

RADIOTHERAPIE STEREOTAXIQUE INTRACRANIENNE

ASPECTS RADIOPHYSIQUES

Anne BEAUDRE – Florent MARTINETTI



Définition de la radiothérapie stéréotaxique

Extrait du Rapport :

SITUATION DE LA RADIOTHÉRAPIE
EN 2011



21

2.2.3 Technique spéciale par radiothérapie stéréotaxique extra et intracrânienne

La radiothérapie stéréotaxique (RStx) est une technique de haute précision utilisant un ensemble de faisceaux convergents de très petites dimensions (« micro ou mini faisceaux »), permettant le traitement de volumes tumoraux de très petites tailles avec une très grande précision.



Définition de la radiothérapie stéréotaxique

- Appareils dédiés



Cyberknife (Accuray)- 6 MV



Gamma Knife (Elekta)
201/195 sources de Co-60

- Appareils non dédiés



Accélérateurs conventionnels avec mini MLC,
micro MLC ou collimateurs coniques



Tomothérapie (Accuray)-6MV

Définition de la radiothérapie stéréotaxique

- **Radiochirurgie** : Dose totale délivrée en 1 séance unique
SRS : Stereotactic Radio Surgery
- **Radiothérapie Stéréotaxique** : Dose totale délivrée en quelques fractions (2 à 10)
SRT : Stereotactic Radiation Therapy

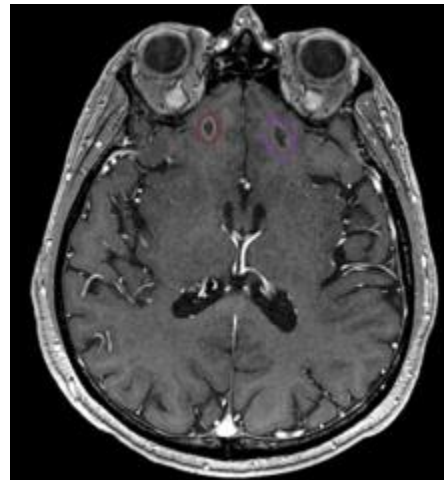
Définition de la radiothérapie stéréotaxique

IRRADIATION à Haute DOSE

d'un petit Volume

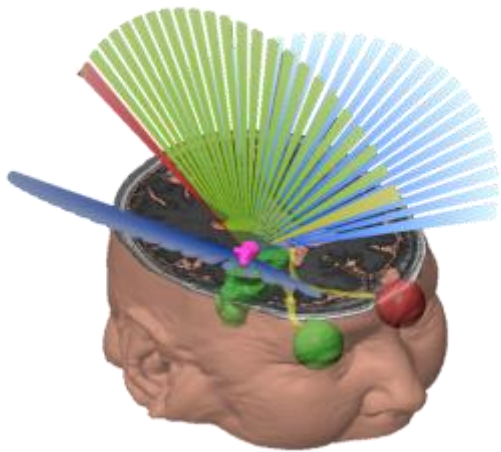
Avec des débits de dose élevés

(Exemple au NOVALIS TX : 100UM/min)

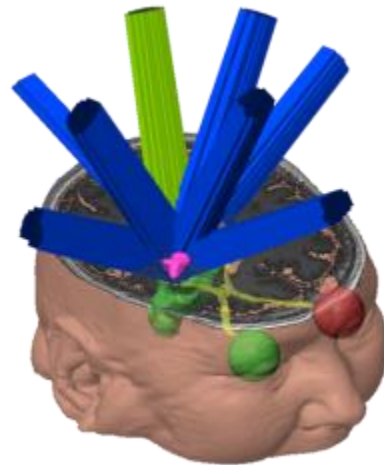


Définition de la radiothérapie stéréotaxique

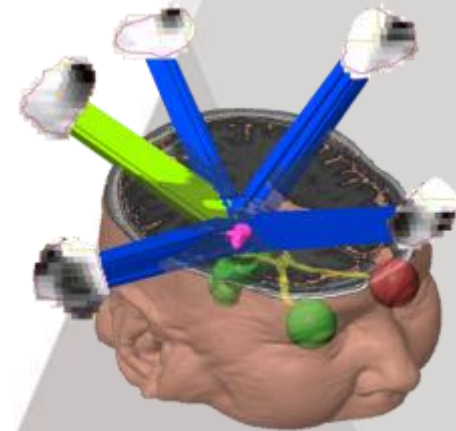
→ Utilisation d'un grand nombre de faisceaux (arcs, champs coplanaires et non coplanaires, faisceaux IMRT)



