

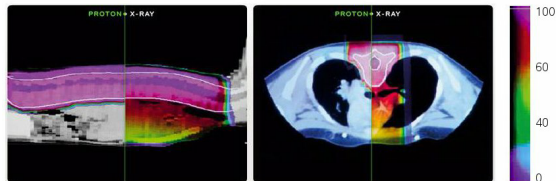
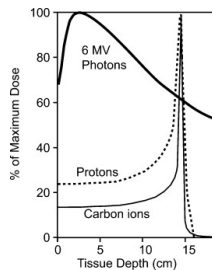
# Proton CT

Simon Rit  
David Brasse  
Denis Dauvergne

Mardi 16 avril 2013

- *Proton CT* aussi ancienne que la *Photon CT* [Cormack, 1963]
- Peu étudiée dans un premier temps par rapport au photon
  - Coût supérieur
  - Résolution spatiale inférieure
- Regain d'intérêt avec le développement de la thérapie protons
  - Disponibilité de sources protons
  - Meilleure estimation du pouvoir d'arrêt des protons [Paganetti, 2012]
  - Faibles doses
  - Nouvelle modalité ⇒ Nouvelle information

# Thérapie proton



- Actuellement planifiée sur CT photon
  - Incertitude sur la position du pic : 3%
- ⇒ *The ideal way to determine proton stopping power ratio distribution inside the patient will be to use proton computed tomography (proton CT) to measure SPR distribution inside the patient directly [Yang et al., 2012]*

# Problème de la proton CT

- Perte d'énergie dépend du pouvoir d'arrêt  $S$  donné par la formule de Bethe Bloch

$$-\frac{dE}{dx}(\mathbf{x}) = \eta(\mathbf{x})S(I(\mathbf{x}), E(\mathbf{x}))$$

- Diffusion multiple de Coulomb ( $\sigma \simeq 7$  mm à la fin du parcours d'un faisceau de 214 MeV)



# Formulation classique du problème

⇒ Intégrale le long d'une courbe pour le proton d'indice  $i$

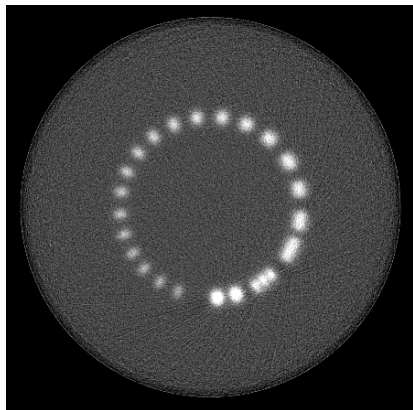
$$\int_{\Gamma_i} \eta(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_{E_i^{out}}^{E_i^{in}} \frac{1}{S(I_{eau}, E)} dE$$

avec  $E_i^{out} / E_i^{in}$  les énergies avant / après l'objet (mesurées),  
 $\Gamma_i \in \mathbb{R}^3$  le chemin courbe (estimé),  
 $\eta : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  densité électronique (inconnue).

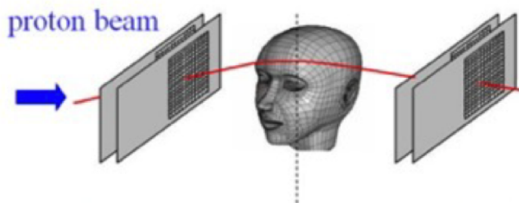
# Approximation du chemin par une droite

- 1 Radiographies protons
- 2 Rétroprojection filtrée

⇒ Résolution spatiale  
prohibitively



# Estimation du chemin le plus probable



*Trackers* avant et après le patient pour mesurer la position et la direction de chaque proton à l'entrée et à la sortie du patient.

⇒ Estimation probabiliste de l'estimation du chemin à partir de cette information [Williams, 2004, Schulte et al., 2008]

⇒ Reconstruction itérative list-mode le long des chemins estimés [Penfold, 2010, Wang et al., 2010]

