

(Quelques) applications médicales en physique nucléaire

Samuel Salvador

Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen

ENSICAEN, Université de Caen, CNRS/IN2P3, Caen, France

17 Novembre 2014

Quelles applications médicales ?

Utilisation des particules chargées (des neutrons ?)

La thérapie

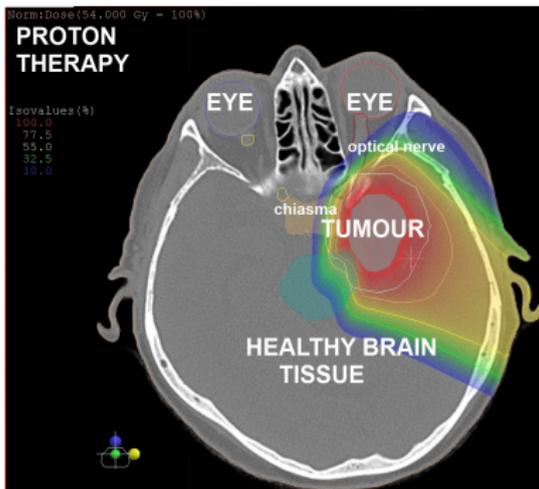
L'imagerie

Quelles applications médicales ?

Utilisation des particules chargées (des neutrons ?)

La thérapie

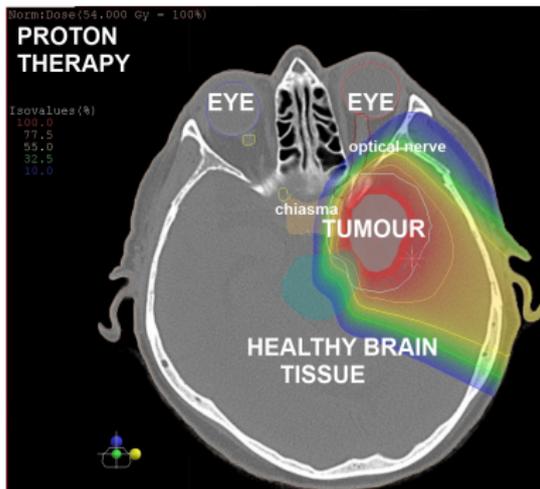
L'imagerie



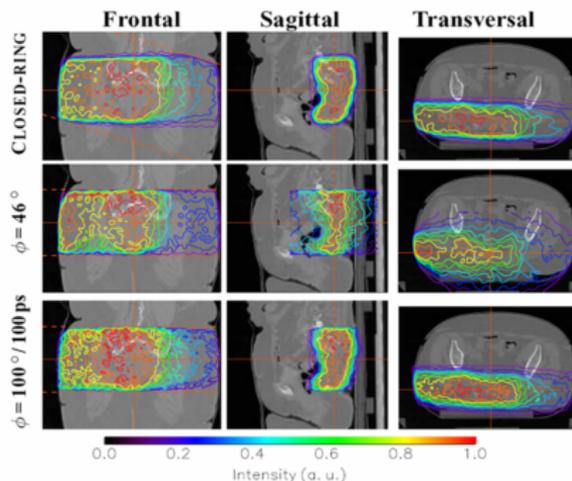
Quelles applications médicales ?

Utilisation des particules chargées (des neutrons ?)

La thérapie



L'imagerie



P. Crespo *et al.*

L'hadronthérapie

Traitement des tumeurs inopérables et radiorésistantes

Principalement protons (\rightarrow 290 MeV) et carbones (\rightarrow 400 MeV/n)

Dans le monde

- ▶ + de 30 centres protons,
- ▶ seulement 5 centres carbones :
 - HIT [D], CNAO [It], HIMAC, GHMC, HIBMC [Jp],

En France

- ▶ 3 centres de thérapie proton (Orsay, Nice, Bordeaux),
- ▶ pas de centre carbone

Thérapie carbone encore au stade de développement

L'hadronthérapie

Traitement des tumeurs inopérables et radiorésistantes

Principalement protons (\rightarrow 290 MeV) et carbones (\rightarrow 400 MeV/n)

Dans le monde

- ▶ + de 30 centres protons,
- ▶ seulement 5 centres carbones :
 - HIT [D], CNAO [It], HIMAC, GHMC, HIBMC [Jp],

En France

- ▶ 3 centres de thérapie proton (Orsay, Nice, Bordeaux),
- ▶ pas de centre carbone

Thérapie carbone encore au stade de développement

L'hadronthérapie

Traitement des tumeurs inopérables et radiorésistantes

Principalement protons (\rightarrow 290 MeV) et carbones (\rightarrow 400 MeV/n)

Dans le monde

- ▶ + de 30 centres protons,
- ▶ seulement 5 centres carbones :
 - HIT [D], CNAO [It], HIMAC, GHMC, HIBMC [Jp],

En France

- ▶ 3 centres de thérapie proton (Orsay, Nice, Bordeaux),
- ▶ pas de centre carbone

Thérapie carbone encore au stade de développement

L'hadronthérapie

Traitement des tumeurs inopérables et radiorésistantes

Principalement protons (\rightarrow 290 MeV) et carbones (\rightarrow 400 MeV/n)

