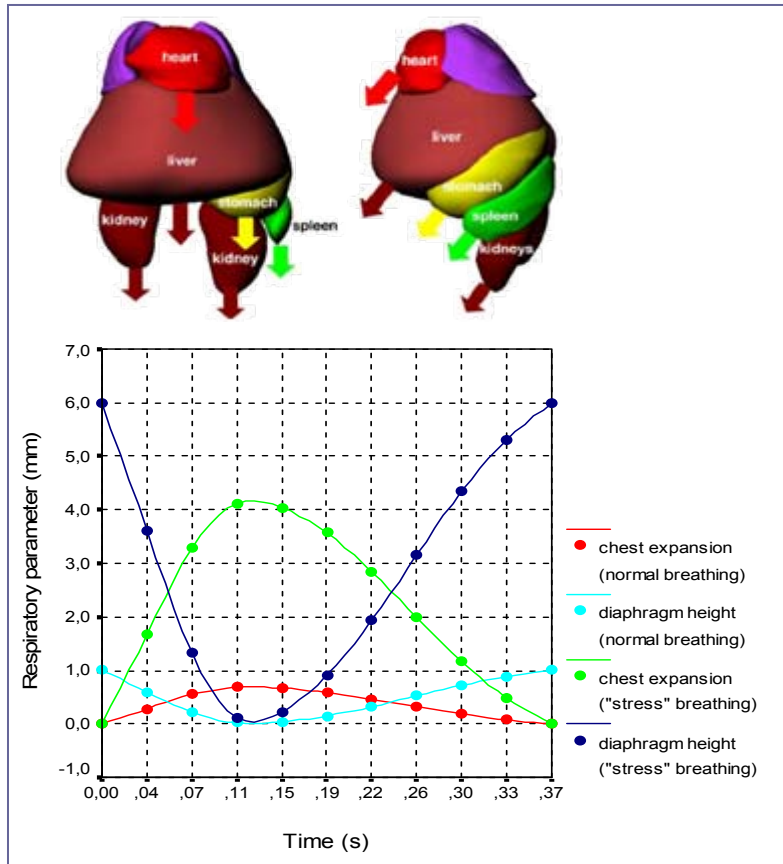
Résultat



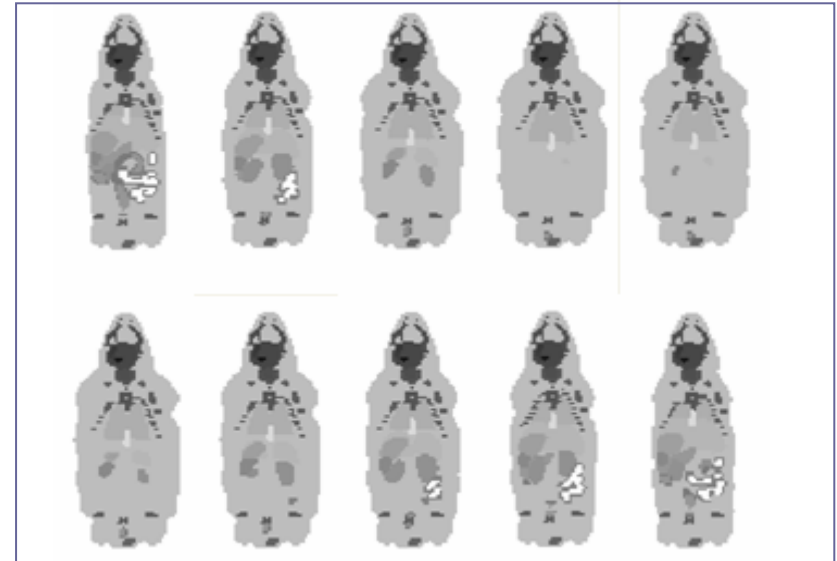
[A. Bonissent *et al* - 2009]

