



# IRM-Linac



Dr Frédéric Miéville  
physicien médical SSRPM

HESAV – Bsc-S4  
25.03.2020

Frédéric Miéville, PhD | Service de radio-oncologie | 25.03.2020 | 1

## Objectifs

- Pourquoi l'IRM-Linac
- Connaître les principes physiques de base de l'IRM-Linac
- Connaître les avantages et limitations de ce système
- A quoi faut-il faire attention ?
- Futur de cette technique



Frédéric Miéville, PhD | Service de radio-oncologie | 25.03.2020 | 2

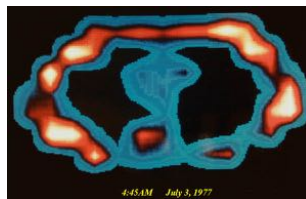
## Plan du cours

- Historique de cette technique
- Rappels sur la physique de l'IRM
- Descriptif des différents types d'IRM-Linac
- Caractéristiques d'un IRM-Linac
- Avantages et limitations
- Améliorations possibles
- Futur de cette technologie



## Historique de la radiothérapie

- **8 novembre 1895** : Découverte des rayons X par Wilhelm Conrad Röntgen
- **A partir de 1950** : Développement d'accélérateurs compacts de hautes énergies → 25 MeV (Siemens, Varian, Elekta, etc.)
- 1958 : Introduction du premier plan de traitement informatisé
- **1969** : Présentation du concept *IRM Body Scanner* par Damadian
- 1973 : 2D reconstruction (Lauterburg)
- 1974 : 3D scan Method (Mansfield)
- **1977** : Première IRM scanner du corps humain (Damadian, Minkoff & Goldsmith)



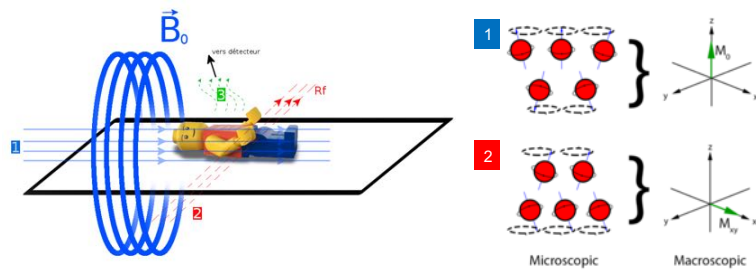
## Historique de la radiothérapie

- 1988 : Développement de l'IMRT
- 2003 : Prix Nobel revient à Paul Lauterburg et Peter Mansfield
- 2004 : Raaijmakers *et al* «*The findings of their feasibility study to integrate a 6-MV linear accelerator (linac) with an MRI unit*»
- 2007 : Prix de l'inventeur national année 2007 revient à R. Damadian
- 2014 : 1<sup>er</sup> traitement de patients avec une IRM-Cobalt (St-Louis, USA)
- 2017 : Premier patient traité avec un IRM-Linac 1.5T
- **Janvier 2020** : Premiers patients «prostate» traités à l'hôpital Riviera-Chablais (Rennaz)



## Rappel : physique de l'IRM

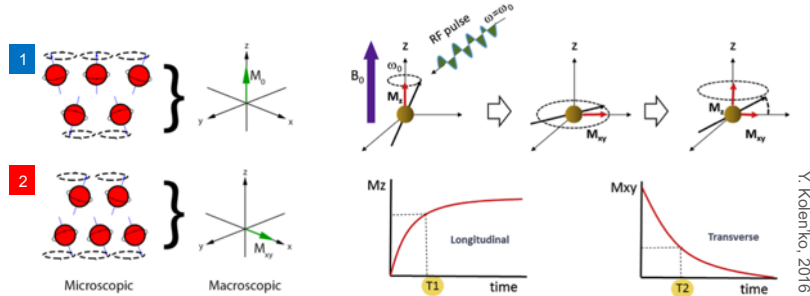
1. On place le patient dans un puissant champ magnétique afin d'orienter **les noyaux d'hydrogène tous dans le même sens**. (Le corps humain étant majoritairement composé d'eau, et l'eau majoritairement composé d'atomes d'hydrogène, ceci concerne environ 63 % des atomes de notre corps.)



2. On envoie ensuite **des impulsions magnétiques** (appelées *radiofréquences*, transversales au champ principal) qui vont détourner les atomes d'hydrogène de leur alignement.