Dans le monde

- ▶ + de 30 centres protons,
- ▶ seulement 5 centres carbones :
 - HIT [D], CNAO [It], HIMAC, GHMC, HIBMC [Jp],

En France

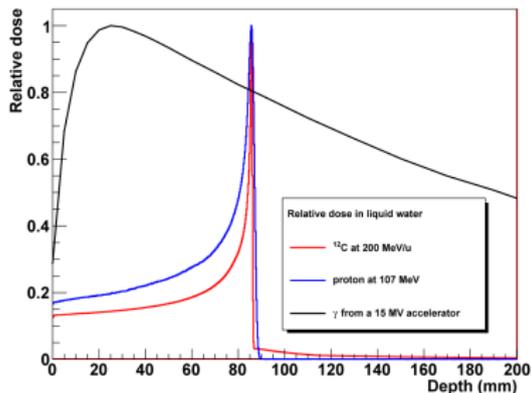
- ▶ 3 centres de thérapie proton (Orsay, Nice, Bordeaux),
- ▶ pas de centre carbone

Thérapie carbone encore au stade de développement

Quels intérêts à l'hadronthérapie

Balistic

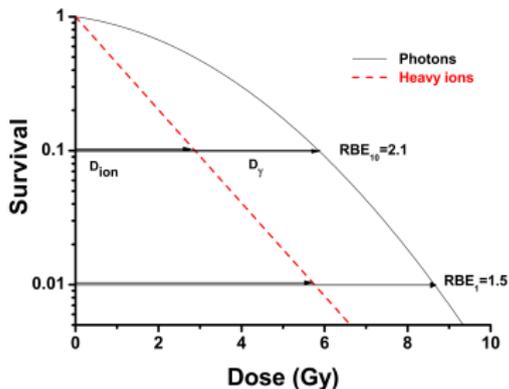
Dépôt de dose localisé au pic de Bragg



Geant4, D. Cussol

Biologique

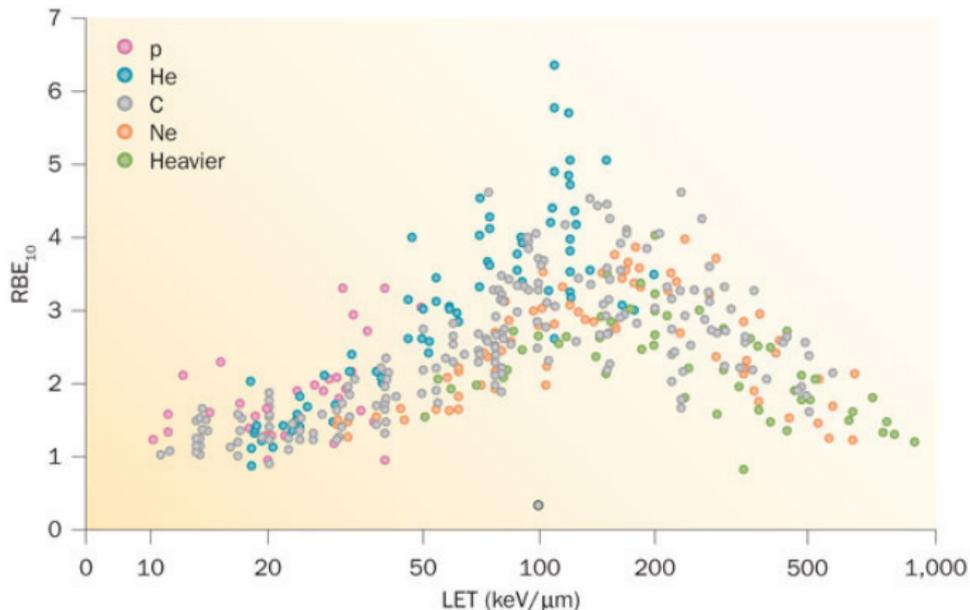
Efficacité biologique relative $\sim 2\text{X}$ celle des photons



D. Schardt *et al.*, Rev. Mod. Phys, 2010

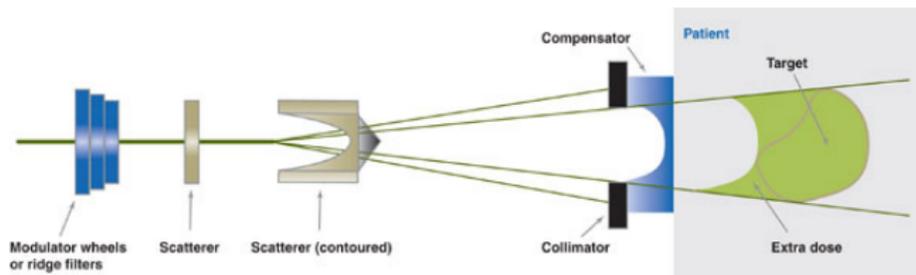
Quelles autres particules ?

Optimisation entre dose (\propto fluence) et transfert d'énergie



Quelles méthodes d'administration ?