GATE & Imagerie pré-clinique : validation

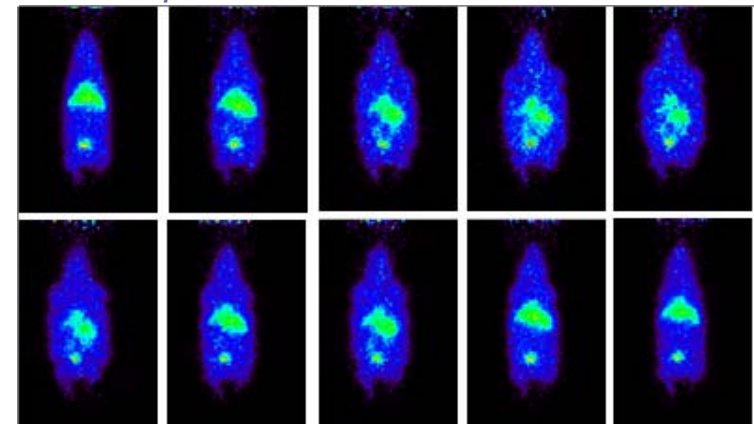
Mouvements organes



Implémentation du fantôme MOBY 4D



Résultat de la simulation : distribution FDG – acquisition scanner FOCUS

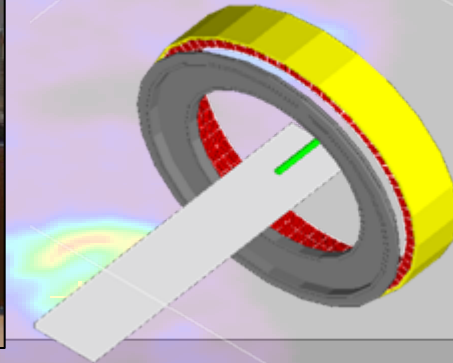


GATE & Imagerie clinique : validation

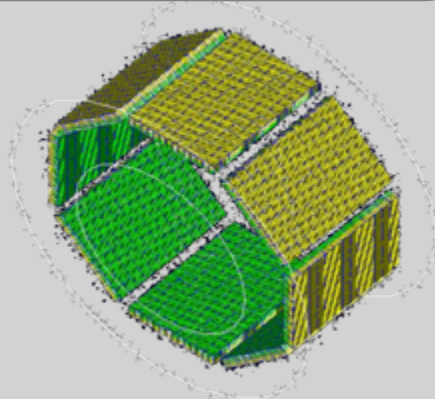
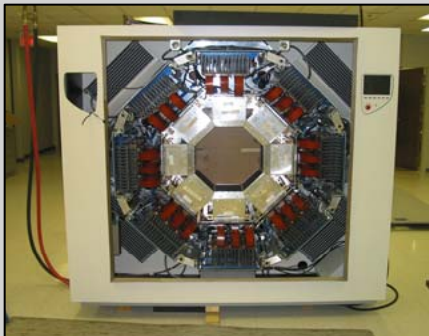
Caméra TEP @ CEA...simulations pour l'imagerie chez l'homme $[^{18}\text{F}]\text{FDG} - \text{HR}+$

cea

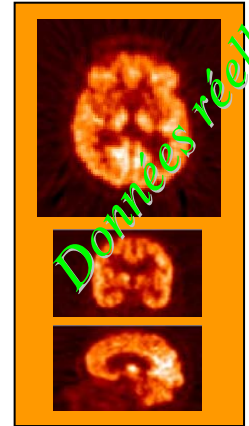
ECAT EXACT HR+



HRRT



Données simulées



Données réelles

$[^{11}\text{C}]\text{Raclopride} - \text{HR}+$



Données simulées



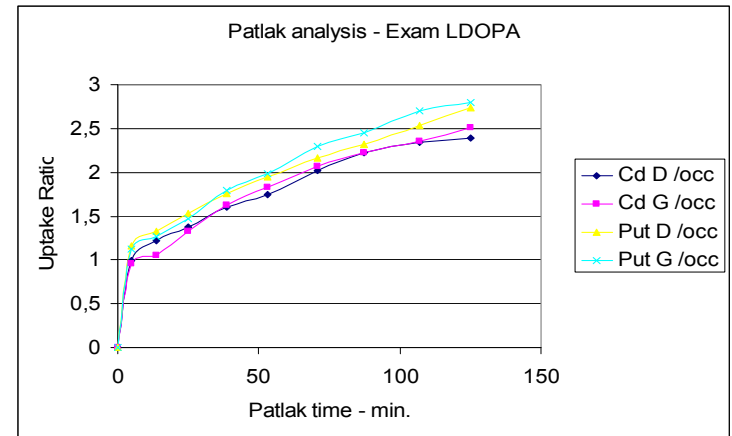
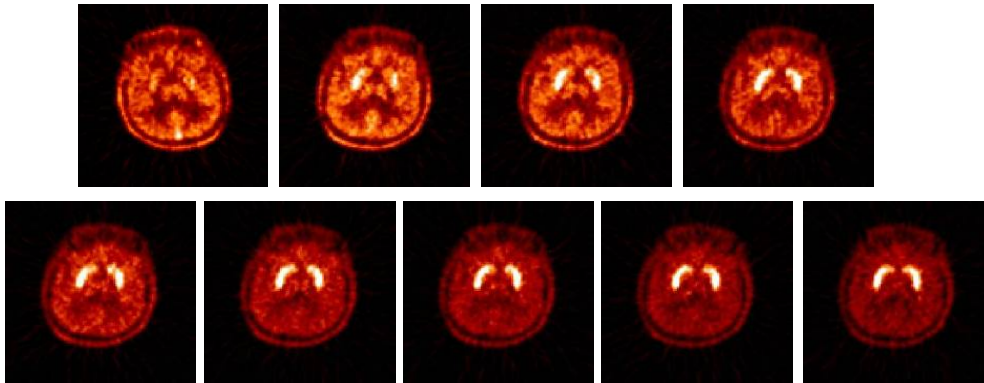
Données réelles

GATE & Imagerie clinique : validation

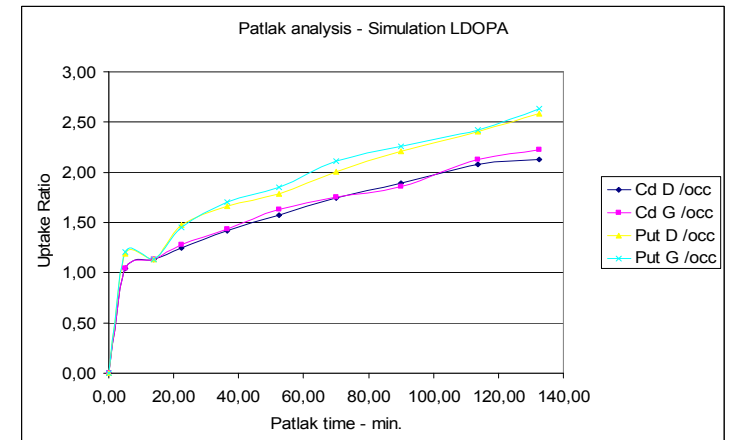
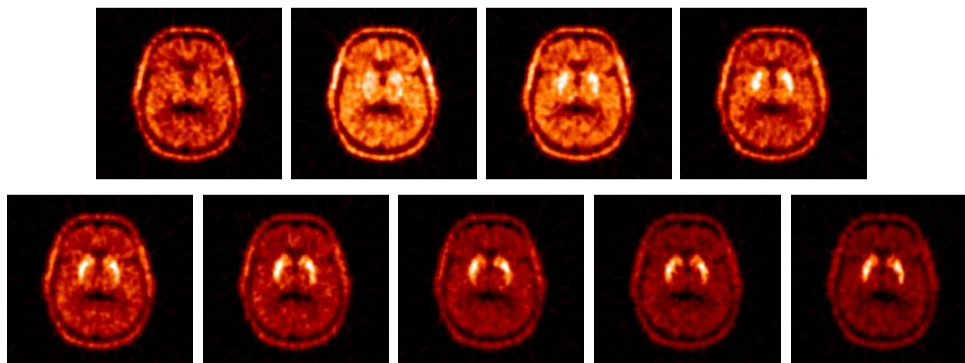
Protocole [^{18}F]FluoroDOPA : données réelles contre simulation

