Institut de Cancérologie de l'Ouest

unicancer PAYS DE LA LOIRE

DOSIMÉTRIE DES PETITS FAISCEAUX

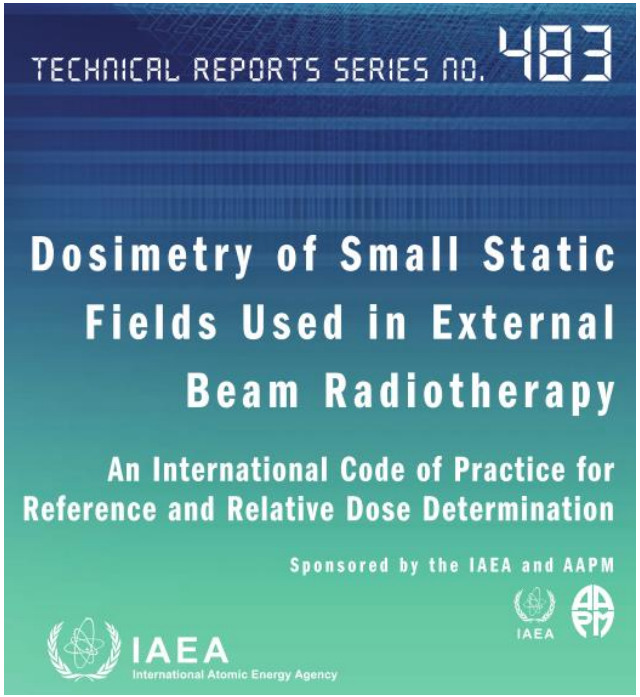
S. DUFRENEIX

stephane.dufreneix@ico.unicancer.fr

Participation de Maïwenn Leroy (CEA, LIST, LNHB)

UN CENTRE D'EXCELLENCE, UN ACCÈS POUR TOUS

BIBLIOGRAPHIE

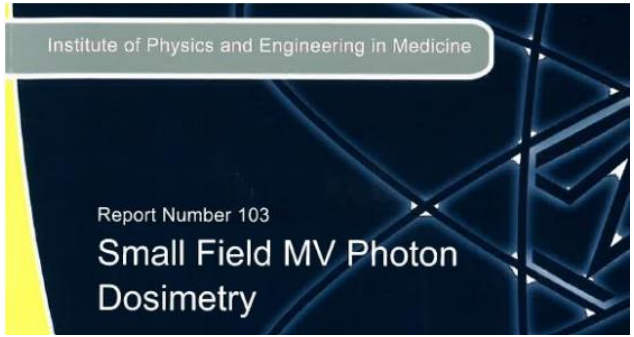


Received: 2 April 2021 | Revised: 6 May 2021 | Accepted: 2 June 2021
DOI: 10.1002/mp.15030

AAPM SCIENTIFIC REPORT

MEDICAL PHYSICS

Report of AAPM Task Group 155: Megavoltage photon beam dosimetry in small fields and non-equilibrium conditions



PLAN

1. **Problématique générale des petits faisceaux**
   1. Caractéristiques des petits faisceaux
   2. Conséquences
   3. Formalisme du protocole AIEA TRS-483
2. **Les différents types de détecteurs**
   1. Les chambres d'ionisation à cavité d'air
   2. Les diodes
   3. Le diamant
   4. Le scintillateur
   5. Les films
3. **Retour d'expérience**
   1. Généralités
   2. Mesures de rendements et de profils
   3. Mesure de FOC
4. **Utilisation des données mesurées dans les TPS**
5. **Etablissement de références dosimétriques en petits faisceaux**

1

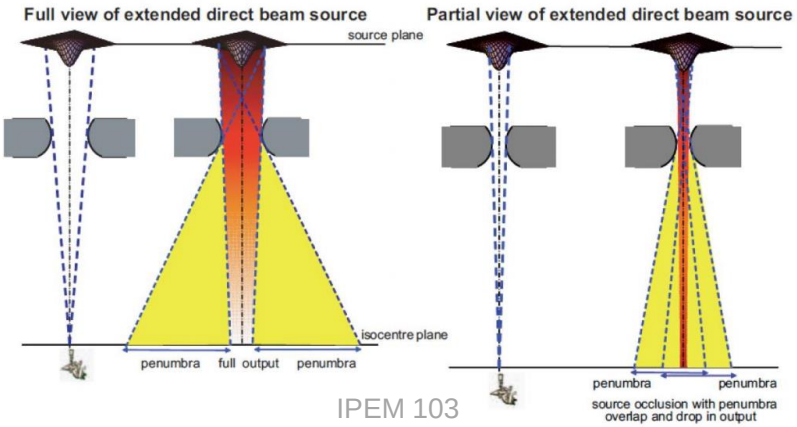
PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

