

NOUVEL ALGORITHME DE HAUTE PERFORMANCE POUR LA RADIOTHÉRAPIE MODERNE

Jean-Luc Feugeas
LABORATOIRE CELIA - UNIVERSITÉ DE BORDEAUX



6^{ÈMES} JOURNÉES SCIENTIFIQUES FRANCOPHONES DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RADIOPROTECTION
CODES DE CALCUL EN RADIOPROTECTION, RADIOPHYSIQUE ET DOSIMÉTRIE – 1^{er} et 2 février 2018

PROGRAMME DE RECHERCHE MENÉ EN RÉGION NOUVELLE AITAINE DANS LE DOMAINE DE L'ONCOLOGIE DEPUIS 2008

FINANCÉ PAR
CEA, CNRS, UBDX,
CRNA ET FEDER
**POPRA - PROGRAMME OPTIQUE,
PHYSIQUE ET RADIOTHÉRAPIE
EN AQUITAINE**
5 ANS – 2014-2019
PROGRAMME DE RECHERCHE
TRANSVERSAL
ANIMÉ PAR LE PR KANTOR



Multi-laboratoires Multi-institutions

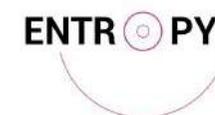
Institut Bergonié, CHU,
CELIA, CENBG, IMB, LABRI

Multi-disciplinaire

oncologie, radiothérapie, radiologie, physique
théorique, biologie, physique médicale,
mathématiques appliquées, informatique



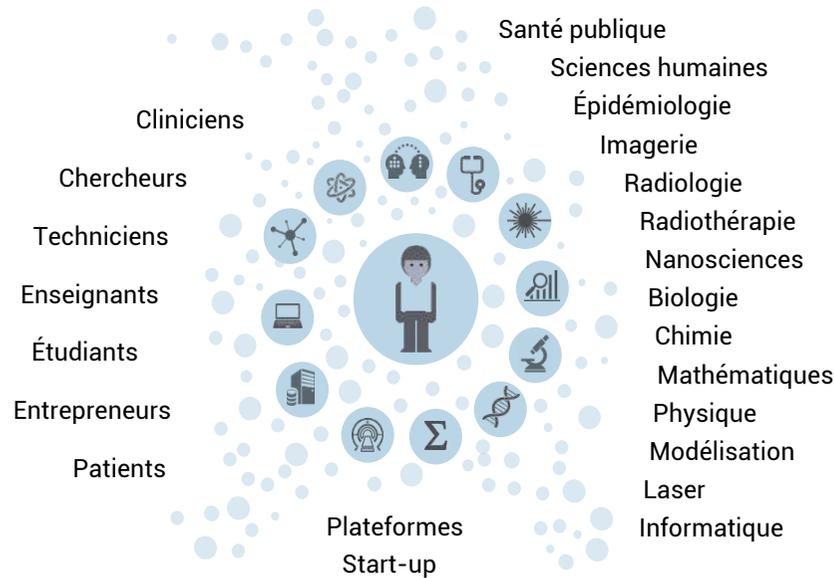
**PROGRAMME DE RECHERCHE
MISSION DE VALORISATION**



Contexte – PROJET D'ONCOSPHERE/CRCB EN COURS

PROJET DE STRUCTURATION DES RECHERCHES EN CANCÉROLOGIE EN RÉGION NOUVELLE AQUITAINE

~100 PERSONNES TRAVAILLENT SUR CE PROJET

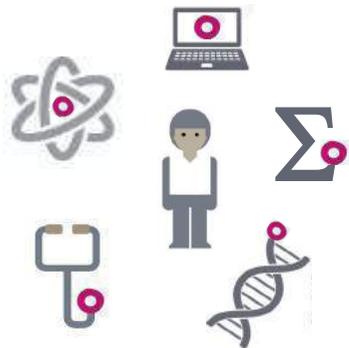


ONCOSPHERE RÉGION NOUVELLE AQUITAINE CRCB CENTRE DE RECHERCHES EN CANCÉROLOGIE DE BORDEAUX

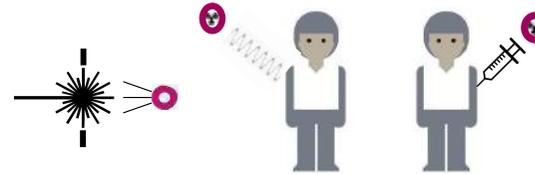
~1000 CHERCHEURS



Contexte – axes de recherche de S&T appliqués à l'oncologie développés au CELIA



NOUVELLES SOURCES DE PROTONS
POUR LA RADIOTHERAPIE
CRÉÉS PAR LASER ULTRA INTENSE
ACCELERATION ET TRANSPORT
PROJET POPRA



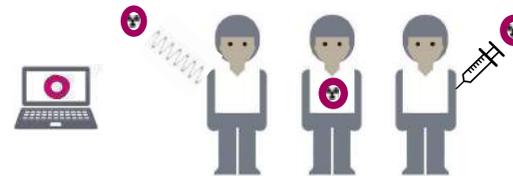
Radiothérapie Interne Vectorisée

Production de radio-isotopes

Protonthérapie

Etudes prospectives pour le développement de nouvelles sources plus compactes et moins chères

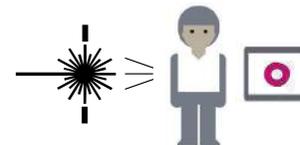
NOUVEAUX ALGORITHMES POUR
LES SYSTÈMES DE
PLANIFICATION DE TRAITEMENT
POUR LA RADIOTHERAPIE
PROJET POPRA



Radiothérapie externe, Curiethérapie, Radiothérapie Interne Vectorisée

Nouveaux enjeux pour les installations modernes

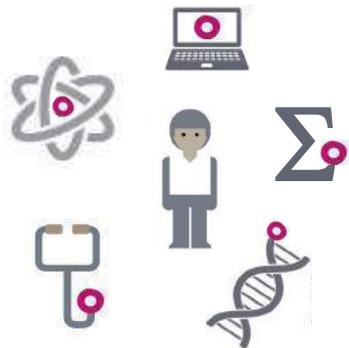
NOUVELLES SOURCES X
POUR UNE IMAGERIE PLUS EFFICACE
PAR LASERS INTENSES
PROJET XPULSE



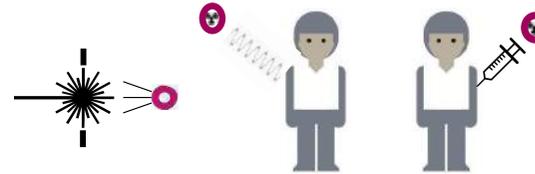
Radiographie

Détection précoce du cancer du sein

Contexte – axes de recherche de S&T appliqués à l'oncologie développés au CELIA



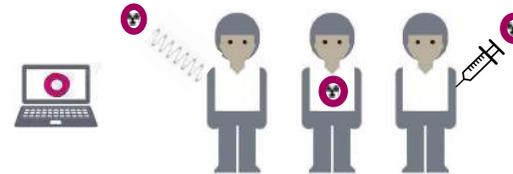
NOUVELLES SOURCES DE PROTONS
POUR LA RADIOTHERAPIE
CRÉÉS PAR LASER ULTRA INTENSE
ACCELERATION ET TRANSPORT
PROJET POPRA



**Radiothérapie
Interne Vectorisée**
Production de radio-isotopes

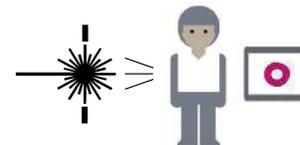
Protonthérapie
Etudes prospectives pour le
développement de nouvelles sources
plus compactes et moins chères

NOUVEAUX ALGORITHMES POUR
LES SYSTÈMES DE
PLANIFICATION DE TRAITEMENT
POUR LA RADIOTHERAPIE
PROJET POPRA



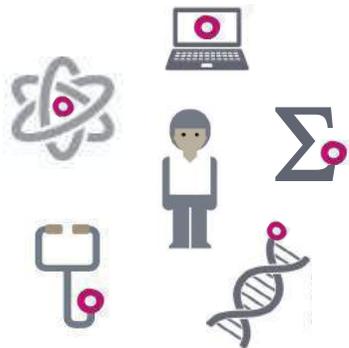
**Radiothérapie externe,
Curiethérapie,
Radiothérapie Interne
Vectorisée**
Nouveaux enjeux pour les
installations modernes

NOUVELLES SOURCES X
POUR UNE IMAGERIE PLUS EFFICACE
PAR LASERS INTENSES
PROJET XPULSE



Radiographie
Détection précoce
du cancer du sein

Contexte – axes de recherche de S&T appliqués à l'oncologie développés au CELIA



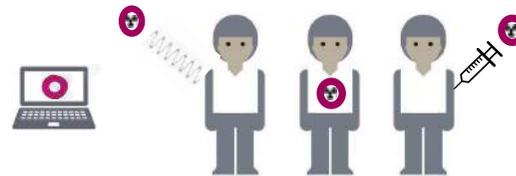
NOUVELLES SOURCES DE PROTONS
POUR LA RADIOTHERAPIE
CRÉÉS PAR LASER ULTRA INTENSE
ACCELERATION ET TRANSPORT
PROJET POPRA



**Radiothérapie
Interne Vectorisée**
Production de radio-isotopes

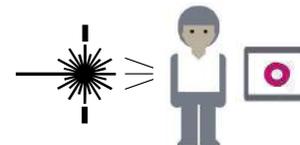
Protonthérapie
Etudes prospectives pour le
développement de nouvelles sources
plus compactes et moins chères

NOUVEAUX ALGORITHMES POUR
LES SYSTÈMES DE
PLANIFICATION DE TRAITEMENT
POUR LA RADIOTHERAPIE
PROJET POPRA



**Radiothérapie externe,
Curiethérapie,
Radiothérapie Interne
Vectorisée**
Nouveaux enjeux pour les
installations modernes