- Analyse Patlak et calcul de l'uptake striatal : calcul de la constante Kc

Examen réel (Frame 0 à 8)



Simulation GATE (Frame 0 à 8)



Cancérologie : Simulation d'un examen TEP corps entier

Collaboration CEA DAM/DSV - Grand Challenge TERA 10 – première mondiale en 2006



Examen réel

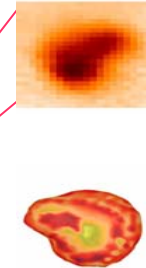
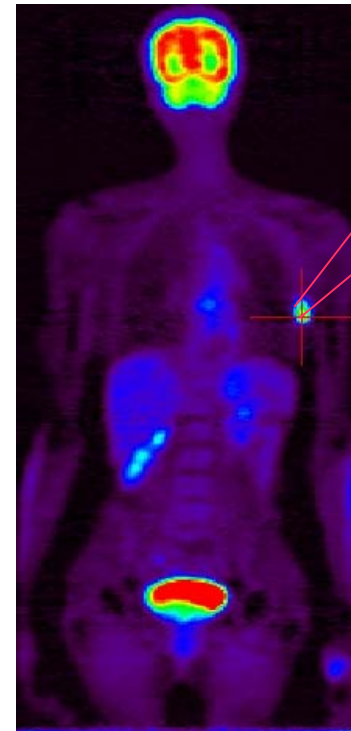
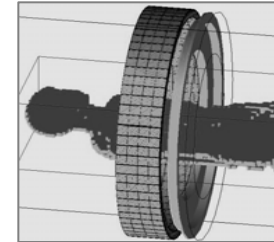
- Start acqui. : 264 MBq
- 8 positions de lit
- Acqui. 7' par position de lit



*volume tumeur
23.7 ml*

Simulation GATE

- Start acqui. : 264 MBq
- 7 positions de lit
- Acqui. 7' par position de lit



*Volume tumeur
22 ml*

3h sur 7000 processeurs

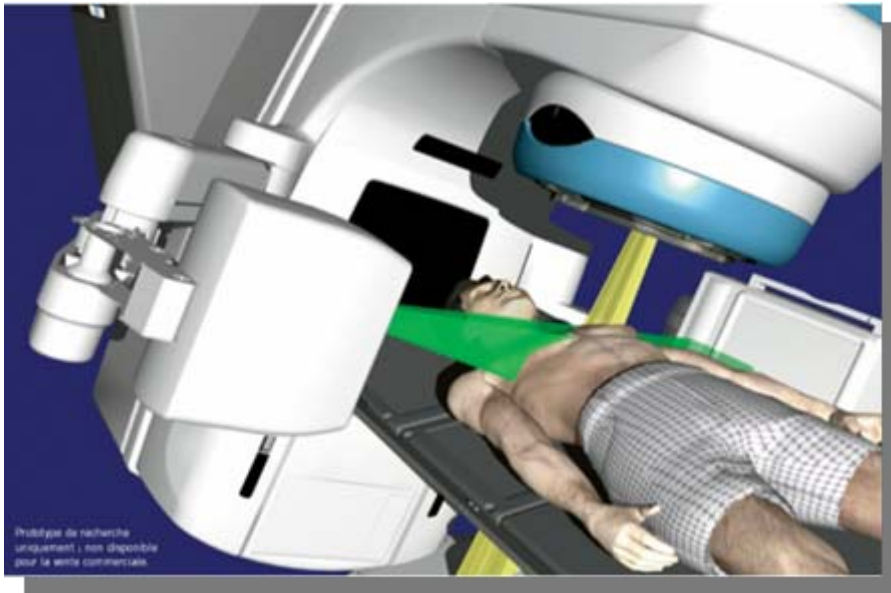
Accélération X 20 entre 2006 et 2009 : projet ANR fGATE

Radiothérapie & Dosimétrie

Traitement du cancer par radiothérapie

Destruction des cellules tumorales par irradiation

- Radiothérapie « conventionnelle » : faisceau de photon (lepton)
- Hadronthérapie : faisceau de hadron – Proton (protonthérapie) – ions carbone (^{12}C)



LINAC (faisceau de photon)