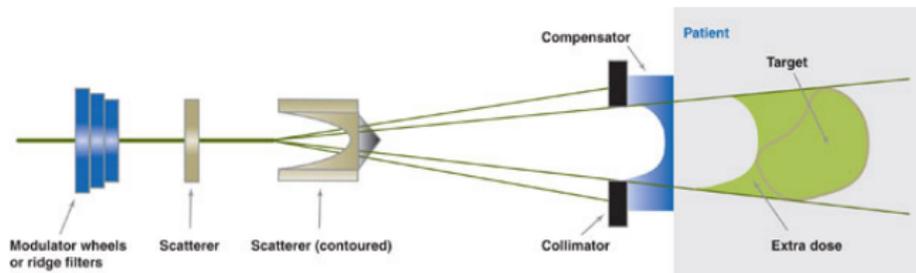
Passive Scattering Proton Beams



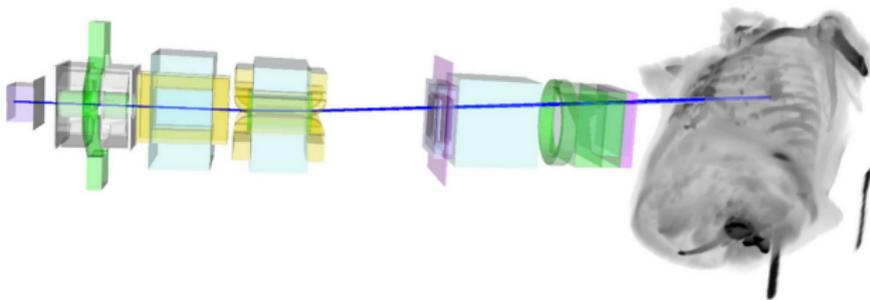
Spot-Scanning

Quelles méthodes d'administration ?

Passive Scattering Proton Beams

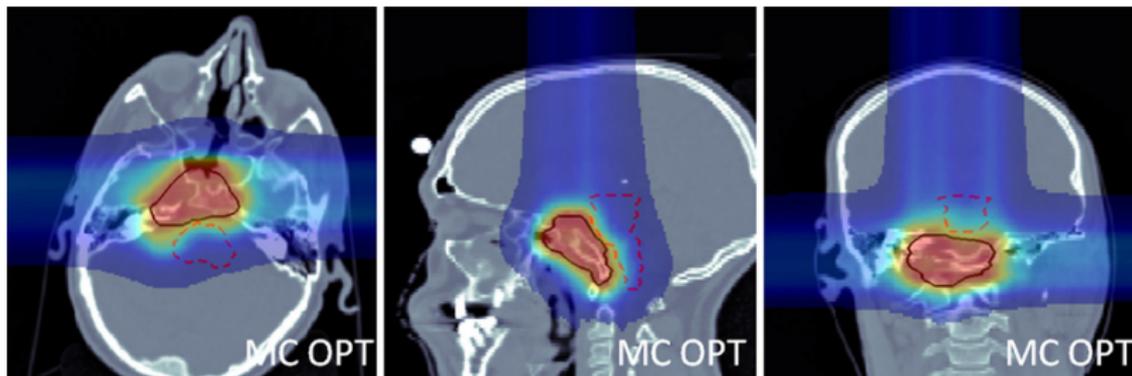


Spot-Scanning



Quelles méthodes d'administration ?

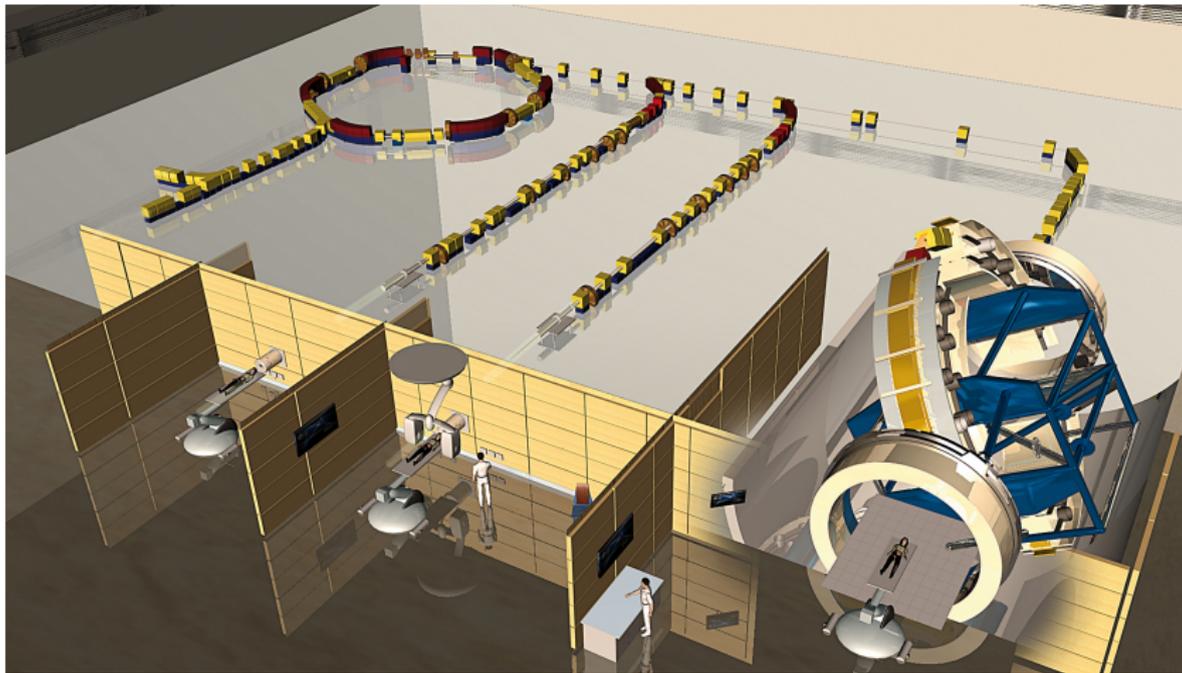
Thérapie à incidences multiples



A. Mairani *et al.*, PMB, 2012

Quelles méthodes d'administration ?