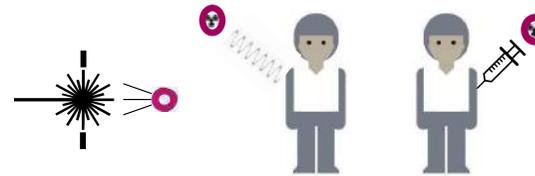
NOUVELLES SOURCES X
POUR UNE IMAGERIE PLUS EFFICACE
PAR LASERS INTENSES
PROJET XPULSE



Radiographie
Détection précoce
du cancer du sein

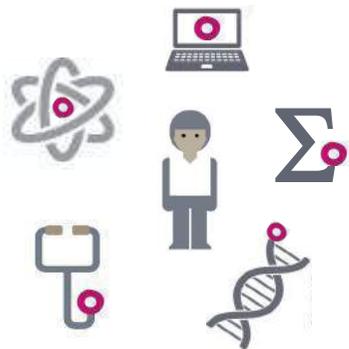
Contexte – axes de recherche de S&T appliqués à l'oncologie développés au CELIA

NOUVELLES SOURCES DE PROTONS
 POUR LA RADIOTHERAPIE
 CRÉÉS PAR LASER ULTRA INTENSE
 ACCELERATION ET TRANSPORT
PROJET POPRA

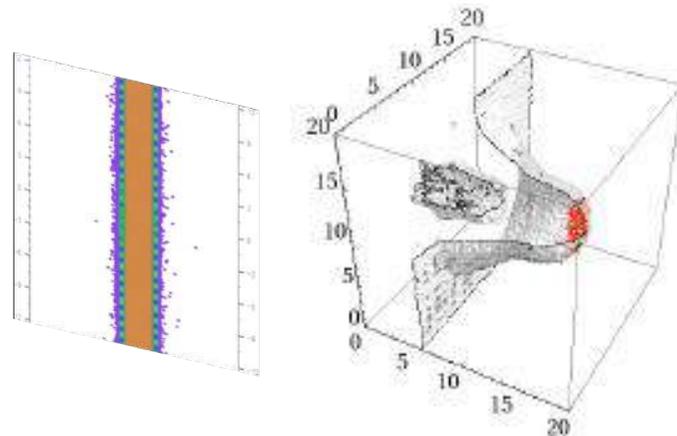


**Radiothérapie
 Interne Vectorisée**
 Production de radio-isotopes

Protonthérapie
 Etudes prospectives pour le
 développement de nouvelles sources
 plus compactes et moins chères

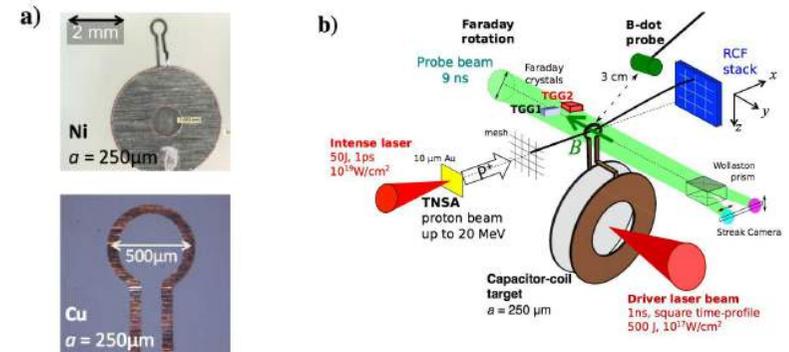


Accélération de proton
 par laser ultra-intense



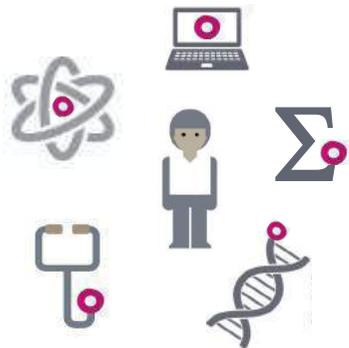
E. d'Humières et al.

Lentilles magnétiques

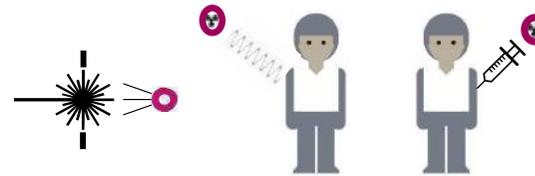


J. Santos et al.

Contexte – axes de recherche de S&T appliqués à l'oncologie développés au CELIA



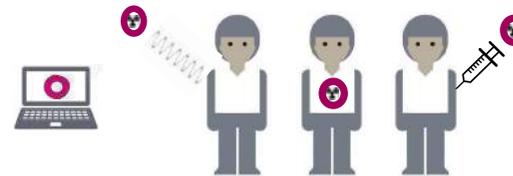
NOUVELLES SOURCES DE PROTONS
POUR LA RADIOTHERAPIE
CRÉÉS PAR LASER ULTRA INTENSE
ACCELERATION ET TRANSPORT
PROJET POPRA



**Radiothérapie
Interne Vectorisée**
Production de radio-isotopes

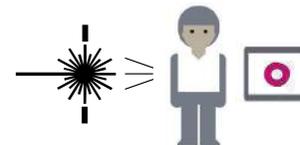
Protonthérapie
Etudes prospectives pour le
développement de nouvelles sources
plus compactes et moins chères

NOUVEAUX ALGORITHMES POUR
LES SYSTÈMES DE
PLANIFICATION DE TRAITEMENT
POUR LA RADIOTHERAPIE
PROJET POPRA



**Radiothérapie externe,
Curiethérapie,
Radiothérapie Interne
Vectorisée**
Nouveaux enjeux pour les
installations modernes

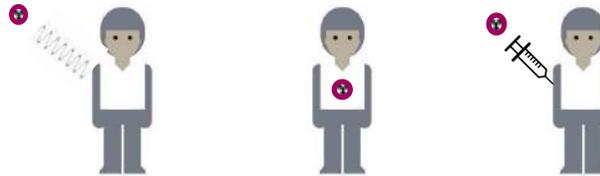
NOUVELLES SOURCES X
POUR UNE IMAGERIE PLUS EFFICACE
PAR LASERS INTENSES
PROJET XPULSE



Radiographie
Détection précoce
du cancer du sein

NOUVEAUX ALGORITHMES, UN ENJEU POUR LA RADIOTHÉRAPIE MODERNE ?

Nouveaux algorithmes **rapides et précis** pour les Systèmes de Planification de Traitement modernes
Radiothérapie externe, Curiethérapie, Radiothérapie Interne Vectorisée



UN NOUVEAU MODÈLE

1 - une alternative aux algorithmes Rapides et/ou Précis existants...

Modèles Ad-hoc

Robustes et rapides

Manque de précision pour des géométries complexes

Inadaptés pour les besoins modernes (IRM...)



Méthodes Statistiques (Monte-Carlo)

Robustes et référentes

Les temps de calcul sont longs

Inadaptées dans un contexte de traitement

Nouvelles propositions

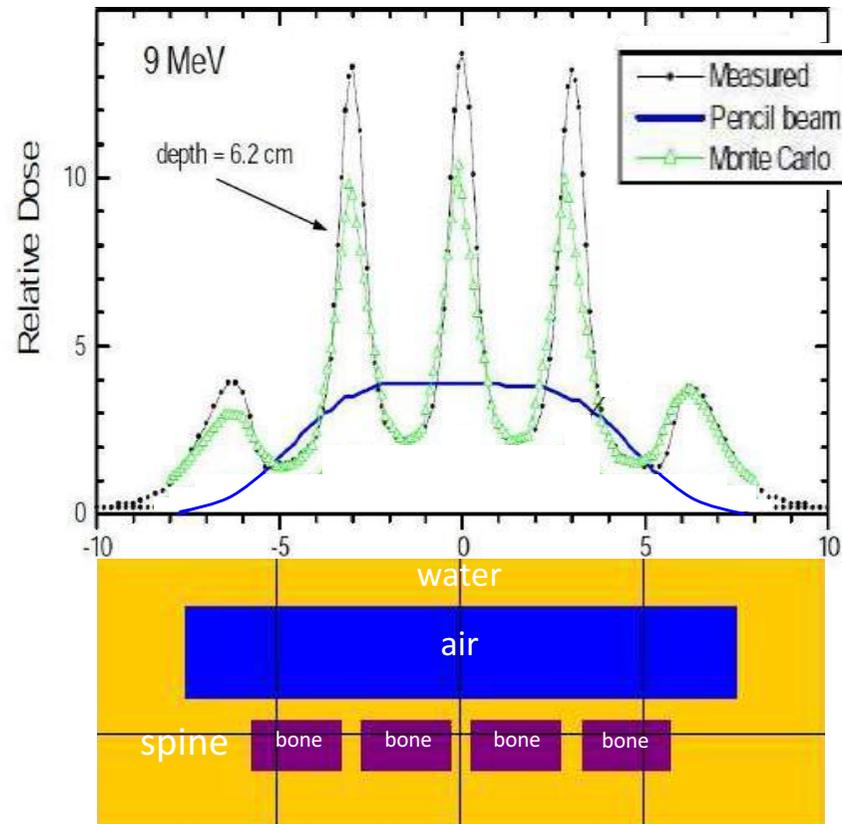
Monte-Carlo Rapides
Radiothérapie guidée par IRM ?

Modèles Déterministes
Evaluation en cours

2 - une solution aux normes imposées de « double calcul » - double TPS ou calcul de dose en un point

QUEL MODÈLE ?