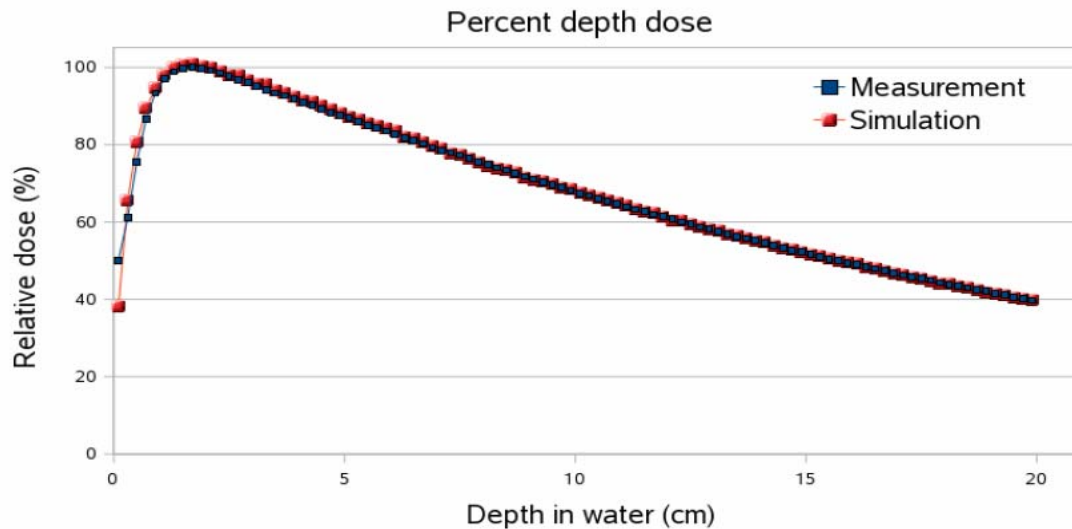
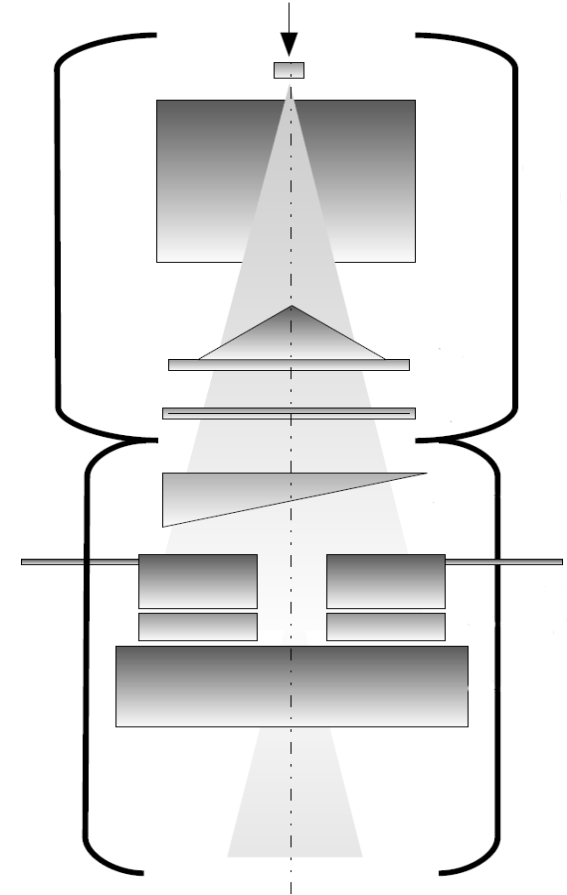
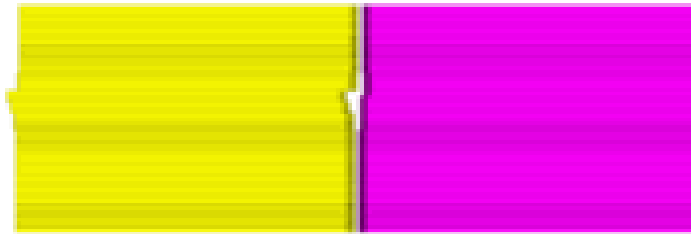
Cyclo/Synchro-tron
(faisceau de carbone)

Traitement du cancer par radiothérapie



Radiothérapie conventionnelle

- *Precise – Elekta system*
- *Mouvements de collimateur*
- *Validation dose photon*

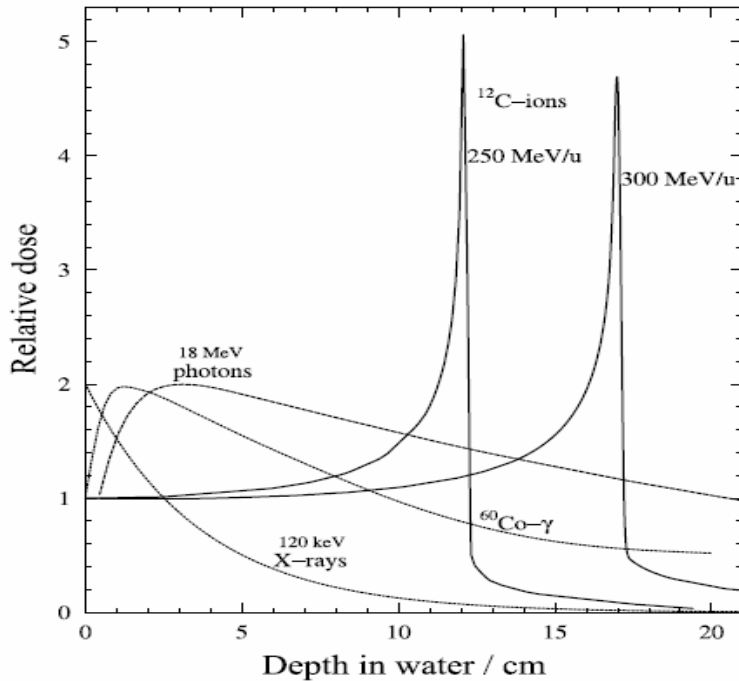
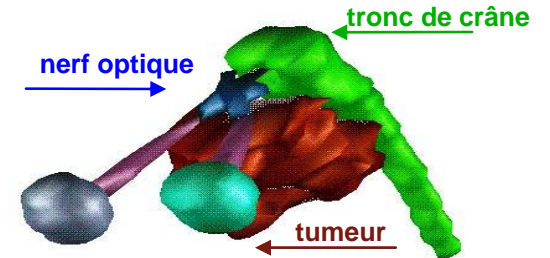