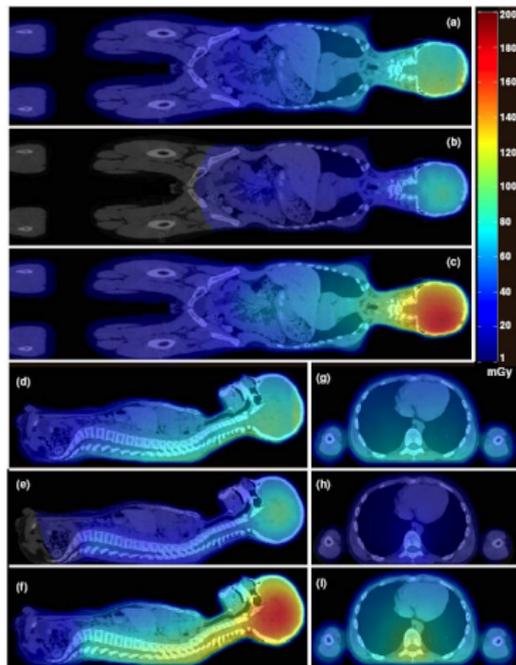
Carbone-thérapie : HIT gantry



Quels dommages collatéraux ?

Dose neutrons (PSPB) jusqu'à 0,5 Sv

82 % externe, 18 % interne



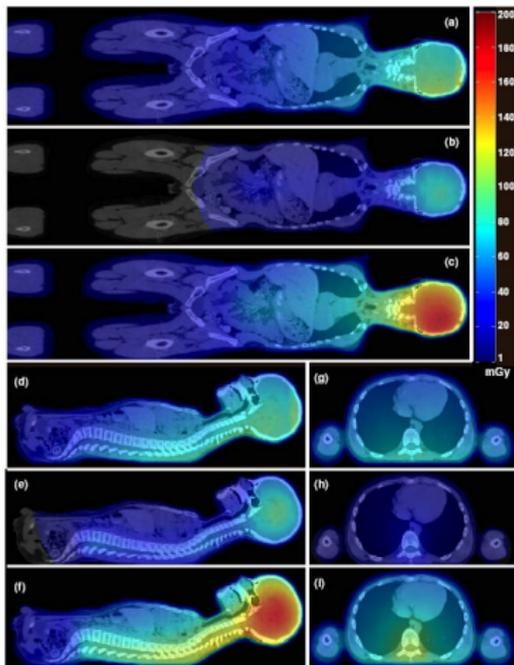
Quels dommages collatéraux ?

Dose neutrons (PSPB) jusqu'à 0,5 Sv

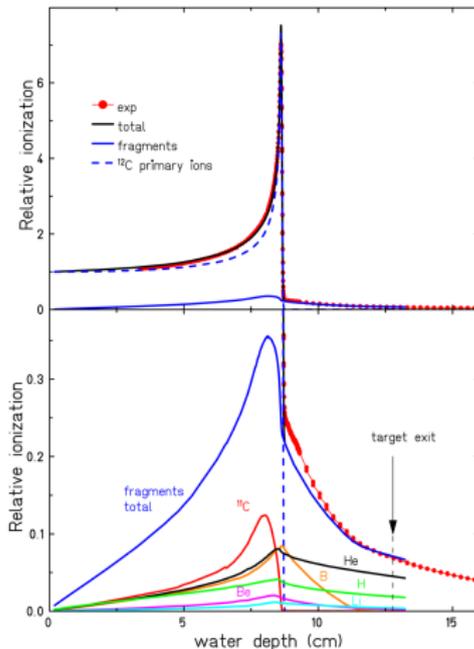
82 % externe, 18 % interne

Fragmentation du projectile

Projectiles ↘, dose après le pic



P. Taddei *et al.*, PMB, 2009



K. Gunzert-Marx *et al.*, New J. Phys, 2008

Comment vérifier la conformité du traitement ?

Traitement planifié (TPS) : si possible par MC

De la thérapie à l'imagerie

- ▶ Imagerie anatomique par la perte d'énergie dans les tissus,
- ▶ Imagerie du "dépôt de dose" :
 - création d'isotopes émetteur β^+ (TEP),
 - excitation des noyaux (γ prompts),
 - reconstruction des vertex d'interactions nucléaires (protons)

Imagerie du pic de Bragg \neq dépôt de dose

Comment vérifier la conformité du traitement ?