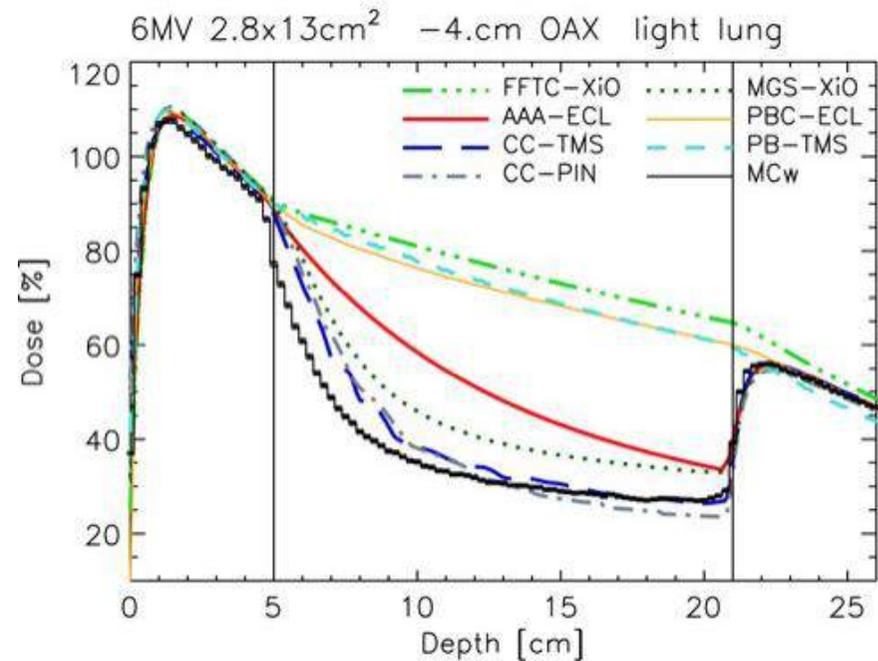
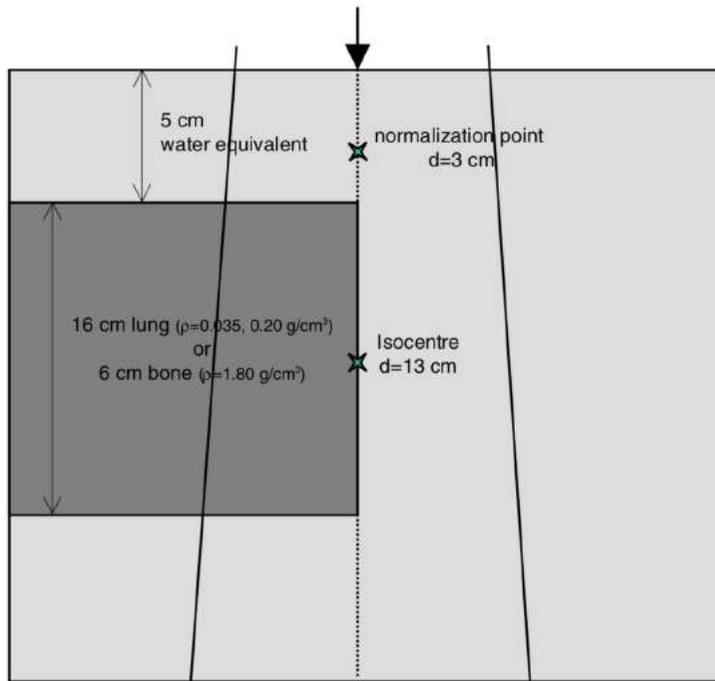
NOUVEAUX ALGORITHMES, UN ENJEU POUR LA RADIOTHÉRAPIE MODERNE ?



Ding, G. X., et al, *Int. J. Rad. Onc. Biol. Phys.* (2005)

NOUVEAUX ALGORITHMES, UN ENJEU POUR LA RADIOTHÉRAPIE MODERNE ?

Depth dose curves for the 6 MV photon beams calculations, at 4 cm off-axis on the heterogeneity side
 Elongated field – 2.8 cm × 13 cm
 Fogliata, A. et al, Phys. Med. Biol. 52 (2007)



type-a (PBC-ECL, PB-TMS and FFTC-XiO) and type-b (CC- TMS, CC-PIN, MGS-XiO and AAA-ECL) algorithms and MC



ECL : Varian Eclipse

TMS - Nucletron Helax

XiO - CMS

PIN - Philips Pinnacle

MC - EGSnrc

QUEL MODÈLE ?

PROBLÈME : MODÉLISATION DE L'INTERACTION D'UN RAYONNEMENT AVEC LA MATIÈRE (TISSUS, INSERTS, ...)

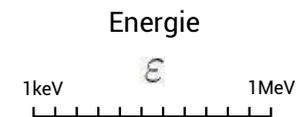
MODÈLE DE RÉFÉRENCE : ÉQUATIONS TRANSPORT LINÉARISÉES DE BOLTZMANN (LBTE)



$$-\frac{1}{v} \partial_{\varepsilon} (Sv\psi) + \mathbf{\Omega} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} \psi = \frac{k_1}{2} \Delta_{\mathbf{\Omega}} \psi$$

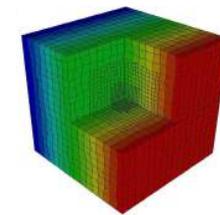
INCONNUE : FONCTION DE DISTRIBUTION

$$\psi(\mathbf{r}, \varepsilon, \mathbf{\Omega})$$



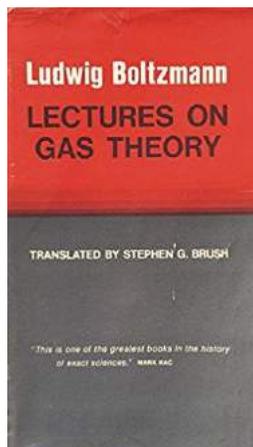
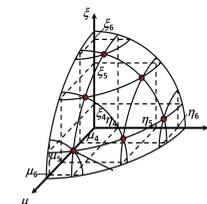
Espace

\mathbf{r}



Angle

$\mathbf{\Omega}$



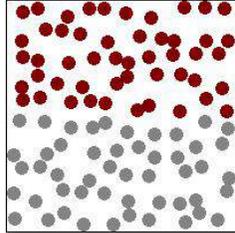
OBJECTIF : CALCUL DE LA DOSE

$$D_{[erg/cm^3]} = t_{exp} \int_{\mathbb{R}} \int_{S_2} S\psi \, d\varepsilon \, d\mathbf{\Omega}$$

OUTIL : ENTROPIE – MESURE DU DÉSORDRE
H-THÉORÈME DE BOLTZMANN

IRRÉVERSIBILITÉ – FLÈCHE DU TEMPS

QUEL MODÈLE ?



PHYSIQUE DES PARTICULES

DEUX ÉCHELLES



Microscopique – particulaire (Newton)

Cinétique (boules de billard)

MAIS

Inaccessible à nos sens et aux moyens de calcul modernes

Réversible → perte de la flèche du temps (film)

Macroscopique – grandeurs hydrodynamiques

Irréversibilité (2^e principe de la thermodynamique)

MAIS

Insuffisante pour décrire des effets cinétiques complexes

Mésoscopique – statistique – fonction de distribution

H-théorème de Boltzmann (1872)

« Tout système physique abandonné à lui-même tend vers un état de désordre maximum autrement appelé "équilibre détaillé" pour lequel chaque événement est exactement compensé par un événement inverse. »



L'entropie d'un système abandonné à lui-même croit vers un état d'équilibre stationnaire (Maxwell) et unique (Boltzmann), d'entropie (de désordre) maximum

1 - Le désordre est la règle et l'équilibre c'est le désordre

2 - Irréversibilité - flèche du temps
démontrée à partir de considérations cinétiques

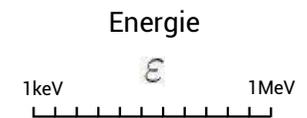
QUEL MODÈLE ?

PROBLÈME : MODÉLISATION DE L'INTERACTION D'UN RAYONNEMENT AVEC LA MATIÈRE (TISSUS, INSERTS, ...)

MODÈLE DE RÉFÉRENCE : ÉQUATIONS TRANSPORT LINÉARISÉES DE BOLTZMANN (LBTE)

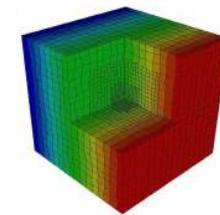


$$-\frac{1}{v} \partial_{\epsilon} (Sv\psi) + \mathbf{\Omega} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} \psi = \frac{k_1}{2} \Delta_{\mathbf{\Omega}} \psi$$



Espace

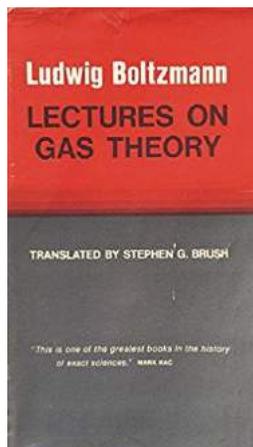
\mathbf{r}



ENTROPIE – MESURE DU DÉSORDRE

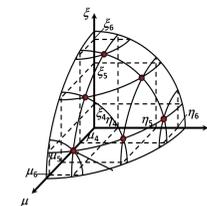
H-THÉORÈME DE BOLTZMANN

QUEL MODÈLE ?