- **Qu'est ce qu'un petit faisceau?**
  - Définition subjective (Das *et al.*, Med. Phys. 35 (1), 2008): attention particulière pour champ d'irradiation < 3 cm x 3 cm
  - Définition dépendant du faisceau (énergie) et du détecteur de mesure (dimension, masse volumique du milieu):
    - Occlusion partielle de la source par le système de collimation sur l'axe du faisceau
    - Manque d'équilibre électronique latéral sur l'axe du faisceau
    - Taille du détecteur similaire ou plus grande que celle du faisceau

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

- **Occlusion partielle de la source:**
  - 2 composantes faisceau:
    - Rayonnement direct: photons en provenance directe de la cible, considérée comme non-ponctuelle (tâche focale)
    - Rayonnement indirect: photons diffusés dans la tête d'irradiation
  - Lorsque la taille de champ diminue:
    - La part de rayonnement indirect diminue
    - La taille de la source primaire est occultée par le système de collimation
      - plus la source est étendue, plus large est le champ pour lequel l'occultation commence
      - fluence photonique sur l'axe réduite et ce d'autant plus que la source est étendue
      - Influence sur le spectre en énergie
      - prise en compte de la taille de la source nécessaire lors de la modélisation des petits faisceaux

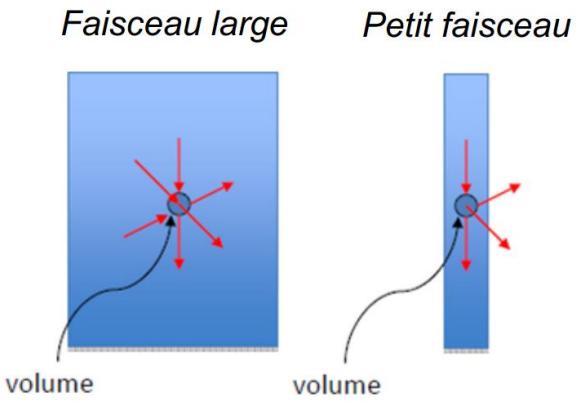


IPEM 103

  - Effet négligeable pour des champs supérieurs à 5-8 mm sur les accélérateurs actuels

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

- **Manque d'équilibre électronique latéral:**
  - Concerne le parcours latéral des électrons secondaires dans la matière
  - Effet présent en champs large en bord de faisceau (diffusion latérale des électrons non compensée)
  - En petits champs:
    - Il entraine une diminution de la fluence <u>sur l'axe</u>
    - Il apparait lorsque le rayon du faisceau est inférieur au parcours latéral maximal des électrons secondaires



PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

- **Manque d'équilibre électronique latéral:**
  - Rayon minimum d'un champ circulaire pour atteindre l'équilibre électronique latéral sur l'axe du faisceau:

Faisceau	r_{LCPE} (g.cm^{-2})
^{60}Co	0.6
6 MV	1.3
10 MV	1.7

(Li *et al.*, Med. Phys. (22), 1995)

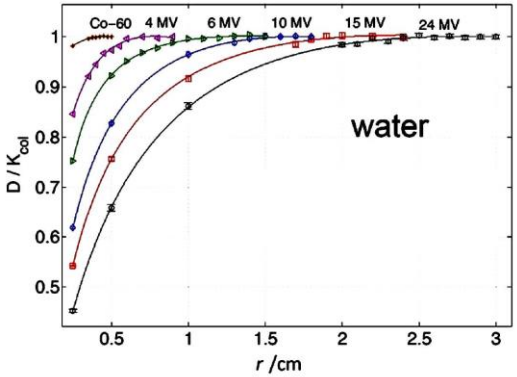


Figure A1: **Monte Carlo calculated D/K_{col} ratios in water at 5 cm depth on the central axis of photon beams of different nominal energy, as a function of the radius of the beam. The ratios are normalized to the values corresponding to broad beam transient charged-particle equilibrium (TCPE) conditions. The lateral charged-particle equilibrium range r_{LCPE} is determined as the field radius for which $D/K_{col} = 1$. From Papaconstadopoulos (2016) [47]. Reproduced with permission.**