## Rappel : physique de l'IRM

1. On place le patient dans un puissant champ magnétique afin d'orienter **les noyaux d'hydrogène tous dans le même sens**. (Le corps humain étant majoritairement composé d'eau, et l'eau majoritairement composé d'atomes d'hydrogène, **ceci concerne environ 63 % des atomes de notre corps.**)



Y. Koenko, 2016

2. On envoie ensuite **des impulsions magnétiques** (appelées *radiofréquences*, transversales au champ principal) qui vont détourner les atomes d'hydrogène de leur alignement.
3. Le changement d'orientation (relaxation) des noyaux d'hydrogène va **induire un bref courant électrique dans les capteurs de l'appareil**



https://coeur-science.eu/?d=dc&de=1--comment-fonctionne-une-irm

## Pourquoi coupler un IRM et un linac ?

*After all, as physicist Harold Johns said "if you can't see it, you can't hit it, and if you can't hit it, you can't cure it"*

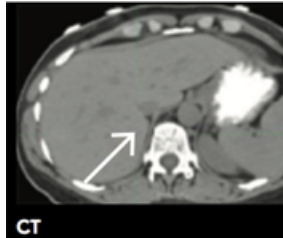


- On l'a compris avec l'introduction de l'*Image-guided radiation therapy* (IGRT) pour la vérification de la mise en place du patient
- Mais alors qu'apporte l'IRM ?
- **Avantages :**
  - Excellent **contraste** des tissus mous contrairement au CBCT
  - Enorme potentiel pour l'imagerie de **biomarqueurs** qui pourrait indiquer la réponse au traitement et donc permettre un traitement adaptatif au niveau des volumes (pas seulement du recalage...)
  - Permet une imagerie **pendant** le traitement (tracking)
  - **Pas de dose** supplémentaire dû à l'imagerie



## Pourquoi coupler un IRM et un linac ?

After all, as physicist Harold Johns said *“if you can’t see it, you can’t hit it, and if you can’t hit it, you can’t cure it”*



Froedtert & the Medical College of Wisconsin, USA for Elekta



## Pourquoi coupler un IRM et un linac ?

After all, as physicist Harold Johns said *“if you can’t see it, you can’t hit it, and if you can’t hit it, you can’t cure it”*



Froedtert & the Medical College of Wisconsin, USA for Elekta

*“This lesion was invisible on CT or contrast-enhanced CT (IV CT) but it is visible on an MR image— without the use of contrast agents. We are now able to see what we treat as we treat it”*



## Pourquoi coupler un IRM et un linac ?

After all, as physicist Harold Johns said *"if you can't see it, you can't hit it, and if you can't hit it, you can't cure it"*



- On l'a compris avec l'introduction de l'*Image-guided radiation therapy delivery* (IGRT-D) pour la vérification de la mise en place du patient
- Mais alors qu'apporte l'IRM ?

• A **REVIEW ARTICLE**  
**The future of image-guided radiotherapy will be MR guided**

JULIANNE M POLLARD, PhD, ZHIFEI WEN, PhD, RAMASWAMY SADAGOPAN, MS, JIHONG WANG, PhD  
 and GEOFFREY S IBBOTT, PhD

UT MD Anderson Cancer Center, Houston, TX, USA

- Permet une imagerie pendant le traitement (tracking)
- Pas de dose supplémentaire dû à l'imagerie



## Pourquoi coupler un IRM et un linac ?

- Tracking (rappel) :
  - La machine suit (track) la tumeur en temps réel

P.J. Keall, 2014



- Avantage : les marges peuvent être réduites sans impacter le traitement
- Prérequis : Il faut être capable de voir la tumeur... en temps réel !
  - D'où l'importance d'une bonne imagerie



## IRM-RT actuellement sur le marché

• Autres systèmes:

MRgRT system	Radiation	Magnet field		
		Configuration	Orientation	Strength
ViewRay MRIdian Cobalt	Cobalt-60*	split superconducting close bore	Perpendicular	0.35 T
ViewRay MRIdian Linac	6 MV	split superconducting close bore	Perpendicular	0.35 T
MagnetTx Aurora RT	6 MV	superconducting rotating open bore	Parallel	0.5 T
Australian MRI-Linac	6 MV	superconducting open bore	Parallel/ Perpendicular	1.0 T
Elekta Unity	7 MV	superconducting close bore	Perpendicular	1.5 T

Mauvaise qualité d'image

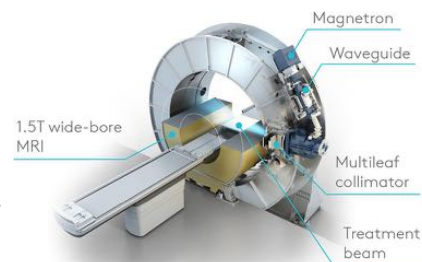
\*Pourquoi une source radioactive plutôt qu'un Linac ?