[L. Grevillot *et al* – Submitted]

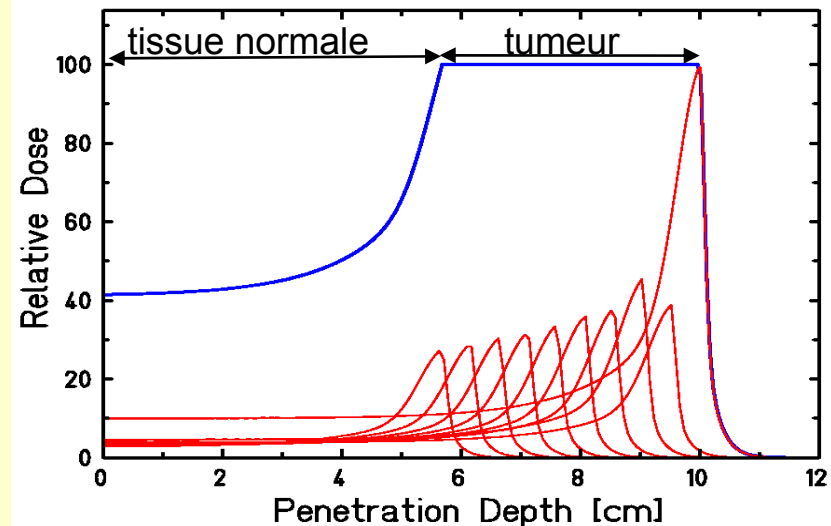
Traitement du cancer par radiothérapie

Hadronthérapie : Efficacité balistique des ions lourds

- Pic de Bragg : spécificité du dépôt de dose
- Particulièrement bien adapté pour les tumeurs dites « inopérables »

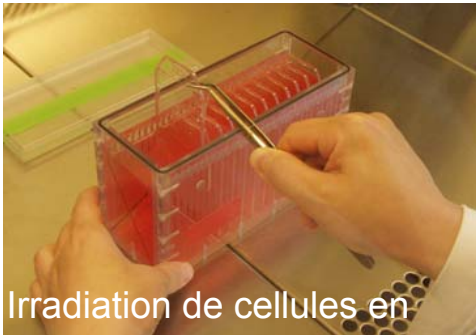


Dépôt de dose au volume de la tumeur : Modulation du pic de Bragg



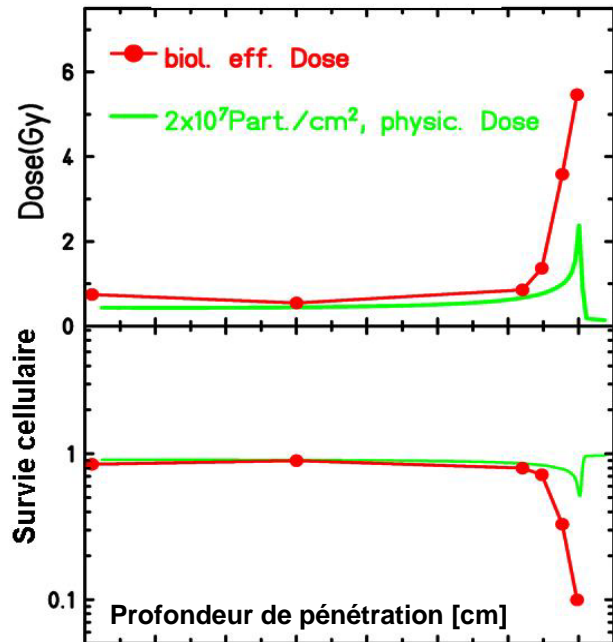
Traitement du cancer par radiothérapie

Hadronthérapie : Efficacité biologique des ions lourds



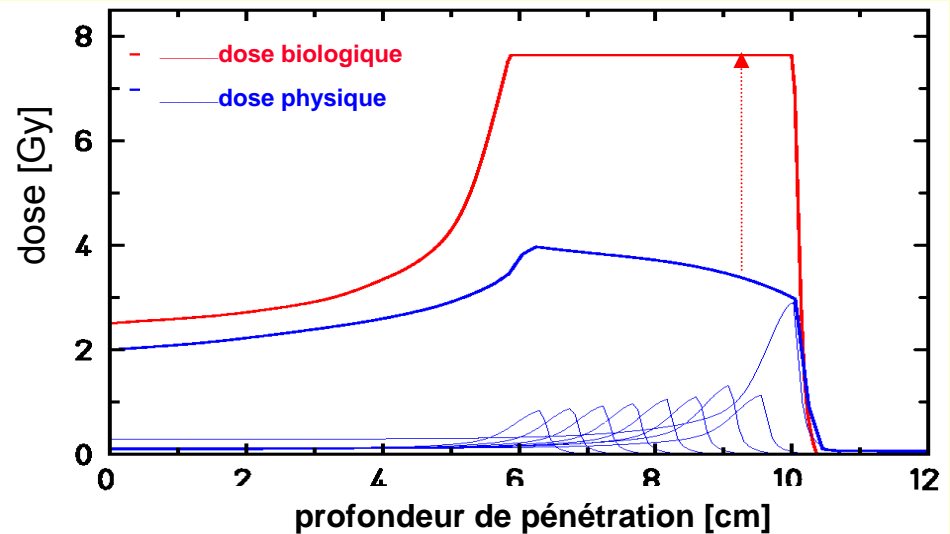
Irradiation de cellules en plusieurs couches contigües

