



# LA PROTONTHERAPIE

## L'expérience du CPO



Sabine Delacroix/ Physicienne CPO IC



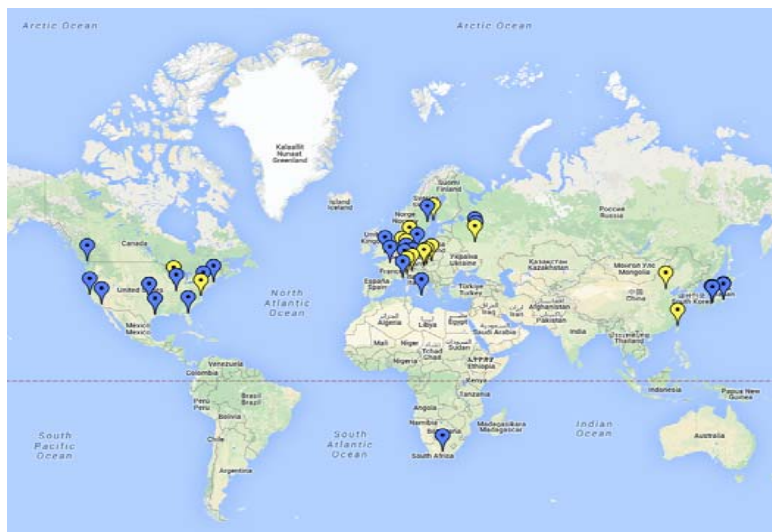
# SOMMAIRE

- La protonthérapie dans le monde
- Intérêt des protons
- Indications cliniques
- Présentation du CPO
- Prise en charge du patient
- La radioprotection du site
- Démarche qualité
- Perspectives





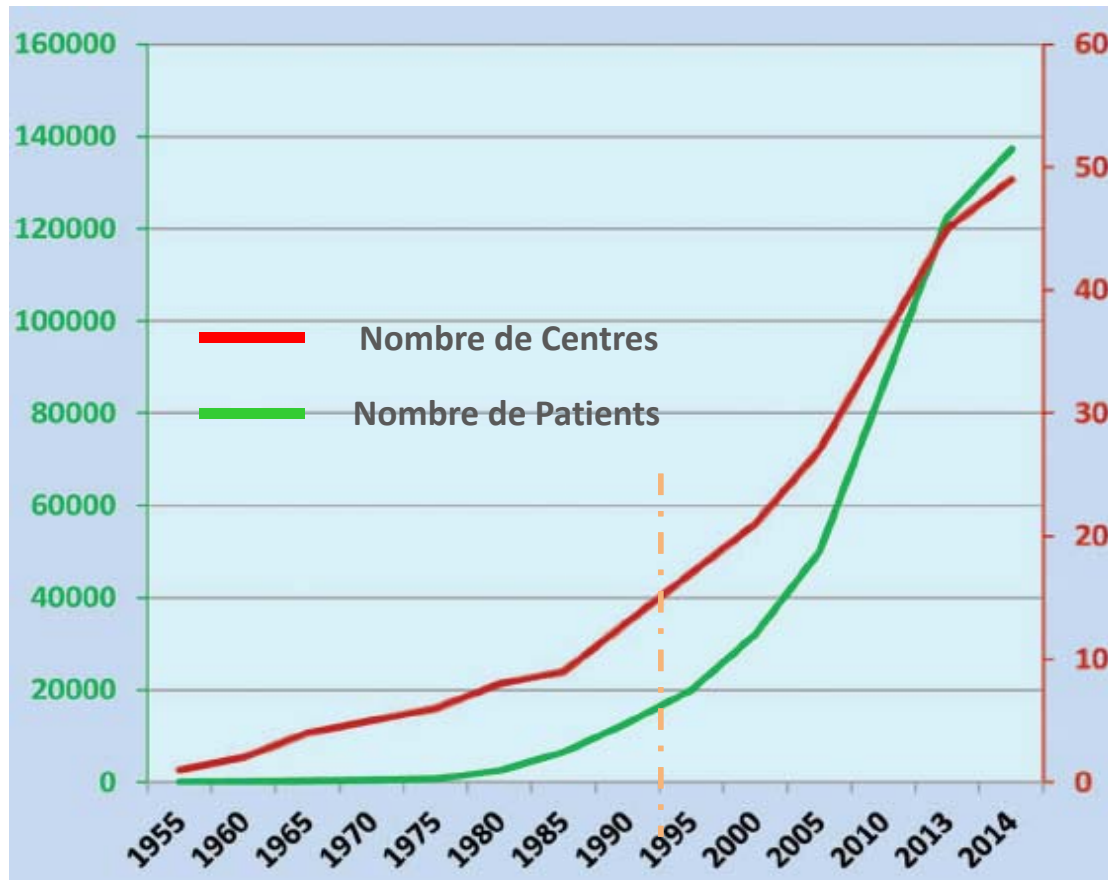
## Parc mondial des installations



**118 200 PATIENTS TRAITES PAR PROTONS FIN 2014**

Sites	Opérationnels	En cours d'installation	En projet	Total
<b>Monde hors Europe</b>	<b>34</b>	<b>25</b>	<b>9</b>	<b>68</b>
Canada	1			1
Etats-Unis	17	14	3	34
Argentine			1	1
Russie	3	1	1	5
Japon	9	3	1	13
Chine	2	1	1	4
Corée du Sud	1	2		3
Taiwan		2	1	3
Inde		1	1	2
Afrique du Sud	1			1
Arabie Saoudite		1		1
<b>Europe hors France</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>25</b>
Allemagne	5			5
Autriche		1		1
Danemark			1	1
Grande-Bretagne	1		2	3
Hollande		2	2	4
Italie	3			3
Pologne	1	1		2
République tchèque	1			1
Slovaquie			1	1
Slovénie		1		1
Suède	1			1
Suisse	1		1	2
<b>France</b>	<b>2</b>		<b>1</b>	<b>3</b>
IC-Orsay	1			1
CAL-Nice	1			1
CFB-Caen			1	1
<b>Total général</b>	<b>49</b>	<b>30</b>	<b>17</b>	<b>96</b>



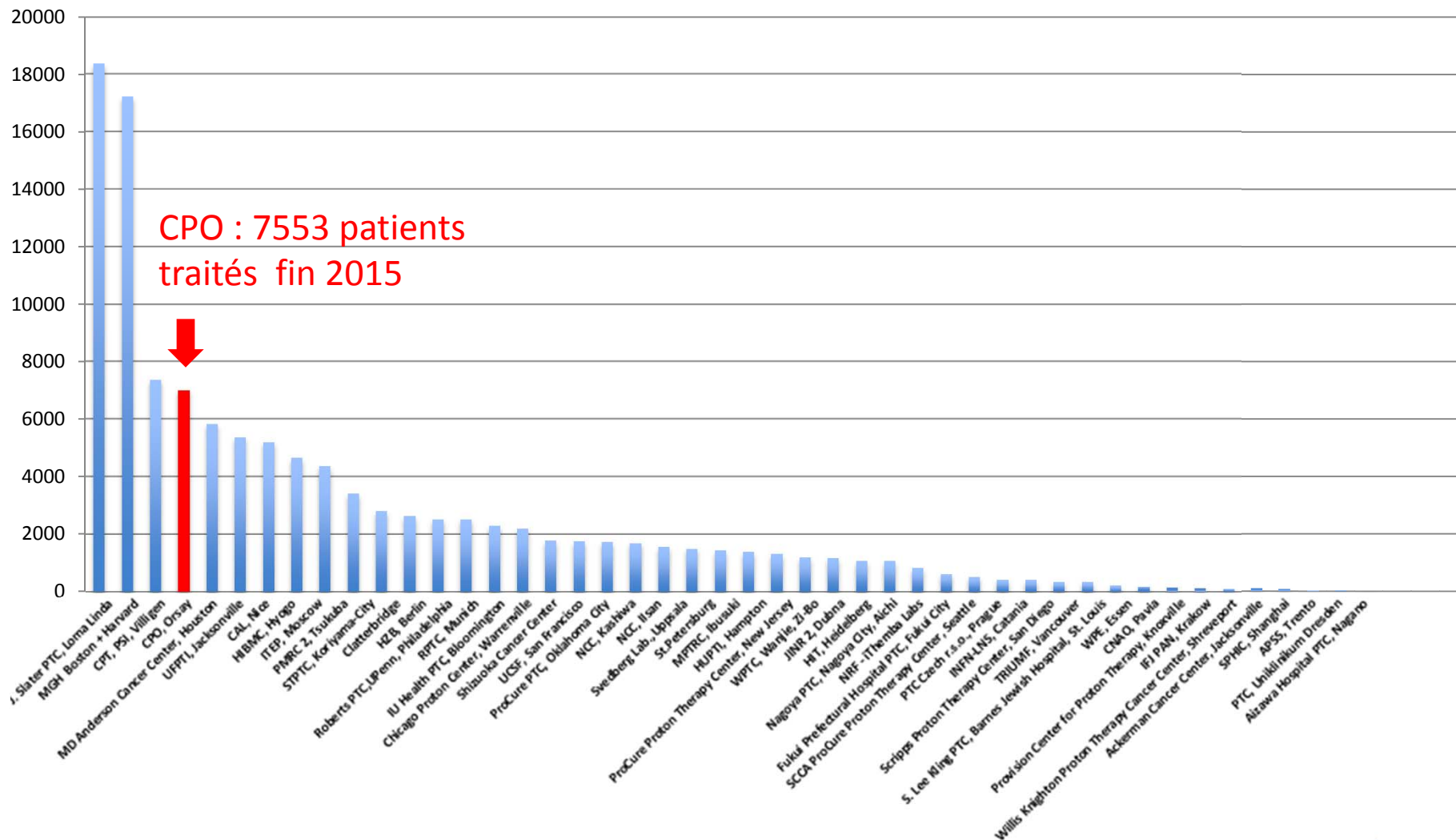


## Evolution du nombre de centres de protonthérapie

Jermann (2015), Int J Particle Therapy



# Nombre de patients traités par site



# La protonthérapie au niveau national



Juin 1991: premier traitement à Nice/ Cyclotron

Septembre 1991: premier traitement à Orsay / Synchrocyclotron IN2P3

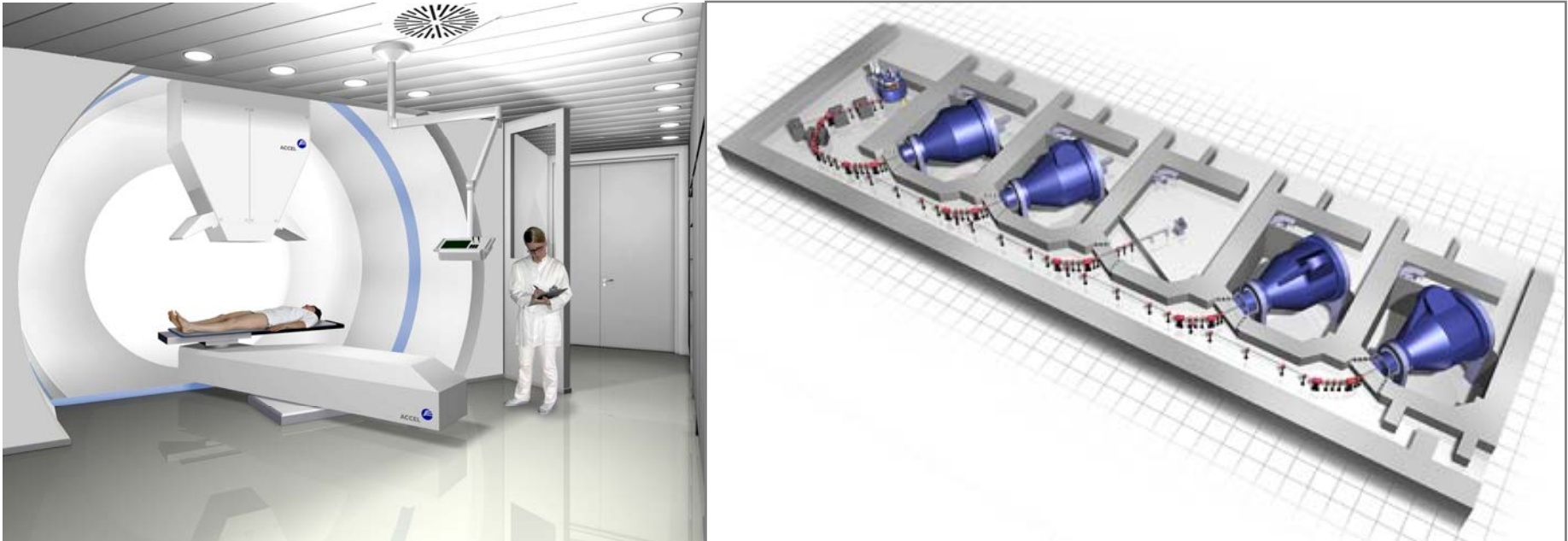
2010: premier traitement avec cyclotron PROTEUS PLUS IBA 230 MeV