Arcs conformationnels dynamiques



Faisceaux conformationnels



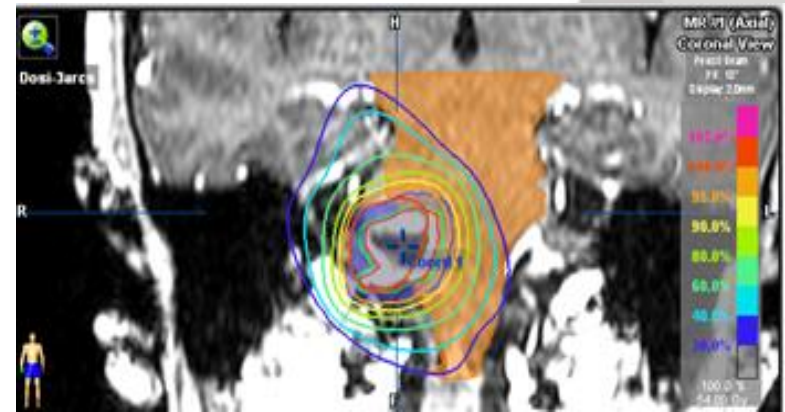
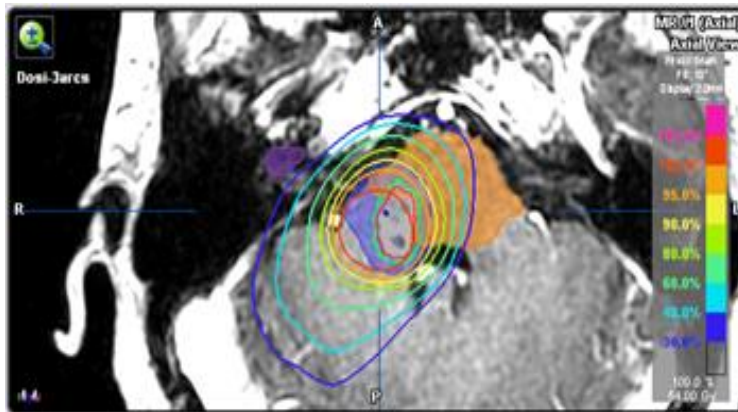
Faisceaux IMRT

Définition de la radiothérapie stéréotaxique

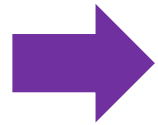
Distribution de dose très conformationnelle

→ Gradient important autour du volume cible

→ Meilleure protection des OARs



Définition de la radiothérapie stéréotaxique



Irradiation de HAUTE PRECISION
Précision requise de l'ordre du millimètre

- **En 3D : 1mm -> 0.1 % sur la dose**
- **En Stéréo : 1mm -> 25 % sur la dose**

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

Radiothérapie Stéréotaxique

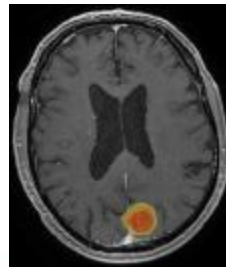
Géométrie
'millimétrique'

Marges Faibles



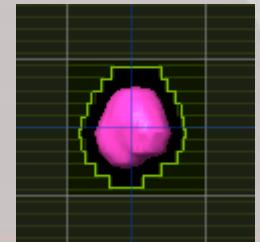
Prescription

Haute dose sur 1
isodose enveloppe



Dosimétrie
Petits Volumes

Petits Faisceaux

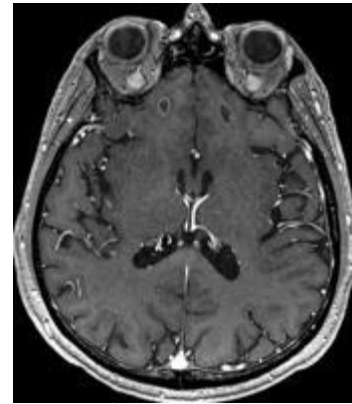
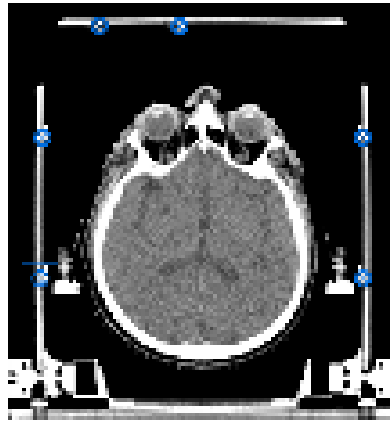


Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

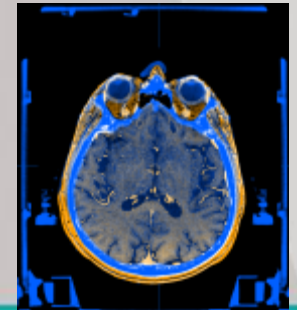
- **GEOMETRIE 'Millimétrique'**

Délimitation des volumes cibles et OARs +++

- Imagerie multimodalités indispensable
(+ Protocoles d'acquisition adéquats)



- Logiciel de recalage d'images performant



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **GEOMETRIE 'Millimétrique'**

Délimitation des volumes cibles et OARs +++

- **Outils de contourage précis**

Manuel, automatique, Atlas anatomique,
Expansion 3D, opérations booléennes



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **GEOMETRIE 'Millimétrique'**

Maintien du patient dans une position fixe

- Cadre invasif (Frame Based)



- Masque thermoformé + Localiseur (Frameless)
Repère de la tumeur dans un système de
radiothérapie stéréotaxique



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● GEOMETRIE 'Millimétrique'

Systeme de contrôle et de correction de la position du patient avant et au cours de la séance d'irradiation

- Camera IR
- Systeme d'imagerie (type EXACTRAC)
- Systeme d'imagerie embarquée CBCT



NOVALIS TX

➔ Nombre de contrôles de qualité augmente
➔ Niveau de Tolérance diminue

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● GEOMETRIE 'Millimétrique'

Propriétés mécaniques de l'accélérateur

- CML
- Isocentre
- Table à 6 degré de liberté
- ...



