Cours Nationaux de Radiothérapie
Société Française des Jeunes Radiothérapeutes Oncologues

Radiothérapie en conditions stéréotaxiques

9-11 mars 2017, Centre Prouvé, Nancy

Principes, technologies et spécificités de la RCS

Vincent Marchesi, Physicien médical

Institut de Cancérologie de Lorraine
Alexis Vautrin
Ensemble, construisons l'avenir

Principes de la Radiothérapie en Conditions Stéréotaxiques

Principes de la Radiothérapie en Conditions Stéréotaxiques

Définition :

GPMED GT STX 2010 : « *La radiothérapie stéréotaxique représente l'ensemble des techniques de radiothérapie externe, en constante évolution, utilisant des appareils d'irradiation avec équipements dédiés* permettant de délivrer un traitement de précision d'ordre millimétrique et utilisant de multiples mini faisceaux en règle générale non coplanaires »*

HAS 2006 : *« Se rapporte au concept de précision extrême. Consiste à délivrer un traitement par irradiation utilisant des mini-faisceaux convergents au centre de la cible.*

Ceci nécessite au préalable une délimitation des volumes, le plus précisément possible, par l'utilisation de l'imagerie adéquate (scanographie, remnographie, TEPscanographie…).

Ce traitement nécessite aussi une contention qui limite au maximum les mouvements du patient. Un contrôle des mouvements d'organe est souvent associé. »

Principes de la Radiothérapie en Conditions Stéréotaxiques

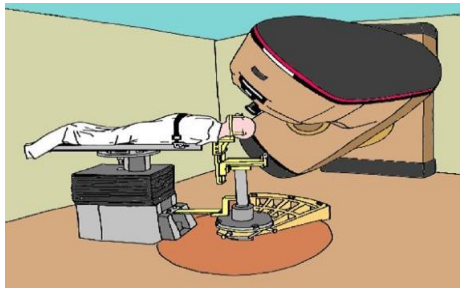
- **Technique caractérisée par :**
  - **Irradiation très ciblée et à haute dose de tissus malades (tumeurs, …) ou suppression de troubles fonctionnels**
  - **Dose élevée par fraction (8 à 20 Gy/fx)**
  - **Faible nombre de séances (typiquement 1 à 5)**
  - **Irradiation de haute précision (précision requise : de l'ordre du mm)**

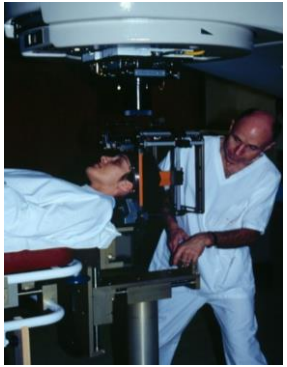
- **Nécessite :**
  - **un matériel adapté aux contraintes particulières**
  - **des procédures cliniques spécifiques**
  - **une organisation adaptée**

Technologies

Technologie

- **Evolution du matériel**





- **Connaissances scientifiques et médicales ont progressées**
- **La « stéréo » serait devenue simple et banale !**

Technologie

- **Précision recherchée de l'ordre du millimètre**

- **Pour y parvenir :**
  - **Utilisation des toutes les modalités d'imagerie pour définir le plus précisément possible la cible**
  - **Maintien du patient dans une position fixe : utilisation d'un cadre invasif (radiochirurgie) ou contrôle et correction de la position du patient au cours de l'irradiation (radiothérapie stéréotaxique)**
  - **Irradiation avec des systèmes avec une précision mécanique élevée**

Technologie

- **Les appareils de traitement : 2 grandes familles d'équipements**

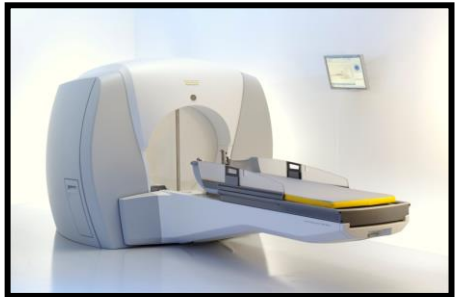
- **Appareils dédiés : systèmes conçus spécifiquement pour l'irradiation en condition stéréotaxique :**
  - **GammaKnife (intracrânien)**
  - **Cyberknife (intra et extra-crânien)**
  - **Vero (intra et extra-crânien)**
  - **MRIdian Viewray (intra et extra-crânien)**

- **Appareils adaptés : système de traitement conventionnel sur lesquels sont ajoutés des éléments spécifiques à la RT stéréotaxique :**
  - **Accélérateur classique + collimateurs circulaires (intra et extra-crânien)**
  - **Accélérateur classique + micro-MLC (intra et extra-crânien)**

Technologie
Gamma Knife (Elekta)

- **Système d'irradiation dont les faisceaux convergent vers un foyer unique**
  - **Sources de Cobalt-60 (192 à 201 selon les versions), 244 TBq (6600 Curie)**
  - **Irradiation intracrânienne (ou proche crâne) exclusivement**

Gamma Knife U (1968)

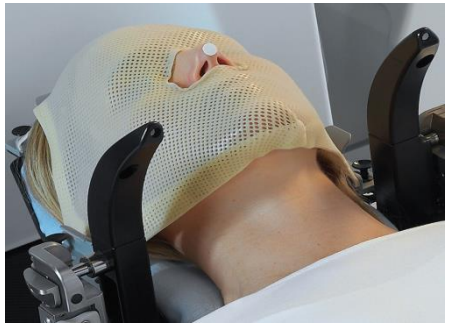


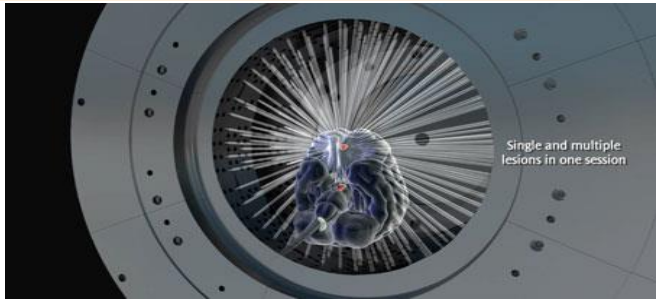
Gamma Knife Perfexion (2006)

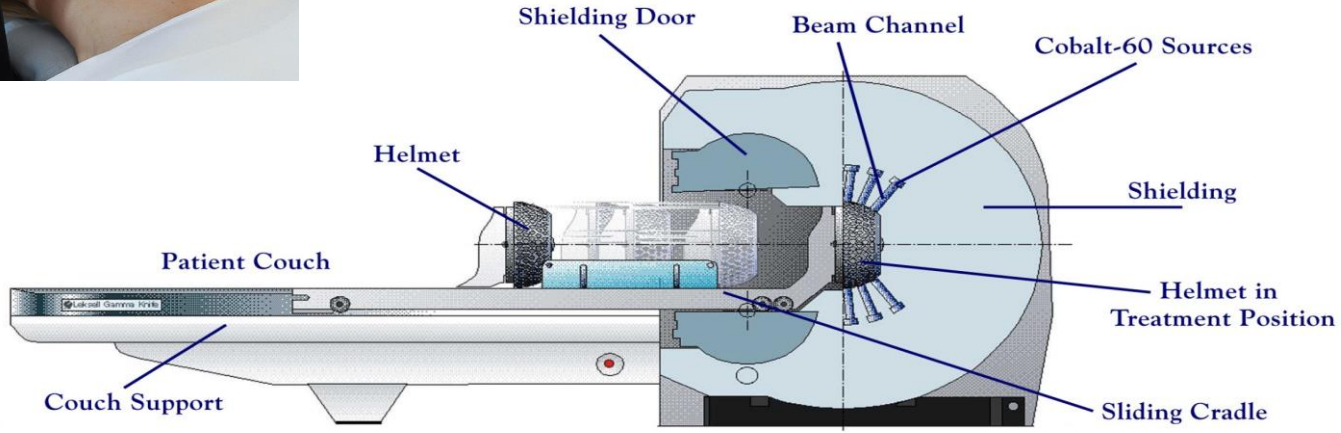
Gamma Knife Icon (2015)
Frameless
IGRT (CBCT), suivi temps réel

Technologie
Gamma Knife (Elekta)

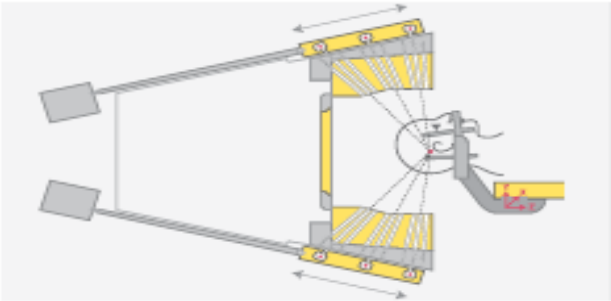
- **Faisceaux convergents**
- **Cadre invasif ou masque**