2016: premier traitement prévu avec cyclotron PROTEUS ONE IBA



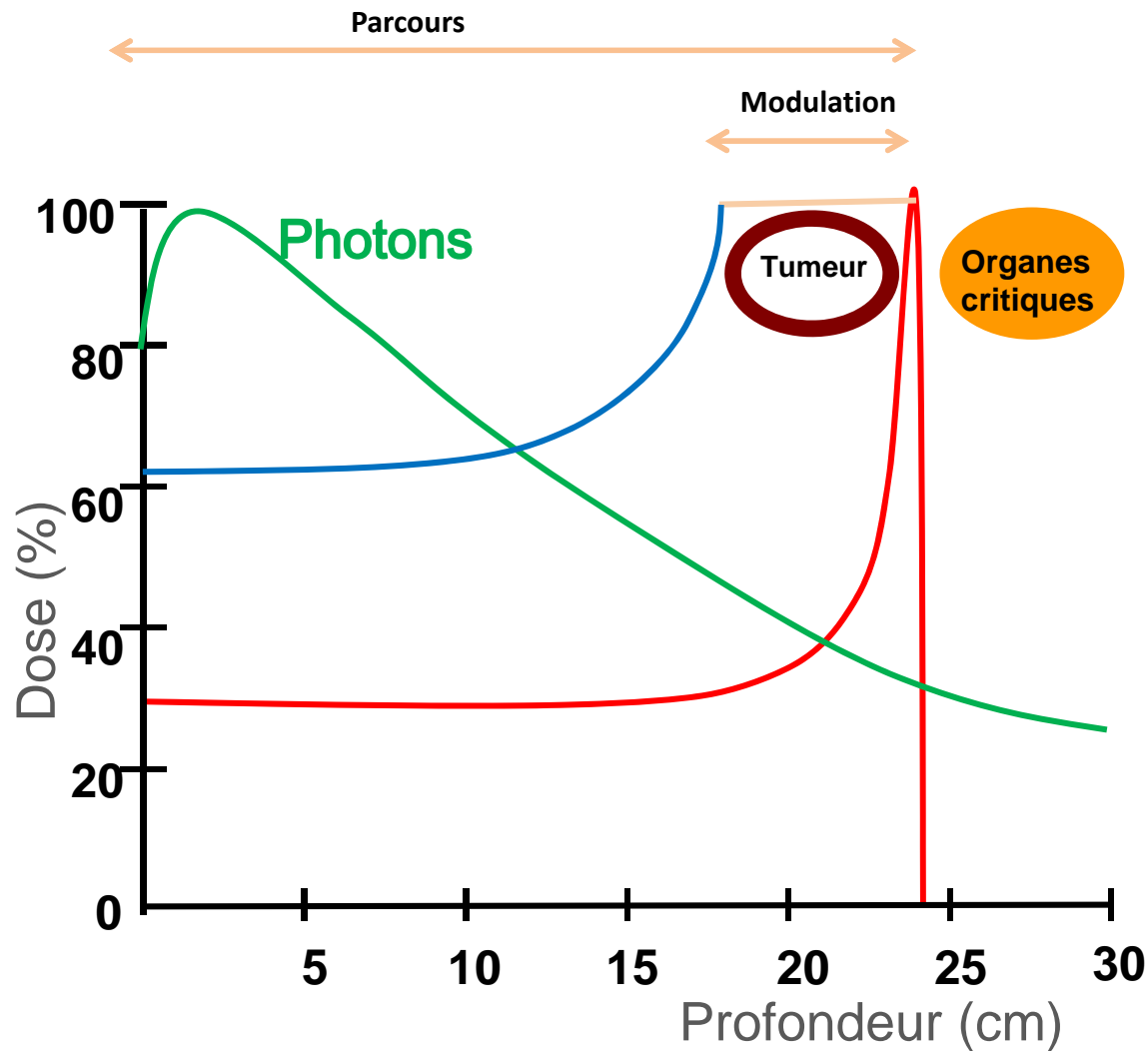


## Centre de protonthérapie type

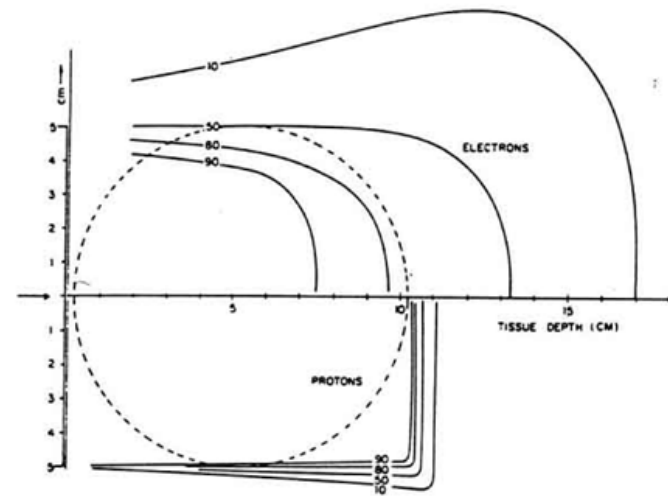


2 à 3 bras isocentriques  
1 ligne fixe ophtalmologique  
1 ligne expérimentale

# Avantages physiques des protons

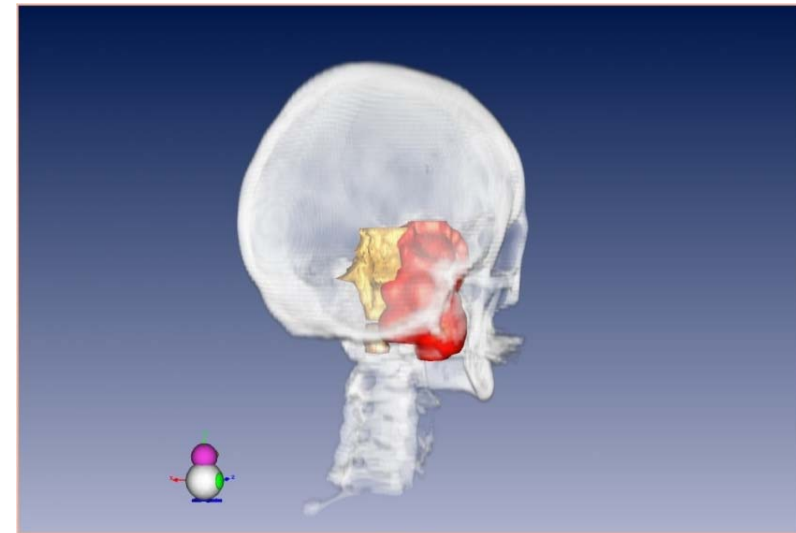
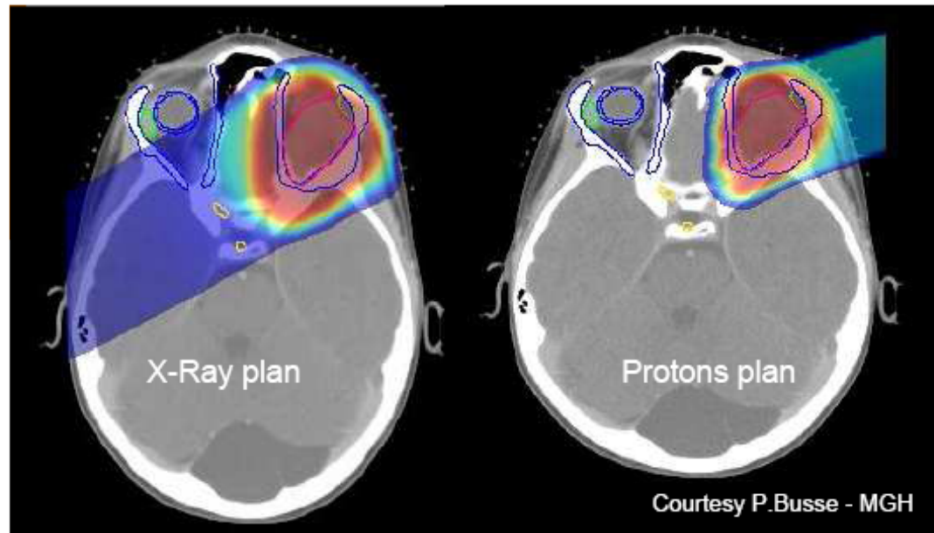


- Parcours fixe
- Gradient de dose en fin de parcours
- Rapport Dentrée/Dmax
- Faibles pénombres





# Avantages physiques de la protonthérapie



Parcours fixe:

- Protection des OAR situés derrière le volume cible

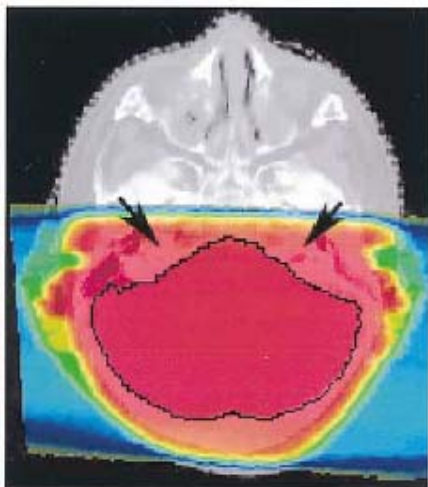
Faibles pénombres latérales et distale:

- Protection des OAR adjacents au volume cible

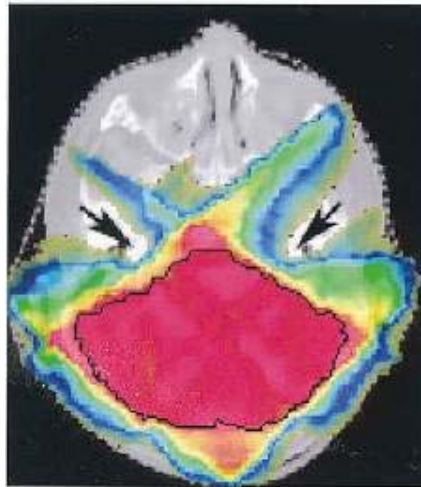
- Meilleure précision de l'irradiation et épargne des organes sains
  - Réduction des faibles doses en dehors du volume cible

# Bénéfice thérapeutique de la protonthérapie

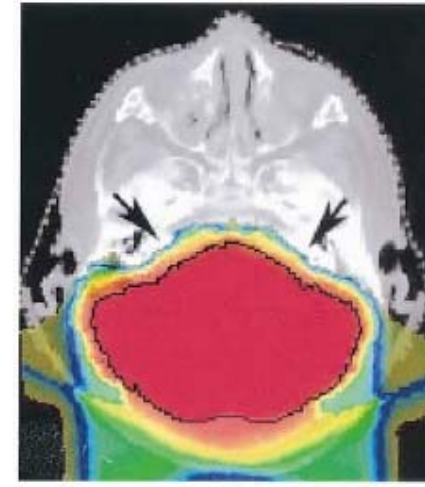
- Moindre toxicité à dose égale
- Possibilité d'escalade de dose à toxicité égale, dans les tumeurs « radio-résistantes »
- Réduction du risque de cancer radio-induit chez les enfants et les jeunes adultes



**Radiothérapie  
Conventionnelle**



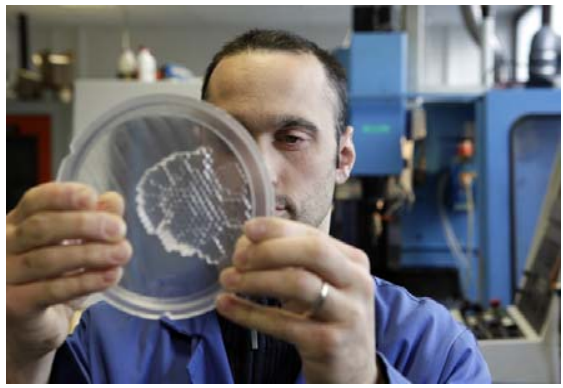
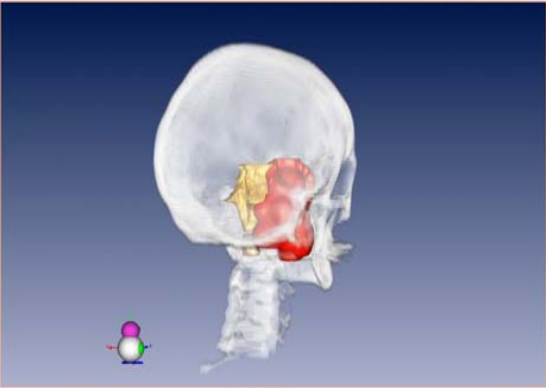
**IMRT**



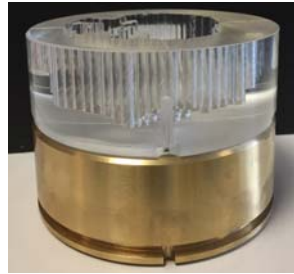
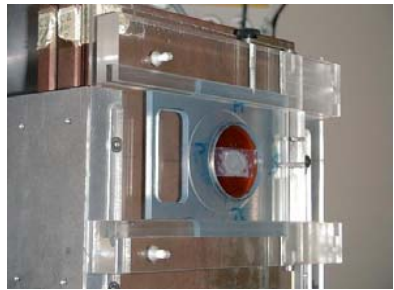
**Protonthérapie**