Angle

$\mathbf{\Omega}$



FERMETURE ENTROPIQUE – SIMULATION DU DÉPÔT DE DOSE PLUS RAPIDE ET PLUS PRÉCISE

Méthodes aux Moments Entropiques

• Le calcul de la dose repose sur la résolution des équations de LBTE qui requiert la discrétisation de l'espace des phases (énergie, direction) et physique (position) :

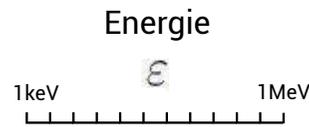
$$-\frac{1}{v} \partial_{\varepsilon} (Sv\psi) + \mathbf{\Omega} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} \psi = \frac{k_1}{2} \Delta_{\mathbf{\Omega}} \psi$$

$(\mathbf{r}, \varepsilon, \mathbf{\Omega})$

• Résolution des moments angulaires
LBTE résolues sur un espace réduit :

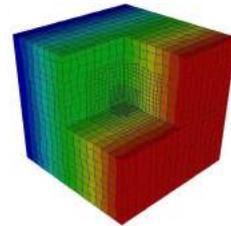
$$\Psi_0 = v \int_{S_2} \psi d\mathbf{\Omega},$$

$$\Psi_1 = v \int_{S_2} \mathbf{\Omega} \psi d\mathbf{\Omega},$$



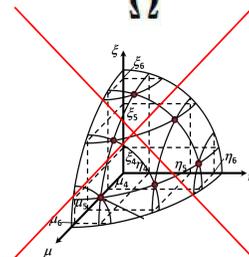
Espace

\mathbf{r}



Angle

$\mathbf{\Omega}$



• Le système d'équations est fermé en utilisant le principe de maximisation d'entropie de Boltzmann (H-Théorème)

$$\begin{aligned} -\partial_{\varepsilon} (S\Psi_0) + \nabla \cdot \Psi_1 &= 0, \\ -\partial_{\varepsilon} (S\Psi_1) + \nabla \cdot \Psi_2 &= -k_1 \Psi_1. \end{aligned} \quad (\mathbf{r}, \varepsilon, \mathbf{\Omega})$$



$$\Psi_2 = v \int_{S_2} \mathbf{\Omega} \otimes \mathbf{\Omega} \psi d\mathbf{\Omega}.$$

Maximisation de l'entropie du système qui résout les deux premiers moments

$$\frac{\Psi_2}{\Psi_0} = \left(\frac{1-\chi}{2} \mathbf{I} + \frac{3\chi-1}{2} \frac{\Psi_1}{|\Psi_1|} \otimes \frac{\Psi_1}{|\Psi_1|} \right)$$

Propriétés attractives

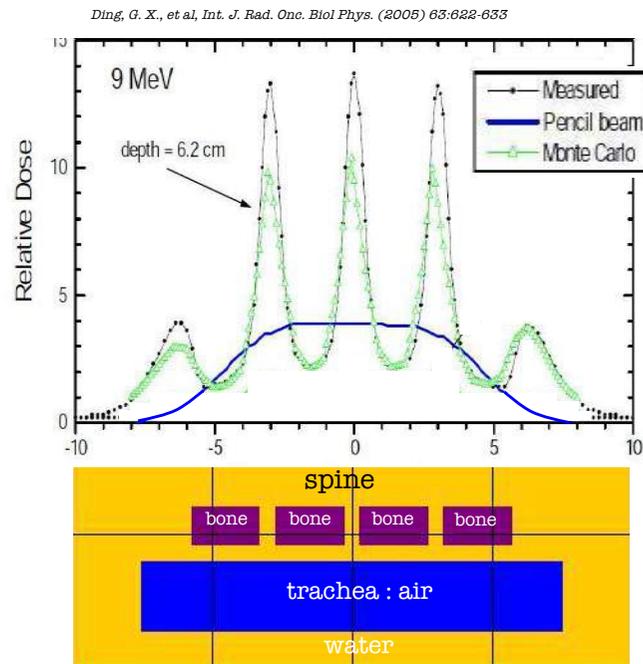
- Fonction de distribution : exponentielle - positive
- Hyperbolicité : méthodes numériques efficaces
- Continuité des équations aux moments : dérivabilité pour résolution du problème inverse
- Toutes les particules sont traitées - photons, positrons, électrons, primaires, diffusées ou secondaire
- Effets physiques supplémentaires (B, ...)

MOINS D'INCONNUS → MEILLEUR EFFICACITÉ
TEMPS DE CALCUL ET ESPACE MÉMOIRE REDUITS
PRÉCISION ?

Radiothérapie externe (électrons, photons, protons)



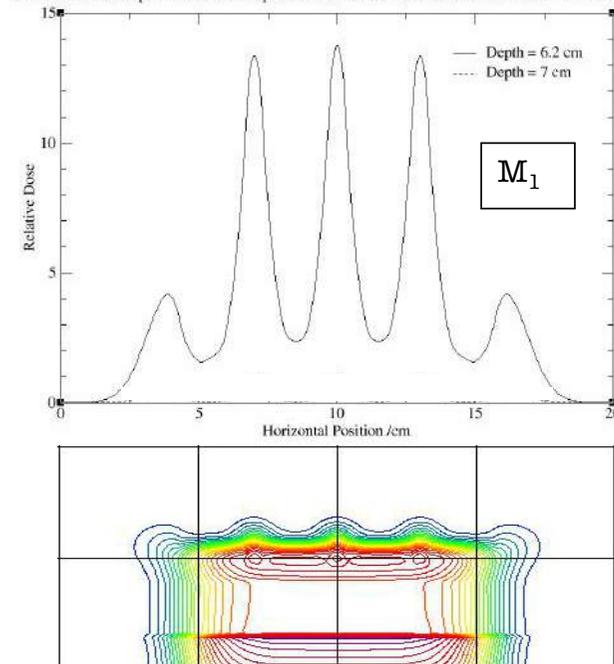
COMPARAISONS QUALITATIVES – CAS “TRAVERSÉE DE VERTÈBRES”



9 MeV,
10×10 cm²

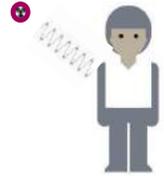
Phantom in the water tank (15x15x4.7 cm³) :
 - trachea : long cylindrical air hole at 2 mm below the surface - diameter of 2.6 cm
 - spine : 4 hard bone material disks 1.4 cm thick - 2.5 cm diameter - 0.5 cm below the trachea - separated 0.5 cm edge to edge.

M1 cross beam dose profile at various depths - 9 MeV +/- 0.8 MeV - Gaussienne ordre 3 - FWHM 10.6 cm

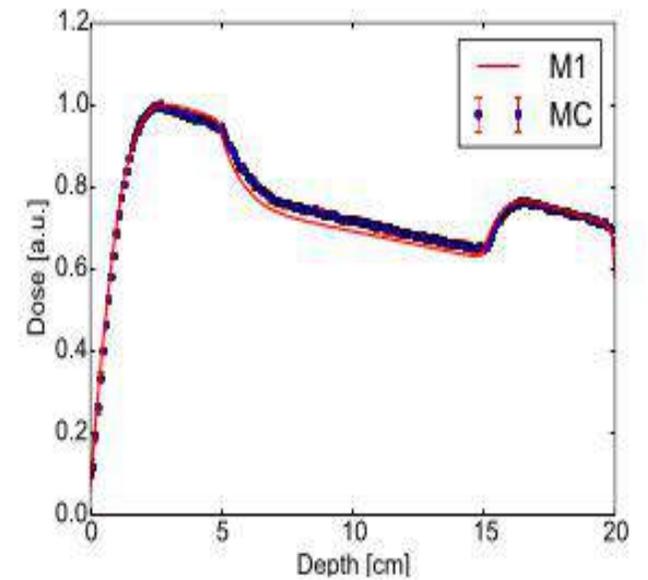
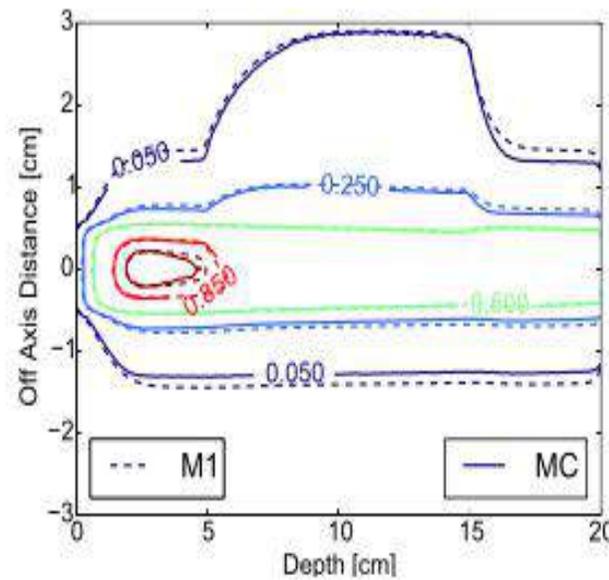
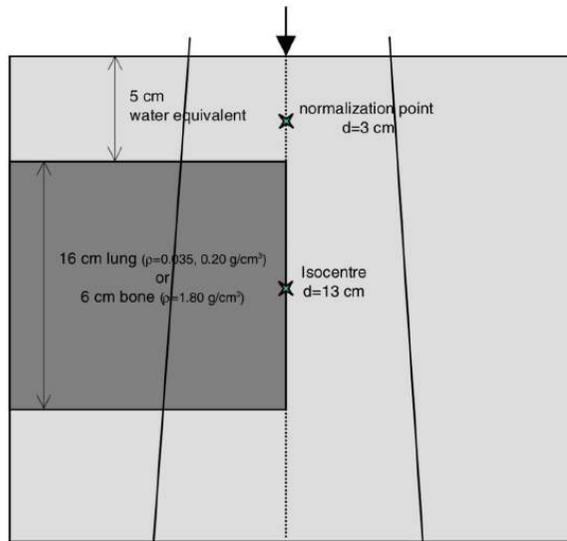


FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

Radiothérapie externe (électrons, photons, protons)



COMPARAISONS QUANTITATIVES AVEC LE CODE PENELOPE (MONTE-CARLO) – CAS “FOGLIATA”