Traitement planifié (TPS) : si possible par MC

De la thérapie à l'imagerie

- ▶ Imagerie anatomique par la perte d'énergie dans les tissus,
- ▶ Imagerie du "dépôt de dose" :
 - création d'isotopes émetteur β^+ (TEP),
 - excitation des noyaux (γ prompts),
 - reconstruction des vertex d'interactions nucléaires (protons)

Imagerie du pic de Bragg \neq dépôt de dose

Comment vérifier la conformité du traitement ?

Traitement planifié (TPS) : si possible par MC

De la thérapie à l'imagerie

- ▶ Imagerie anatomique par la perte d'énergie dans les tissus,
- ▶ Imagerie du "dépôt de dose" :
 - création d'isotopes émetteur β^+ (TEP),
 - excitation des noyaux (γ prompts),
 - reconstruction des vertex d'interactions nucléaires (protons)

Imagerie du pic de Bragg \neq dépôt de dose

Comment vérifier la conformité du traitement ?

Traitement planifié (TPS) : si possible par MC

De la thérapie à l'imagerie

- ▶ Imagerie anatomique par la perte d'énergie dans les tissus,
- ▶ Imagerie du "dépôt de dose" :
 - création d'isotopes émetteur β^+ (TEP),
 - excitation des noyaux (γ prompts),
 - reconstruction des vertex d'interactions nucléaires (protons)

Imagerie du pic de Bragg \neq dépôt de dose

Comment vérifier la conformité du traitement ?

Traitement planifié (TPS) : si possible par MC

De la thérapie à l'imagerie

- ▶ Imagerie anatomique par la perte d'énergie dans les tissus,
- ▶ Imagerie du "dépôt de dose" :
 - création d'isotopes émetteur β^+ (TEP),
 - excitation des noyaux (γ prompts),
 - reconstruction des vertex d'interactions nucléaires (protons)

Imagerie du pic de Bragg \neq dépôt de dose

Proton et Carbone -CT

Imagerie de transmission



R. Schulte *et al.*, 2013

Vérifier le placement avant traitement

- ▶ perte d'énergie dans les tissus → densité électronique,
- ▶ dose délivrée plus faible qu'en photons (X),
- ▶ straggling des particules,
- ▶ temps d'acquisition/reconstruction potentiellement très long (~10-20 heures)

Imagerie des émetteurs de positrons

▶ Idéalement, imagerie “in-beam”

▶ Pratiquement, au mieux “in-room”

Faisceau de carbones :

Corrélation avec le pic de Bragg

Faisceau de protons :

Émetteurs produits

▶ $^{16}\text{O}(p,pn)^{15}\text{O}$: 2,04 min

▶ $^{14}\text{N}(p,pn)^{13}\text{N}$: 9,96 min

▶ $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$: 20,33 min

Imagerie des émetteurs de positrons

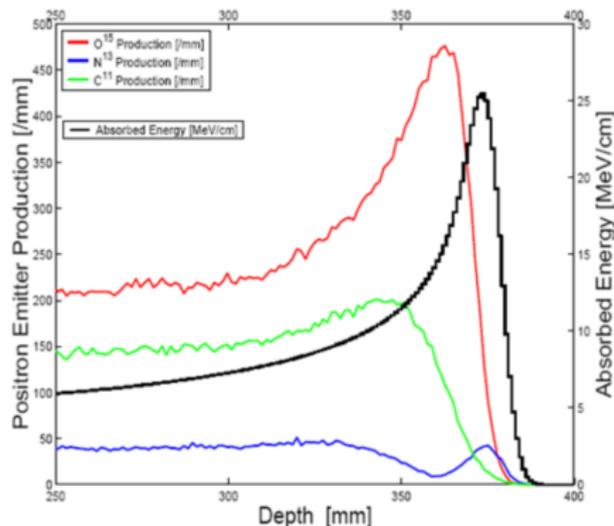
► Idéalement, imagerie “in-beam”

► Pratiquement, au mieux “in-room”

Faisceau de carbones :

Faisceau de protons :