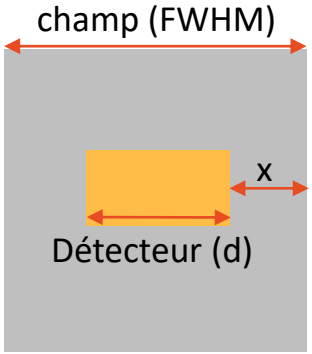
(Andreo, Radiother Oncol. (126), 2018)

- IAEA TRS-483: $r_{LCPE} \approx 8.369 \times TPR_{20,10} - 4.382$ cm
- TG155, Med. Phys. (48), 2021: $r_{LCPE} \approx 0.67\ d_{max} \pm 0.2$ cm

- Pour des faisceaux de 6 MV, les faisceaux de taille inférieure ou égale à 3 cm sont considérés comme petits

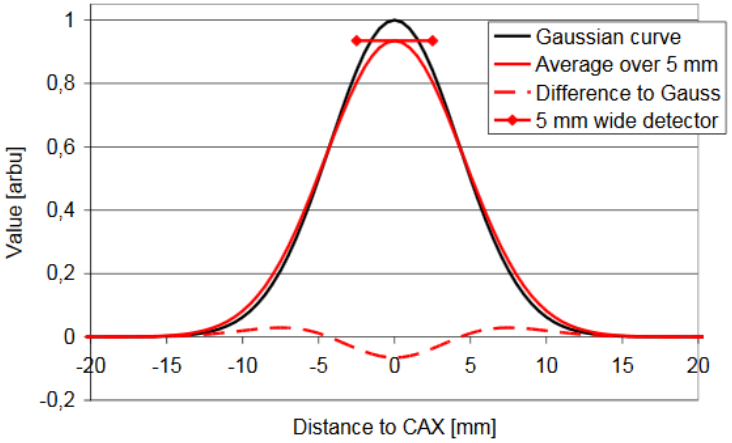
PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

- **Manque d'équilibre électronique latéral:**
  - Recommandation IAEA TRS-483: utiliser des détecteurs pour lesquels la distance entre le bord extérieur du détecteur et le bord du champ d'irradiation est plus grande que r_{LCPE}
  - Pour une mesure sur l'axe du faisceau:
    - d: plus grande dimension du détecteur
    - $x = FWHM / 2 – d / 2$
    - $x > r_{LCPE}$
    - $FWHM > 2 \times r_{LCPE} + d$



PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Caractéristiques des petits faisceaux

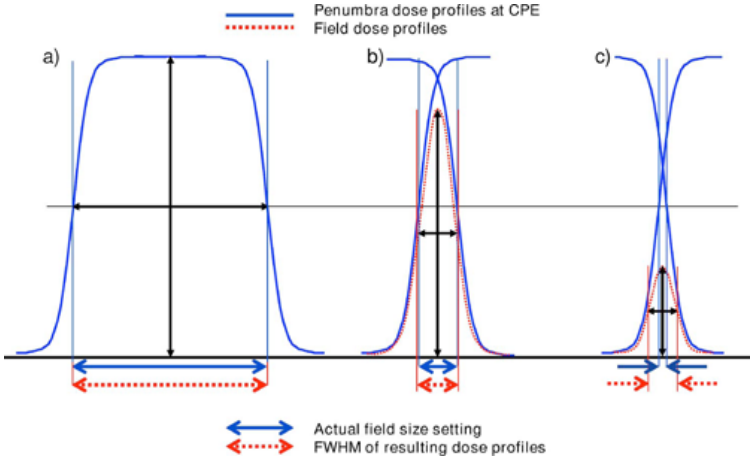
- **Impact du détecteur:**
  - Le signal d'un détecteur est proportionnel à la dose absorbée sur son volume sensible
  - Effet de « moyennage » si la dose n'est pas homogène sur le volume sensible
  - Remarquable en champ large sur des mesures de pénombre
  - Entraine une sous-réponse du détecteur sur l'axe pour un petit faisceau