NOVALIS TX

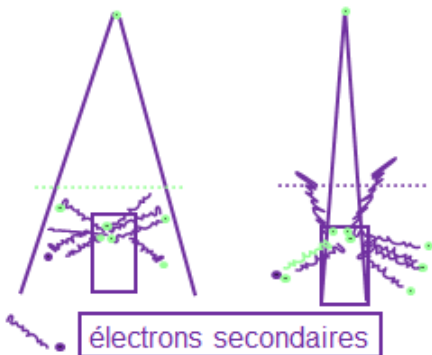
- ➔ Nombre de contrôles de qualité augmente
- ➔ Niveau de tolérance diminue

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **DOSIMETRIE des « petits faisceaux »**

Pourquoi la dosimétrie des petits faisceaux pose t'elle un problème ?

- à la 'physique' des petits faisceaux
- à la mesure dans les petits faisceaux
-> Choix d'un détecteur approprié



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **DOSIMETRIE des « petits faisceaux »**

Définition d'un «petit » faisceau ?

Pas de consensus clair
définition usuellement très subjective

-> **Attention particulière pour des champs**
< à 3 cm x 3 cm

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● DOSIMETRIE DES « petits faisceaux »

Définition d'un «petit » faisceau ?

Approche plus scientifique

(DAS et AI Med Phys 2008)

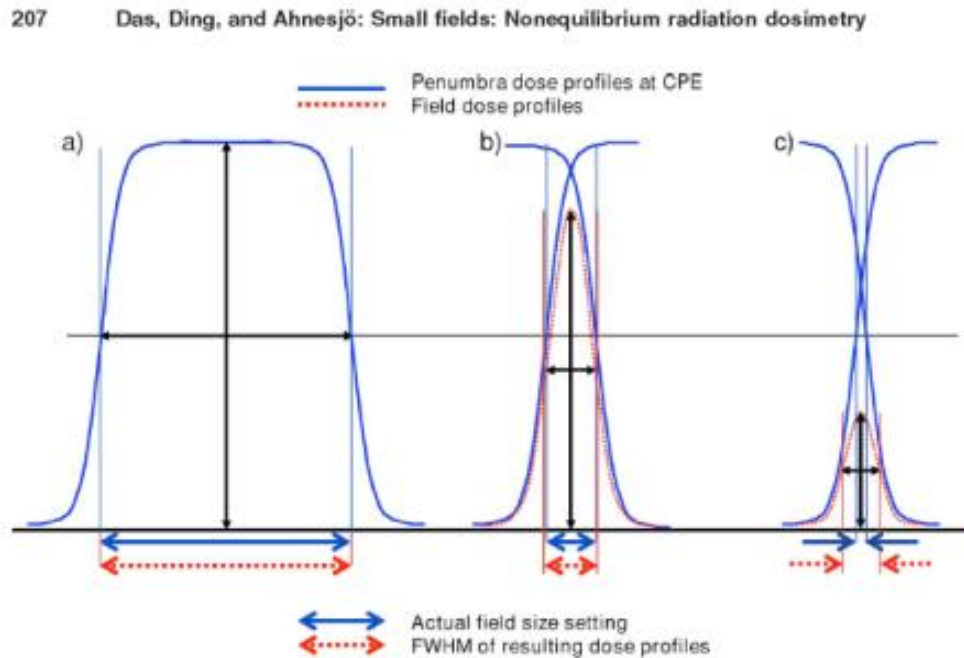
-> Considérations de 3 « equilibrium factor »

- 1- Taille de la source vue du détecteur à travers l'ouverture du collimateur
- 2- Parcours latéral des électrons dans le milieu irradié / à la dimension du champ
- 3- Taille du détecteur utilisé +++

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● DOSIMETRIE des « petits faisceaux »

-1- Effet de la taille de la source vue du détecteur à travers le collimateur



(Das et al.- 2008)

Si la taille du champ diminue :

- la source n'est que partiellement vue du point de mesure
-> pénombre géométrique sur tout le champ

- Méthode LMH (Largeur Mi Hauteur)
-> surestimation des dimensions du champ

-> surestimation de la dose en dehors du champ

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- DOSIMETRIE des « petits faisceaux »

-2- Effet du défaut d'équilibre électronique latéral EEL

Rayon du faisceau $< R_{max} e^-$ secondaires

=> Dose inhomogène dans le champ
d'irradiation

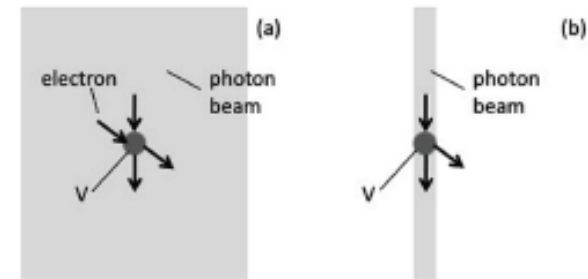


Tableau III : Valeur du rayon minimum, r_{EEL} , d'un champ circulaire pour avoir l'équilibre électronique latéral sur l'axe du faisceau, en fonction de la qualité du faisceau (D'après Li et al., 1995 [10]).