Corrélation avec le pic de Bragg



Émetteurs produits

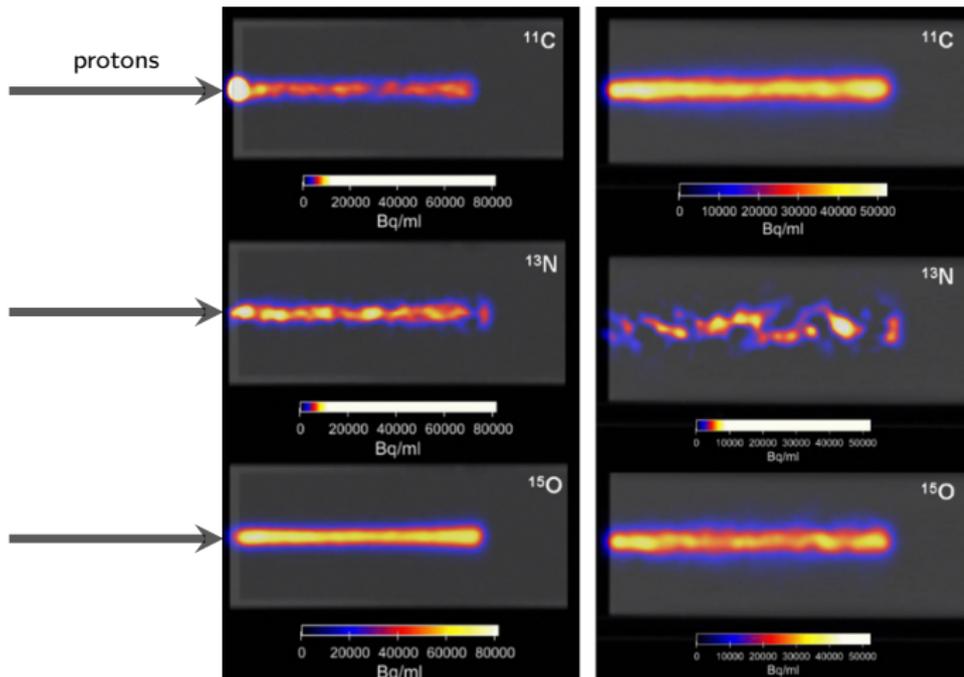
► $^{16}O(p,pn)^{15}O$: 2,04 min

► $^{14}N(p,pn)^{13}N$: 9,96 min

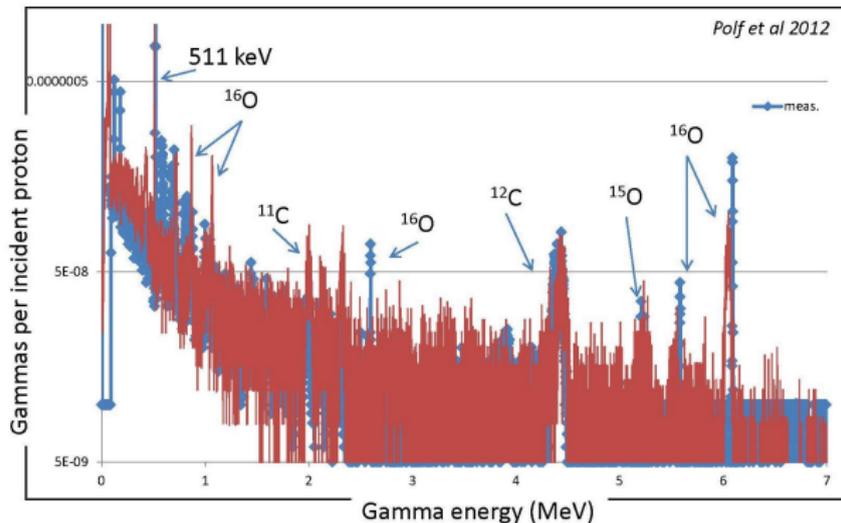
► $^{12}C(p,pn)^{11}C$: 20,33 min

Imagerie des émetteurs de positrons

Imagerie TEP dans la gélatine (eau) et le PMMA ($C_5H_8O_2$)

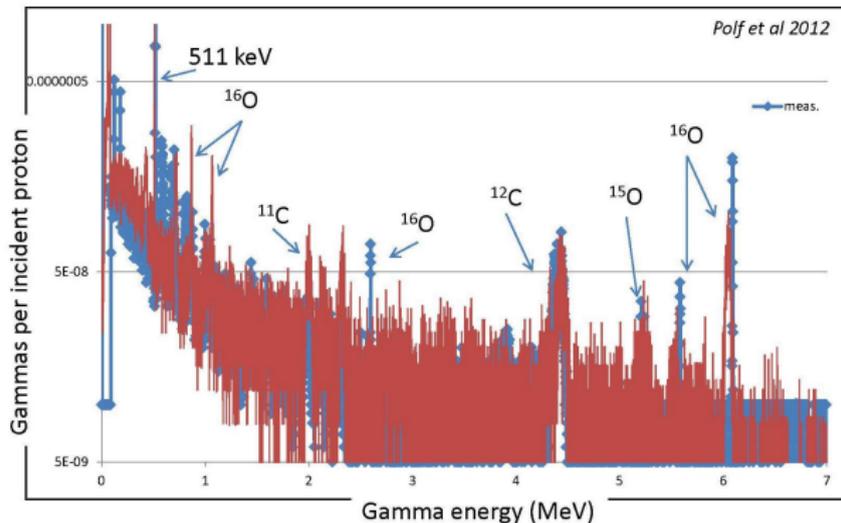


Statistique faible et large gamme en énergie, sans compter le flux de neutrons !



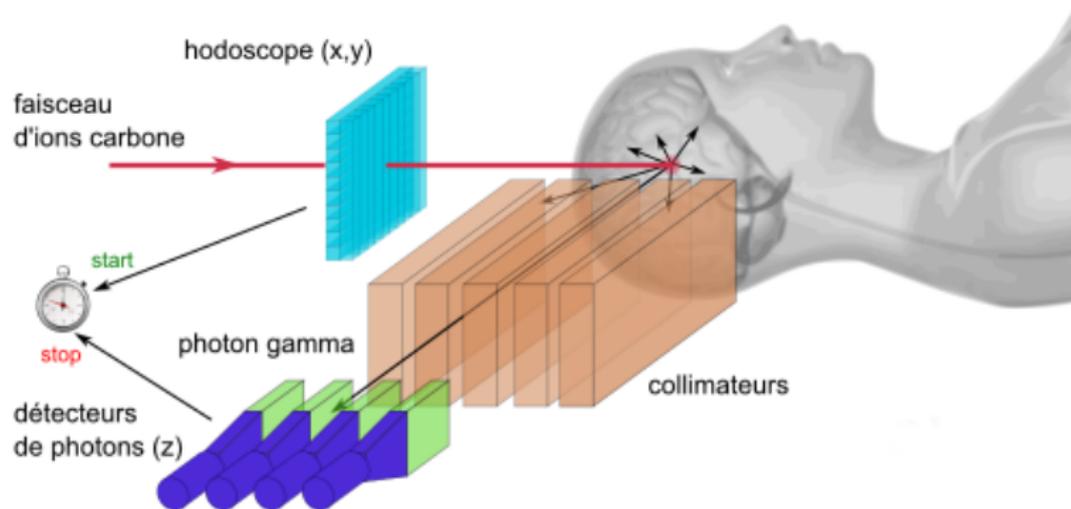
1 Gy : $\sim 10^{10}$ protons de 150 MeV ou $\sim 10^7$ carbones de 270 MeV/u