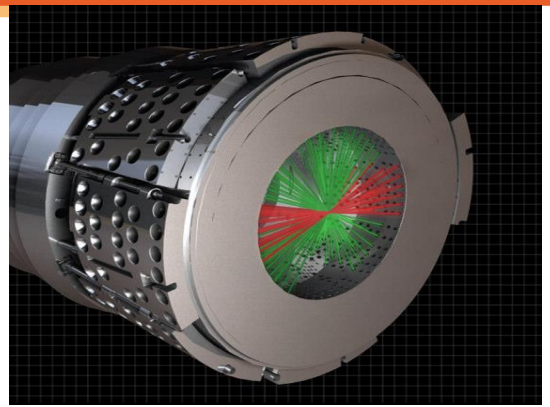




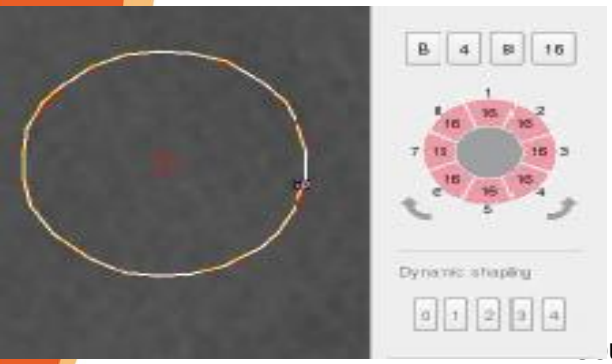


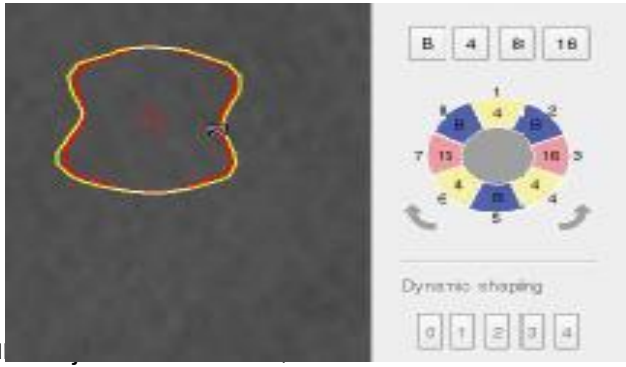
Technologie
Gamma Knife (Elekta)

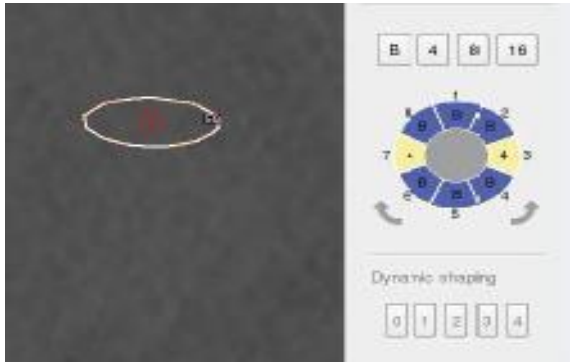




- **Choix des dimensions des collimateurs**
- **Réalisation de tirs hybrides (plusieurs tailles de colli.)**

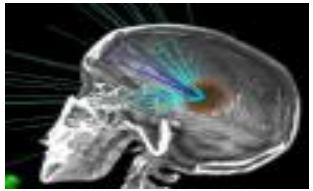


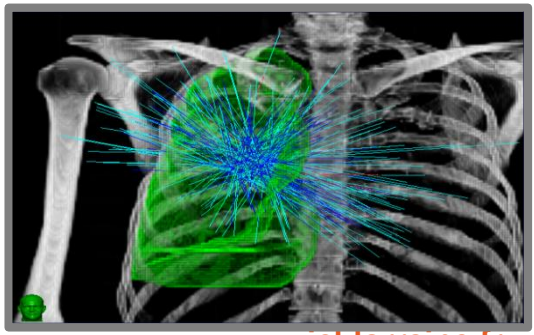




Technologie
Cyberknife (Accuray)

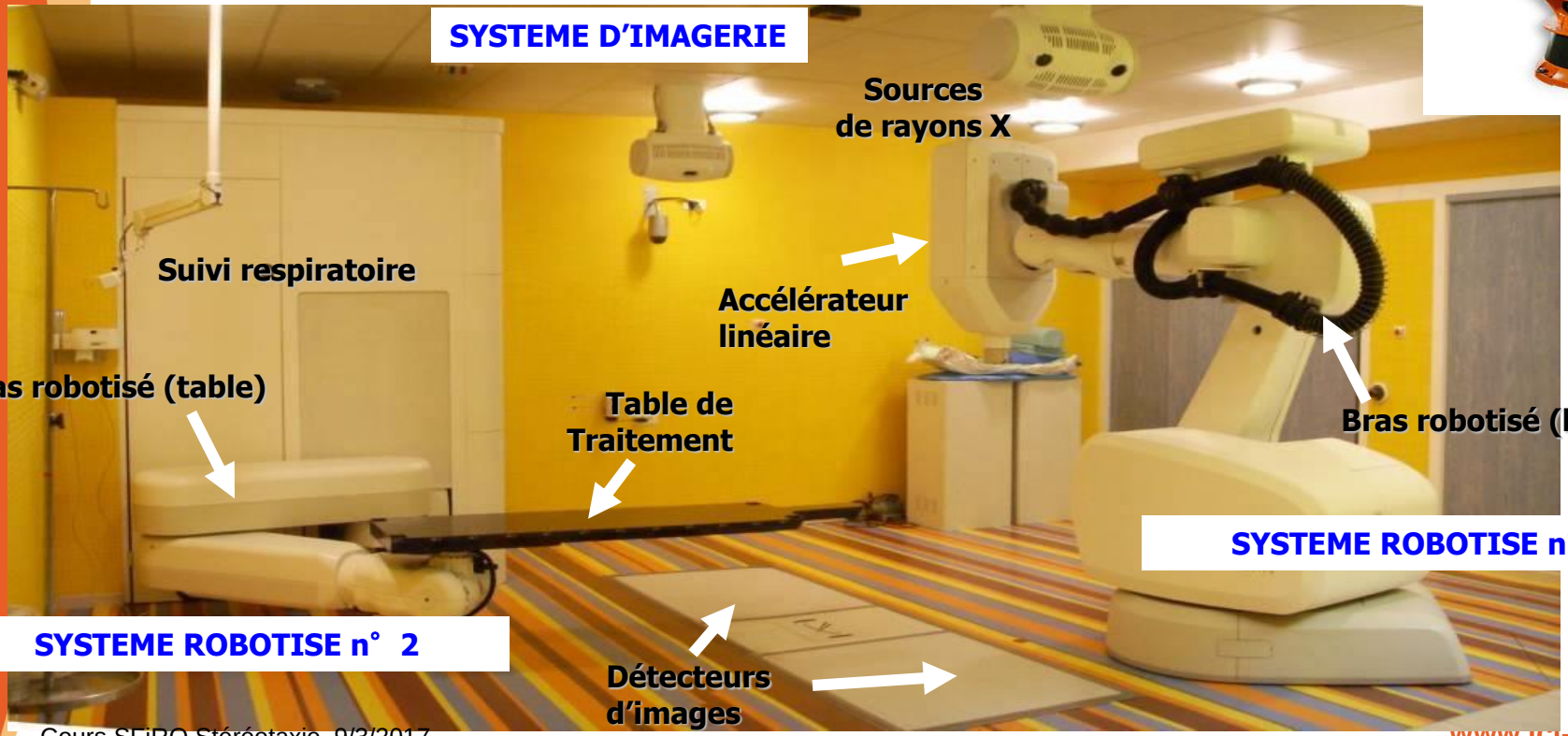
- **Cyberknife : radiothérapie robotisée**
  - **Système d'irradiation monté sur un bras robotisé associé à un système d'imagerie en temps réel : isocentre**
  - **Contraintes des mouvements supprimées : Correction en temps réel des mouvements du patient**
  - **Irradiation très précise (< 1mm) : stéréotaxie intra ou extra crânienne**
    - **Jusqu'à + de 1200 petits faisceaux possibles**
    - **Irradiation conformationnelle de la tumeur en évitant les organes sensibles (moëlle, …)**
  - **Pas de cadre invasif**
  - **Utilisation de grains implantés (tissus mous)**
  - **Traitement entièrement guidé et contrôlé par l'imagerie**





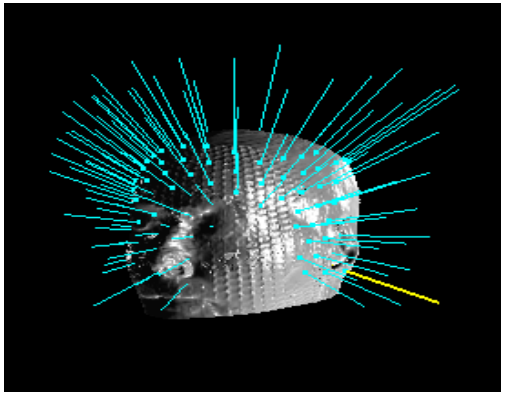
Technologie
Cyberknife (Accuray)

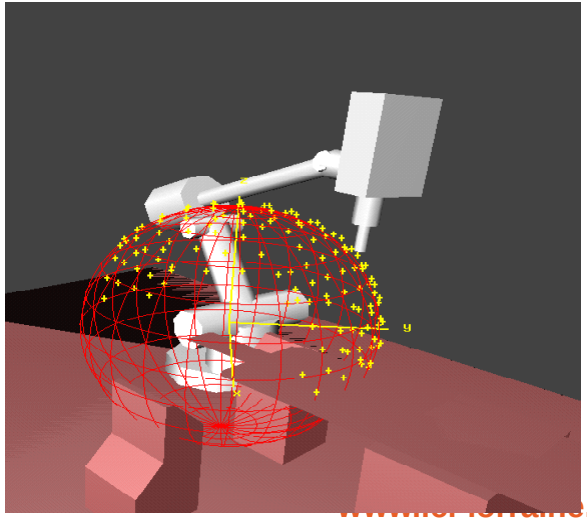
- **Le Cyberknife : 3 sous-systèmes automatisés**