## IRM-Linac Unity (Elekta)

• **Caractéristiques principales:**

- Elekta Unity (inventé à UMC Utrecht, Pays-Bas)
- IRM 1.5T couplé à un Linac
- 7MV FFF
- SAD = 143.5 cm
- Débit 425 MU/min
- Le gantry à une rotation continue
- Vitesse de rotation 6 tr/min
- Imagerie MV (SPD = 265 cm)



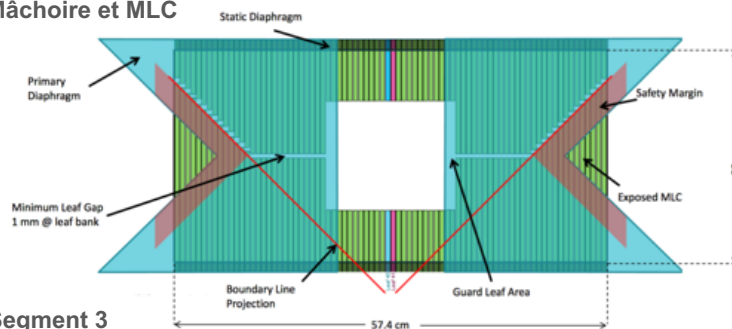
• **Structure**

- Acier inoxydable, composé de 3 segments



## IRM-Linac Unity (Elekta)

### • Mâchoire et MLC



### • Segment 3

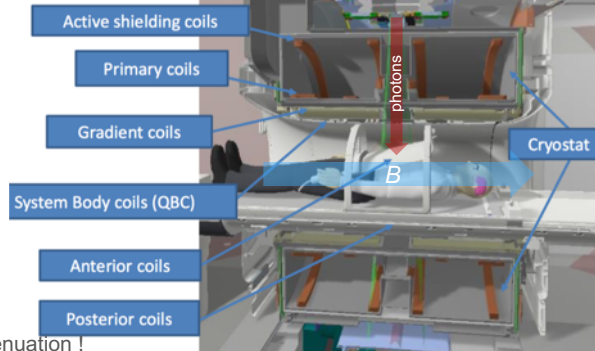
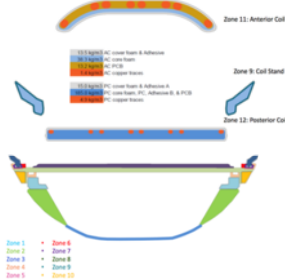
- MLC 160 (largeur 7.2mm@iso)
- Pas de rotation de collimateur
- Pas de champs lumineux
- Collimateur primaire rectangulaire
- Vitesse max 60 mm/s pour lames et mâchoires
- Transmission max < 0.5%



## IRM-Linac Unity (Elekta)

### • IRM

- Diamètre du Bore 70 cm
- Champ statique  $B_0 = 1.5$  T
- Aimants supraconducteurs
- Bobine de gradients
- Bobine ant/post



- Table : jusqu'à 20 % d'atténuation !



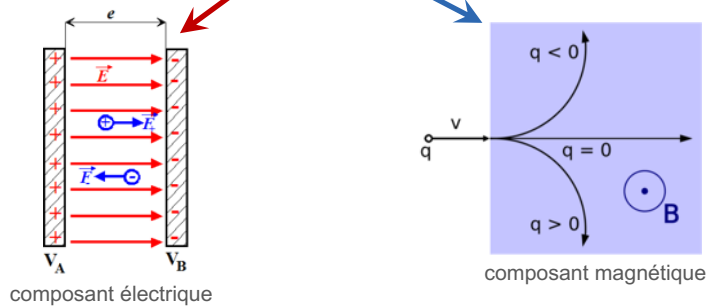


## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • Force de Lorentz (rappel):