Faisceau	TPR _{20,10}	r_{EEL} (g.cm ⁻²)
⁶⁰ Co		0,6
6 MV	0,670	1,3
10 MV	0,732	1,7
15 MV	0,765	1,9
24 MV	0,805	2,1

-> Rayon augmente
quand l'énergie augmente

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **DOSIMETRIE des « petits faisceaux »**

-3- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?

Quelles mesures de dose ?

- Facteurs d'ouverture du collimateur (FOC)
- Rendements en profondeur
- Profils de dose.

- Dose absolue dans les 'conditions de Référence'

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?

Qualités requises pour le détecteur ponctuel « idéal »

- **Petit volume sensible du détecteur**
- **Equivalence à l'eau (ou ET) du milieu détecteur**
- Point effectif de mesure bien défini
- Réponse linéaire avec la dose ($< \pm 1 \%$)
- Pas de dépendance de réponse avec le débit de dose ($< \pm 1 \%$)
- Pas de dépendance angulaire de réponse ($< \pm 1 \%$)
- Réponse indépendante avec le spectre en énergie
- Réponse indépendante avec le type de rayonnement
- Répétabilité ($< \pm 0.5 \%$) et reproductibilité de réponse
- Pas d'influence des conditions atmosphériques sur la réponse
- Réponse dynamique, immédiate
- Sensibilité de réponse élevée

E.Fujak- G.Lutters -2007

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?

-> Chambres d'ionisation à cavité d'air

Chambre type PTW Farmer



$V = 0.6 \text{ cm}^3$

Chambres type PTW Semiflex



$V = 0.125 \text{ cm}^3$

$V = 0.3 \text{ cm}^3$

Type Pinpoint



$V = 0.015 \text{ cm}^3$

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?

-> Diodes, détecteurs diamant



$V = 0.03 \text{ mm}^3$



$V = 0,3 \text{ mm}^3$
 $V = 0,017 \text{ mm}^3$



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

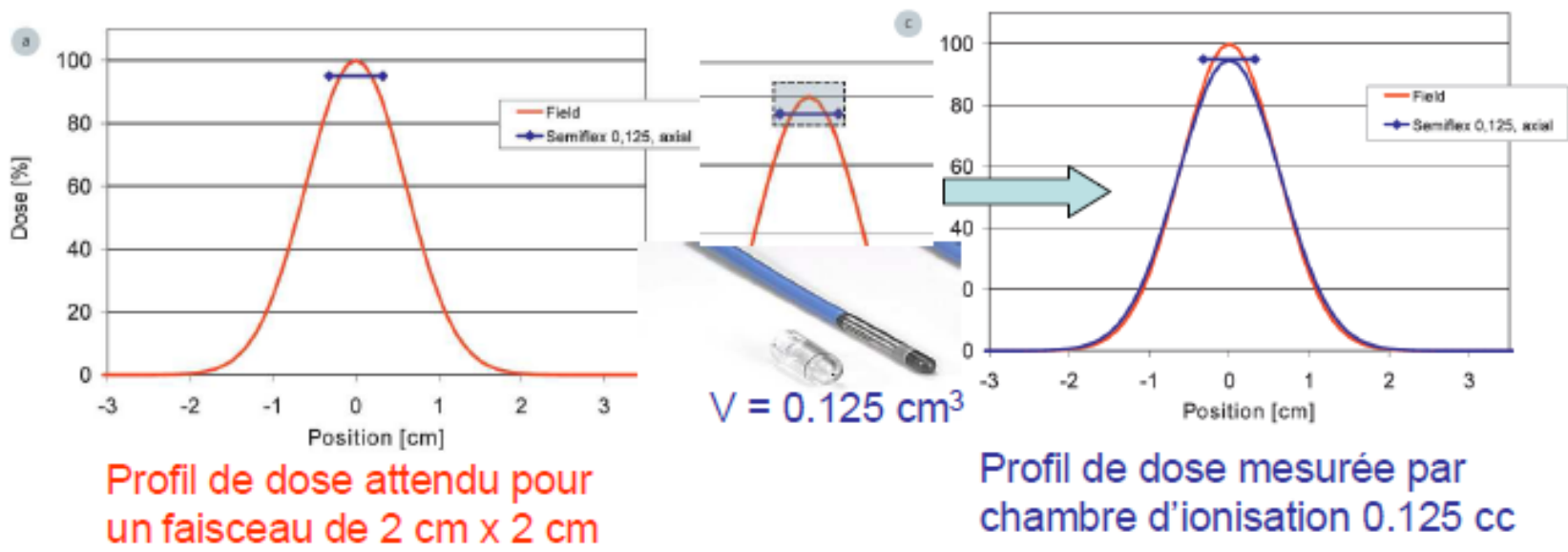
- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?

**Le détecteur “ idéal ”
n'est pas disponible actuellement.**

=> Le physicien doit utiliser différents types de détecteurs pour s'adapter à chaque situation de **mesure** (Mesures relatives, mesure absolue, Taille du champ d'irradiation ...)