Technologie
Cyberknife (Accuray)

- **Bras robotisé : Contraintes des mouvements supprimées**
- **Possibilité accrue d'orientations du faisceau (jusqu'à 1200 portes d'entrée possibles)**
- **Correction en temps réel des mouvements du patient dans toutes les directions de l'espace grâce au système d'imagerie**



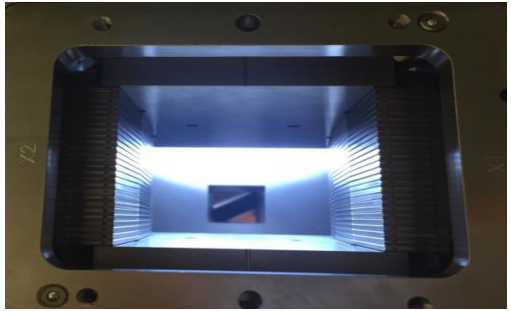


Technologie
Cyberknife (Accuray)

- **3 systèmes de collimation possibles :**
  - **Cônes circulaires : 12 tailles (diamètre de 5mm à 60mm)**

  - **Collimateur Iris : simulation des cônes circulaires par un système de mâchoires en diaphragme**

  - **Mini-MLC (Machine M6)**



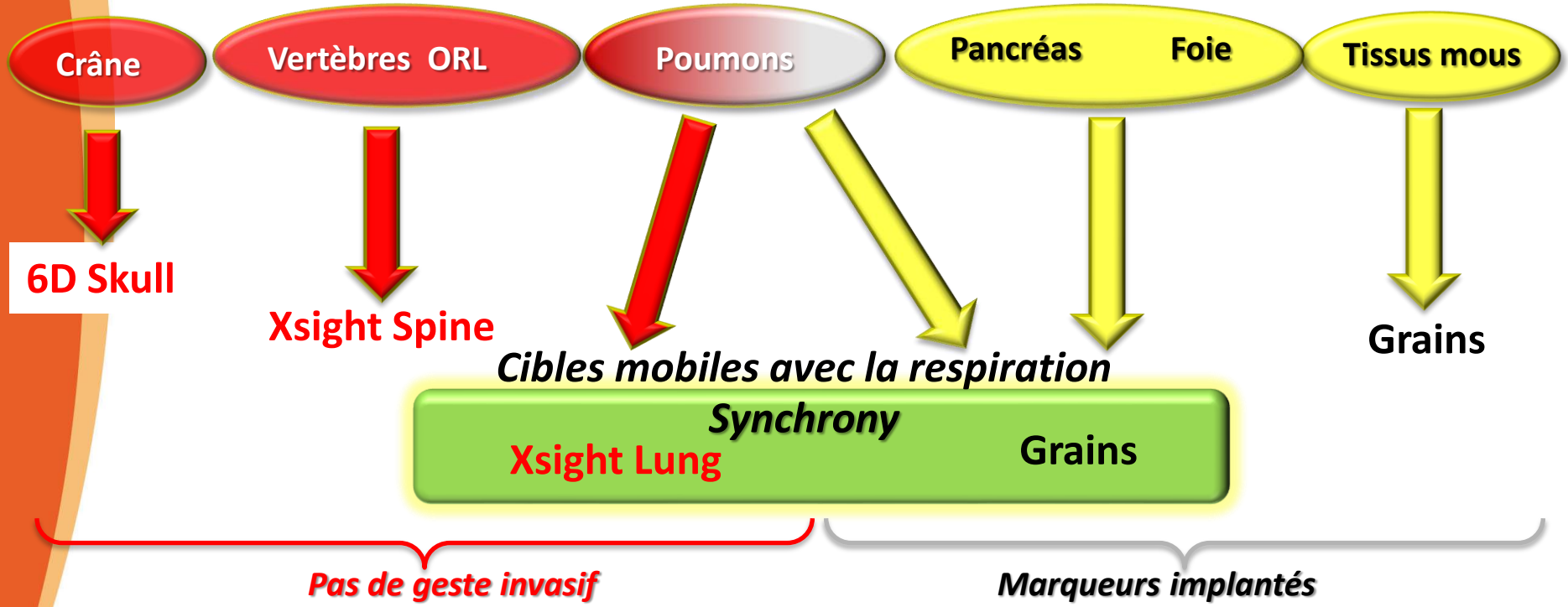
Technologie
Cyberknife (Accuray)

- **Cyberknife : Un système entièrement IGRT**
  - **Suivi en temps réel (à chaque faisceau) du patient et de la tumeur grâce à son système d'imagerie et son système de repositionnement**

- **Tête :**
  - **6D-Skull basée sur la reconnaissance de la boite crânienne**
- **Colonne :**
  - **X-Sight Spine basé sur la reconnaissance des corps vertébraux**
- **Tissus mous immobiles :**
  - **Marqueurs : reconnaissance de marqueurs implantés +/- suivi respiratoire en temps réel**
- **Poumons/foie :**
  - **Tracking avec marqueus**
  - **Tracking sans marqueurs (poumons uniquement) : reconnaissance de l'ombre de la tumeur sur l'imagerie**
- **Prostate :**
  - **Fréquence d'imagerie adaptée au mouvement interne**

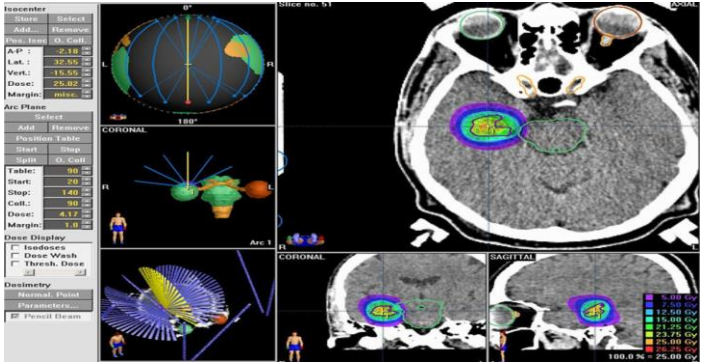
Technologie
Cyberknife (Accuray)

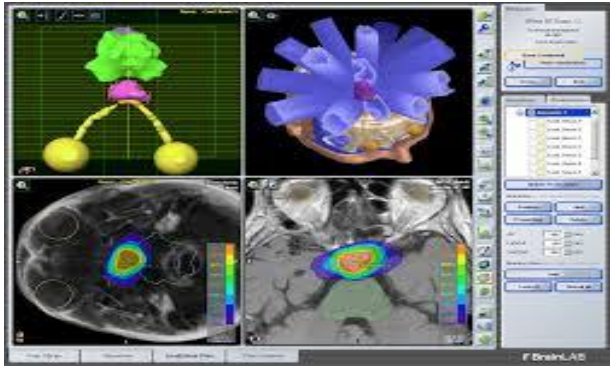
- **Algorithmes de suivi adaptés à la localisation traitée**



Technologie
Accélérateurs équipés

- **Utilisation des accélérateurs conventionnels et addition de modules spécifiques pour l'irradiation et le positionnement du patient**
  - **Utilisation de faisceaux de 6 à 10MV uniquement**
  - **Irradiation par faisceaux fixes ou arcs concentriques (intra-crânien)**
  - **Irradiation avec un mini-MLC additionnel (intra et extra-crânien)**
  - **Irradiation non coplanaire**



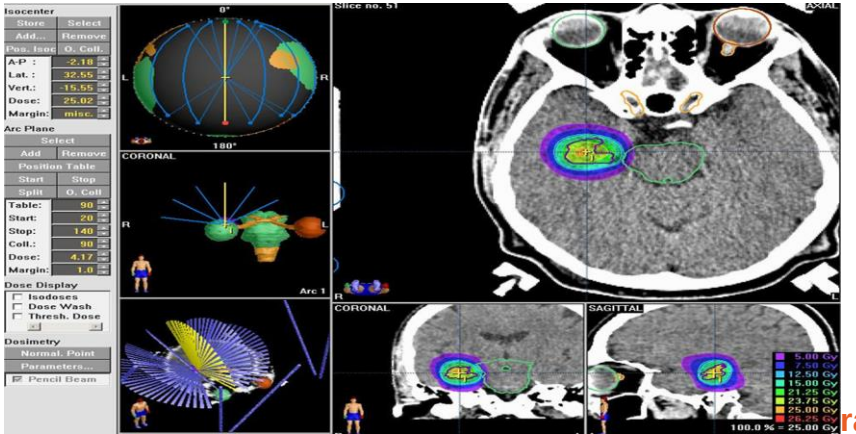


Technologie
Accélérateurs équipés

- **Radiothérapie stéréotaxique sur accélérateurs équipés**
- **Irradiation par arcs concentriques avec cônes cylindriques**
  - **Diamètre du cône adapté à la taille de la lésion**
  - **3 à 7 arcs (180° max.)**