- La force de Lorentz est la force que subit une particule **chargée** dans un champ **électromagnétique**

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



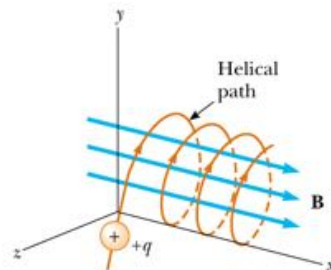
## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • Exemple si $E = 0$

- La particule chargée subit l'effet du champ **magnétique**
- Si la particule a une vitesse perpendiculaire au champ magnétique, elle aura une trajectoire en forme de **cercle**
- Si la particule a une vitesse avec une composante parallèle au champ magnétique, elle aura une trajectoire en **hélice**

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\text{Rayon} \sim \frac{m \cdot v_{\perp}}{B}$$

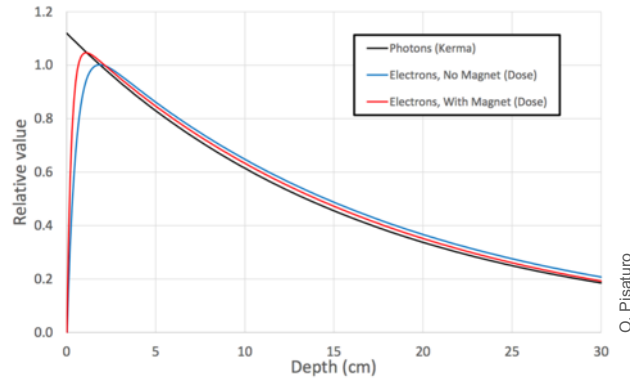


- Donc les électrons vont être **influencé par la force de Lorentz !**



## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • Rendements en profondeur



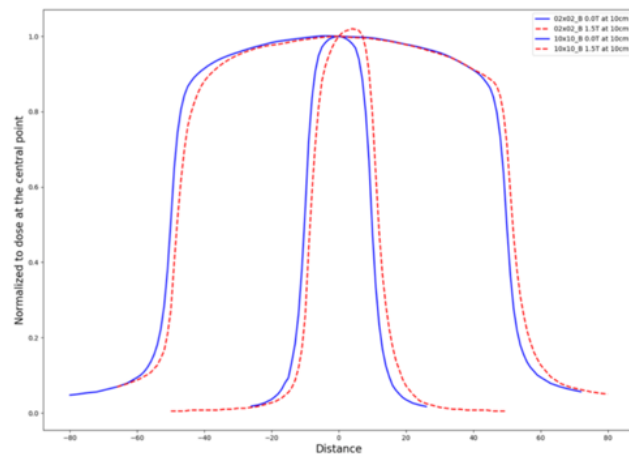
O. Pisaturo

- Les photons sont insensibles au champ magnétique... mais pas les électrons !
- La **dose max augmente**
- La profondeur du maximum diminue, c'est-à-dire que la zone de **build-up** diminue)



## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • Profils de dose transverses



O. Pisaturo

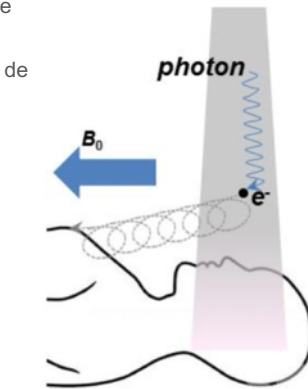
- Profil asymétrique (shift ~1.5 mm @50%)



## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • *Spiraling contaminant electrons (SCE)*

- Un électron produit dans l'air et ayant un vitesse avec une composant latérale peut **spiraler**
- Cette contamination électronique peut déposer de la dose à la **peau** du patient en **dehors** du champ



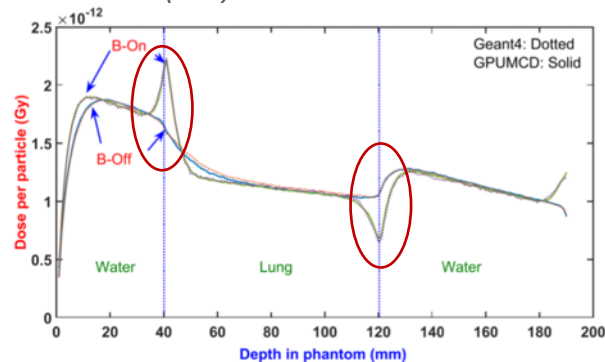
Hackett et al. (2018) Phys. Med. Biol. 63 (9)