Carbone 270 MeV/u



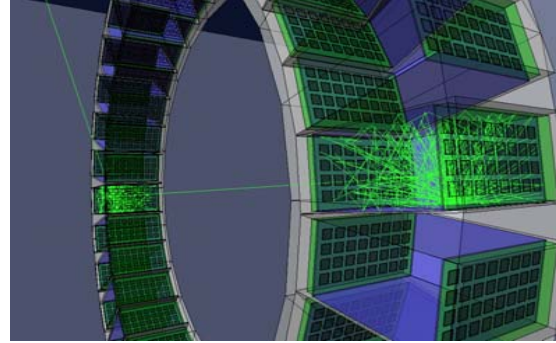
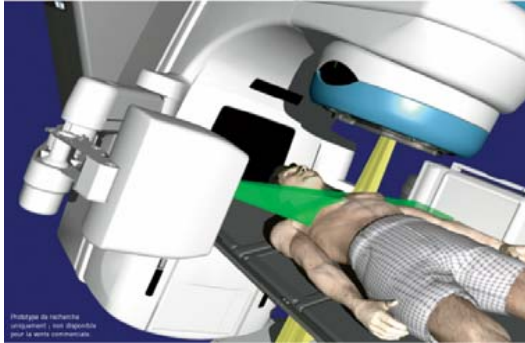
- Mesure de l'efficacité biologique d'un rayonnement
- Particulièrement bien adapté pour les tumeurs dites « radorésistantes »

Compétition entre la dose biologique et la dose physique

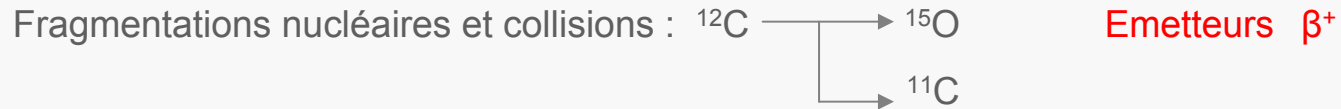
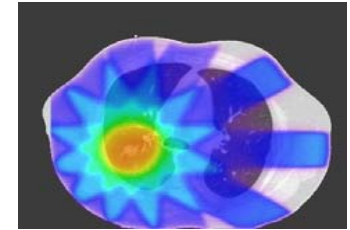


Hadronthérapie & Contrôle thérapeutique « en ligne »

Une idée pour le contrôle thérapeutique en hadronthérapie : l'imagerie TEP



Dosimétrie in-vivo en ligne



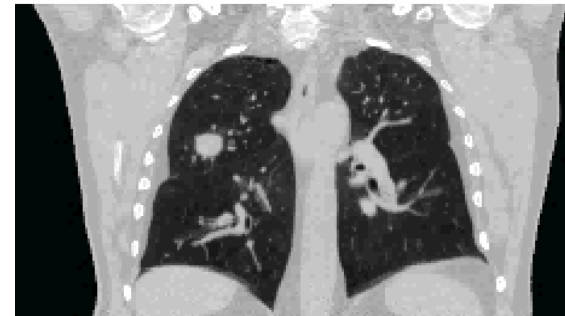
Grand Challenge GENCI 2009 : CEA/SHFJ – CREATIS

- Fantôme: CT scan
- Tumeur segmentée \varnothing 2 cm
- 1 faisceau - $9 \cdot 10^8$ ^{12}C

- Fantôme: CT scan 4D
- Tumeur réelle
- 3 faisceaux - 10^8 ^{12}C / faisceau



Hounsfield number



Hounsfield number

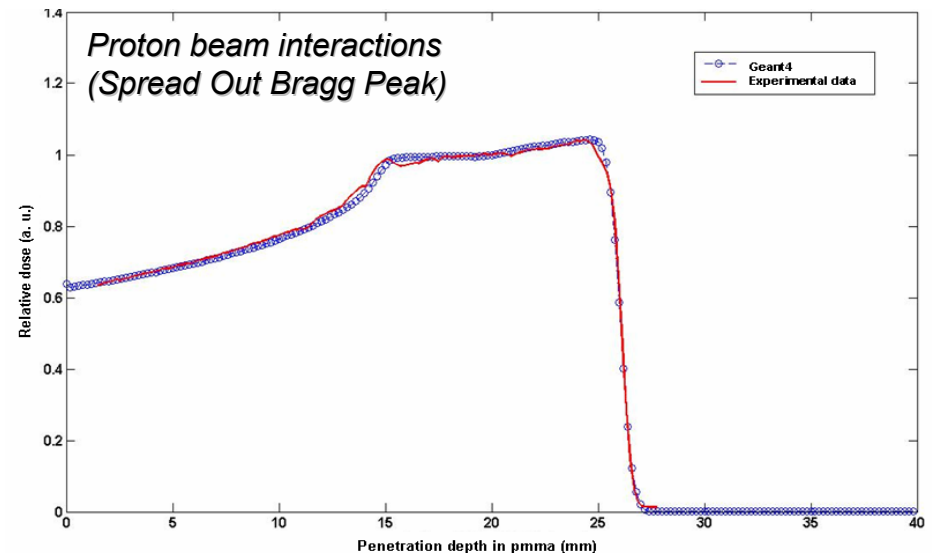
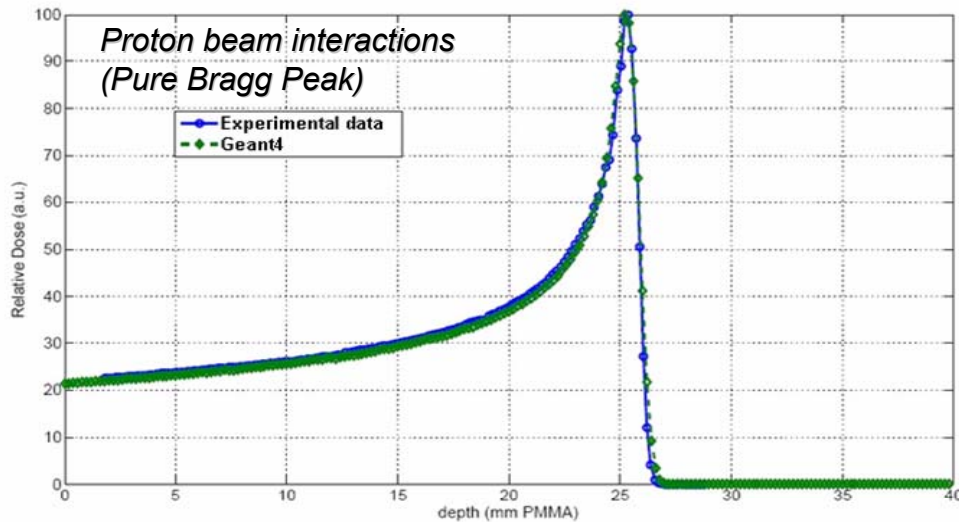
Hadronthérapie & Contrôle thérapeutique « en ligne »