# Mise en forme du faisceau

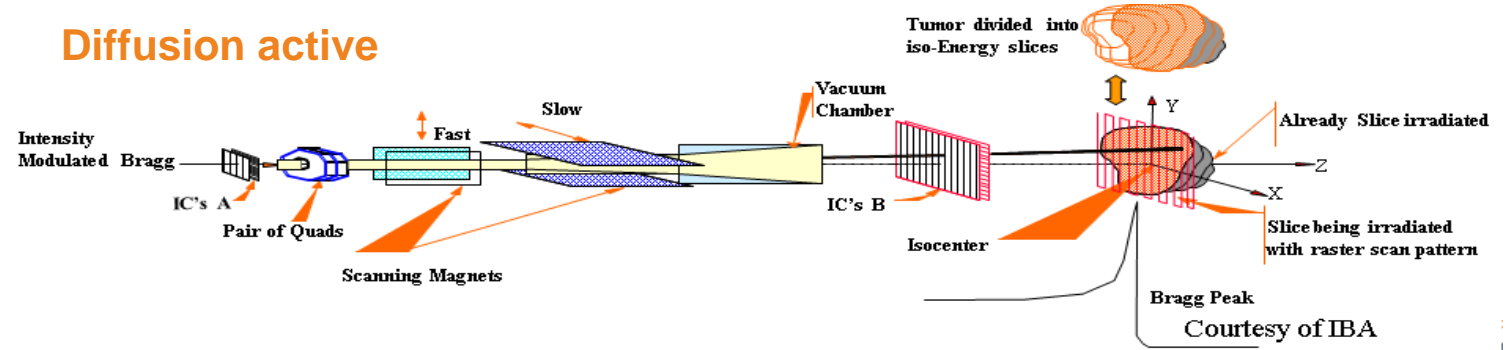
- Diamètre 0.5 cm
- Energie fixe
- Dépôt d'énergie sur quelques mm en profondeur



## Diffusion passive

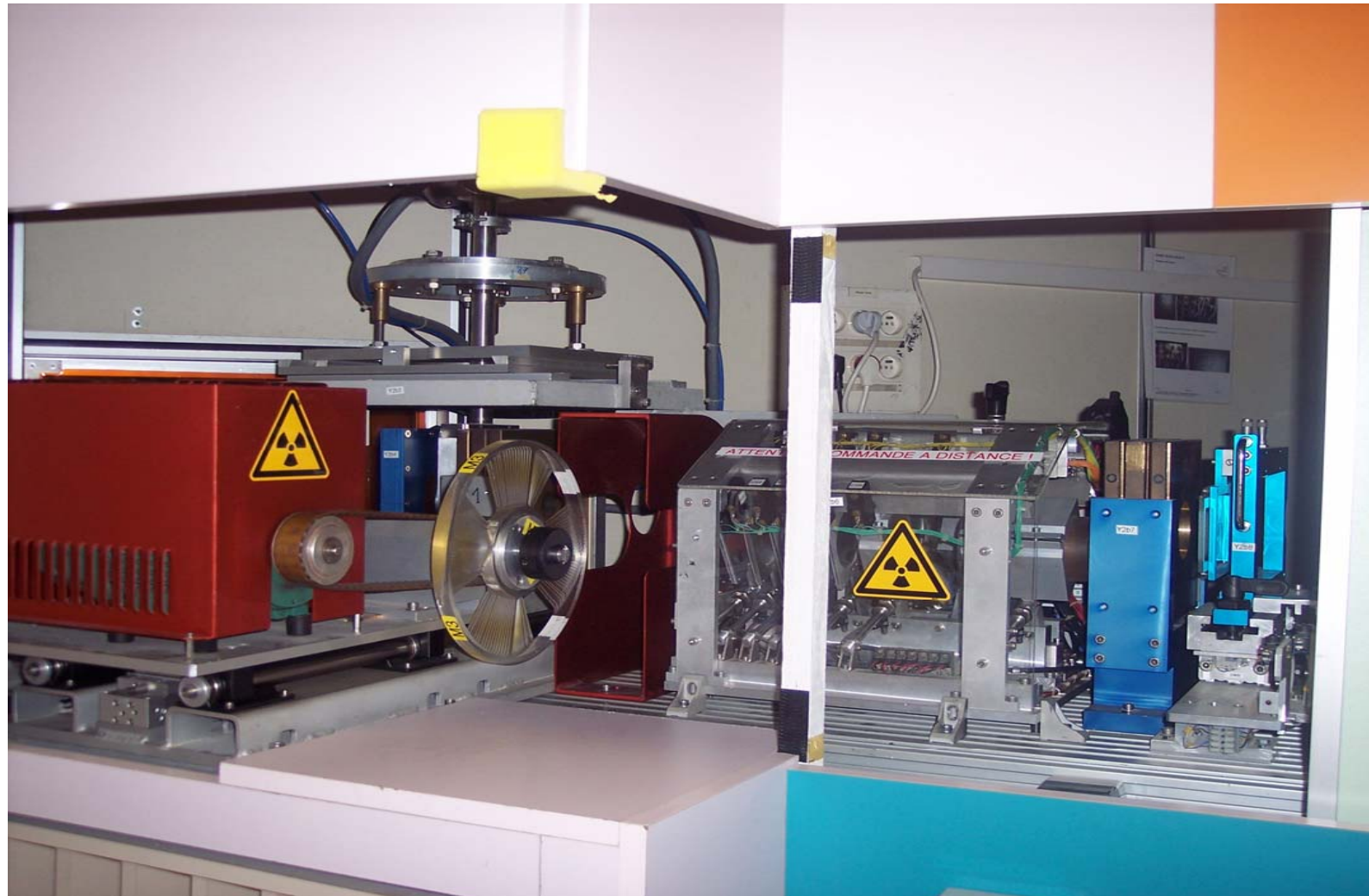


## Diffusion active

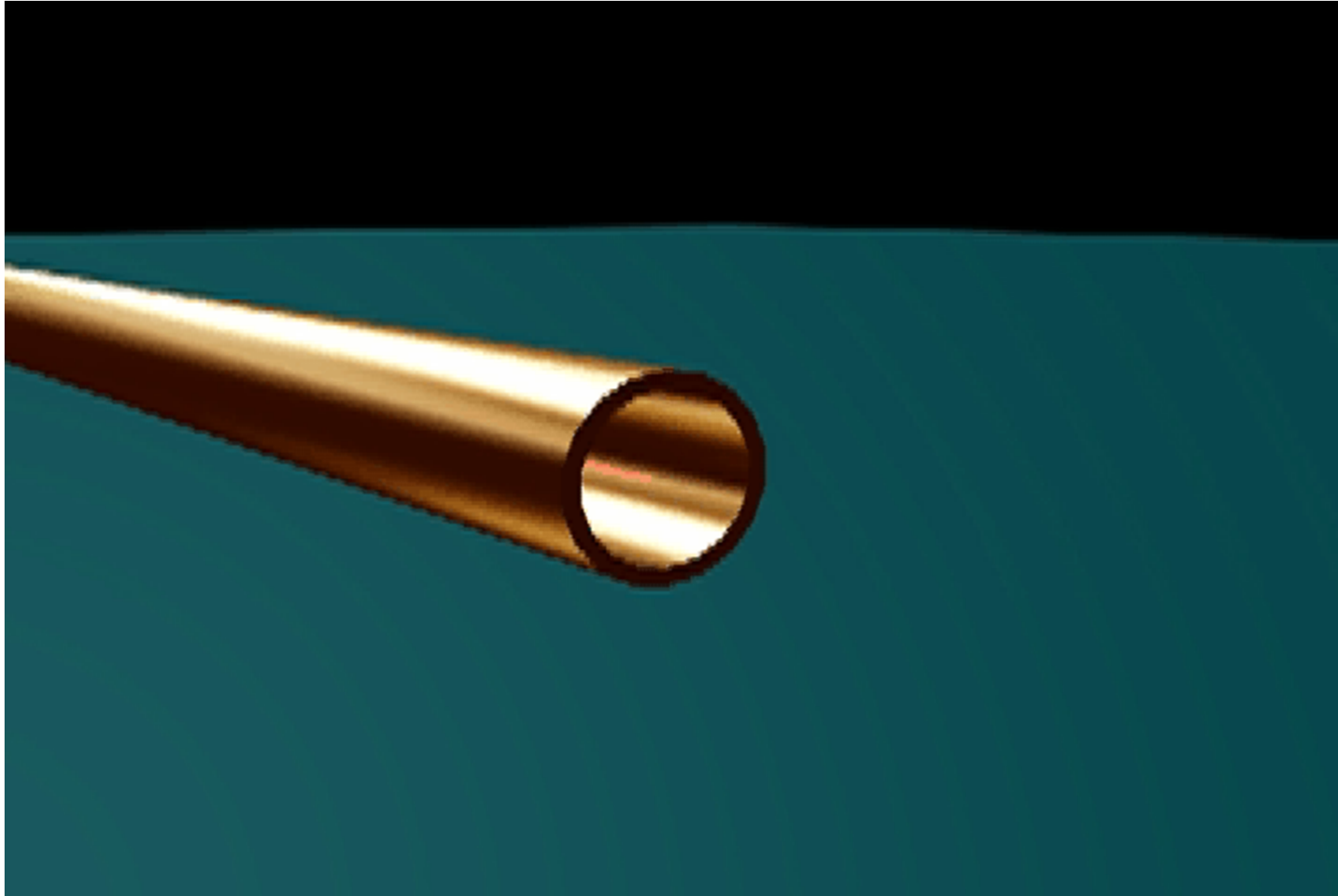




## Mise en forme du faisceau/ Diffusion passive



## Mise en forme du faisceau/ Diffusion passive

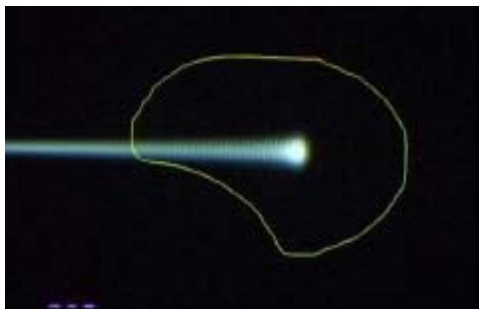


# Avantages inconvénients des deux méthodes

Diffusion passive:



Diffusion active:



- Robuste
- Insensible aux mouvements d'organes
- Manutention
- Production de neutrons
- Gestion des accessoires
- Pas d'activation
- Pas de manutention
- Pas de changement de snout
- Sensible aux mouvements d'organes
- Moins bonne pénombre latérale
- Optimisation de la distribution de dose dans la zone proximale
- CQ faisceau plus complexe



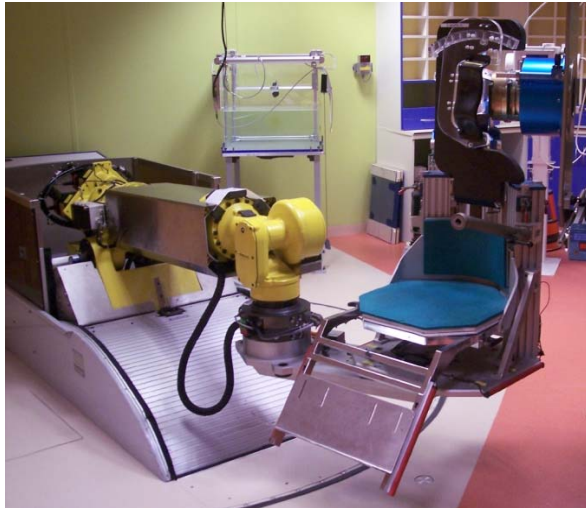
# Indications cliniques de la protonthérapie

- **Mélanomes de la choroïde et tumeurs ophtalmiques**
- **Tumeurs de la base de crâne (chondrosarcome, chordome, ...)**
- **Tumeurs du rachis et du sacrum**
- **Pédiatrie**

Tumeurs à proximité immédiate d'OAR  
Importance +++ de la mise en place quotidienne

- Choix de contentions adaptées
- Systèmes de positionnement robotisés
- Contrôles RX quotidiens
- Grande précision dans la MEP