Cône de tailles variables

Platine fixé à la base du collimateur



raine.fr

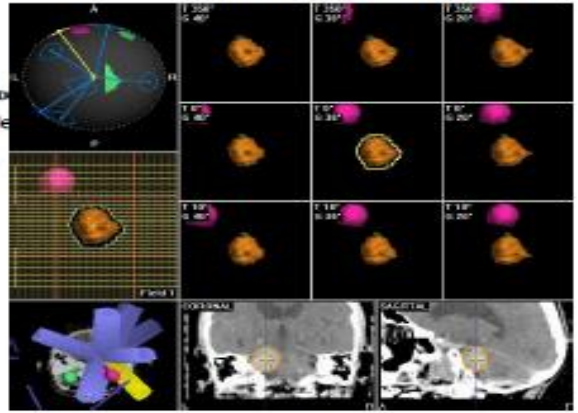
Technologie
Accélérateurs équipés

- **Irradiation avec un mini-MLC additionnel**
- **M3 (Brainlab) : lames ~3 à 5mm**
- **Faisceaux statiques ou par arc (adaptation dynamique de la forme du MLC / cible)**

Faisceaux fixes : Static Beam

Characteristiques:

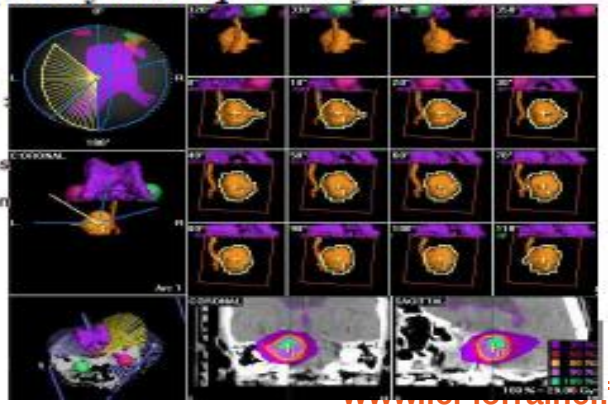
- 1 position des lames pour chaque faisceaux
- pas de mouvement de bras ou de lames pendant l'irradiation



Arcthérapie dynamique : Dynamic Arc

Caractéristiques:

- optimisation de la position des lames : changement tous les 10°
- Mouvement du bras et des lames pendant l'irradiation

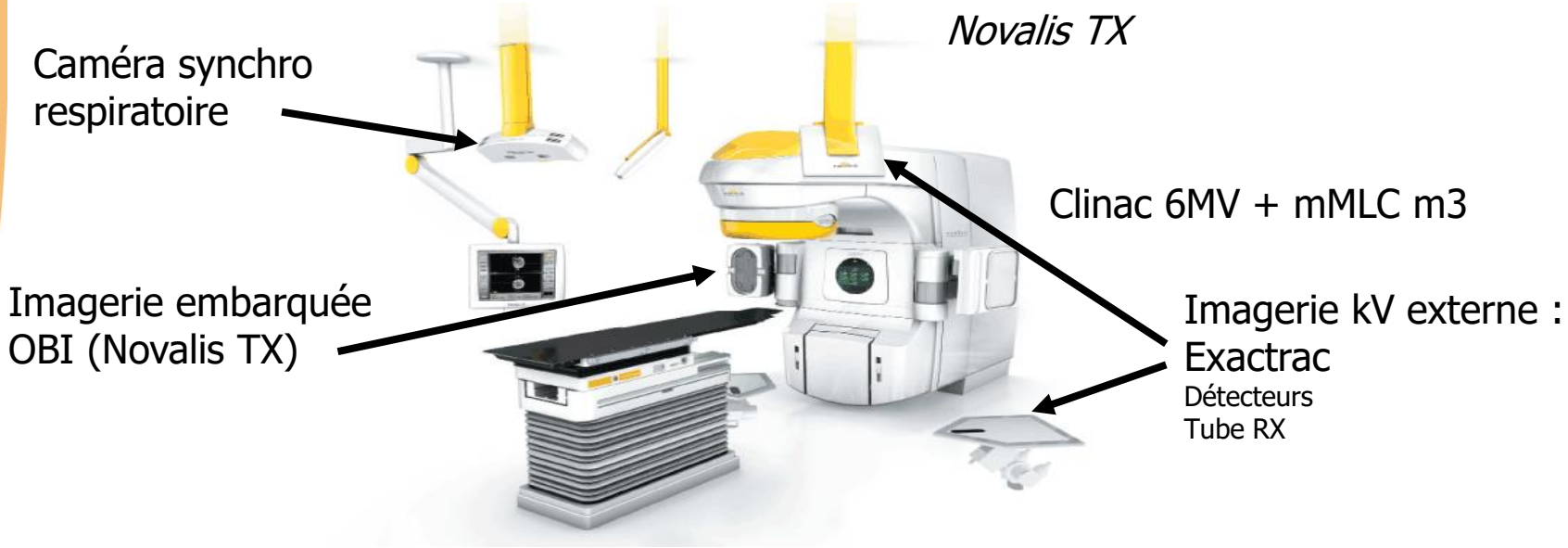


Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Machine conçue spécifiquement pour les traitements stéréotaxiques : intégration des éléments additionnels dans la machine**
- **Association Varian (accélérateur) et Brainlab (matériel stéréo) pour créer le Novalis**
- **Varian et Elekta ont également développé des versions spéciales de leurs machines**
- **Intérêt de ce type de machine : Permet également de faire des traitements non stéréotaxiques (rentabilité)**

Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Brainlab Novalis TX**
  - **Base : Varian Clinac 6EX (6MV) + MLC Brainlab m3**
  - **Double système d'imagerie (embarquée + externe)**
  - **Table motorisée à 6 degrés de liberté**



Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Brainlab Novalis**
  - **Idem que Novalis TX mais sans OBI**

Novalis – ICO Nantes

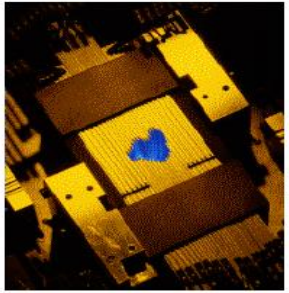
Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Brainlab Novalis**

Brunet 2011, ICO Nantes

Institut de Cancérologie de l'Ouest
René Gauducheau

Caractéristiques techniques



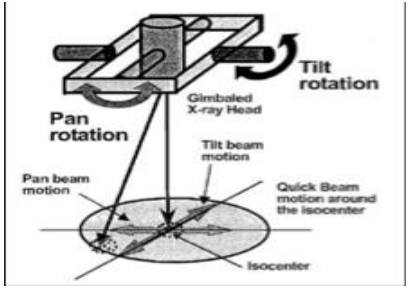
Collimateur mini-multilames intégré 10x10 cm

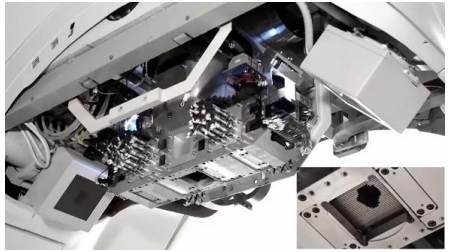
Ateliers radiothérapie – 31/03/2011

14/126

Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Systèmes d'irradiation avec une précision mécanique élevée**
  - **Machine de conception spécifique : Vero (Brainlab/Mitsubishi)**
    - **Accélérateur X6 MV monté sur anneau dans un panier oscillant (Gimbal)**
    - **2 axes de rotation**
      - **Horizontal : + ou - 180°**
      - **Vertical : + ou - 60°**
    - **MLC 30 paires de lames de 5 mm (IMRT)**
    - **Avec cône égalisateur, Débit de dose : max 5 Gy/min**
    - **Panier oscillant : permet l'orientation des champs d'irradiation dans 2 directions autour de la position centrale, indépendamment du mouvement des lames pour réaliser un tracking**





Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Varian TrueBeam STX**
  - **Clinac TrueBeam + MLC Millenium HD (lames de 2,5mm)**
  - **Faisceau FFF (Flatenning Filter Free) : Débit jusqu'à 1400 UM/min (6MV) et 2400 UM/min (10 MV)**
  - **Système d'imagerie OBI + synchro respiratoire**
  - **Table à 6 degrés de liberté**

MECHANICAL PERFORMANCE	
Gantry and collimator isocenter accuracy	≤ 0.5 mm radius
Gantry, collimator and couch isocenter accuracy	≤ 0.75 mm radius
Gantry rotational accuracy	≤ 0.3 degrees

MULTILEAF COLLIMATOR	
Millennium™ 120 Leaf MLC	
Center	5 mm width x 40 pairs
Peripheral	10 mm width x 20 pairs
Maximum static field size	40 cm x 40 cm
High Definition 120 Leaf MLC	
Center	2.5 mm width x 32 pairs
Peripheral	5 mm width x 28 pairs
Maximum static field size	40 cm x 22 cm