Statistique faible et large gamme en énergie, sans compter le flux de neutrons !



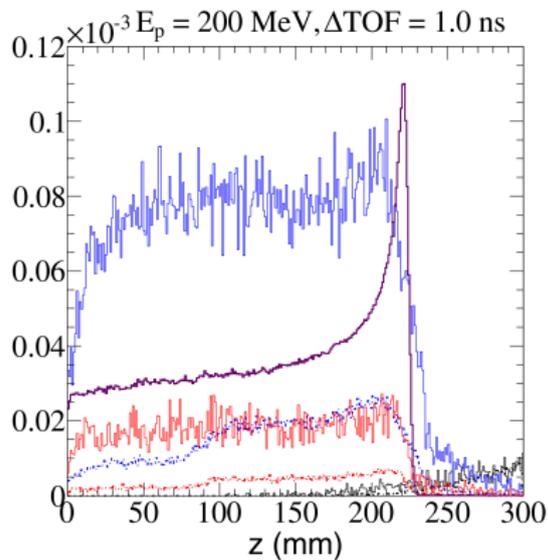
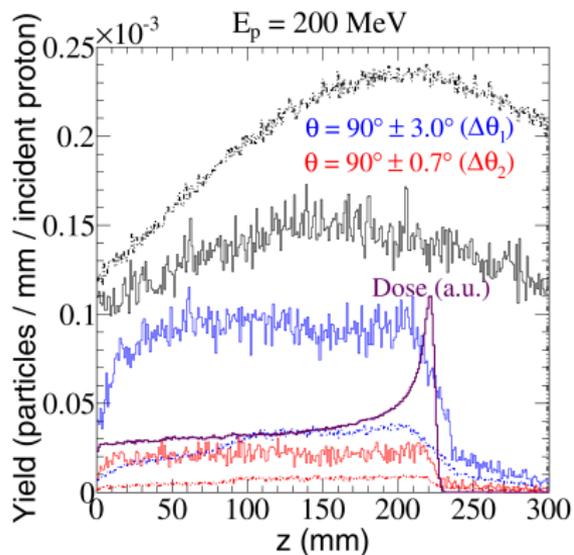
1 Gy : $\sim 10^{10}$ protons de 150 MeV ou $\sim 10^7$ carbones de 270 MeV/u