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

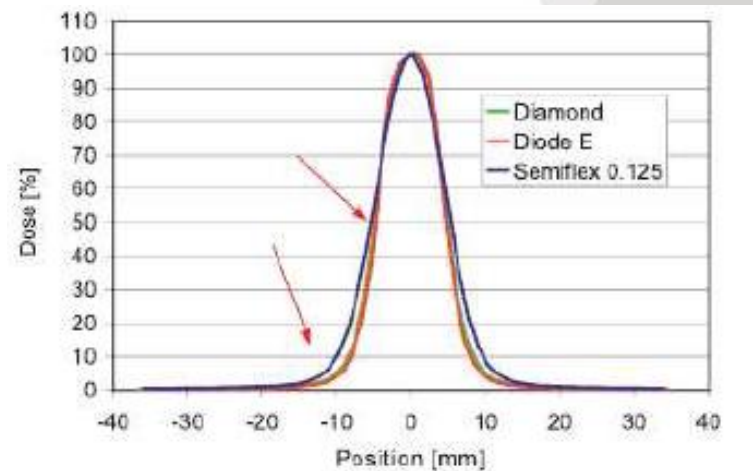
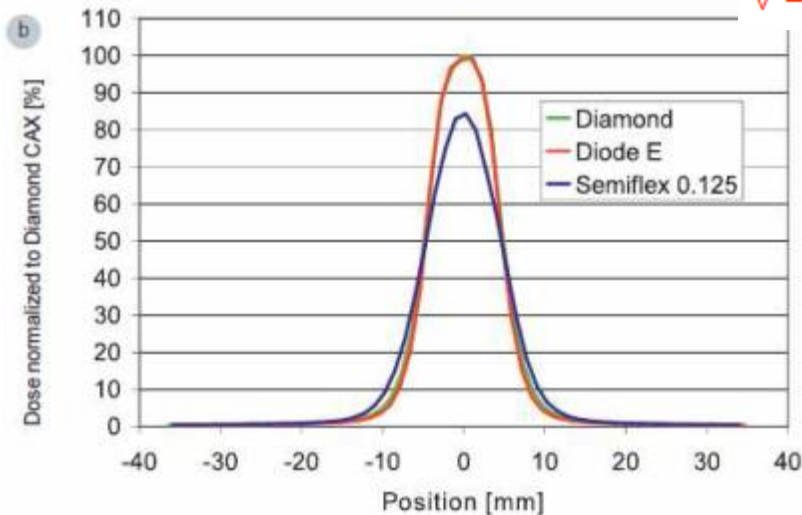
- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?



Effet de Volume : La dose sera sous estimée d'autant plus que la taille du détecteur est grande / à la taille du faisceau

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

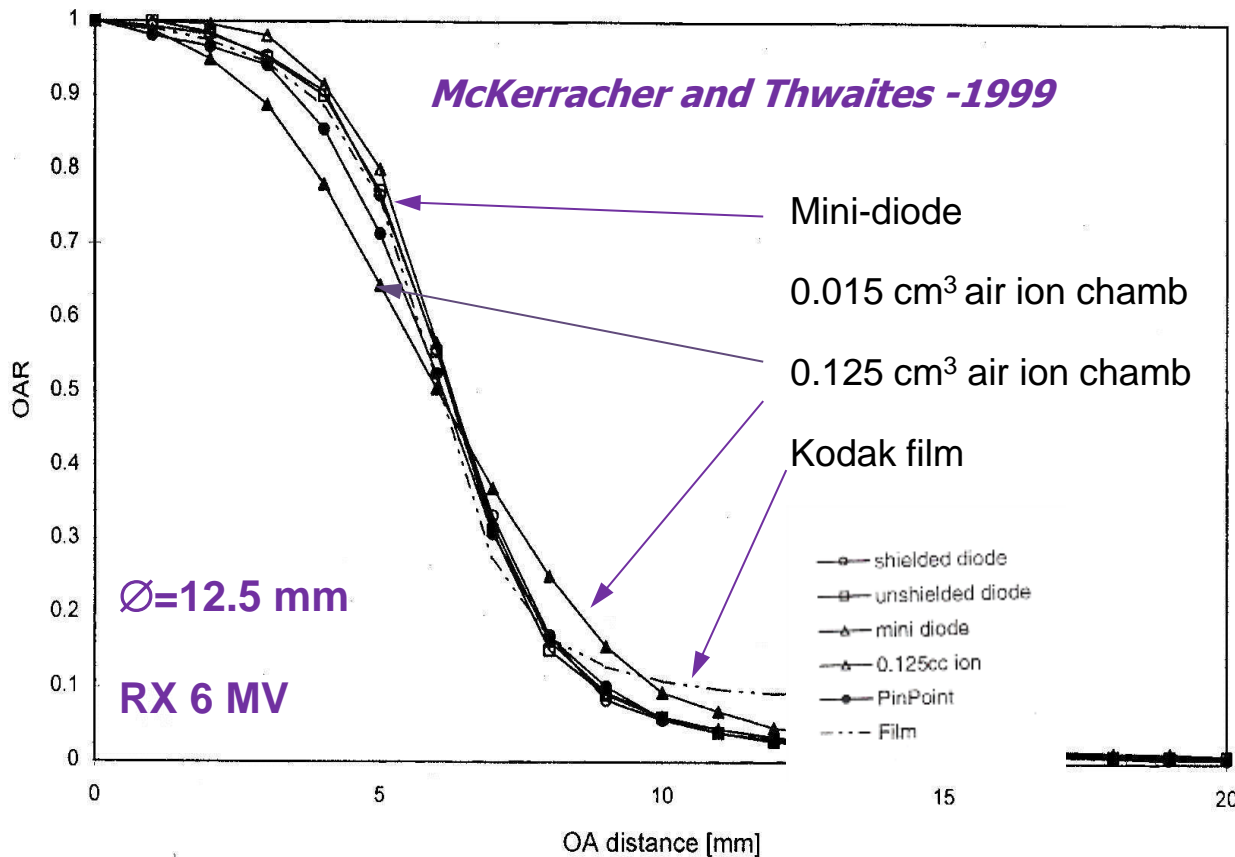
- Quel détecteur pour mesurer la dose dans les petits faisceaux ?