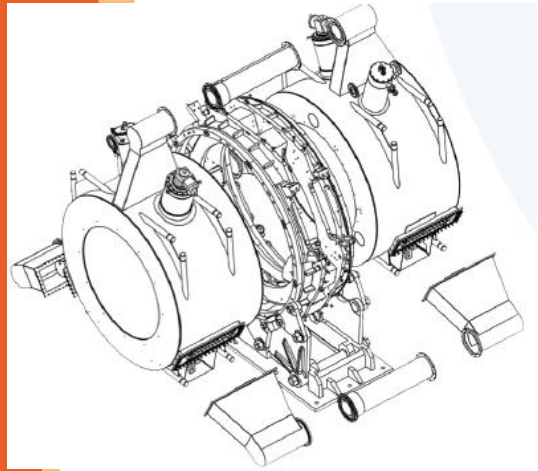
Données brochure Varian

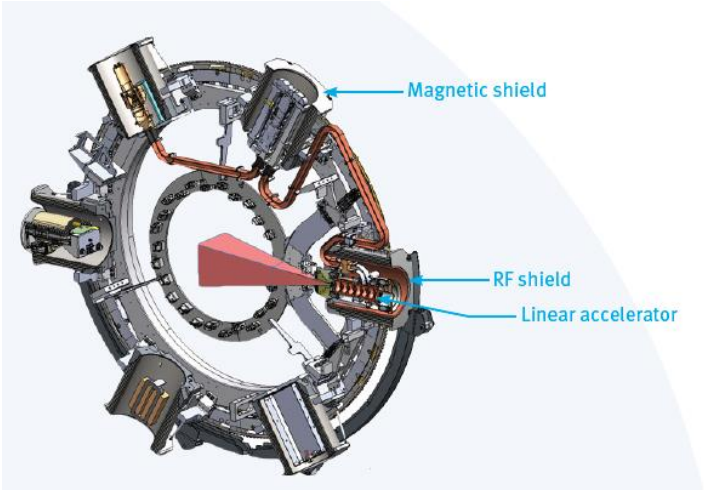
Technologie
Accélérateurs dédiés

- **Elekta Versa HD**
  - **MLC : Agility (160 paires de lames)**
  - **Système d'imagerie embarquée + synchro respiratoire**
  - **Table à 6 degrés de liberté**

Technologie
Accélérateurs dédiés

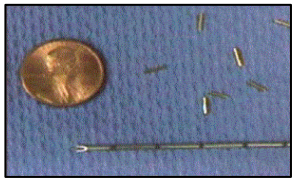
- **Viewray MRIdian**
  - **Premier système couplant IRM et radiothérapie**
  - **Guidage image par IRM (0,35 T) + adaptation plan de traitement**
  - **MLC : double rangée de 34 paires de lames (138 lames)**
  - **Irradiation :**
    - **Première version : 3 sources de Co-60**
    - **Nouvelle version : 1 accélérateur linéaire 6 MV**

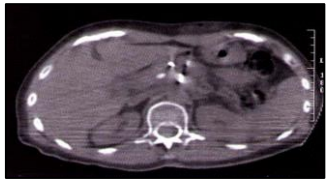




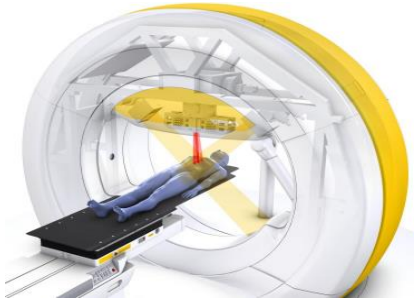
Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Repositionnement du patient ou de la cible**
  - **Système d'imagerie de contrôle associé (IGRT) : tube RX/capteur plan**
    - **Système embarqué**
      - **Images planaires (2D) : structures osseuses, fiduciaires implantés**





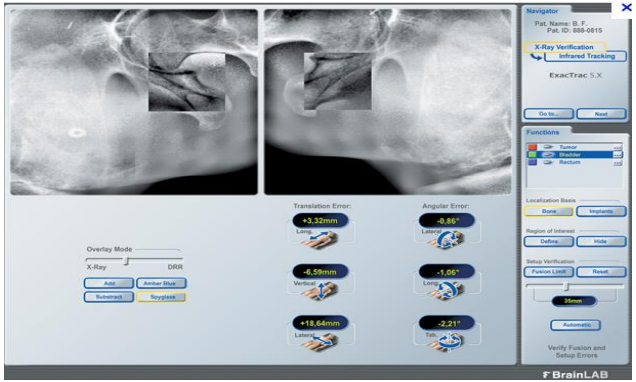
      - **Cone BeamCT (3D) : structures à faibles contrastes, tissus mous**
        Véro Brainlab, Elekta, Varian,



Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Repositionnement du patient ou de la cible**
  - **Système d'imagerie de contrôle associé (IGRT) : tube RX/capteur plan**
    - **Système externe à la machine**
      - **Statique : structures osseuses, fiduciaires implantés**
      - **2 images perpendiculaires à -45° et +45° => repérage 3D**

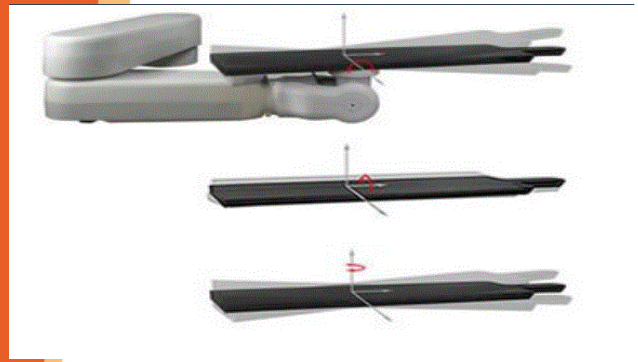
Exactrac (Brainlab), Cyberknife (Accuray)



Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Repositionnement du patient ou de la cible**
  - **Table motorisée et automatisée**
    - **Permettant déplacements 6D :**
      - **3 translations (Ant/Post, Sup/Inf, G/ D)**
      - **3 rotations (Roulis, Tangage, Lacet)**
    - **Compensation mauvais alignement du patient + suivi des mouvements intra-séance**

Cyberknife Accuray, Novalis-Vero Brainlab, Elekta, Varian



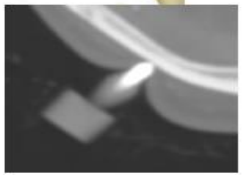
Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

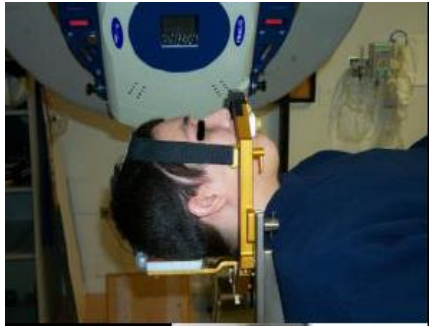
- **Système de contention du patient doit garantir :**
  - **Maintien du patient dans une position fixe (limiter le mouvement intraséance)**
  - **Etre confortable pour permettre au patient de rester immobile pendant les séances (durée allongée par rapport aux traitements standards**
  - **Etre compatible avec les différents équipements et modalités d'imagerie (IRM !)**

Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Cas de l'utilisation d'un <u>cadre stéréotaxique invasif</u> (RCS intracrânien)**
  - **Pour garantir une précision maximale en radiochirurgie**
  - **Cadre vissé dans le cadre du patient (4 vis) en début d'intervention (avant réalisation des imageries nécessaires au traitement) et gardé en position jusqu'à la fin du traitement**
  - **Différents modèles de cadre invasif, le plus utilisé : cadre de Leksell**
  - **Cadre fixé à la table de traitement (ou système de potence externe)**

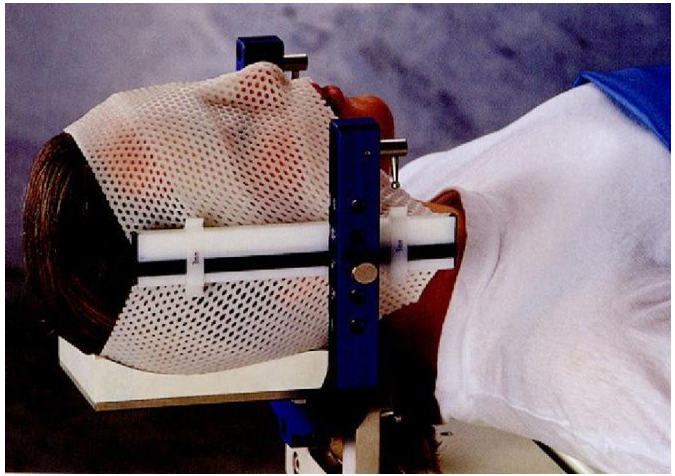
  - **Progressivement abandonné au profit de techniques non invasives + IGRT**

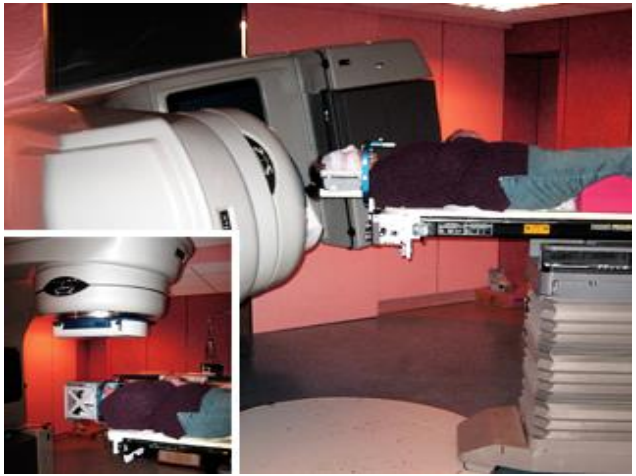




Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Cas de l'utilisation d'un <u>masque thermoformé non invasif</u> (RCS intracrânien)**
  - **Permet d'assurer un maintien et une précision satisfaisante (IGRT nécessaire)**
  - **Utilisé en radiothérapie fractionnée**
  - **Masque englobant la totalité de la tête**
  - **Plus épais et rigides que les masques standards**
  - **Parfois complété par un système de maintien palatin (empreinte du palais)**





Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Cas des irradiations extra-crâniennes**
  - **Pas de système invasif**
  - **Contentions permettant le maintien du patient dans une position stable et reproductible : matelas à dépression, coque personnalisée**

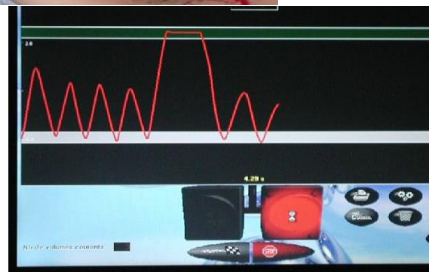
Matelas à depression

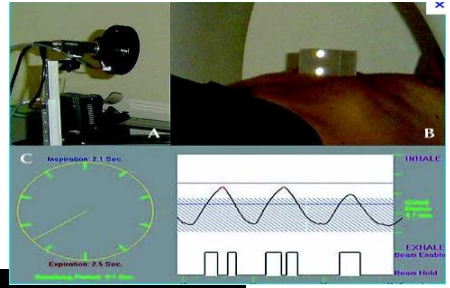
Coque personnalisée + compression diaphragmatique

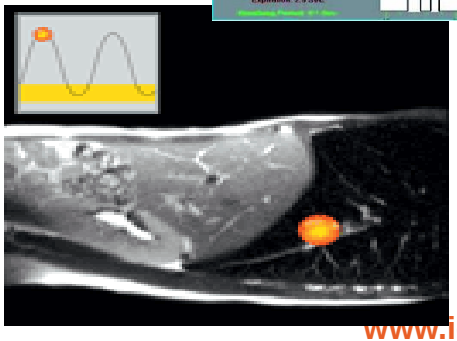
Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

- **Cas des cibles mobiles avec la respiration (extra-crânien)**
  - **Différentes stratégies possibles :**
    - **Pas de suivi ou de contrôle pendant la séance (scanner 4D, ITV…)**
    - **Suppression ou diminution du mouvement, irradiation sur une partie du cycle respiratoire (Gating, blocage diaphragmatique)**

SpiroDyn'Rx, RPM Varian, Calypso …



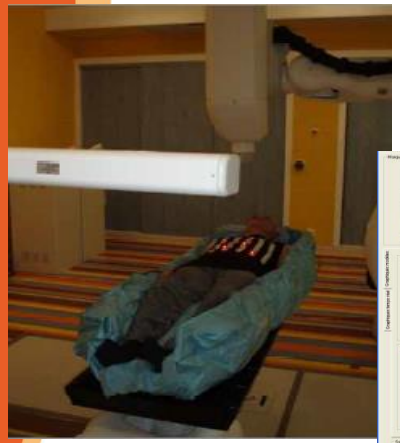


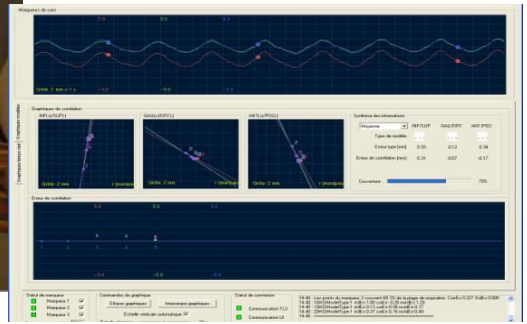


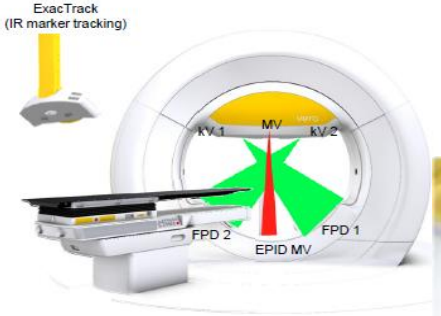
Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

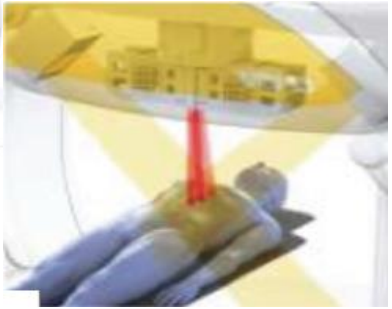
- **Cas des cibles mobiles avec la respiration**
  - **Différentes stratégies possibles :**
    - **Suivi du mouvement pendant l'irradiation (Tracking)**
    - **Modélisation mathématique de la corrélation mouvements de marqueurs externes et de marqueurs internes (fiduciaires ou anatomiques)**
    - **Système d'irradiation « suit » le mouvement interne prédit à partir du mouvement externe observé**

Synchrony (Accuray), Vero (Brainlab/Mitsubihi)





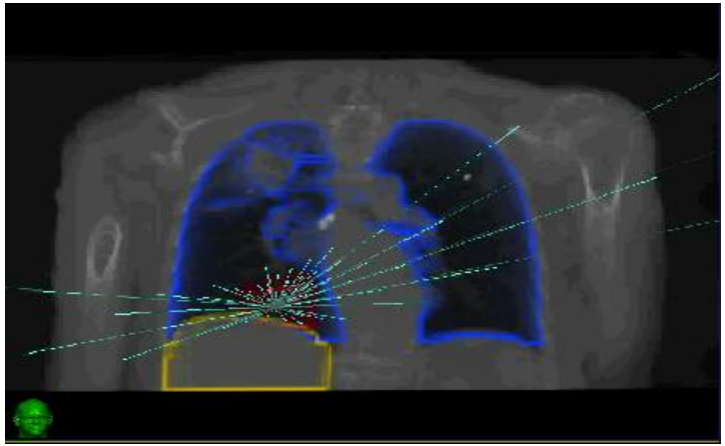




Technologie
Repositionnement – Guidage par l'image

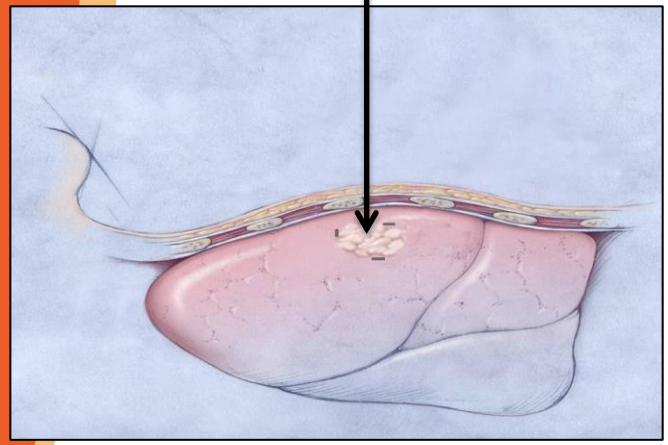
- **Suivi du mouvement de la cible en temps réel : Exemple du Cyberknife**

- **Administre les rayons tout au long du cycle respiratoire alors que le patient respire normalement**
- **S'adapte en continu aux modifications des différents modèles de mouvement respiratoire**

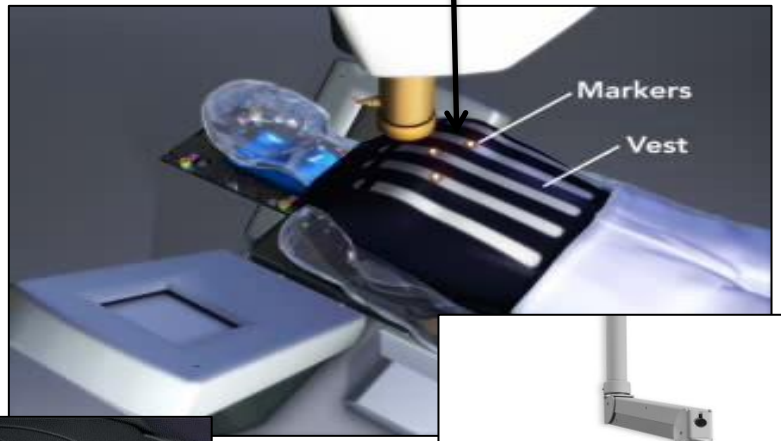


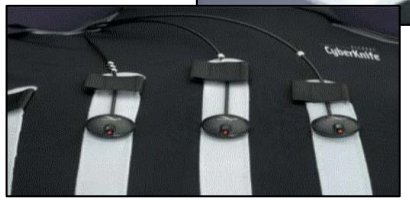
Technologie
Suivi respiration sur Cyberknife : Synchrony