γ prompts : caméra collimatée

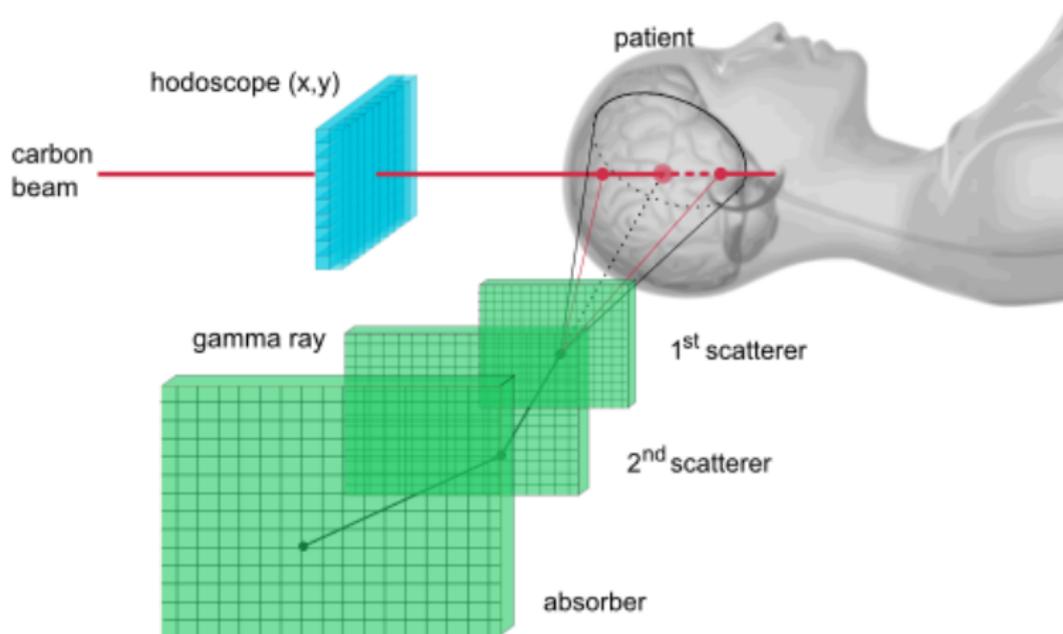


γ prompts : caméra collimatée

Temps de vol : s'affranchir des neutrons



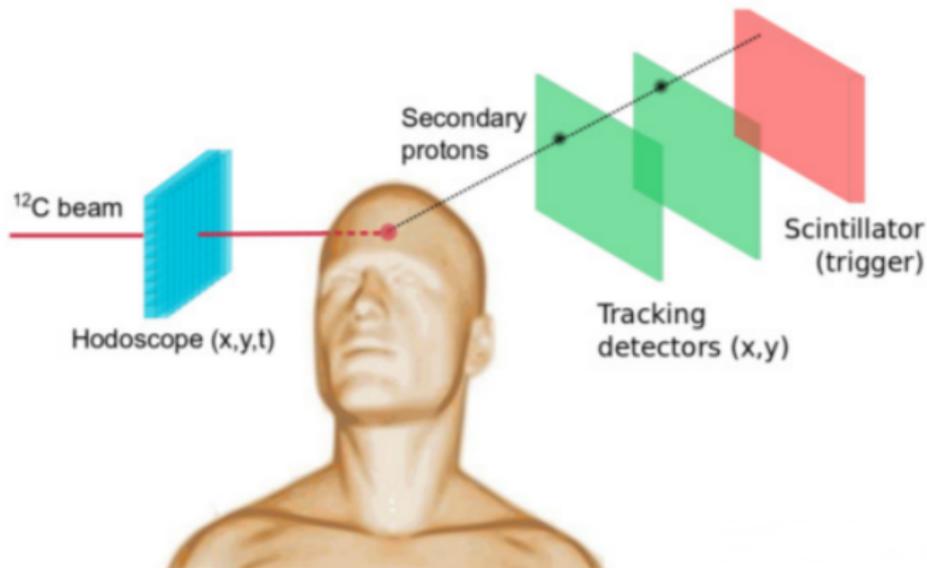
γ prompts : caméra Compton



IPNL *et al.*

Imagerie des vertex

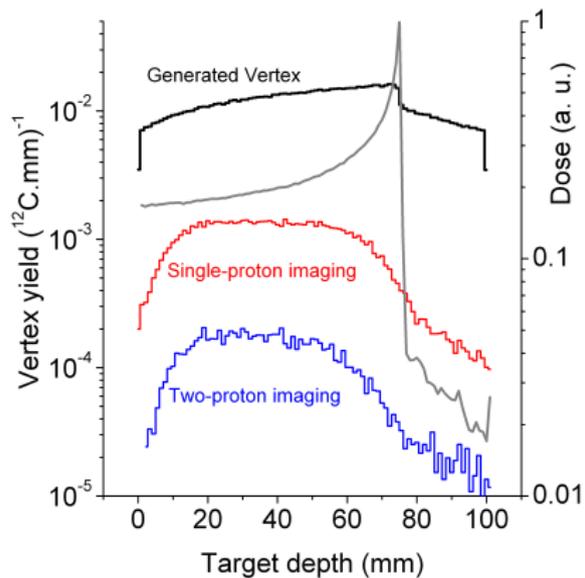
Interaction Vertex Imaging (secondary protons)



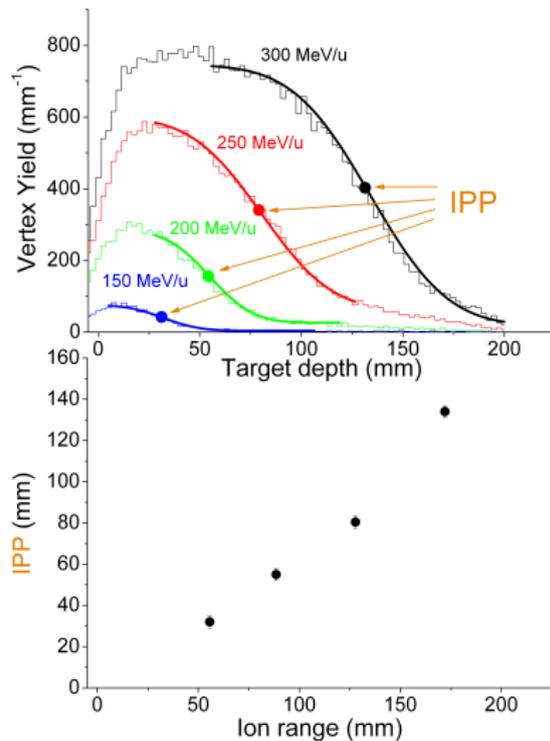
IPNL *et al.*

- Seuil en énergie : imagerie du plateau de Bragg

Imagerie des vertex



E. Testa *et al.*, ICTR-PHE, 2012



et quoi d'autres ?

- ▶ Accélérateur
- ▶ Thérapie, imagerie neutrons...
- ▶ Imagerie moléculaire (clinique ou pré-clinique)
 - TEP
 - TEMP
 - Cerenkov
- ▶ Radiotraceurs (imagerie et thérapie)
- ▶ ...