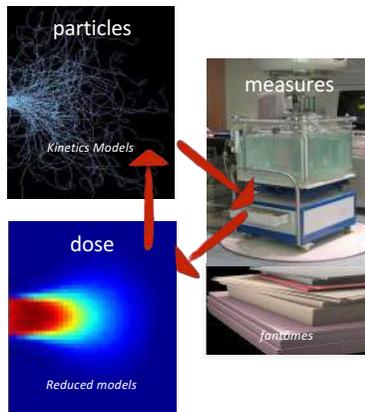


FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

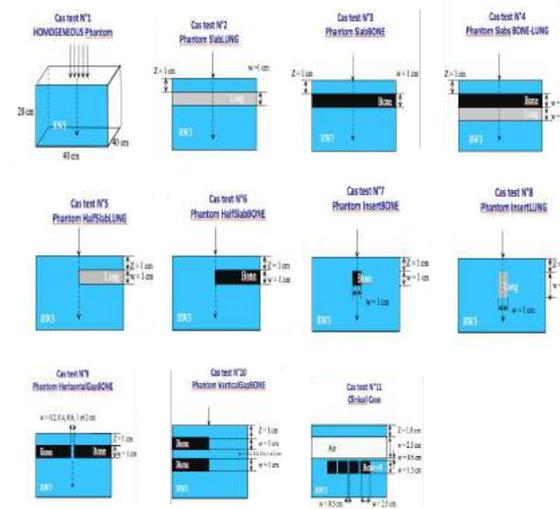
Protocole de validation

Numérique – code à code – simulations
Monte-Carlo de référence

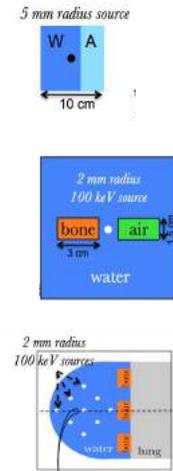
Expérimentale - mesure de dépôt de dose
dans en cuve



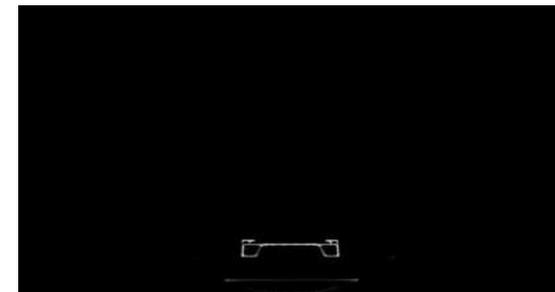
radiothérapie externe



curiethérapie

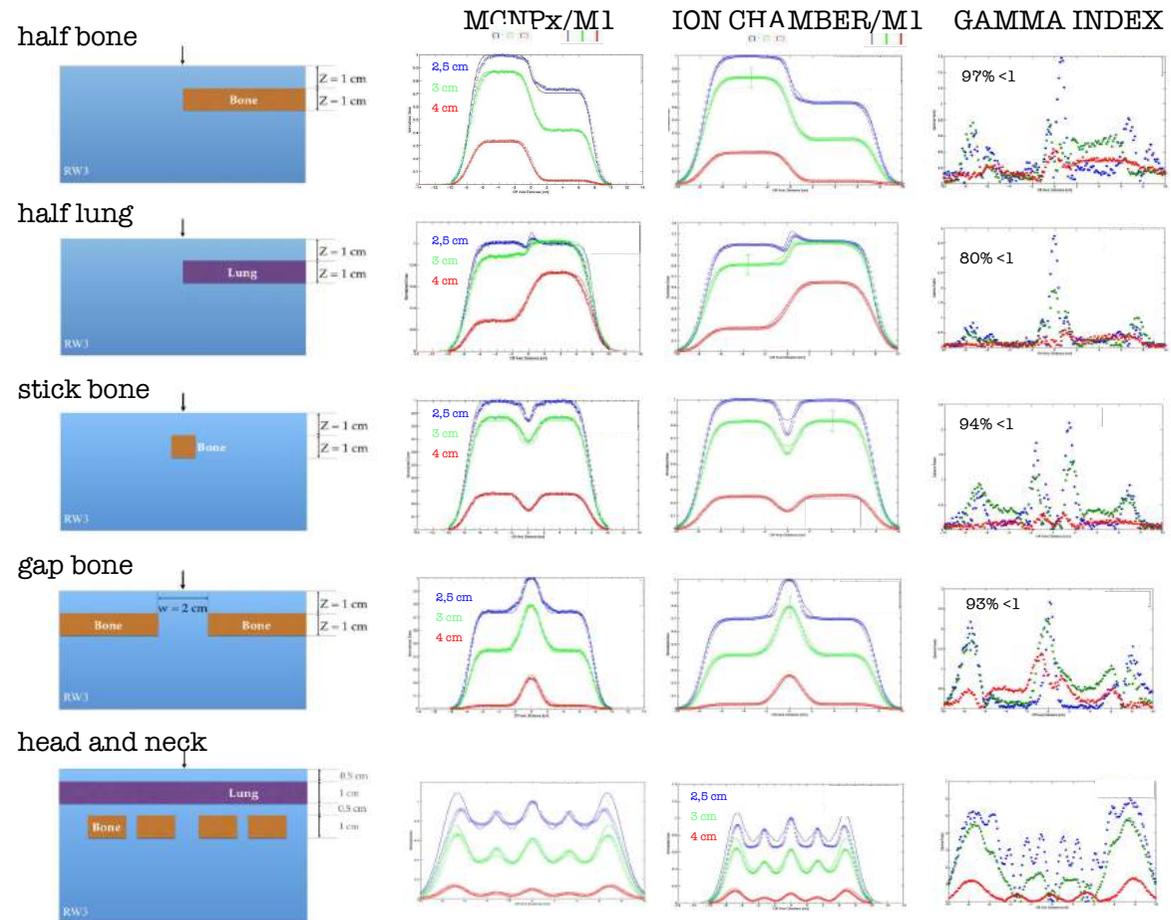
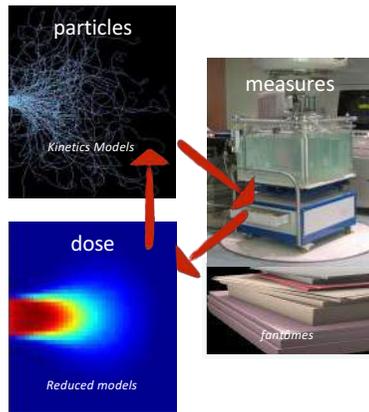


CAS ACADÉMIQUES À LA COMPLEXITÉ CROISSANTE



FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

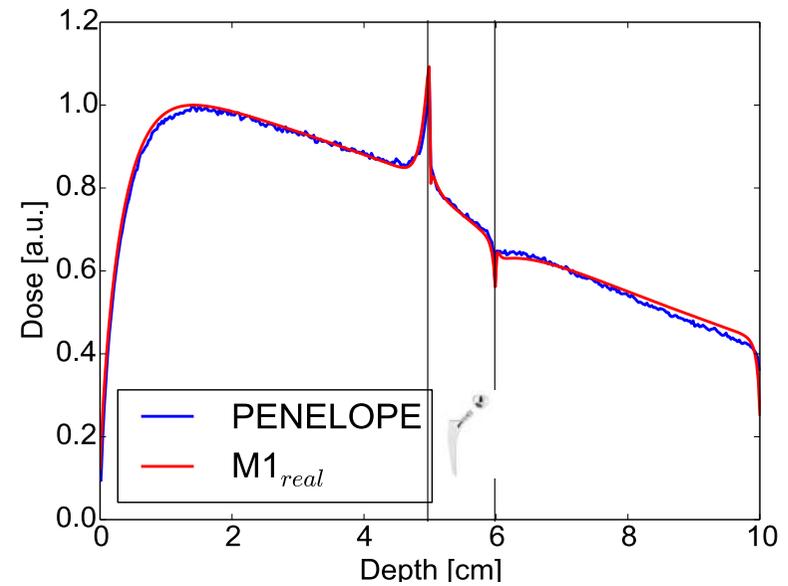
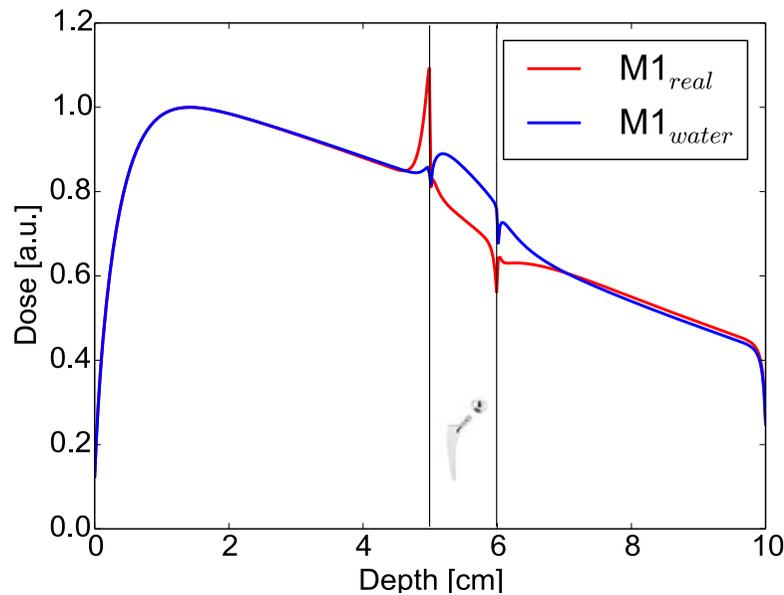
Radiothérapie externe (électrons, photons, protons)



Radiothérapie externe (électrons, photons, protons)



COMPOSITIONS DES MATÉRIEAUX - INSERTS MÉTALLIQUES Insert de Titane ($Z=22$) à $4,54 \text{ g/cm}^3$ entre 5 et 6 cm