Frédéric Miéville, PhD | Service de radio-oncologie | 25.03.2020 | 21

## IRM-Linac : effet du champ magnétique sur la distribution de dose

### • *Electron return effect (ERE)*



- Quand un électron passe d'un milieu vers un milieu de densité plus faible, il subit un effet de retour et peut ré-entrer dans le premier milieu
- **Hot spot** (surdosage) quand on passe vers un milieu de densité plus faible
- **Cold spot** (sous-dosage) quand on passe vers un milieu de densité plus élevée



Frédéric Miéville, PhD | Service de radio-oncologie | 25.03.2020 | 22

## Difficultés : dosimétrie

- La réponse des chambres de ionisation varie notamment avec :

- la force du champs magnétique
- l'orientation
- les gaps d'air
- etc.

- Détecteur semi-conducteur (diode)

- la force du champs magnétique
- l'orientation
- il est possible d'utiliser des diodes blindées

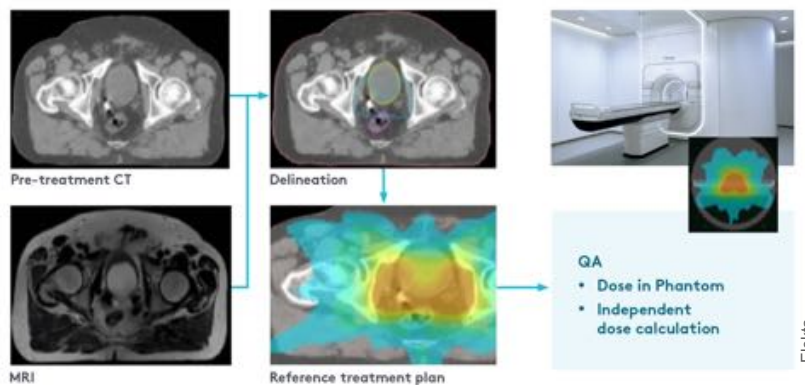
- Les films et les scintillateurs plastiques

- sont aussi influencé par le champ magnétique

➤ La dosimétrie en présence d'un champ magnétique est **critique** !

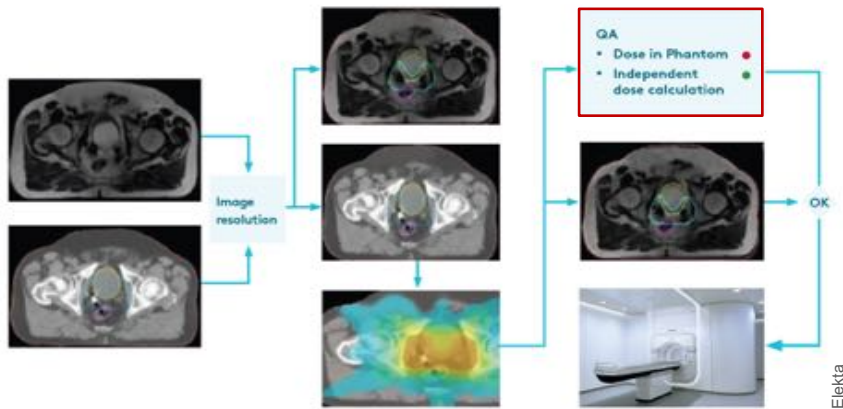


## Workflow : offline pretreatment planning



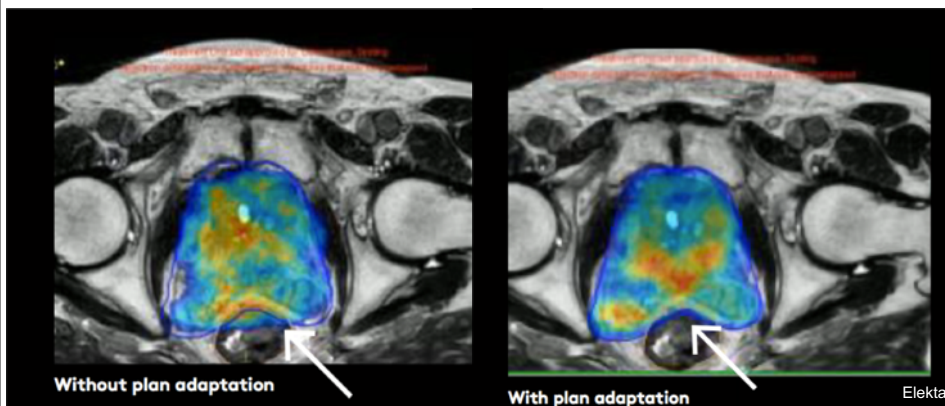
- Contourage à l'aide du CT et de l'IRM
- Calcul de la dosimétrie avec la méthode Monte Carlo (TPS Monaco)