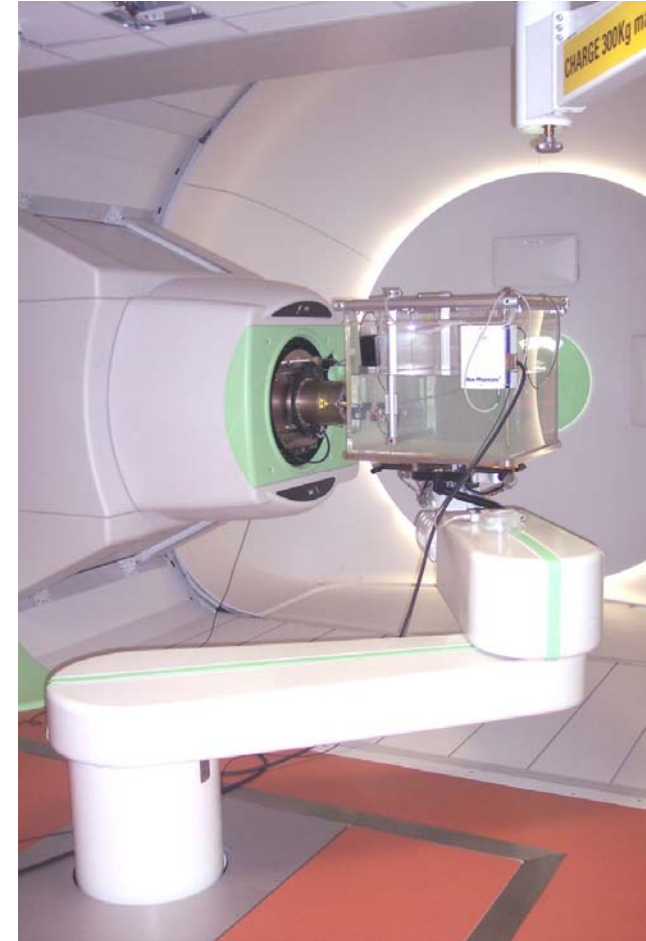
# Systemes de positionnement/ Robots 6 degrades de liberte



Salle Y1



Salle Y2



Salle GANTRY



## Le centre de protonthérapie de l'Institut Curie

- Un cyclotron de 230 MeV IBA
- 3 salles de traitement (2 lignes fixes/ 1 bras isocentrique)
- Intégré au département de radiothérapie de l'Institut Curie
  
- Une équipe de 50 personnes dont 13 techniciens et ingénieurs pour assurer la maintenance de l'accélérateur et du bâtiment , la maintenance et le développement des lignes de faisceau.
  
- Une équipe d'anesthésistes du site IC Paris pour la prise en charge des enfants sous AG



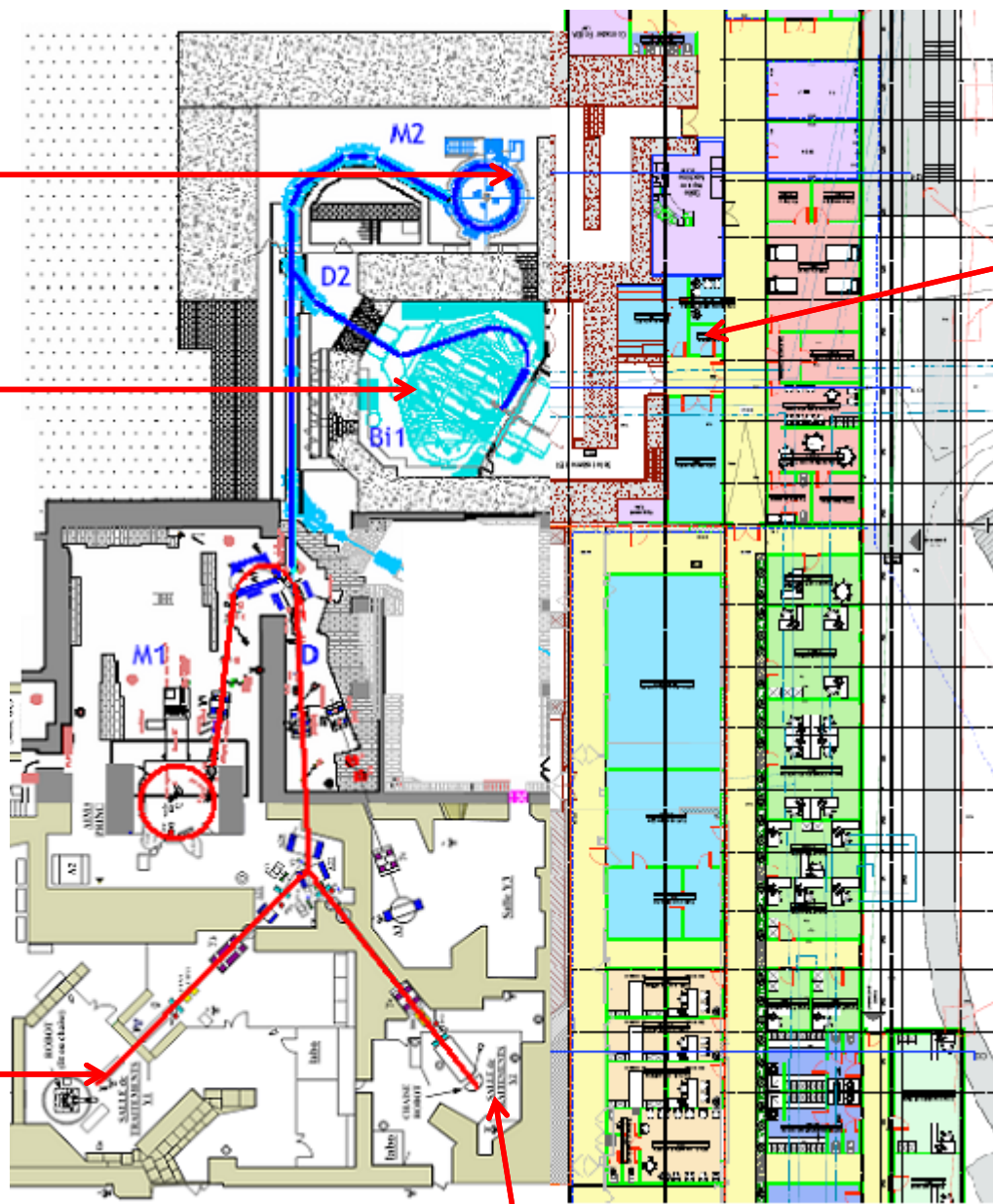


Cyclotron

Gantry

Salle de réveil

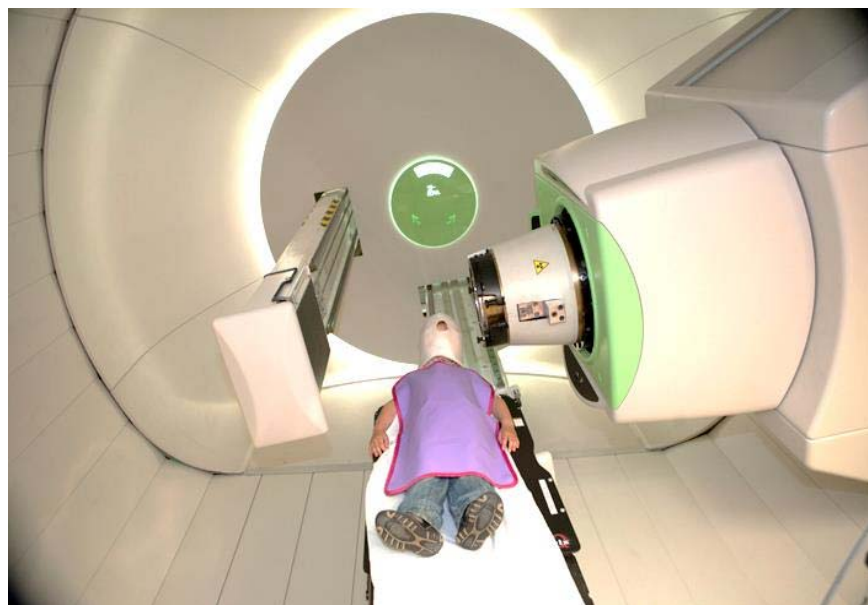
Salle  
intracrânienne



Salle ophtalmologique



## CPO: Les locaux



## Prise en charge du patient au CPO

Traitements ophtalmologiques : Mélanomes de la choroïde/ Iris/Conjonctive & hémangiomes **5750 patients traités fin 2016**

- Recrutement national
- Forte dose/fort débit de dose/Étalement sur 4 ou 8 séances
- Petit volume/ Précision de positionnement de 3/10 mm/Densité homogène
- Organe mobile/ Patient impliqué dans sa MEP

Autres localisations: tumeurs BDC/ Rachis/Sacrum **1803 patients traités fin 2016**

- Recrutement international
- Dose/étalement standard. Possibilité d'inclure une composante photons
- % Pédiatrie important/ traitements sous AG pour enfants < 5ans



## TRAITEMENTS OPHTALMOLOGIQUES

<b>S-3</b>	Ophtalmologiste
<b>S-2</b>	Clips de tantale sauf pour iris et conjonctive
<b>S-1</b>	Masque + embout buccal
<b>S-2</b>	Echographie+ scanner+photos
<b>S-1</b>	EYEPLAN/1champ
<b>J-1</b>	Tous les patients
<b>J<sub>1</sub>- J<sub>4 ou 8</sub></b>	MEP quotidienne RX
	1 CS ophtalmo et Radiothérapeute

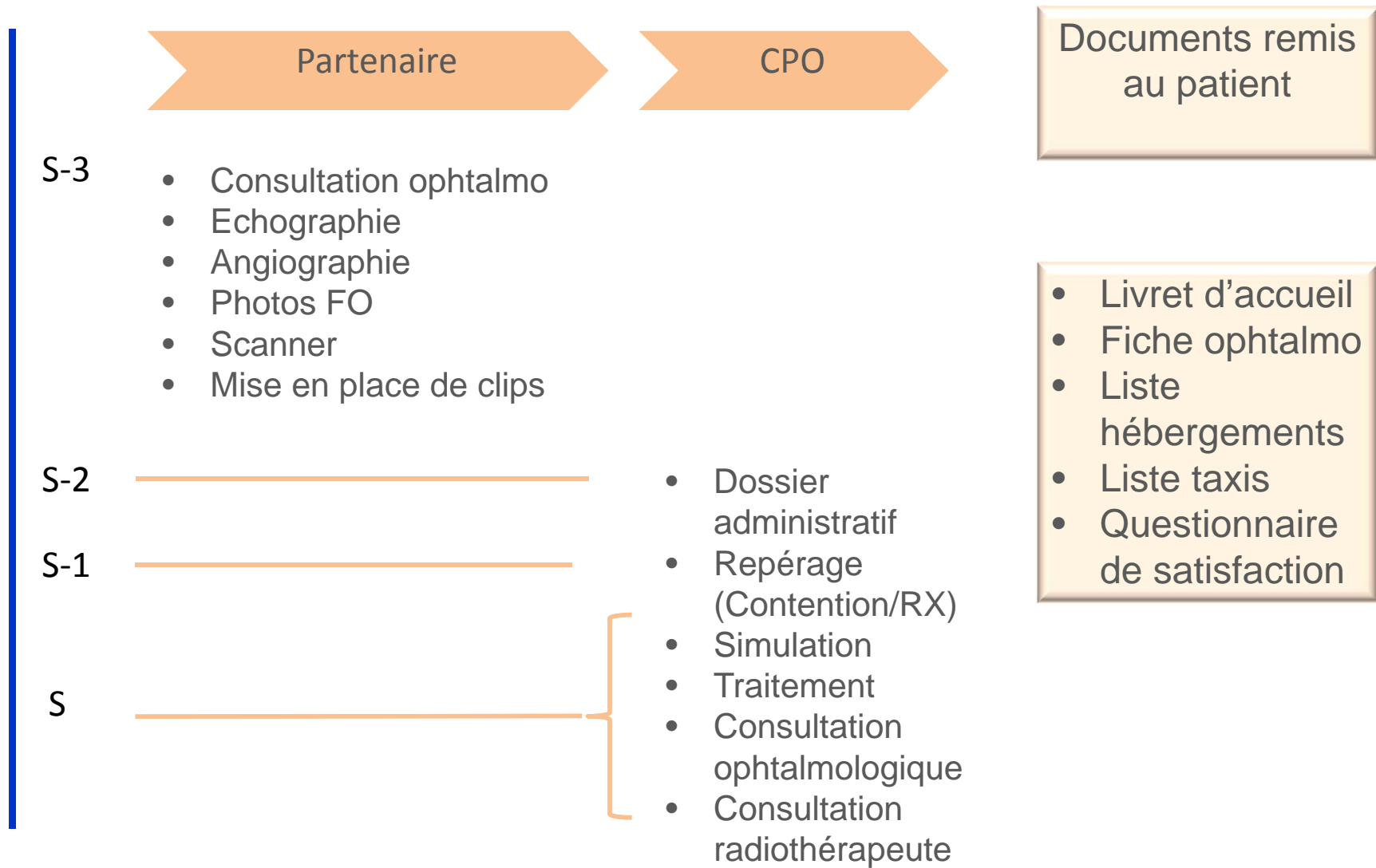
## AUTRES LOCALISATIONS

Oncologue radiothérapeute	<b>S-7</b>
Pas systématique	<b>S-4</b>
Dépend de la localisation	<b>S-4</b>
Scanner + IRM	<b>S-4</b>
3 to 6 champs	<b>S-2</b>
Pas systématique	<b>S-1</b>
MEP quotidienne RX	<b>J<sub>1</sub>- J<sub>n</sub></b>
1 CS hebdomadaire	