En pratique : Utiliser un détecteur dont les dimensions du volume sensible sont $<$ à $1/3$ du diamètre du faisceau

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Effet du volume détecteur sur la mesure de la pénombre des petits champs



→ Elargissement de la pénombre si Vdétect trop grand

Résolution spatiale élevée requise

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Effet du volume et de la composition du détecteur sur la mesure du FOC

C.Bassinot et al. -Poster –Congrès ESTRO-mai 2011

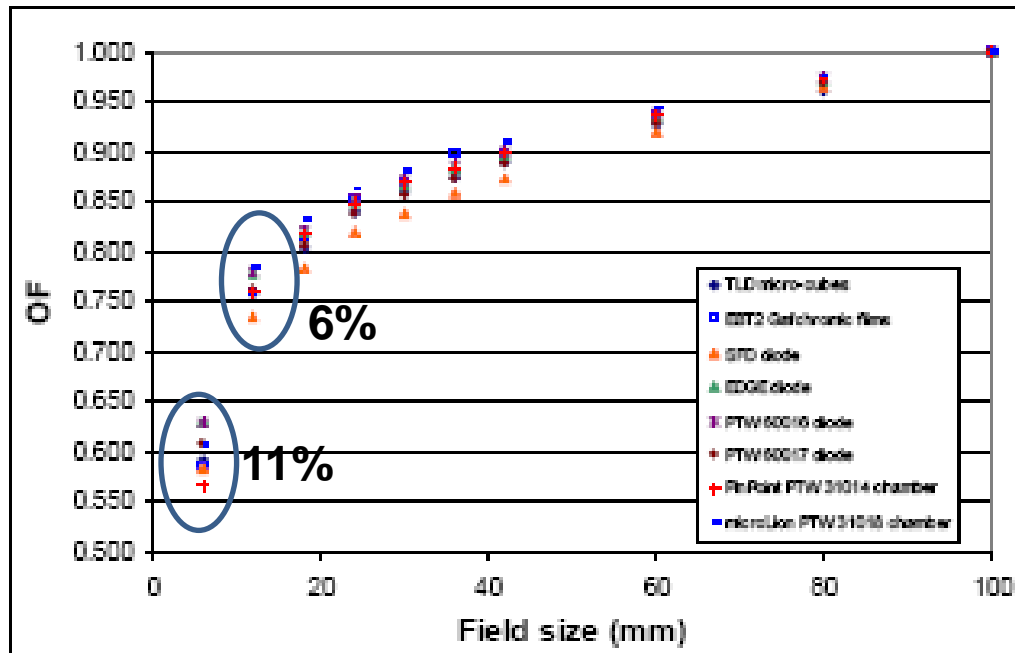


Figure 1. OF obtained for a Novalis system equipped with microMLC

-> Ecarts importants dans les mesures de FOC des champs < 2 cm
-> Sous-estimation avec les détecteurs de plus grand volume (CI)

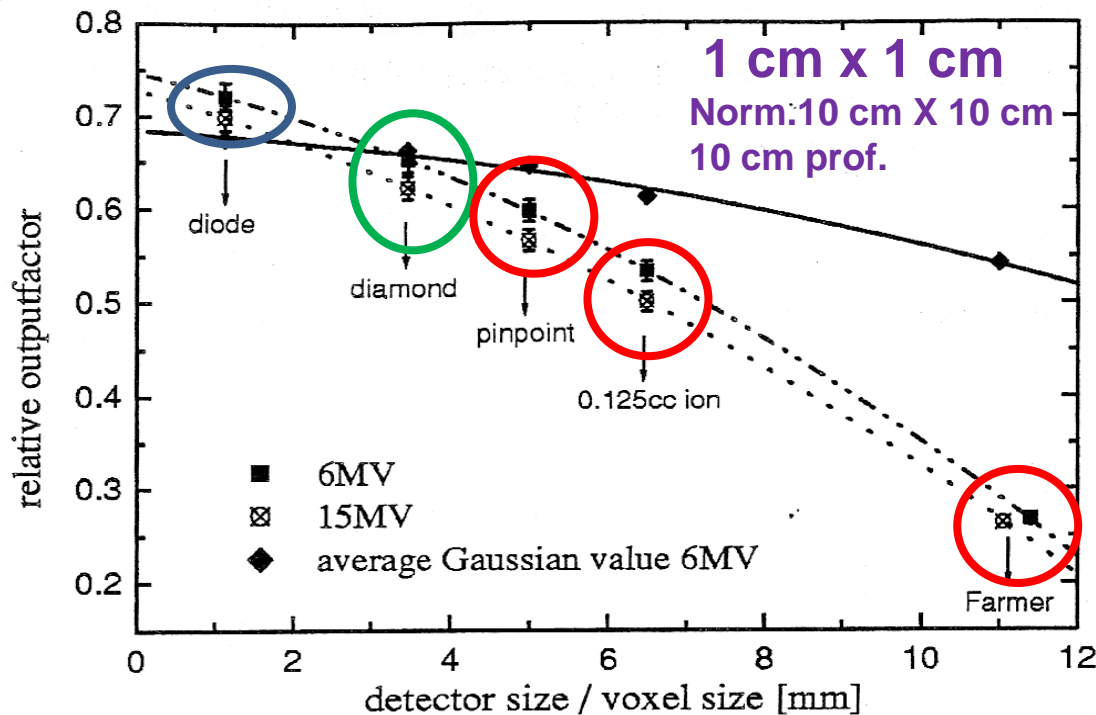
-> Valeur du FOC détermine le nb d'UM et donc la dose ..