## Workflow : Plan adaptatif en temps réel



- **Adapt to shape workflow** : la dose est déformée pour correspondre à l'anatomie du jour du patient
- Le positionnement est contrôlé durant le traitement par l'IRM

## A la console: Plan adaptatif en temps réel



- **Planning adaptatif** en temps réel (directement à la console de la machine)
  - Fusion rigide (position),
  - fusion déformable (reshaping),
  - calcul de la dose et estimation de la dose totale et validation du médecin et
  - traitement

## Pendant traitement : Tracking en temps réel



- Images en temps réel avec le faisceau de traitement ON et gantry en rotation
- Images dans les 3 plans @ 5 images/s
- Permet de réduire les marges avec une **excellente confiance** !



## Treatment Planning System (TPS) et QA

- **Quel algorithme ?**
  - Actuellement aucun algorithme *Model-based* n'est capable de modéliser la physique complexe de l'IRM (*Spiraling contaminant electrons, electron return effect, etc.*)
  - Seul Monte Carlo permet de faire un calcul correct
- **Contrôle qualité**
  - Conceptuellement, il faut faire le QA du linac (dose, mécanique, etc.)
  - Conceptuellement, il faut faire le QA de l'IRM (qualité d'image)
  - Il faut que l'isocentre du linac corresponde à celui de l'IRM
  - Les tests à faire restent encore à être clairement déterminés (actuellement pas de recommandation suisse)



## Limitations et challenges

- **Intégration** de l'IRM et du Linac
- **Impact de l'IRM → le Linac**
  - Génération du faisceau, pénétration du faisceau, diffusé du faisceau à travers l'IRM
  - Impact de la force de Lorentz sur les électrons secondaires
  - etc.
- **Impact du Linac → l'IRM**
  - Homogénéité du champs magnétique (pas de VMAT actuellement !)
  - Interférence avec la radiofréquence
- Conception d'un nouveau workflow (quels patients, médecins à la console)
- Conception d'une nouvelle salle (détecteur métaux, sécurité, etc.)
- Conception de nouveaux QA (quoi contrôler, quelle fréquence, etc.)
- Etc.

## Sécurités : IRM ET Linac

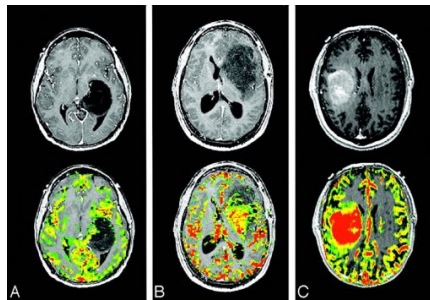
- Dangers des radiations
- Dangers liés au champ magnétique
- Quench de l'IRM



## L'IRM fonctionnel : le futur ?

- **fMRI = functional magnetic resonance imaging**

- Avec l'fMRI, on a l'imagerie structurelle mais **également fonctionnelle** !
- Permet une évaluation à un stage précoce, pendant le traitement et de façon fréquente de la réponse tumorale
- Permet également d'évaluer la toxicité aux tissus sains
- fMRI ouvre la porte aux **vrais** traitements individualisés et aux stratégies adaptatives



## Résumé

- L'IRM-Linac offre une qualité d'image **exceptionnelle** et un énorme potentiel pour le futur
- Permet de faire un traitement **adapté à la forme** de tumeur
- Beaucoup de **nouveaux effets physiques** à prendre en compte
- Algorithme **Monte Carlo** obligatoire !
- Pas de traitement VMAT actuellement (car perturbe le champs magnétique)
- **Workflow** entièrement à revoir
- Attention à la sécurité !
- L'IRM-Linac a le potentiel de faire un traitement adapté à la réponse **fonctionnelle** de la tumeur