INFLUENCE SIGNIFICATIVE DE LA PRISE EN CONSIDÉRATION DE LA COMPOSITION DU MATÉRIAU
SUR LE DÉPÔT DE DOSE AUX INTERFACES

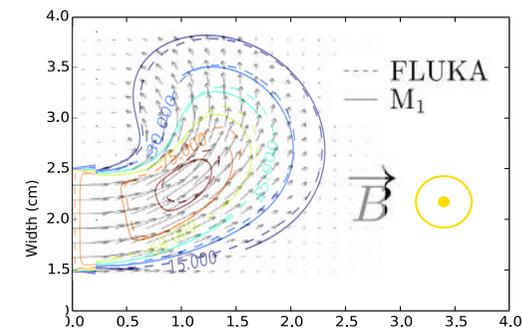
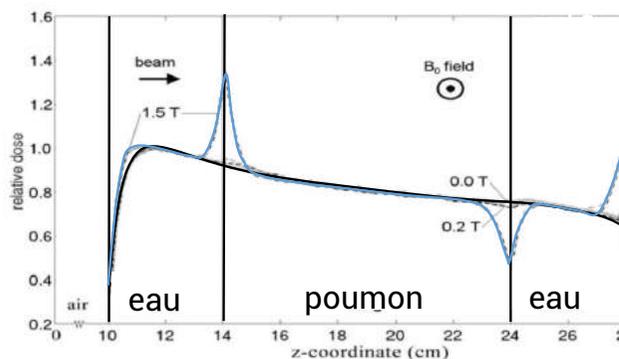
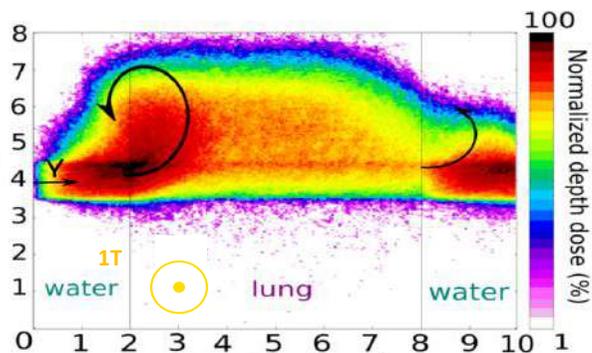
FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

Radiothérapie guidée par IRM



MODÉLISATION DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES – FORCE DE LORENTZ

$$\begin{aligned}
 -\partial_\epsilon (S_\epsilon \Psi_0) + \nabla \cdot \Psi_1 &= 0, \\
 -\partial_\epsilon (S_\epsilon \Psi_1) + \nabla \cdot \Psi_2 &= -k_1 \Psi_1 + \frac{q_e}{cp} \Psi_1 \wedge \mathbf{B}.
 \end{aligned}$$

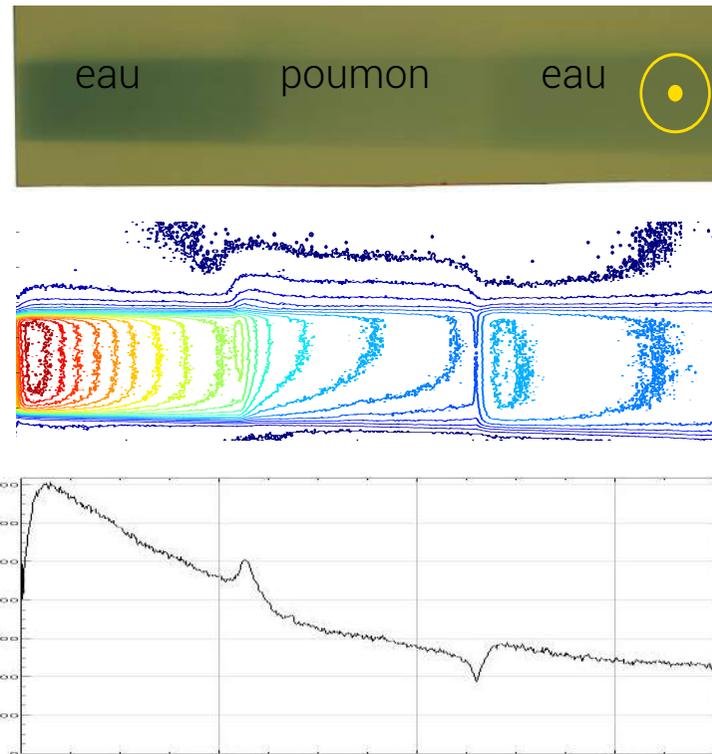


INFLUENCE SIGNIFICATIVE D'UN CHAMPS SUR LE DÉPÔT DE DOSE AUX INTERFACES

FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

Radiothérapie guidée par IRM

CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE – AVRIL 2017 – INSTITUT BERGONIÉ

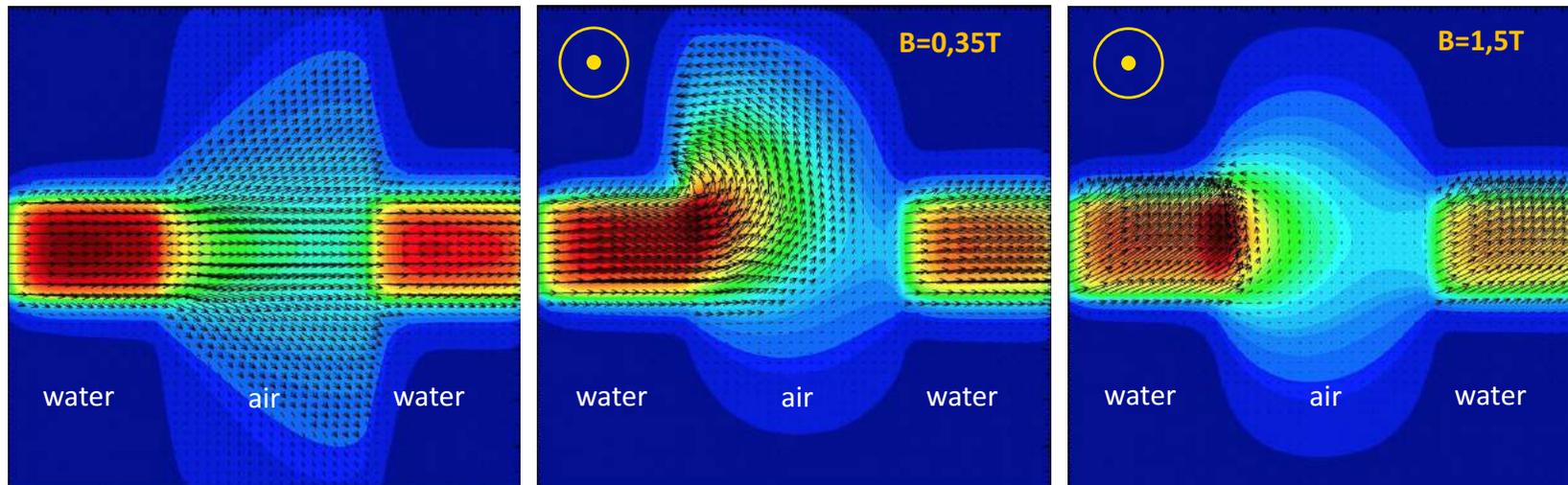


MESURES DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES AVEC UN AIMANT DE 0.87T

Radiothérapie guidée par IRM



SIMULATIONS DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES
TRAVERSÉE D'UN FAISCEAU DE PHOTONS DE 2MV – EAU/AIR/EAU – 0T, 0.35T ET 1.5T

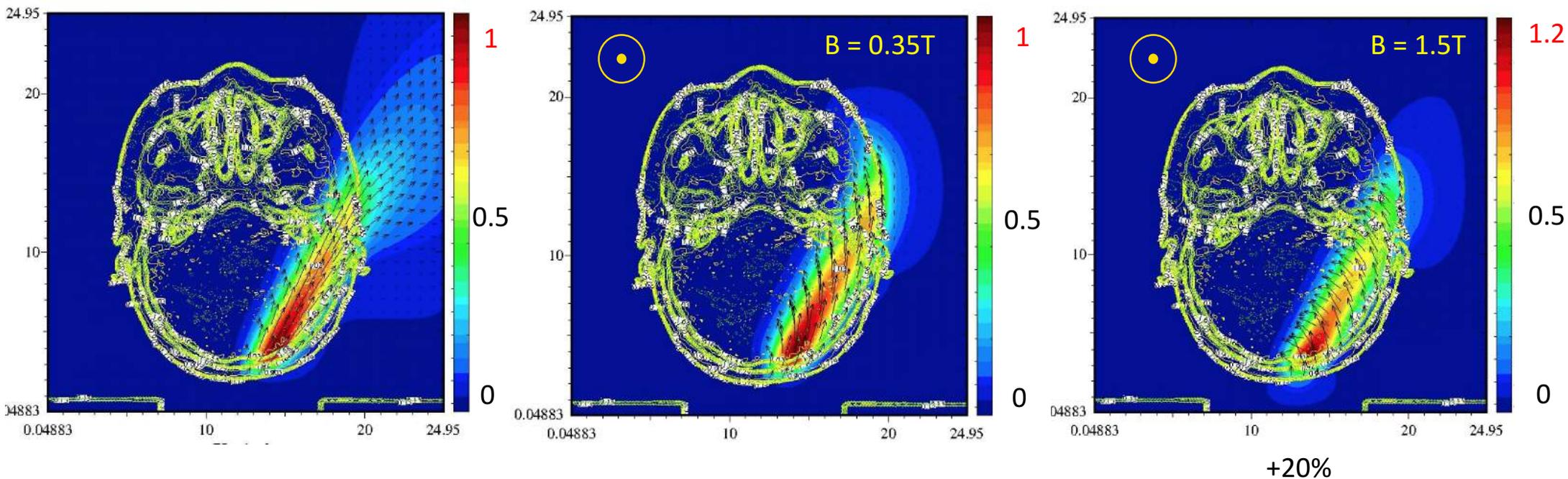


INFLUENCE SIGNIFICATIVE DES CHAMPS DE 0.35T ET 1.5T SUR LE DÉPÔT DE DOSE

Radiothérapie guidée par IRM



SIMULATIONS DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES
TRAVERSÉE D'UN FAISCEAU DE PHOTONS DE 6MV – 0T, 0.35T ET 1.5T