Recommandation pour CI: $V_{\text{détect.}}$ inclus dans l'isodose 99%

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● Effet du volume et de la composition du détecteur sur la mesure du FOC

Laub and Wong-2003



Avec **diode**: sur-estimation FOC dû à \uparrow e- secondaires (diode non équivalent-eau)
 Avec **chambre**: sous-estimation FOC dû à \uparrow déséquilibre électronique latéral avec l' \uparrow du volume détecteur .

Le détecteur diamant constitue le détecteur de référence pour le FOC des petits champs (équivalence à l'eau et résolution spatiale élevée)

V (cm⁻³) **2.5x10⁻⁶** **2x10⁻³** **0.015** **0.125** **0.6**

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Dépendance de la réponse avec le débit de dose
-> Incidence sur les rendements en profondeur

6MV : 10cm x 10cm

3cm x 3cm

0.5cm x 0.5cm

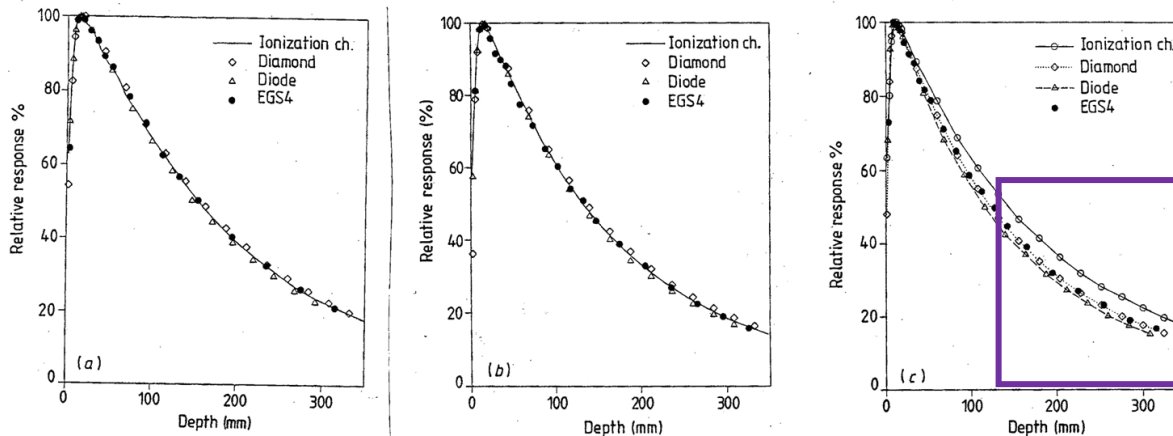


Figure 3. 6 MV photon beam percentage depth doses measured with ionization chamber, diamond, and diode detectors and calculated using MC (EGS4) for (a) $10 \times 10 \text{ cm}^2$, (b) $3 \times 3 \text{ cm}^2$, and (c) $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ field sizes at FSD = 100 cm.

M Heydarian et al. 1996

Avec la profondeur, le débit de dose ↘

- Avec **chambre**: dépendance négligeable (pour $\phi_{CI} \ll \phi_{\text{champ}}$)
- Avec **détecteur diamant** surestimation de la réponse
- Avec **diode**: sous estimation de la réponse

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- **Dosimétrie de référence pour les « petits » faisceaux**

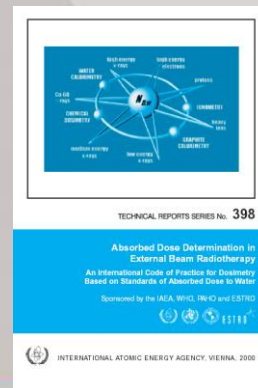
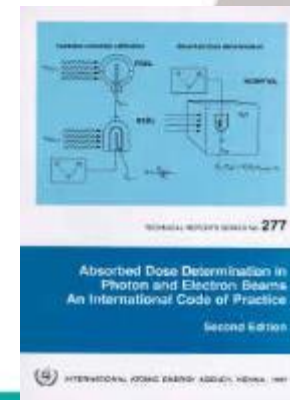
- **Protocoles de dosimétrie actuels**

IAEA (TRS 277, TRS 398), AAPM (TG21, TG51)

établis pour des conditions de référence
« classiques »

(champ 10cm x 10 cm – DSC=100cm)

non directement applicables.