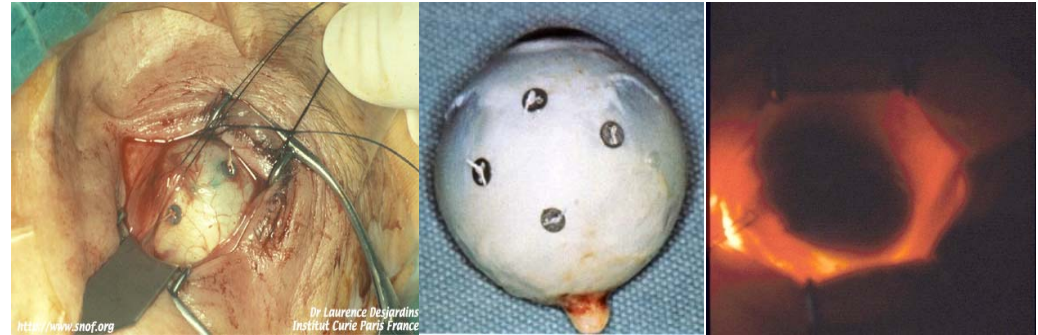


# Prise en charge patient ophtalmologique

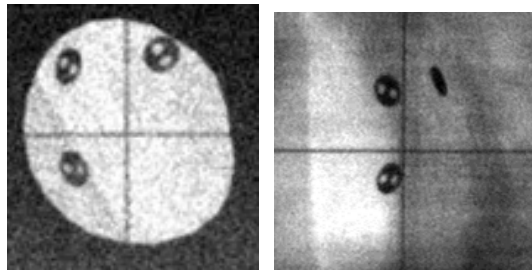


# Traitement ophtalmologique

- **Clips en tantale** suturés autour de la base de la tumeur (AG +Transillumination)
  - Distances clips-tumeur
  - Diamètre du limbe



- **Contention:**
  - Masque +embout buccal
  - Ecarteurs de paupières
  - Robot (0,1mm, 0,1°)



# Traitement ophtalmologique/ Dosimétrie

Reconstruction 3D de la tumeur

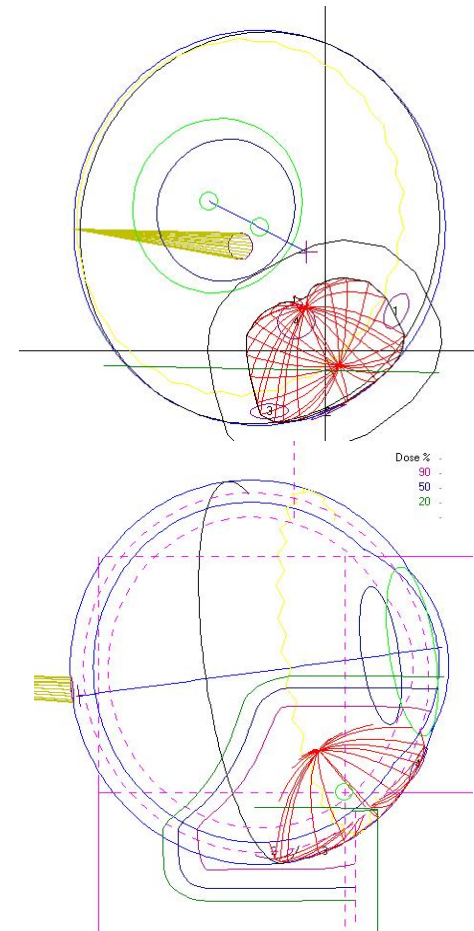
Choix de la position de traitement

Préservation de l'œil:

- Eviter d'irradier la totalité de la chambre antérieure
- Réduire le volume d'irradiation
- Eviter la glande lacrymale

Préservation de l'AV(Si possible)

- Eviter le nerf optique
- Eviter la macula



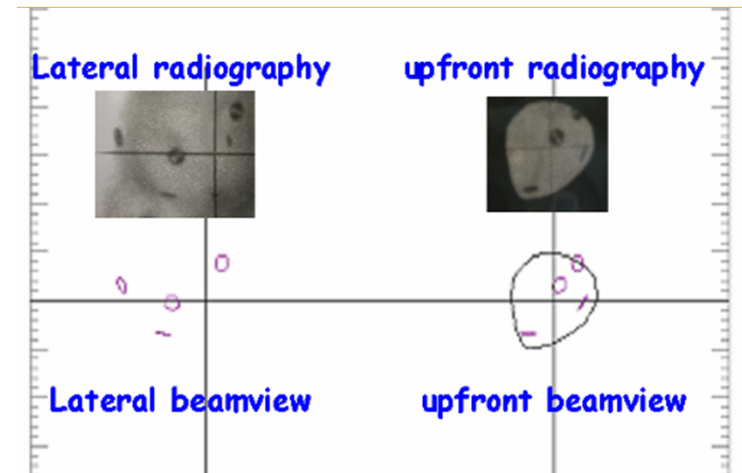
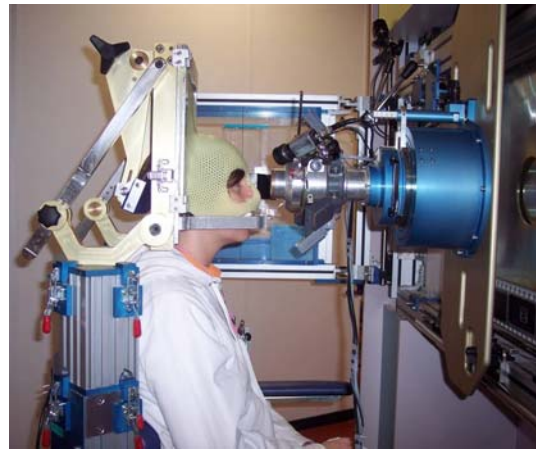
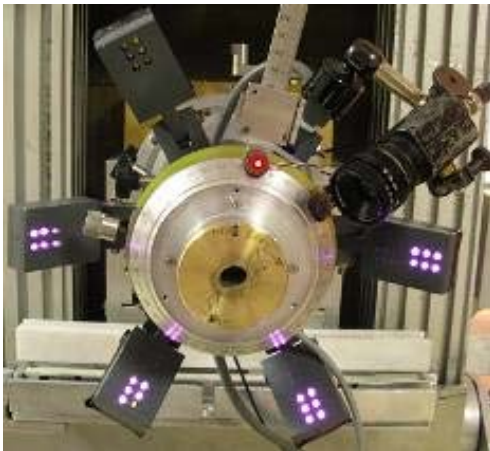
**Beam eye view**

**Vue latérale**

# Traitement ophtalmologique/ Simulation

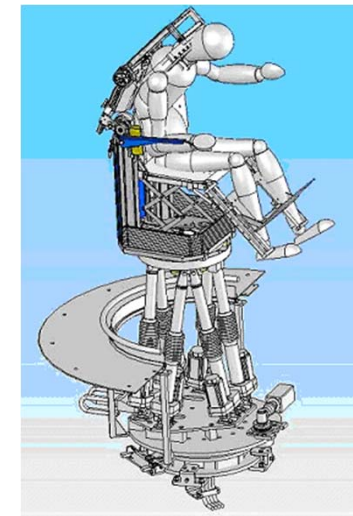
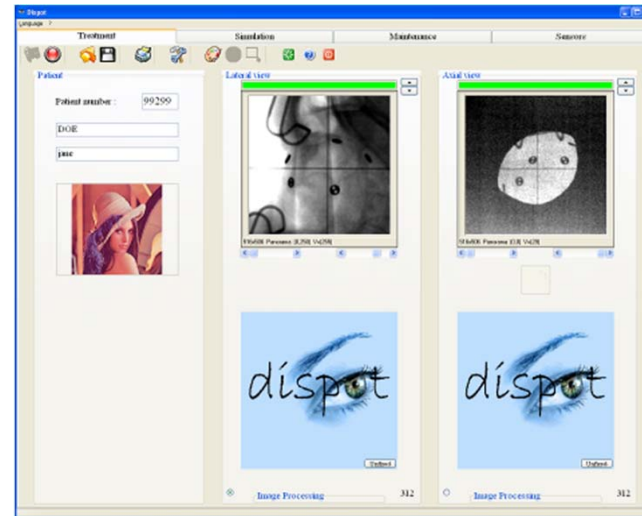
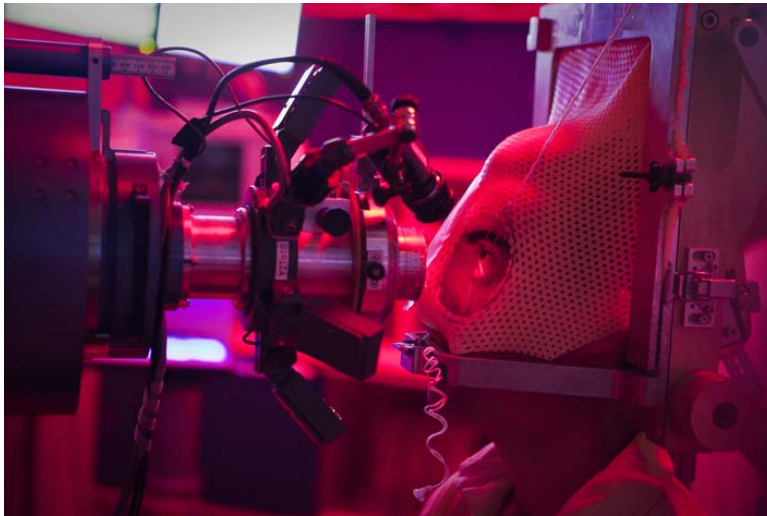
## Simulation:

- Validation de la position
- Mesure de la géométrie de l'œil et des paupières

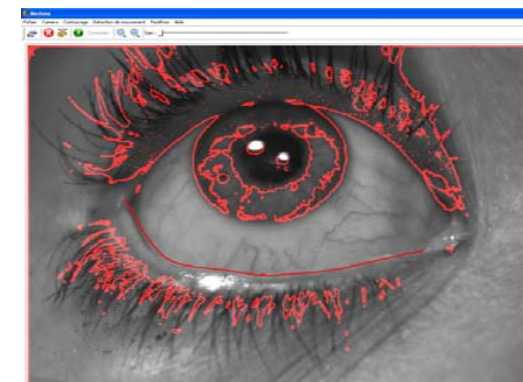
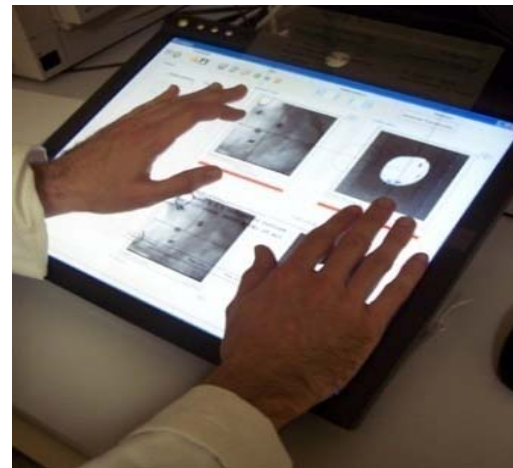




# Traitement ophtalmologique/ Traitement

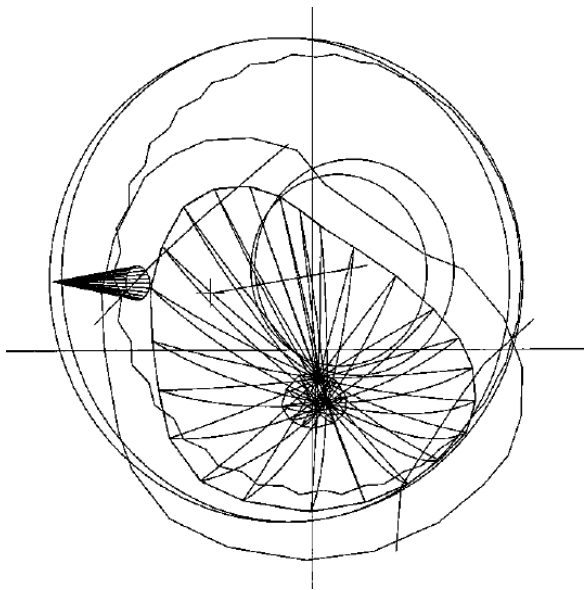


- MEP quotidienne par clichés RX – recalage manuel
- Contrôle du patient et de la position de l'œil par deux caméras spécifiques