# Développements matériels

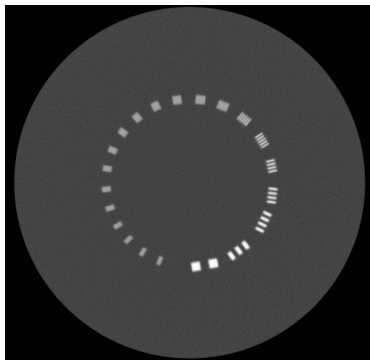
Group	Tracker	Energy detector
Firenze/LNS (Italy) (M. Bruzzi PRIMA @ IEEE)	SSD	YAG:Ce crystals + Si PD
LLU/UCSC/NIU (USA) ⇒ LLU/UCSC/CSUSB (R. Schulte pCT @ IEEE)	SSD	CsI crystals ⇒ Multi-stage scint + PMT
NIU/FNAL/U. Delhi (USA) (P. Rubinov @ IEEE)	Scin Fibers+ SiPM	Range + WLSF+ SiPM (wavelength-shifting fiber)
TERA/CERN (Italy)	GEM	Range + WLSF+ SiPM
GSI/HIT (Germany) (K. Parodi @IEEE)	Stack of Ionisation chambers	Stack of ionisation chambers
MGH/Québec/UW (O. Koybasi @IEEE)	Scintillating fibers	Scintillating fibers + PMT
PSI/ETH Zurich/U Munich	IC ?	Range

Tableau : Franca Cassol / Cédric Ray

- *ProTom : Tomographie par faisceaux de protons appliquée à la planification de traitement en protonthérapie*
- Partenaires
  - **CREATIS, Lyon**  
Jean Michel Létang, Nicolas Freud, Voichita Maxim, Simon Rit, David Sarrut, Bruno Sixou, George Dedes
  - **IPNL, Lyon**  
Etienne Testa, Denis Dauvergne, Jochen Krimmer, Cédric Ray, George Dedes
  - **IPHC, Strasbourg**  
David Brasse, Cécile Bopp, Marc Rousseau, Christian Finck, Didier Juliani, Eric Garrido
  - **LPC, Caen**  
Daniel Cussol, Marc Labalme

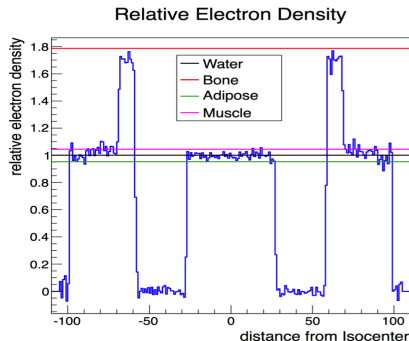
- Travaux *in silico*
- Scanner idéal
  - Deux paires de détecteurs
  - Mesure de l'énergie parfaite en entrée et en sortie
  - Enveloppe du patient connue
- Logiciels libres
  - Simulation avec Gate / Geant4
  - Reconstruction RTK : [www.openrtk.org](http://www.openrtk.org)

## Résolution spatiale (S. Rit)



Rétroprojection filtrée avec chemins courbes [Rit et al., 2013]

## Résolution densité (G. Dedes)



Apport pour la thérapie proton  
Evaluation / spécification d'un  
prototype

Nous recrutons !

- Thèse ministérielle CREATIS

- Reconstruction pCT multi-variée ( $\rho$ , I et Z)

<http://www.creatis.insa-lyon.fr/site/fr/node/43969>

- Postdoc labex PRIMES IPNL+CREATIS

- Apports escomptés (proton thérapie, caractérisation tissus),
- Comparaison avec d'autres modalités (scanner spectral),
- Prototypage en vue de la fabrication d'un système.

# Imagerie par proton CT, ImaBio, IPHC, Strasbourg

## Objectif principal

*Utilisation de l'imagerie pCT comme outil diagnostique:  
identification de matériaux, composition chimique*

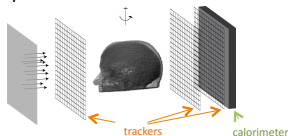
## Support d'analyse

*Plate-forme Gate, Geant4*

*Fantôme réaliste tête*

*Analyse des observables:*

*énergie des protons, taux de transmission, déviation angulaire*



## Développements

*Implémentation des processus physiques Geant4 sur architecture hybride CPU-GPU*

*Organisation/tri des données: projection, mode liste*

*Reconstruction 3D des observables: FBP, ART+TV, ML-EM*

*Limites de résolution spatiale:*

*Influence des paramètres système sur le calcul de la MLP*

## Ressources humaines et financières

*2012: Eric Garrido, post-doc sur projet Protom et hGate*

*2012-2014: Cécile Bopp, thèse ministère*

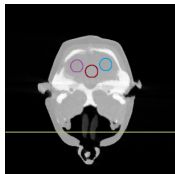
*2013-2015: Post-doc, projet IdeX*

## Résultats principaux

### Geant4 sur GPU:

Facteur d'accélération entre 100 et 1000 selon la complexité de la simulation

### Composition chimique:



ART + TV (50 iterations)