Validations des processus physiques

- Collaboration groupe Geant4 pour développements et validations
- Upgrade majeur sur les versions Geant4 9.2 et 9.3

Exemple : Faisceau de proton (Geant4 9.1.p02):

- Physique électromagnétique basse énergie
- Modèles Precompound + GEMEvaporation
- G4LElastic



[Romano *et al* – 2008]

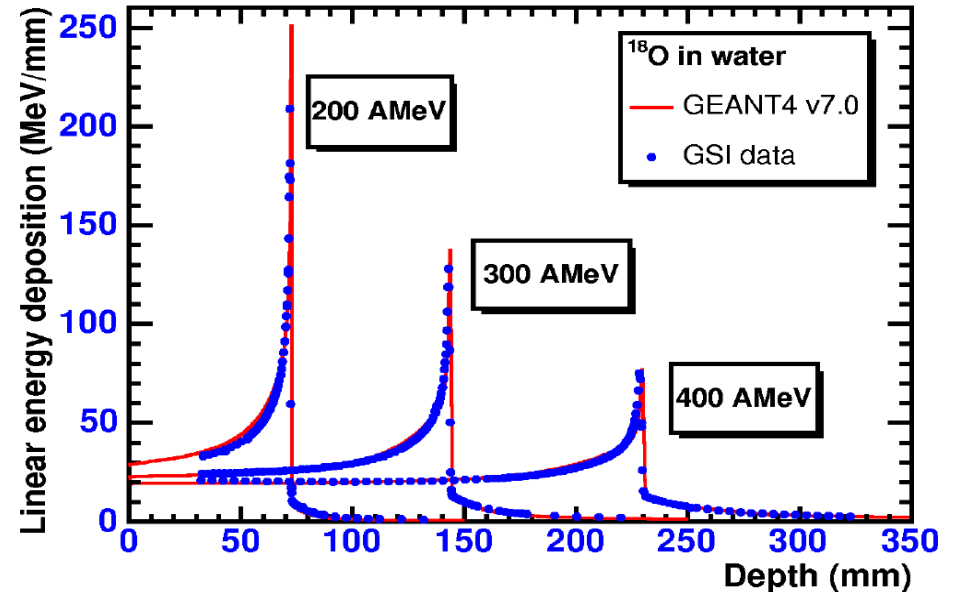
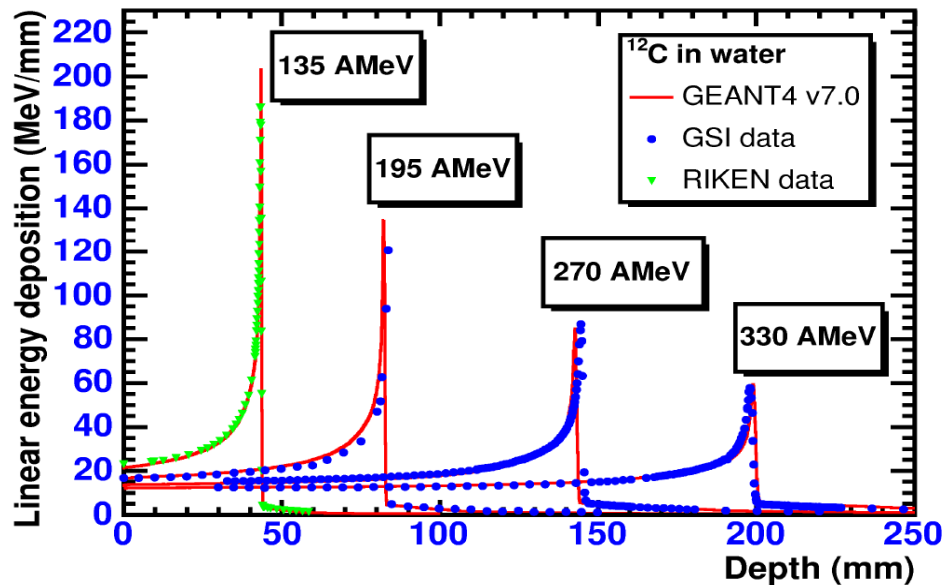
Hadronthérapie & Contrôle thérapeutique « en ligne »

Validations des processus physiques



Exemple de processus physiques pour l'interaction de faisceau d'ions :