- **Marqueur internes implantés avant le traitement**



- **Marqueurs optiques externes positionnés sur le thorax**



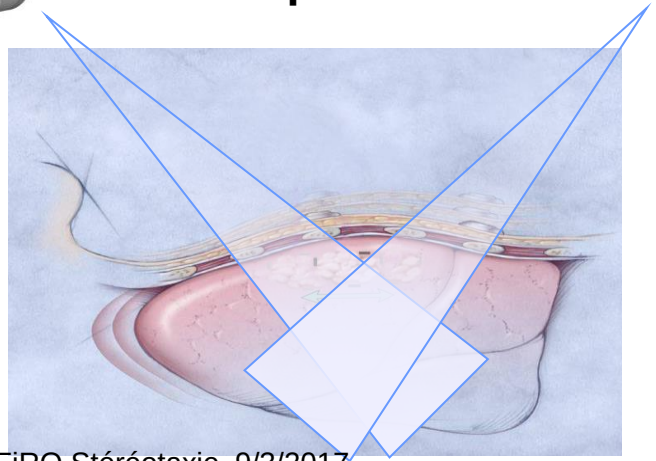


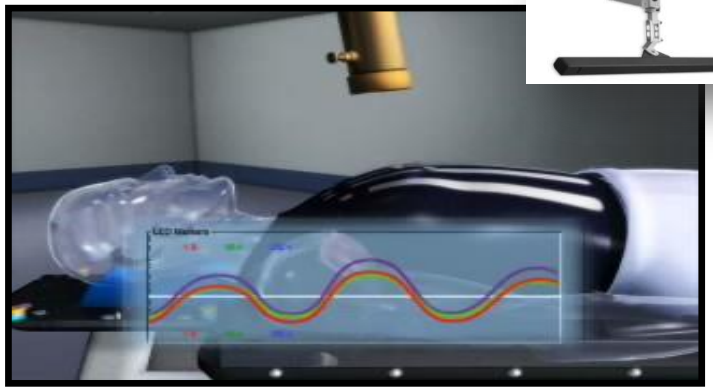
Technologie
Suivi respiration sur Cyberknife : Synchrony

- **Avant le traitement : Création d'un modèle de corrélation dynamique**

Reconnaissance auto. des marqueurs + enregistrement de leurs positions à différents moments du cycle respiratoire

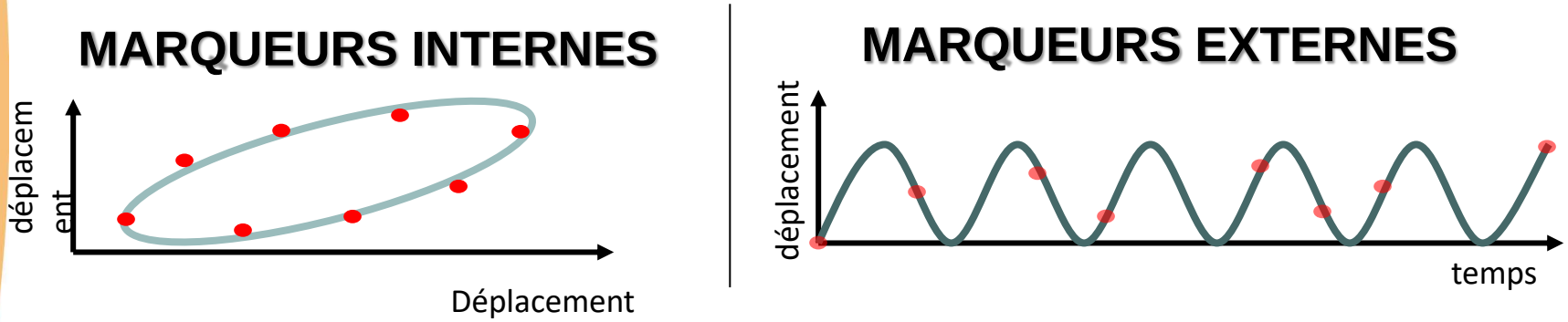
Enregistrement du mouvement des marqueurs externes en temps réel





Technologie
Suivi respiration sur Cyberknife : Synchrony

- **Avant le traitement : Création d'un modèle de corrélation dynamique liant le mouvement externe des diodes et les mouvements internes des marqueurs implantés**



Pendant le traitement : ce processus se répète, se réactualise et corrige le ciblage des faisceaux à partir du nouveau modèle respiratoire

Technologie
Suivi respiration sur Cyberknife : Synchrony

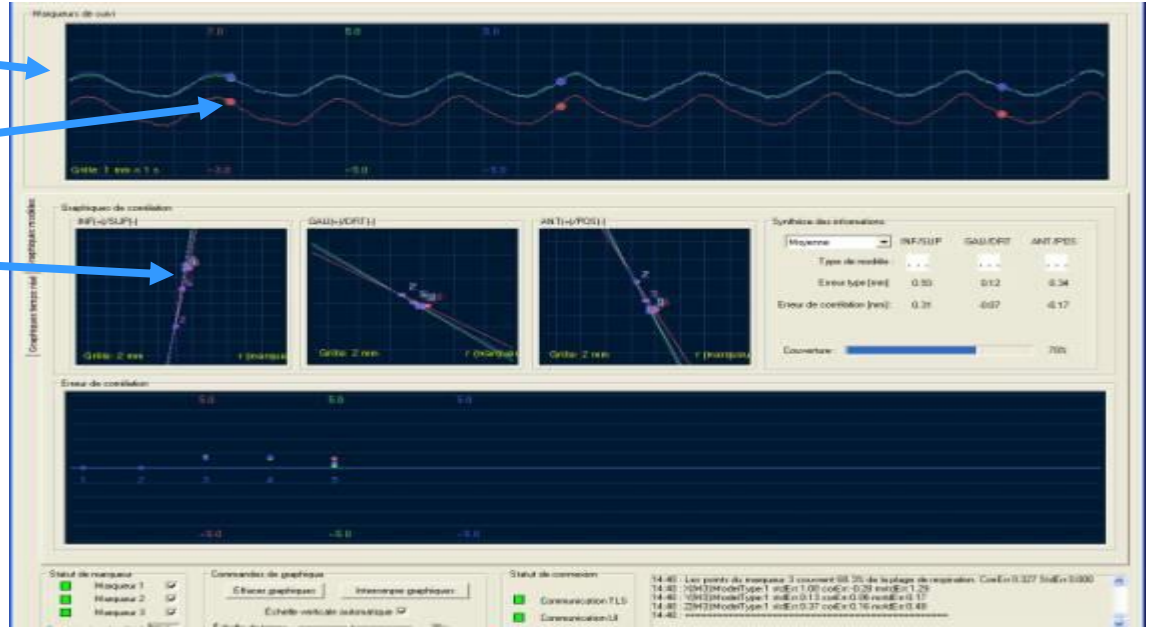
➔ **Détermination exacte de la position de la tumeur tout au long du cycle respiratoire + Anticipation du mouvement de la cible par le robot**

Mvt des 3 marqueurs externes

Prise de clichés kV

Relation mathématique interne/externe (1/direction)

Irradiation suivant mouvement externe pour suivre mouvement interne

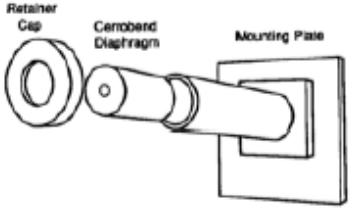


Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Importance d'une collimation additionnelle proche du patient**
  - **Meilleure définition du champ : pénombre réduite**
  - **Moins sensible à une erreur de positionnement**

Tertiary Collimation minimizes the geometric penumbra and positioning error



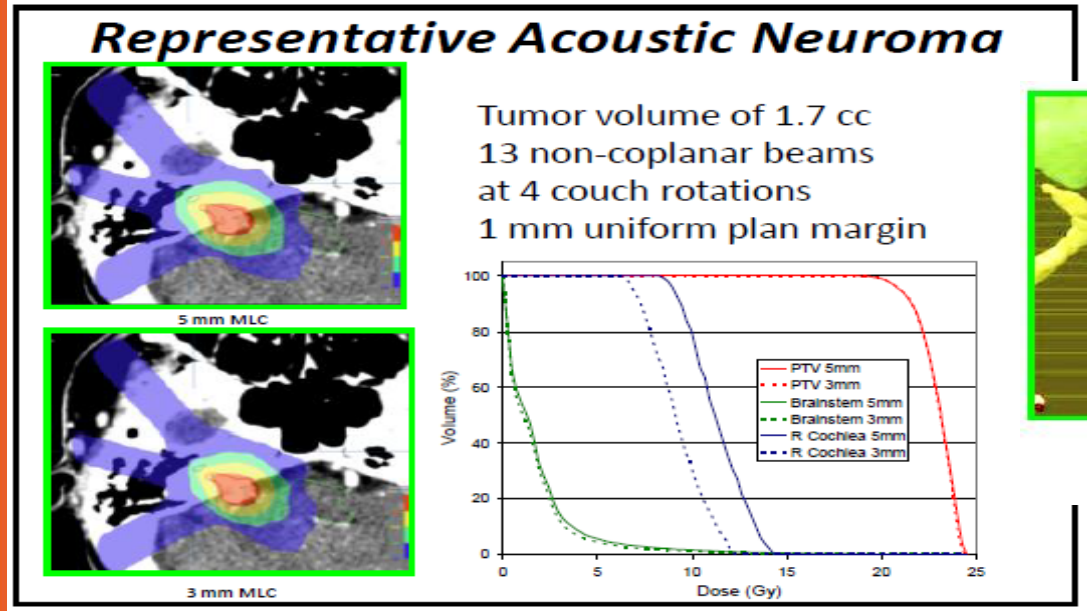
	Upper Jaw	Lower Jaw	Tray Collimator	Tertiary Collimator
Distance from isocenter (mm)	72	62	35	23
Geometrical penumbra for 2mm focal spot (mm)	5.1	3.3	1.1	0.6
Positional error due to 0.5mm displacement of X-ray target (mm)	1.3	0.8	0.3	0.15
Positional error due to 0.5 mm displacement of collimator (mm)	1.8	1.3	0.8	0.65