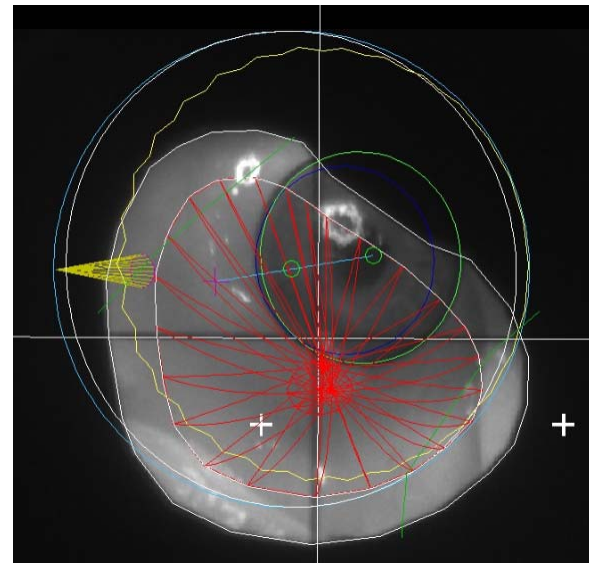


# Traitement ophtalmologique/ Contrôle de la MEP

- Caméra beam eye view ( Visualisation du champ de traitement)
- Caméra externe (Contrôle de la position de l'œil)



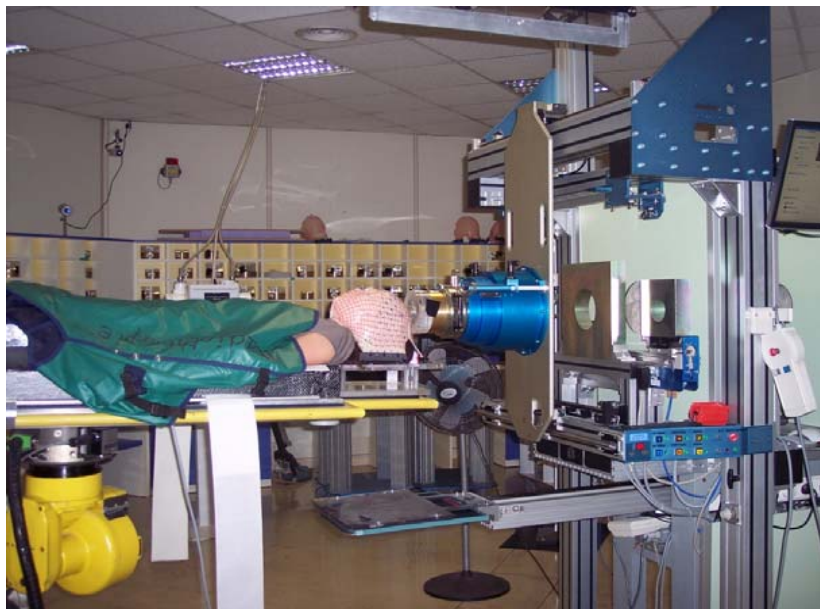
Modélisation œil et  
volume cible dans le TPS  
EYEPLAN



Contrôle MEP par caméra  
Médusa

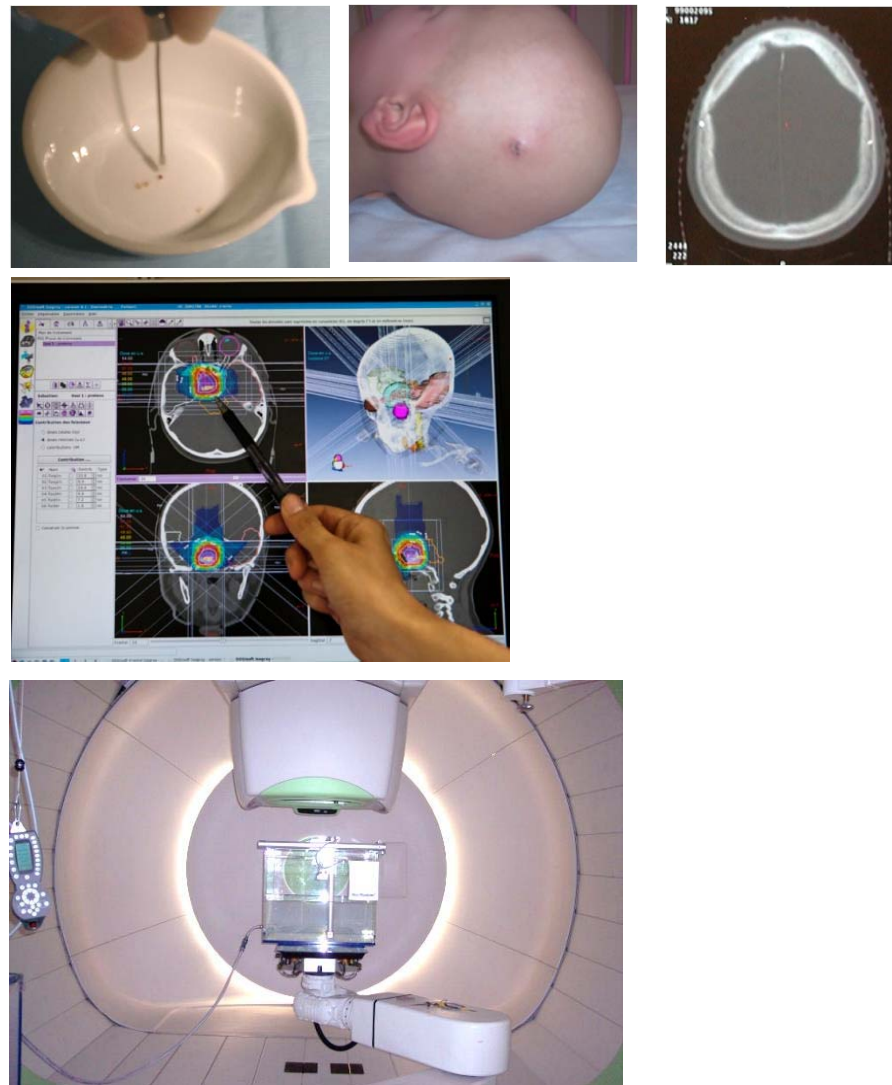


# Prise en charge patient hors ophtalmologique



## Prise en charge patient hors ophtalmologique

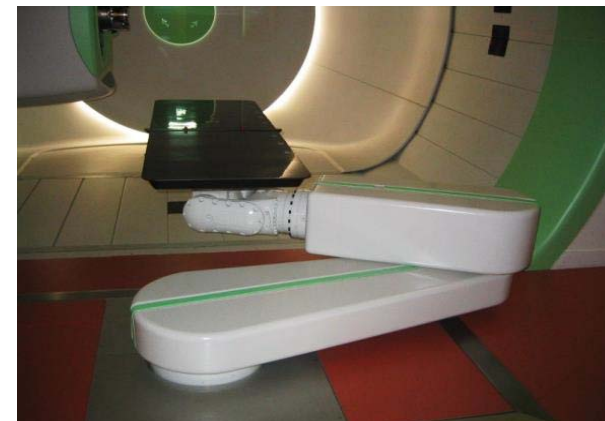
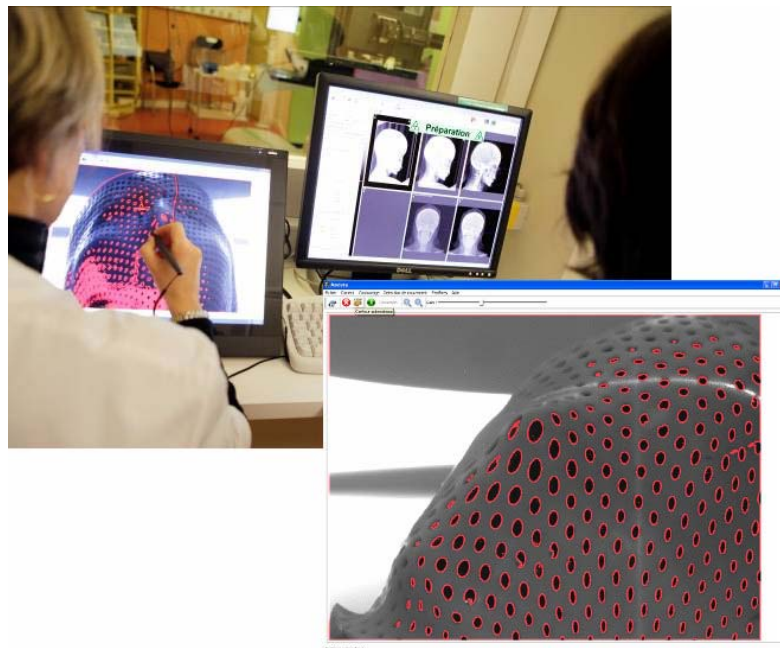
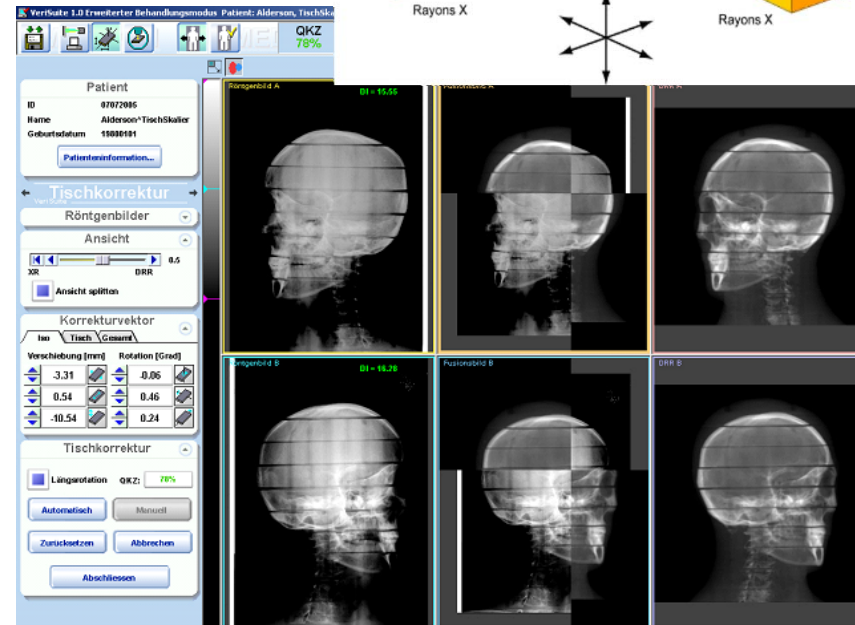
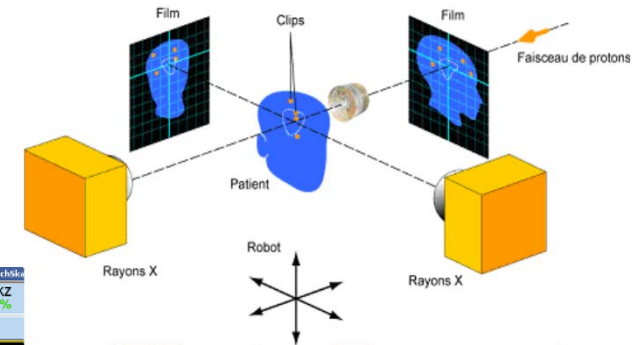
- Scanner
- IRM
- FUSION
- Contourage du volume cible et des OAR (Radiothérapeute)
- Balistique d'irradiation mise en place par dosimétriste ou physicien/ Vérifiée par physicien/Validée par le radiothérapeute
- Simulation (Selon les cas)
- Fabrication des accessoires personnalisés (Collimateur, compensateur)
- CQ patient