Contrast study :

	Electron density phantom	ART+TV Electron density	ML-EM transmission	FBP deviation
Carcinoma	2.9%	2.9%	11.5 %	10.2%
Carcinoma (less oxygen)	3.0%	2.3%	12.3 %	11.5%

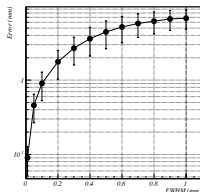
Travaux soumis pour publication à PMB

### Résolution spatiale:

$(\text{Résolution MLP})^2 =$

$(\text{résolution intrinsèque})^2 + (\text{résolution système})^2$

$\sim 0,5 \text{ mm}$



Travaux soumis pour publication à Medical Physics

# Nos atouts

- Nombreux labos IN2P3 **et autres**  
**CAL-Nice**, CPPM, **CREATIS**, IPHC, IPNL, LPC-Caen
- Savoir faire:
  - simulations
  - reconstruction (IPHC, CREATIS)
  - Imagerie protons (QAPIVI: IPNL, IPHC)
  - Instrumentation détection (ex: CMOS, hodoscope, calorimétrie...)
  - Acquisition rapide xTCA (CCPM, IPNL)
- Collaborateurs internationaux potentiels  
Heidelberg/Munich, TERA, IBA, University College of London...
- Volonté des acteurs de poursuivre leur implication après ProTom:
  - Post-doc Idex IPHC 2013-2015
  - Post-doc simulations Labex PRIMES CREATIS-IPNL 2 ans (ouvert)
  - Thèse reconstruction CREATIS 2013-2016

# Perspectives du groupe de travail

- Prochaine réunion: CAL-Nice le 25 avril  
(invités R. Schulte, I. Rinaldi)  
<https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=8162>
- Objectifs à 2 ans:
  - Simulations: Montrer qu'on peut dépasser l'état de l'art
  - Si oui: lettre d'intention au CS IN2P3
  - Avant Projet Détaillé d'un projet français ou intégration dans une collaboration internationale

# Bibliography

- A.M. Cormack. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *Journal of Applied Physics*, 34(9) :2722–2727, 1963. doi : 10.1063/1.1729798.
- H. Paganetti. Range uncertainties in proton therapy and the role of monte carlo simulations. *Phys Med Biol*, 57(11) : R99–117, Jun 2012. doi : 10.1088/0031-9155/57/11/R99. URL <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/57/11/R99>.
- S. Penfold. *Image reconstruction and Monte Carlo simulations in the development of proton computed tomography for applications in proton radiation therapy*. PhD thesis, Centre for Medical Radiation Physics, University of Wollongong, 2010. URL <http://ro.uow.edu.au/theses/3305>.
- S. Rit, G. Dedes, N. Freud, D. Sarrut, and J.M. Létang. Filtered backprojection proton CT reconstruction along most likely paths. *Med Phys*, 40(3) :031103, 2013. doi : 10.1118/1.4789589. URL <http://link.aip.org/link/?MPH/40/031103/1>.
- R. W. Schulte, S. N. Penfold, J. T. Tafas, and K. E. Schubert. A maximum likelihood proton path formalism for application in proton computed tomography. *Med Phys*, 35(11) :4849–4856, Nov 2008.
- D. Wang, T.R. Mackie, and W.A. Tomé. On the use of a proton path probability map for proton computed tomography reconstruction. *Med Phys*, 37(8) :4138–4145, Aug 2010.
- D.C. Williams. The most likely path of an energetic charged particle through a uniform medium. *Phys Med Biol*, 49 (13) :2899–2911, Jul 2004.
- M. Yang, X.R. Zhu, P.C. Park, U. Titt, R. Mohan, G. Virshup, J.E. Clayton, and L. Dong. Comprehensive analysis of proton range uncertainties related to patient stopping-power-ratio estimation using the stoichiometric calibration. *Phys Med Biol*, 57(13) :4095–4115, Jul 2012. doi : 10.1088/0031-9155/57/13/4095. URL <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/57/13/4095>.