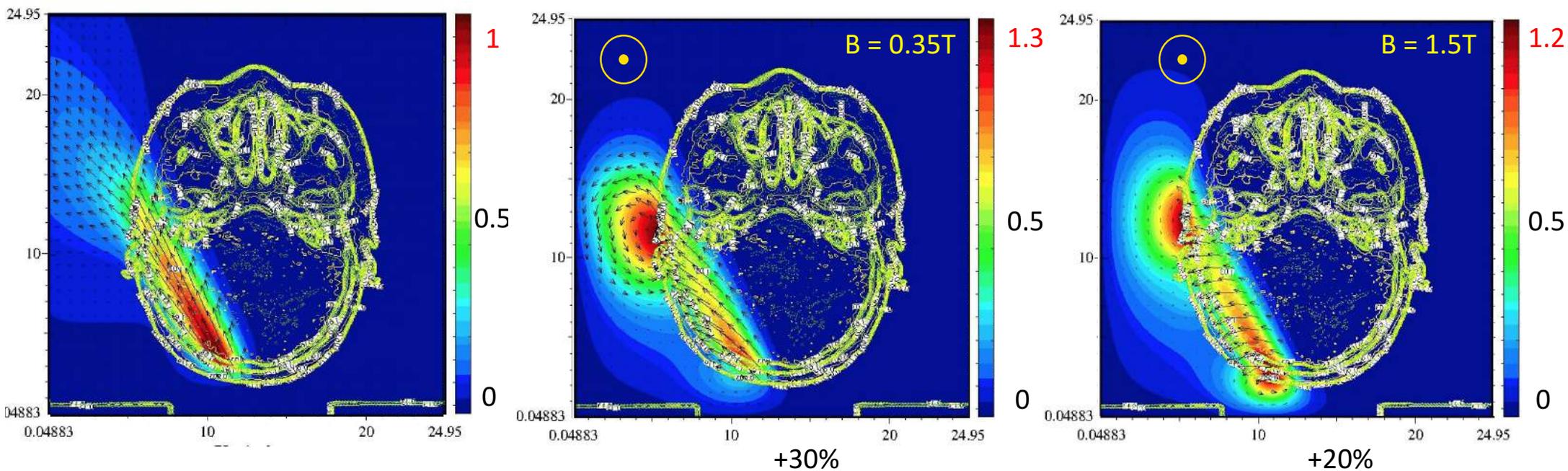
INFLUENCE SIGNIFICATIVE DES CHAMPS DE 0.35T ET 1.5T SUR LE DÉPÔT DE DOSE

Radiothérapie guidée par IRM



SIMULATIONS DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES
TRAVERSÉE D'UN FAISCEAU DE PHOTONS DE 6MV – 0T, 0.35T ET 1.5T

0T

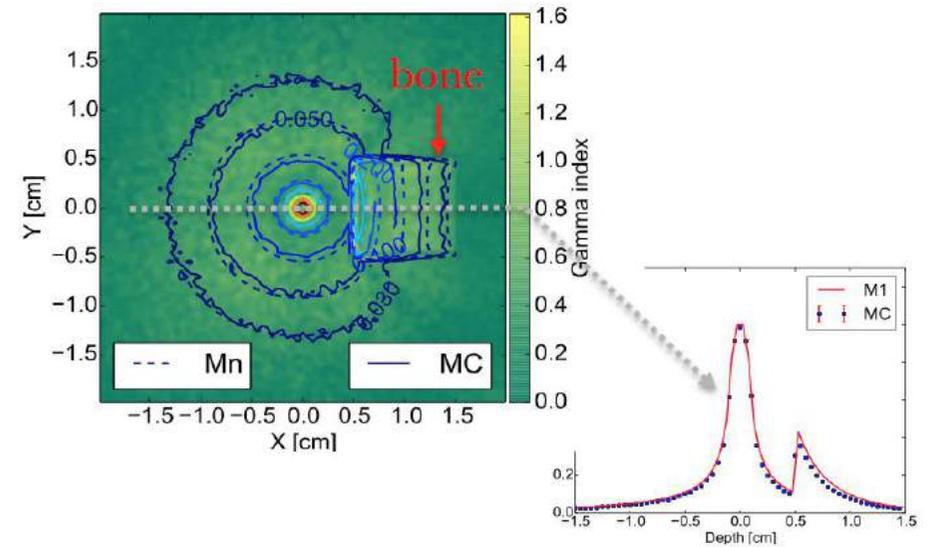
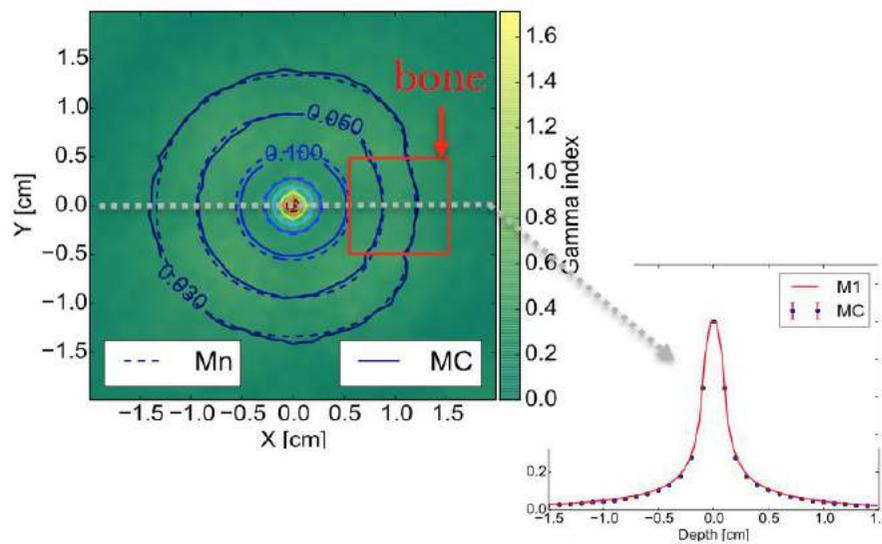


INFLUENCE SIGNIFICATIVE DES CHAMPS DE 0.35T ET 1.5T SUR LE DÉPÔT DE DOSE

Curiethérapie



EFFETS DE LA DENSITÉ ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE RECENTES RECOMMANDATIONS (TG-186) POUR CURIETHERAPIE

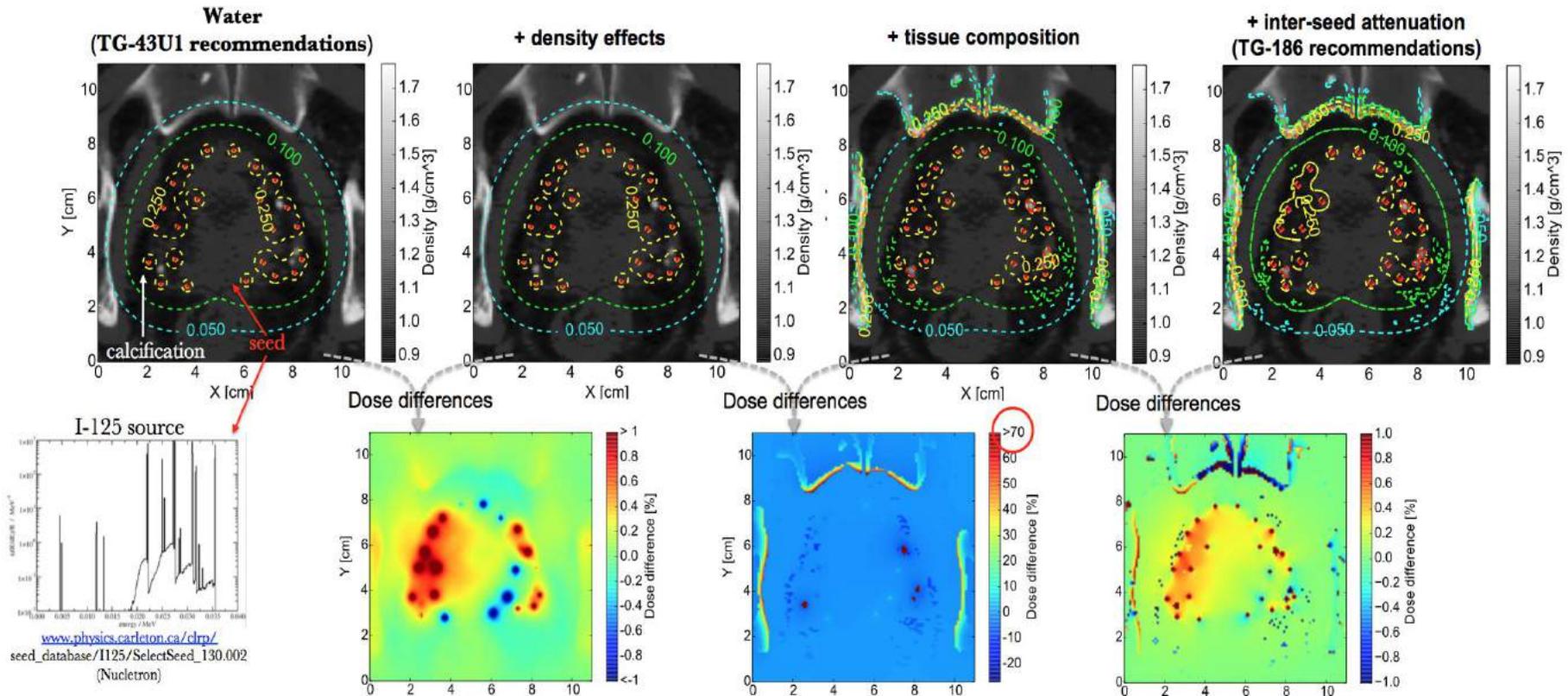


INFLUENCE PEU SIGNIFICATIVE DES EFFETS DE LA DENSITÉ
ET SIGNIFICATIVE DES EFFETS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE

FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

Curiethérapie

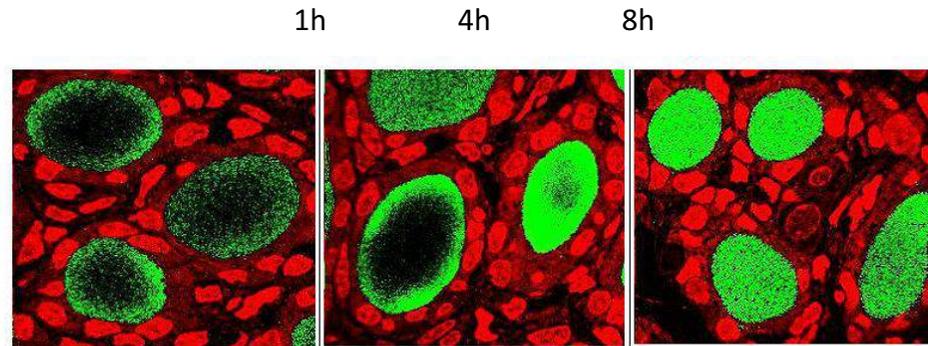
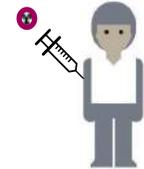
EFFETS DE LA DENSITÉ ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE RECENTES RECOMMANDATIONS (TG-186) POUR CURIETHERAPIE



INFLUENCE PEU SIGNIFICATIVE DES EFFETS DE LA DENSITÉ
ET SIGNIFICATIVE DES EFFETS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE

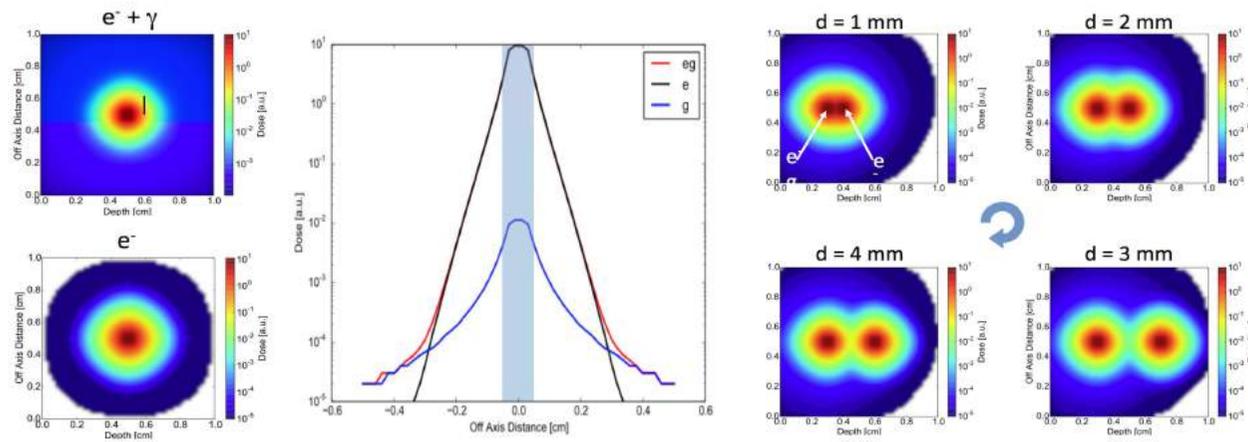
FERMETURE ENTROPIQUE – APPLICATIONS – PRÉCISION

Radiothérapie Interne Vectorisée



Christophe Champion et al

DOSIMÉTRIE CELLULAIRE



Cf présentation de Christophe Champion

MODÈLE AUX MOMENTS - FERMETURE ENTROPIQUE

MODÈLE PLUS RAPIDE QUE MONTE-CARLO (x20) MAIS NON OPTIMISÉ – ENCORE PERFECTIBLE EN TEMPS CALCUL ET OCCUPATION MÉMOIRE – SHÉMAS NUMÉRIQUES (AMR, MONTÉE EN ORDRE...)

MODÈLE PLUS PRÉCIS QUE LES MODÈLES AD-HOC SUR CERTAINES CONFIGURATIONS COMPLEXES

MODÈLE DIRECTEMENT DÉDUIT DES LBTE - PLUS APTE À ÉVOLUER POUR RÉPONDRE AUX EXIGENCES

- DES NOUVELLES INSTALLATIONS : IRM (CHAMPS MAGNÉTIQUES), ...
- DES NOUVEAUX ENJEUX : COMPOSITION PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

MODÈLE CINÉTIQUE – ANALYSE DES EFFETS PHYSIQUES COMPLEXES

MODÈLE CONTINU – DÉRIVABLE – INTÉGRABLE DANS UN PROCESSEUS D'OPTIMISATION FORMEL

MODÈLE ACADÉMIQUE QUI DOIT MAINTENANT DÉMONTRER
SON EFFICACITÉ EN ROUTINE CLINIQUE

Workshop
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
pour L'ONCOLOGIE

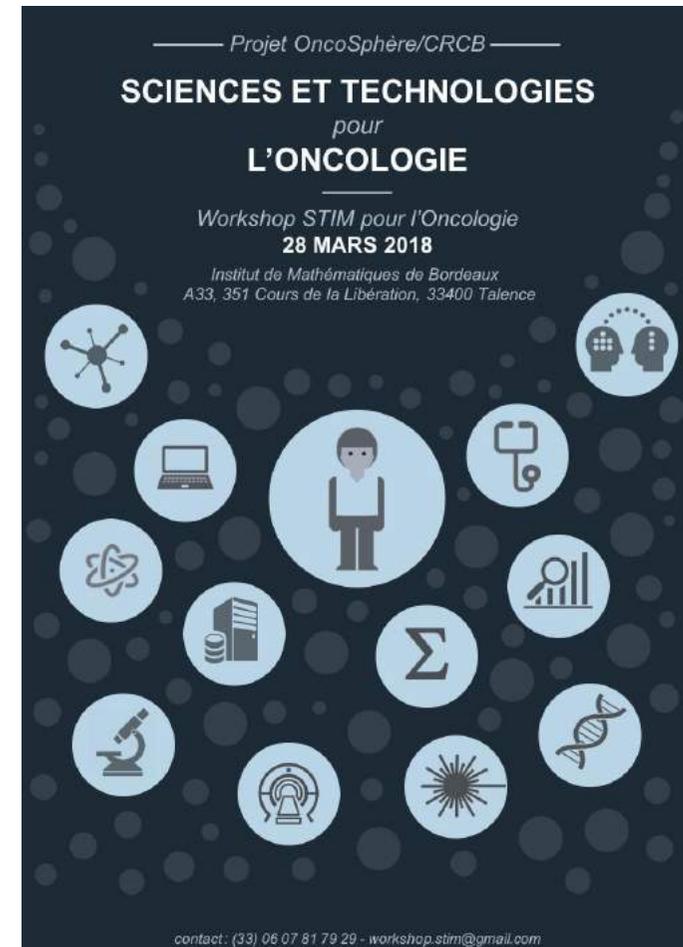
28 MARS 2018
À BORDEAUX

INSCRIPTIONS

<https://goo.gl/forms/8KVkYUMHLfFHZoxd2>

workshop.stim@gmail.com

jean-luc.feugeas@u-bordeaux.fr



Investigateurs principaux au CELIA et collaborations en France et à l'étranger

Chercheurs

- Pr Christophe Champion (Phys., UBdx)
- Dr Jean-Luc Feugeas (Math. Appli. / Phys., CEA – HDR)
- Pr Emmanuel d'Humières (Phys., UBdx), resp. du groupe IFCIA
- Dr Katarzyna Jakubowska (Phys., UBdx)

- Dr Philippe Nicolai (Phys., CEA – HDR), resp. du groupe IFCIA
- Dr Thanh-Ha Nguyen-Bui (Phys./Math. Appli., CEA – HDR)
- Dr Joao Santos (Phys., MdC UBdx – HDR)

- Mario Enrique Alcocer Avila (Physique, CNRS – PhD)
- Gabriele Birindelli (Phys., CEA – PhD)
- Julien Moreau (Phys., CNRS – PhD)
- Erwan Olivier (Phys., CNRS – PhD)
- Jonathan Page (Phys., CNRS – PhD)

Expertises Scientifiques

- Pr Vladimir Tikhonchuk (Phys., UBdx)
- Dr Bruno Dubroca (Math. Appli., CEA/LCTS – HDR)

Administratif

- Sophie Heurtebise (Dir. Admin.)

Service Technique

- Laurent Merzeau (Atelier)

Collaborations en France

• Institut Bergonié de Bordeaux

Pr Guy Kantor (Radioth.), Dr Jérôme Caron (Phys. Méd.), Sarah Belhomme (Phys. Méd.), Emilie Rich (Phys. Méd.) - *Projets IOPRA, POPRA*

• CHU (Centre Hospitalier Universitaire) de Bordeaux, INCIA

Pr Elif Hindié (Radiothérapie, Médecine Nucléaire), Clément Morgat (Phys. Méd.), Sébastien Buj (Physique médicale) - *Projet INFINITY*

• IUCT (Institut Universitaire du Cancer de Toulouse Oncopole)

Laure Vieilleville (Phys. Méd.), Régis Ferrand (Phys. Méd.), Tony Younes (PhD) - *Projet Émergence CGSO*

• CAL (Centre Antoine Lacassagne) de Nice

Catherine Dejean (Phys. Méd.)

• CENBG (Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan)

Dr Fazia Hanachi (Phys.) - *Projets IOPRA, POPRA*

• LABRI (Laboratoire bordelais de recherche en informatique)

Pr Guillaume Blin (Info.)

• LCTS (Laboratoire Des Composites Thermostructuraux)

Dr Bruno Dubroca (Math. Appli.)

• IMB (Institut de Mathématiques de Bordeaux)

Dr Raphaël Loubère (Math. Appli.), Pr Luc Mieussens (Math. Appli.), Pr Rodolphe Turpault (Math. Appli.)

• CEA (Commissariat à l'énergie atomique et

aux énergies alternatives), LIST, Dr. Cindy Le Loirec (Phys. Méd.)

Collaboration à l'Étranger

• Mc Gill Hospital - Canada

Dr Shirin Abbasi Nejad Enger (Phys. Méd.)

• Institut de Physique de Rosario - Argentine

Pr Roberto Rivarola (Phys.)

• Université de Liège – Belgique

Pr Alain Seret (Radiol.)

• Sandia National Laboratory, Albuquerque – USA

Dr Ph. Weck (Chim. Quant.)