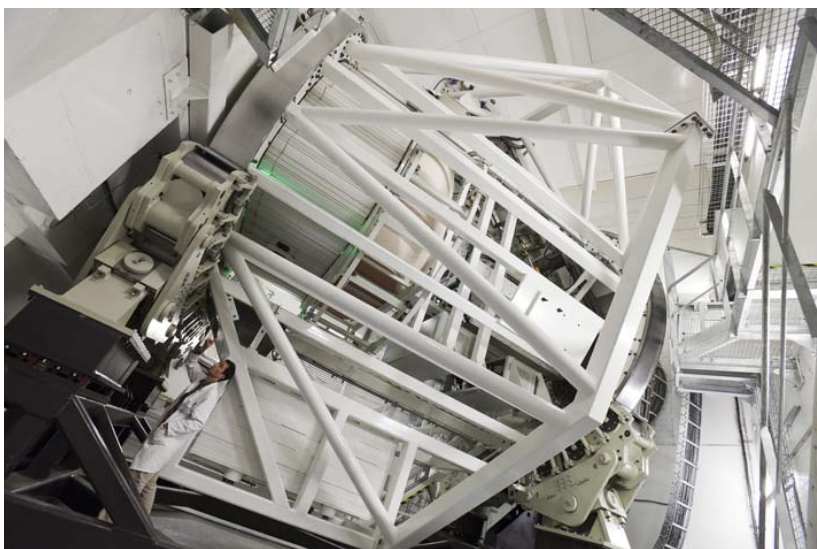
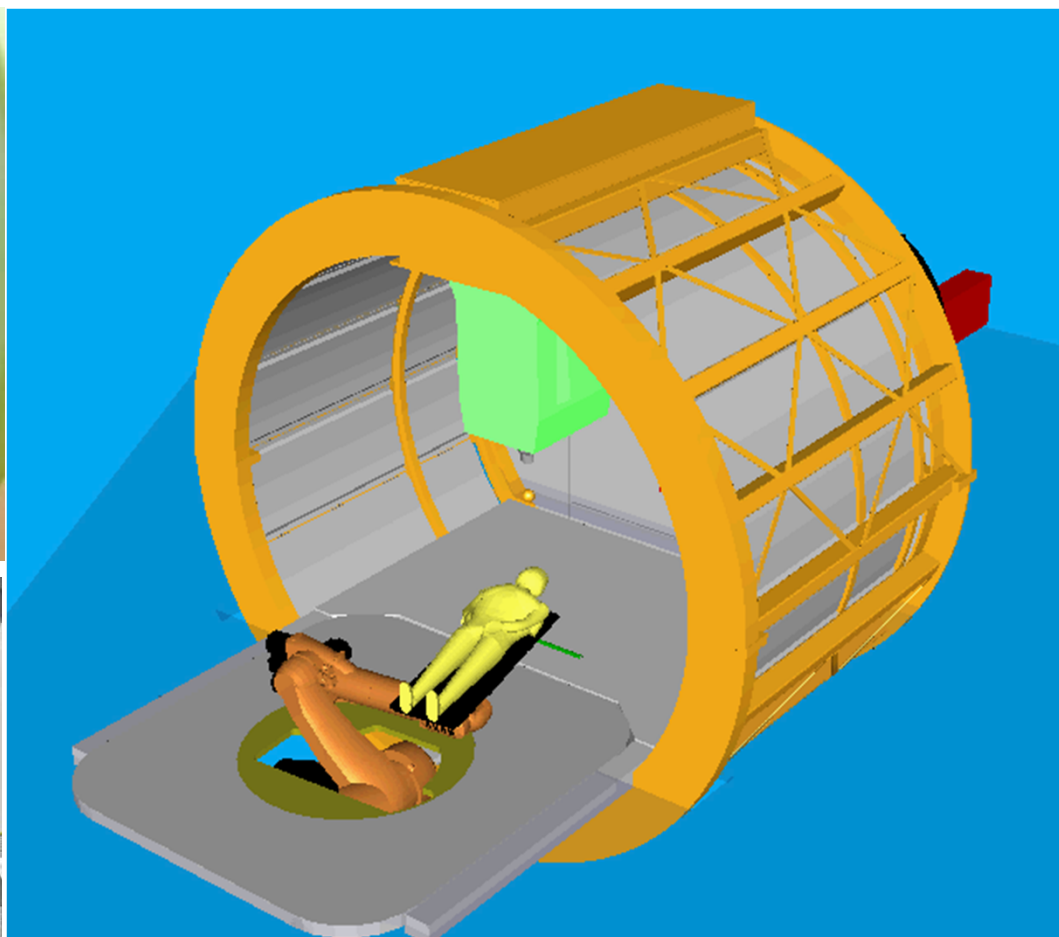


# Logiciels de positionnement

- Implants ou structures anatomiques (recalage 6D manuel ou automatique)
- Positionnement par RX orthogonaux quotidiens et itératifs
- Robotique (0,1mm et 0,1°)
- Contrôle patient par caméra spécifique



# Prise en charge patient hors ophtalmologique



## Prise en charge des enfants sous AG

- Enfants < 5 ans
- 2 à 10 enfants sous AG/ jour
- 2 champs/ jour
- Induction et réveil en salle de traitement
- Suivi en salle de réveil puis petit déjeuner





# Maintenance

**Equipe technique : 15 techniciens et ingénieurs**

**Equipe IBA : 3 ingénieurs**

**Astreinte 24/7 (2 TECH+1PHYSICIEN)**

**Maintenance hebdomadaire:**

2h le lundi et jeudi matin

4h le samedi si nécessaire

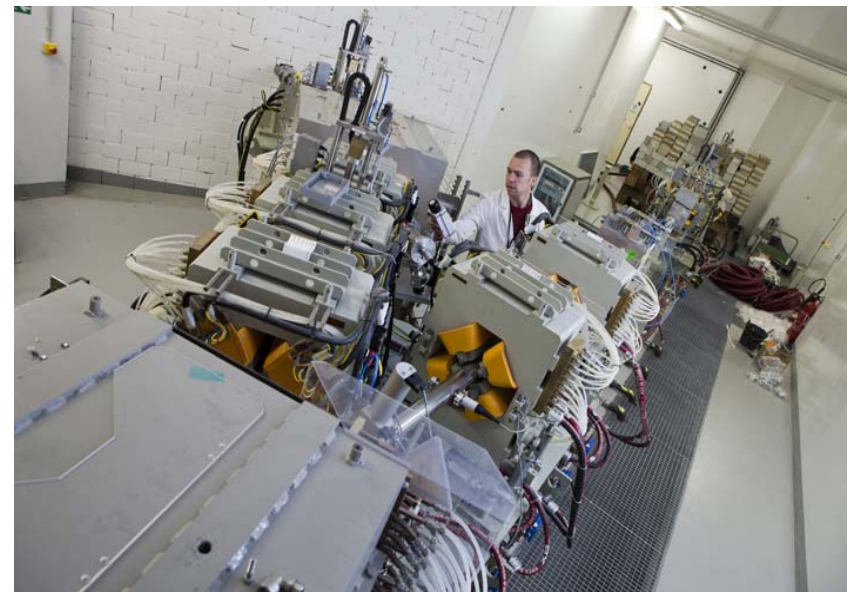
**Maintenance trimestrielle:** 3 jours/ trimestre

**Maintenance annuelle:** 1 semaine si besoin

**Bilan 5 ans après l'installation du cyclotron:**

**Up-time fin 2015 : 97.8%**

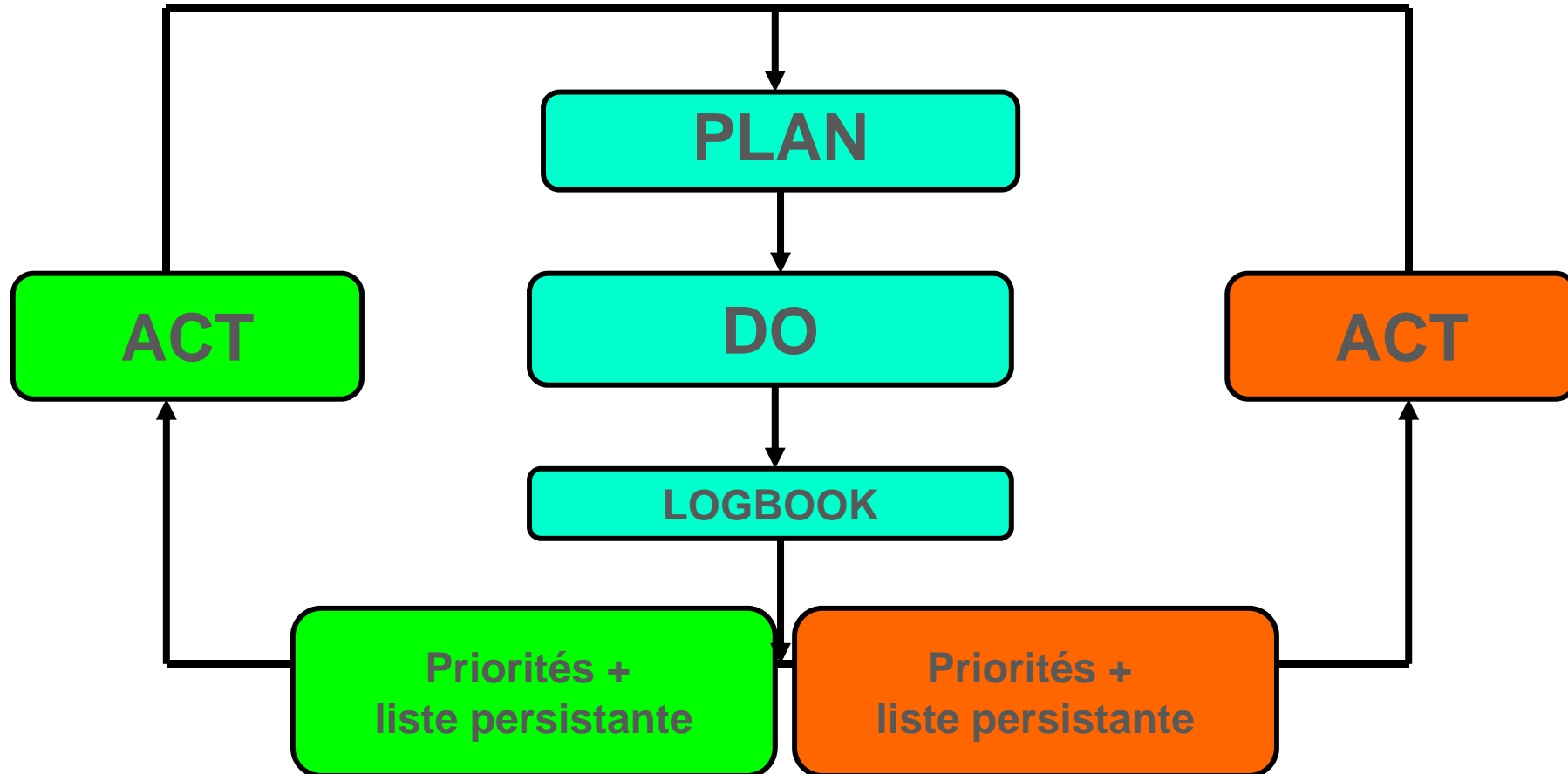
**(2.2% de patients reprogrammés)**





IBA

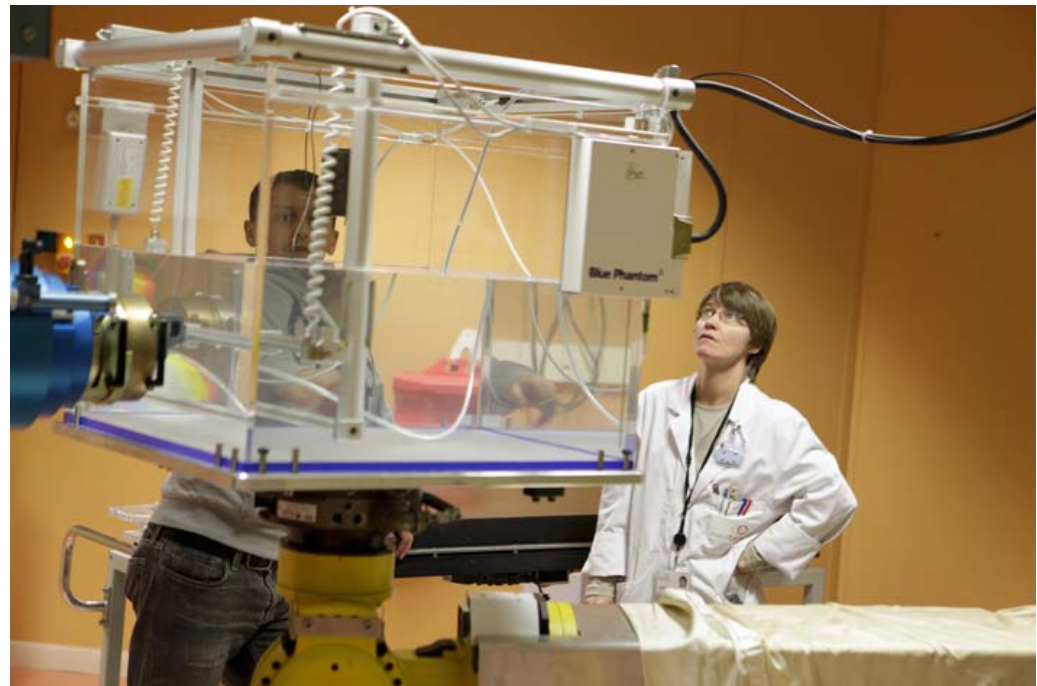
CPO



Réunion hebdomadaire IBA-CPO pour le suivi et la priorisation des actions

## Contrôles qualité

- Tests périodiques réglementaires
- Contrôle quotidien du faisceau (centrage, énergie, dose) dans une condition de référence
- Contrôle de tous les accessoires (mécanique/ manipulateurs/physiciens)
- Contrôle des champs d'irradiation sous faisceau (parcours/ modulation/dose)



# Contrôles qualité/ Suivi et enregistrement des étapes de validation

numéro	Date	Salle type cq	Diamètre épaisseur	
101806 AS2N	07/03/2016	Y1	100 (2,6)	
101820 AS3N	07/03/2016	Y1	70 (1,4)	
101828 SD2N	07/03/2016	Y1	70 (3,3)	
101835 AD3L	07/03/2016	GTR1	180 (6,4)	
101835 PD4C	07/03/2016	GTR1	180 (3,3)	
101839 SD2N	07/03/2016	Y1	100 (4,6)	
101750 PD3R	08/03/2016	GTR1	100 (5,2)	
101770 SG3N	08/03/2016	GTR1	180 (4,8)	
101806 LD1N	08/03/2016	Y1	70 (3,2)	
101839 AS1N	08/03/2016	Y1	100 (3,9)	
101576 PS1N	09/03/2016	GTR1	100 (3,3)	
101576 SG4N	09/03/2016	GTR1	100 (2,0)	