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● Dosimétrie de référence pour les « petits » faisceaux

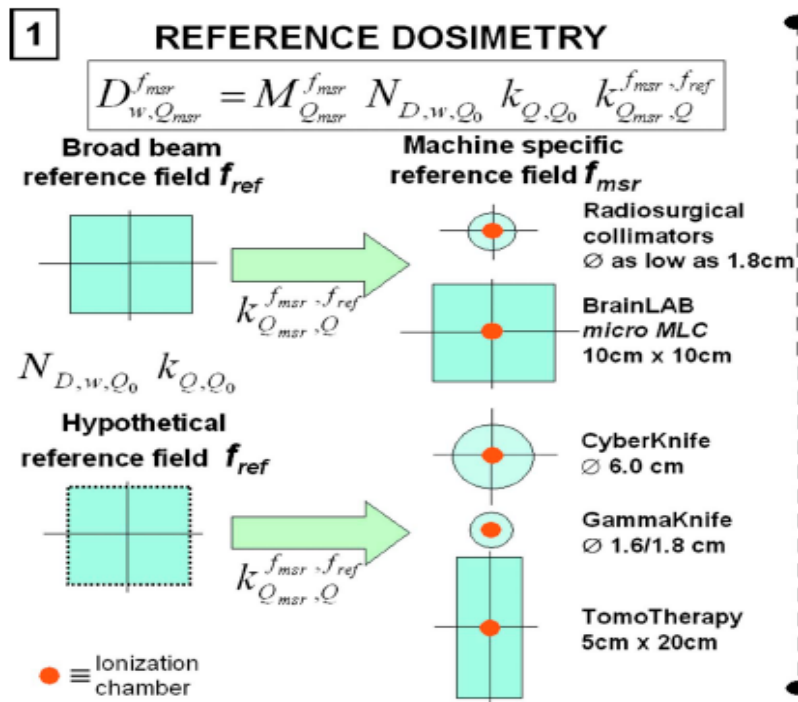


FIG. 2. Schematic overview of the dosimetry of small static fields with reference to a machine in this paper.

Formalisme proposé par AIEA et AAPM pour élargir les recommandations des protocoles « classiques ».

-> concept d'un champ de référence spécifique de la machine (f_{msr})

+ facteur tenant compte des différences de réponse de la chambre d'ionisation dans les champs f_{ref} et f_{msr}

$$k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}} = \frac{D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} / M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}}{D_{w,Q}^{f_{ref}} / M_{Q}^{f_{ref}}}$$

Alfonso et al. Med.Phys., V35, 2008

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Rapports : 2008 et 2013

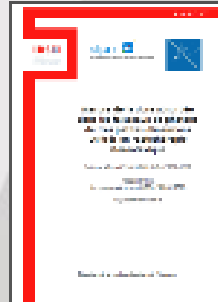


-> Conclusions et Recommandations du GT

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● Conclusions / Recommandations du GT

- Pas de référence métrologique pour les mini-faisceaux (travail AIEA / AAPM en cours)
- Pas de consensus quant au meilleur détecteur mais établissement de règles de base communes pour la réalisation des mesures
- Ne pas se contenter de mesures faites avec un seul type de détecteur, en particulier pour la détermination des FOC.



Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

● Conclusions / Recommandations du GT



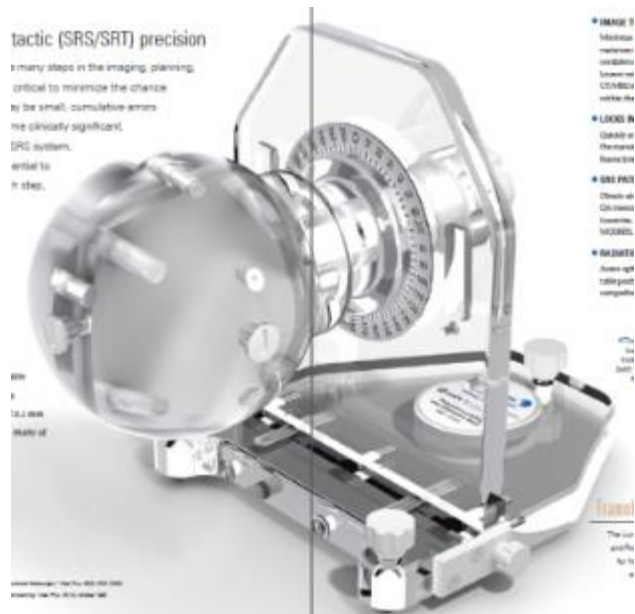
- Réaliser un audit externe ou inter-comparaison avec un autre centre après mesures, avant d'utiliser les mini-faisceaux pour le traitement des patients
- Valider les données de base entrées dans le système de planification des traitements par des mesures dans un fantôme irradié dans les conditions d'un traitement

Concepts spécifiques de la radiothérapie stéréotaxique

- Quel fantôme pour le CQ des plans de traitement ?

The Lucy 3D QA Phantom

verifies and assures stereotactic (SRS/SRT) precision



STEEV
STEREOTACTIC END-TO-END VERIFICATION



CONCLUSION

- 'Aspects radiophysiques' de la stéréointracrânienne

Précision millimétrique

-> **Contrôle de qualité +++**

à chaque étape de la préparation et de la réalisation du traitement

CONCLUSION

- ‘Aspects radiophysiques’ de la stéréointracrânienne
 - **Choix des détecteurs +++** pour l’acquisition des données dosimétriques de base
 - **Choix du détecteur** pour le contrôle de qualité des plans de traitements sur fantôme