- Geant4 7.0
- ^{12}C et ^{18}O : Simulation contre données GSI & RIKEN

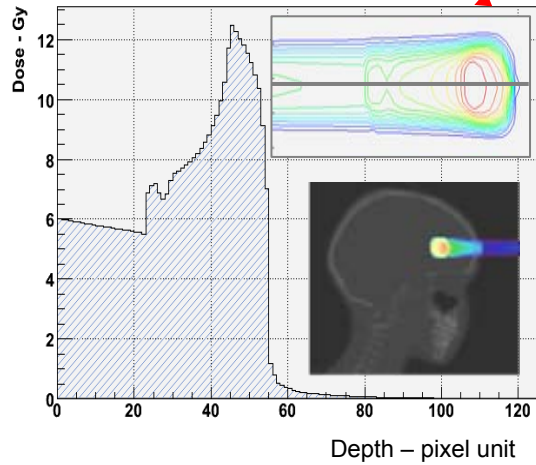


[Pshenichnov *et al* – 2005]

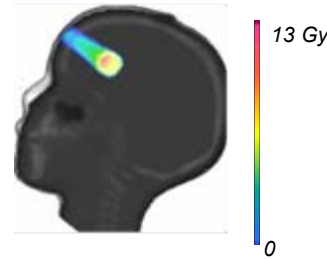
Hadronthérapie & Contrôle thérapeutique « en ligne »



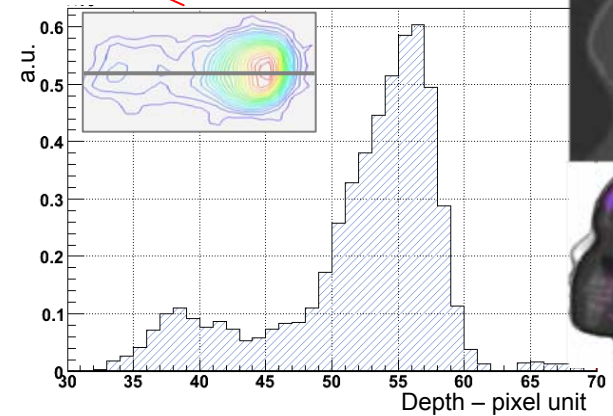
Dose déposée ^{12}C



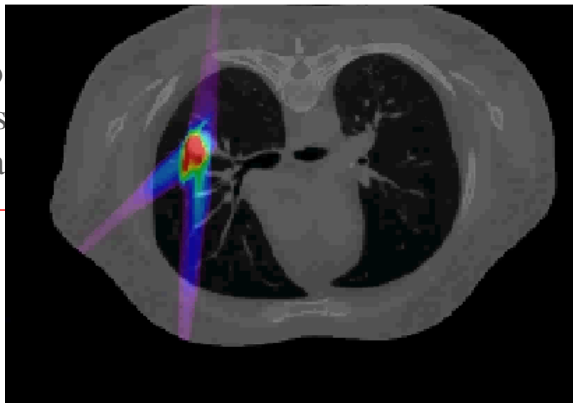
Modèle inverse



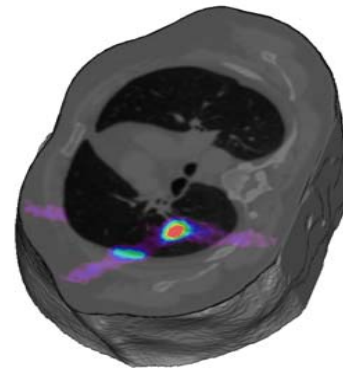
Acquisition TEP ^{11}C



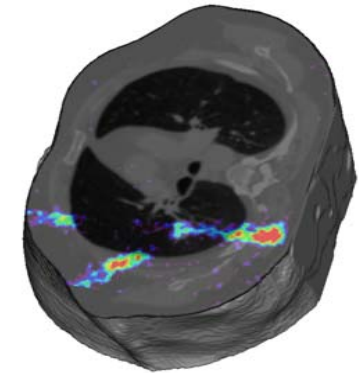
Dose déposée ^{12}C



Acquisition TEP ^{11}C



Acquisition TEP ^{15}O



Etude du seuil en do
permettant une statis
minimale pour l'ima
TEP : $Dose_{min} = [5 -$
 $Gy]$

Examen réaliste en imagerie & Protocole d'irradiation réaliste
...de l'ordre de 50000 h CPU.....1 semaine sur 400 processeurs

Perspectives

Futurs développements de la plateforme GATE

2 projets démarrent en 2010

➤ Portage GPU



➤ Simulation imagerie optique



ANR 09-COSINUS (2010-2012)

- CEA-SHFJ
- INSERM LATIM
- CNRS IMNC
- CNRS IPHC
- CNRS CPPM
- CNRS CREATIS

GATE highlights

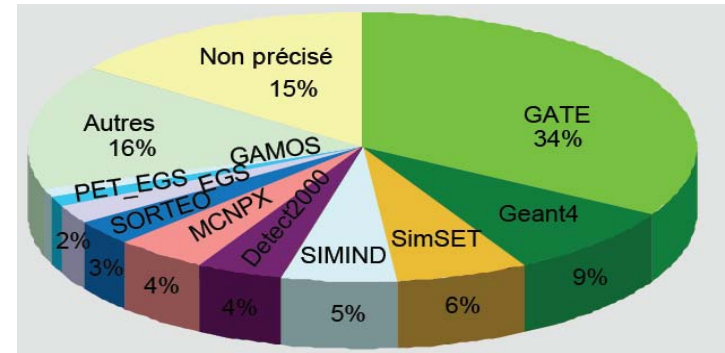


2009 : prix Rotblat



S. JAN & al. "GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT"
>> 225 citations

GATE vs autres codes MC



Based on the IEEE/MIC – Dresden 2008

- Agence Nationale de Recherche:
ANR 06-CIS-6-004 (2007-2009)
ANR 09-COSINUS (2010-2012)



- Commission Européenne : FP 7
Project ENVISION (2010-2013)