Fabrication compensateur



Fabrication collimateur



Contrôle mécanique



Contrôle manipulateur



Contrôle mécanique



Contrôle physicien

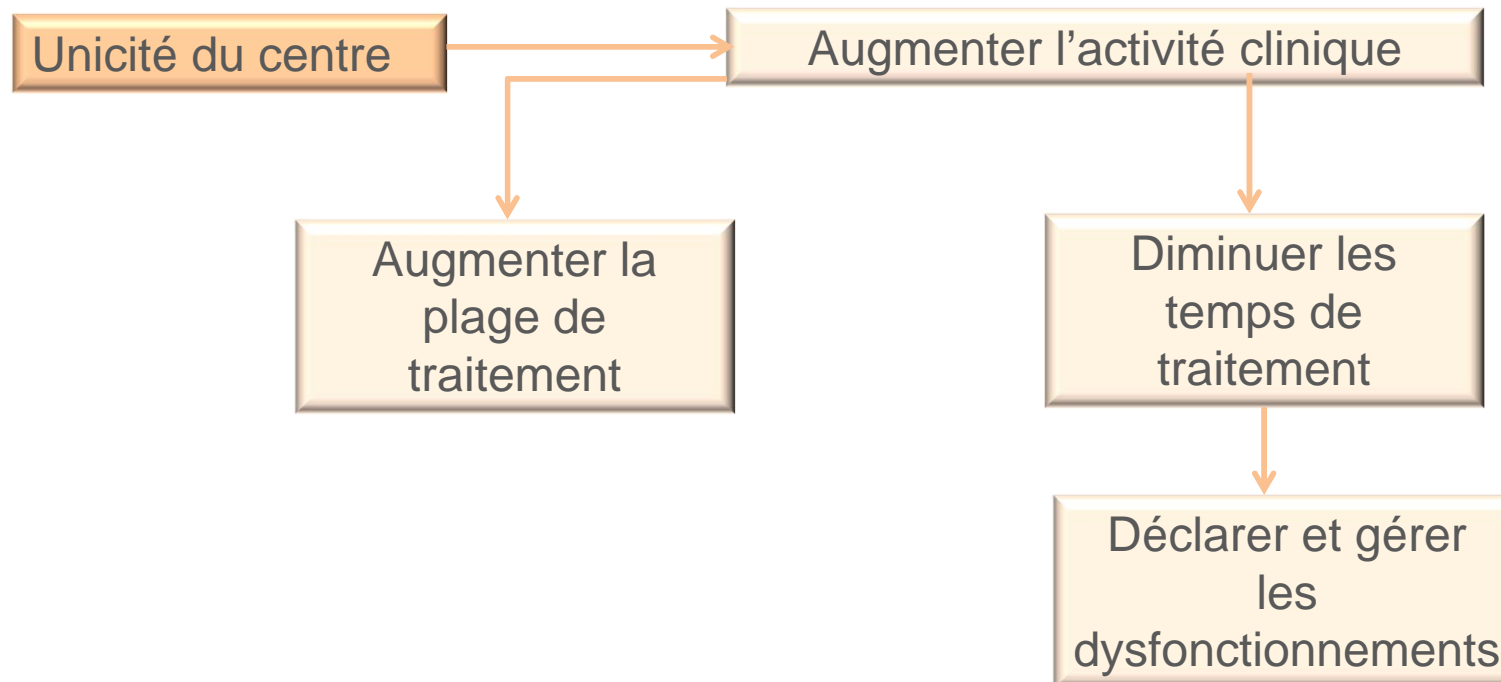
# DEMARCHE QUALITE DU SITE



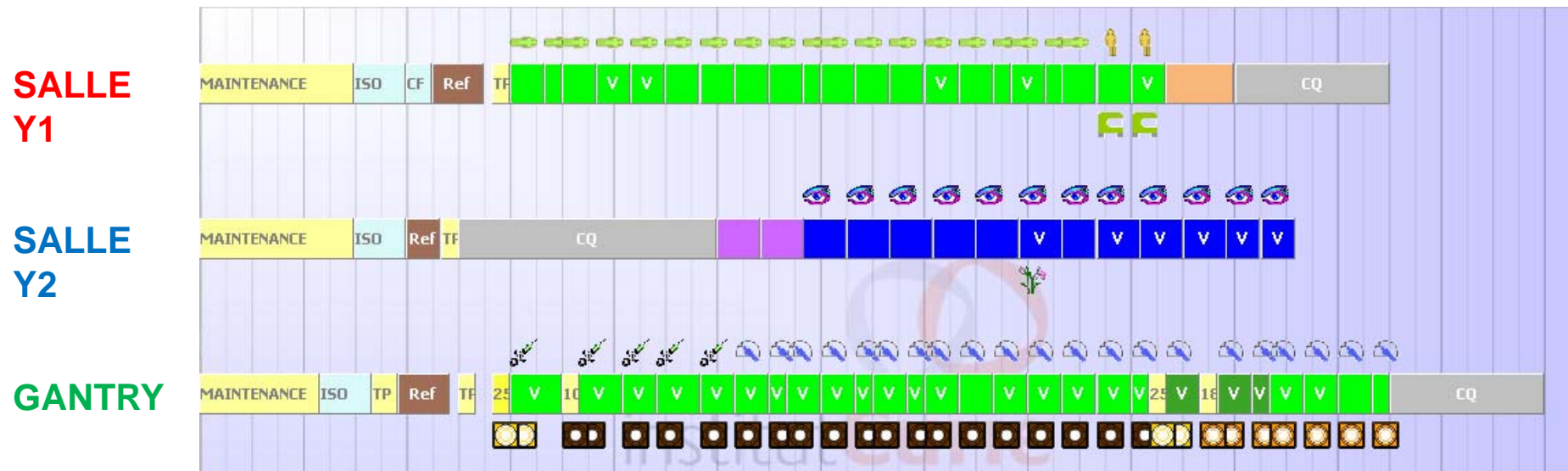


# Activité clinique prévisionnelle

ANNEE	2011	2012	2013	2014	2015	2016
OBJECTIF (Nb de séances/an)	4800	6000	7000	8000	9000	10000
REEL (Nb de séances/an)	4750	6389	7253	8757	9515	
NOMBRE DE PATIENTS TRAITES	418	457	498	554	559	



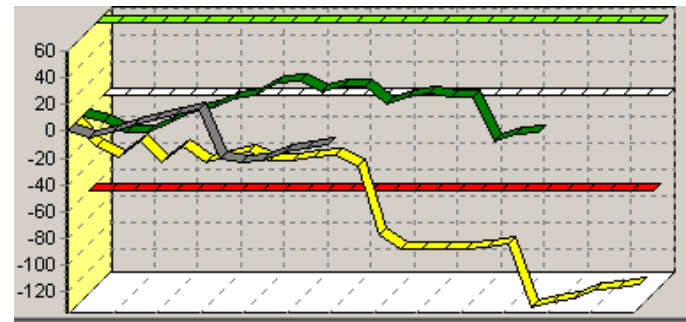
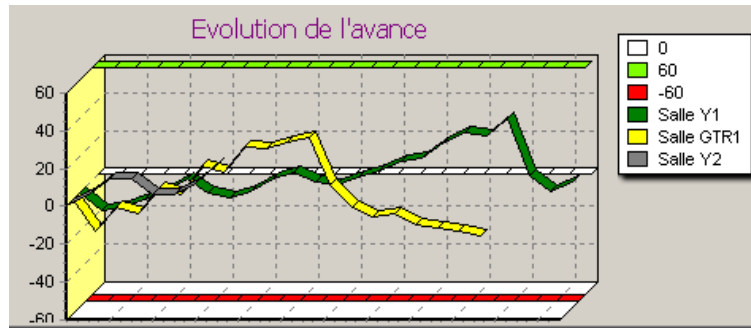
# Planning quotidien prévisionnel/ Plusieurs activités dans une salle



## Activités planifiées:

- Contrôle de qualité de référence
- Tests périodiques
- Changement d'accessoires (chaise/table/snout...)
- Simulations/ Traitements/ Essais de faisabilité/ Enfants sous AG
- Contrôle de qualité des patients
- Développement
- Expérimentations

# Planning quotidien réel



- Mise en place d'une démarche LEAN/ Cartographie des processus
- Déclaration des Problèmes Oublis Pannes (POP)
- Résolution quasi immédiate de 85% des dysfonctionnements (Ventilation vers agents concernés)
- Retour vers les équipes et implication dans la résolution des POP
- Pour les 15% restants : mise en place de plans d'actions
- Suivi des plans d'actions/ Retour vers les équipes

En gantry: **45 min/champ en 2010** **17,2 min en 2012** **14,7 min/ champ aujourd'hui**

## Ajustement du planning quotidien

- Ajustement des temps de traitement en fonction des statistiques
- Remontée d'informations des manipulateurs vers le cadre de santé (état du patient/ Difficultés de MEP...)
  
- Les retards incontrôlables:
  - Stress du patient
  - Pannes
  - Impondérables...



# RADIOPROTECTION



# Radioprotection/ Risques

## Pendant l'envoi faisceau : neutrons

En salle:

- Electronique de salle
- Dose additionnelle patient

Hors salle: calcul des blindages (MCNPX + contrôles ambiance)

## Hors envoi faisceau (Dose extrémités)

- Activation (Ligne, collimateurs...)/ Manipulateurs/Dose aux extrémités
- Cyclotron (Opérations de maintenance)/Techniciens et ingénieurs

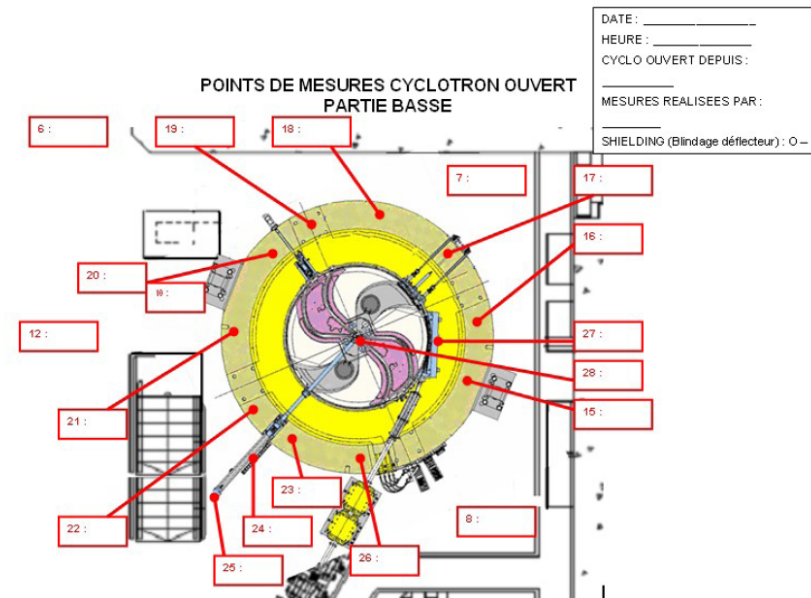
## Hors envoi faisceau (Risque d'exposition radiologique)

- Réalisation de RX pour le positionnement/manipulateur
- Paravent plombé – sécurités porte



# Radioprotection

- Formation/ Phase de préparation des ouvertures cyclotrons avec les équipes
- Cartographie/ Etude de postes
- Mesures prévisionnelles (Opération de maintenance)
- Suivi des opérations



## Radioprotection/ Estimation du rayonnement secondaire au niveau du patient (Thèse en collaboration avec l'IRSN)

- Détecteurs
- Fantôme anthropomorphique
- Fantôme mathématique





# Les contraintes globales de la protonthérapie

- **Cout des installations**

- Cyclotron+ lignes + bras isocentrique: 28 M€
- 1 accélérateur linéaire moderne : 2,5 à 5 M€

- **Limitation du nombre d'indications traitées**

- Place des protons par rapport aux dernières technologies en photons (stéréotaxie, arcthérapie...)
- Essais cliniques en cours

- **Autre :**

- Imagerie en salle de traitement : les nouvelles salles photons sont actuellement mieux équipées que les salles de protonthérapie
- Taille des installations

Bras isocentrique 10m, 120t



## Les contraintes liées ou impactant sur l'activité clinique

- Le lissage du recrutement patient
- La gestion des urgences
- Le décalages des patients:
  - Protocole de chimiothérapie
  - Etat clinique
  - Chirurgie
  - Evolution du volume tumoral
- La gestion des pannes



## Les perspectives

- Augmenter l'activité clinique
- Diversifier les localisations
- Exploiter toutes les options du gantry
- Intensifier la R&D dédiée au développements cliniques
- Installer une ligne expérimentale
- Installer un LINAC

# Merci pour votre attention