Smith et al Radiation Oncology Investigations (1993)

Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Intérêt des mini MLC**

Comparaison lames 5mm et 3mm



Yenice et al., Chicago, congrès AAPM 2011

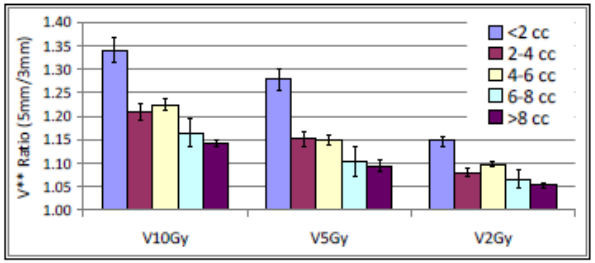
Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Intérêt des mini MLC**
- **Comparaison lames 5mm et 3mm**

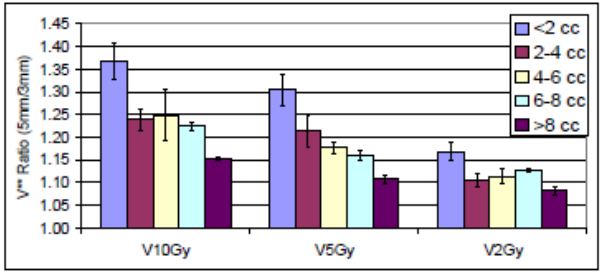
Normal Brain Dose (5mm vs 3mm MLC)

$$\text{V10Gy Ratio} = \frac{\text{V10Gy (5 mm)}}{\text{V10Gy (3 mm)}}$$

- V Ratio of 5mm to 3mm decreases with increasing volume for 10, 5 and 2 Gy
- V Ratio of 5mm to 3mm was higher for high isodose lines and lower for lower dose levels
- Normal tissue dose difference is significant only for lesions less than 2cc



Single Lesion (47 cases)



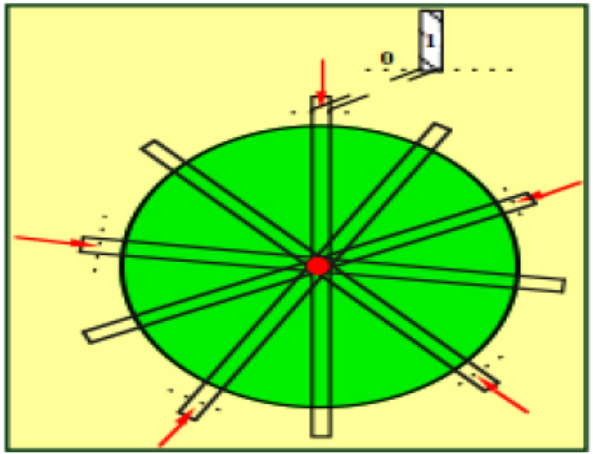
Multiple Lesions (19 cases)

Dose à l'encéphale sain : augmentation de 10% à 35% avec lames de 5mm

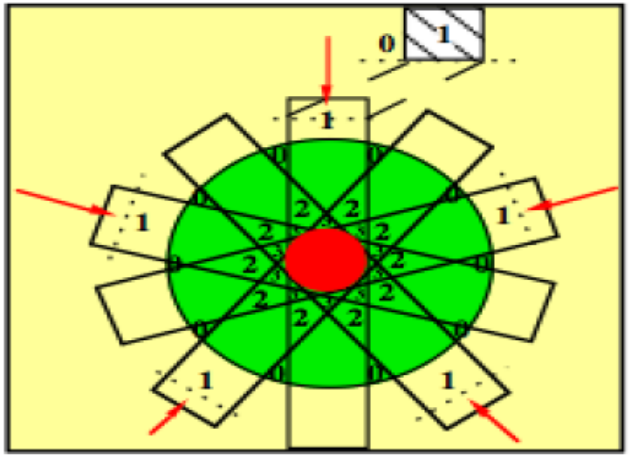
Yenice et al., Chicago, congrès AAPM 2011

Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Irradiation sur de faibles volumes**
- **Taille d'irradiation <= à 3-4cm max sinon trop de recoupe des faisceaux dans les tissus sains**



Small target, narrow beams
High dose is focused to where beams intersect over the target

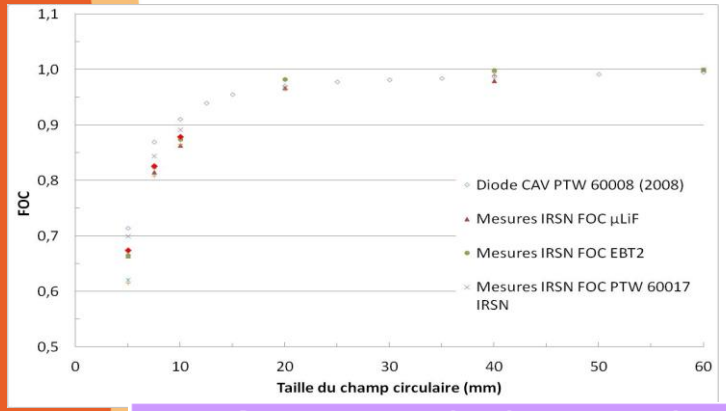


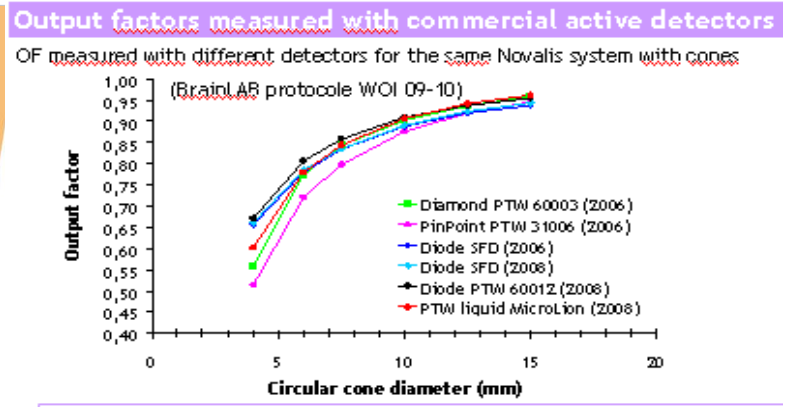
Large target, broad beams
Increased beam overlap beyond target boundary

Figures: Jürg

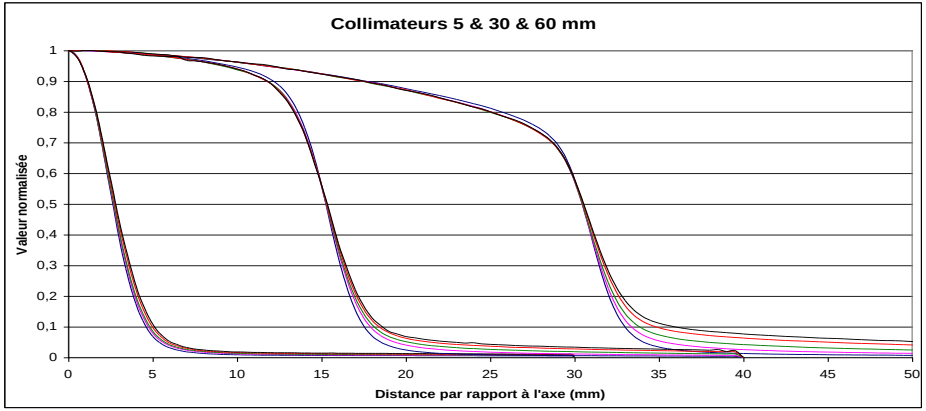
Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Notion de petits (mini?) faisceaux :**





Mesure des données faisceaux critique!!



Spécificités de la RCS
Des exigences accrues

- **Activité à haut risque malgré l'évolution des techniques**

- **Nécessite une gestion rigoureuse et réfléchie en amont et suivie tout au long de l'utilisation**

- **Mise en œuvre doit se faire en sécurité :**
  - **Organisation du projet avec un groupe de personnels pluridisciplinaires référents pour la technique**
  - **Savoir évaluer sa pratique (EPP, audits externes, audits dosimétriques, …)**
  - **Technique complexe : nécessite des moyens et du temps supérieurs aux techniques standards pour mettre en service (recette) et assurer la mise en œuvre au quotidien**
    - **Il faut s'assurer de l'adéquation entre le dimensionnement du projet et les ressources humaines disponibles**
    - **<u>Eviter la mise en difficulté des équipes qui pourrait compromettre la sécurité des traitements</u>**
  - **S'assurer de la formation des professionnels (initial, continue, par le constructeur…)**

Conclusion

- **Equipements et moyens pour faire la RCS disponibles et très variés**
  - **Machines dédiées (exclusives)**
  - **Machines équipées (polyvalentes)**
- **Choix dépend de l'objectif recherché et du projet du service**
- **Disponibilité ne signifie pas simplicité et absence de risques**
- **Si processus est maîtrisé, bénéfice démontré pour les patients**