(Wuerfel, Med. Phys. Int. (1), 2013)

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

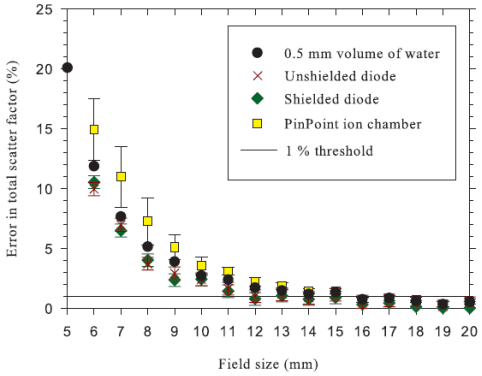
- **Taille de champ d'irradiation ≠ taille de champ géométrique:**
  - Taille du champ géométrique : projection de l'ouverture du collimateur dans un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau (simulation lumineuse)
  - Taille du champ d'irradiation : généralement définie comme la largeur à mi-hauteur des profils de dose (FWHM)
  - En petits champs:
    - Dose sur l'axe réduite (manque de LCPE et occultation partielle de la source)
    - Normalisation au maximum de dose:
      - Largeur à mi-hauteur mesurée à une position plus basse sur la courbe de pénombre
      - Elargissement apparent de la taille du champ



Das et al., Med. Phys. (35), 2008

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

- **Taille de champ d'irradiation ≠ taille de champ géométrique:**
  - IAEA TRS-483: utilisation de la taille du champ d'irradiation
    - Erreurs significatives possibles en cas de mauvaise estimation de la taille du champ
    - Charles *et al.*, Med. Phys. (41), 2014: erreur sur le FOC lors d'une erreur de 1 mm sur la taille du champ d'irradiation



  - Comparaison multicentriques de FOC (Cagni et al., Med. Phys. (43), 2016):

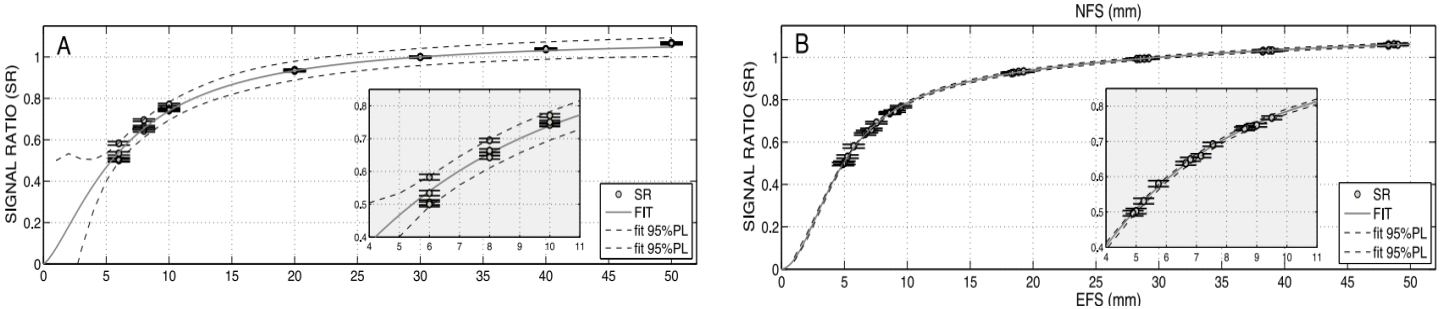


FIG. 1. Razor1 SR values with relative fit plotted as function of (A) NFS and (B) EFS. Prediction limits (PLs) with confidence interval of 95% for each fit were also reported. Error bars are also shown.

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

- **Durcissement du spectre**
  - Lorsque la taille de champ diminue:
    - Durcissement du faisceau de photons:
      - Baisse du nombre de photons de basse énergie (réduction des photons diffusés venant de la tête d'irradiation et atteignant le centre du petit faisceau, réduction du diffusé dans le fantôme d'eau)
      - Effet plus important pour les faisceaux d'énergie inférieure à 15 MV
    - Durcissement du faisceau d'électrons:
      - Modification du spectre des photons
      - Manque de LCPE : déficit d'électrons de basse énergie sur l'axe
  - Influence sur la réponse des détecteurs

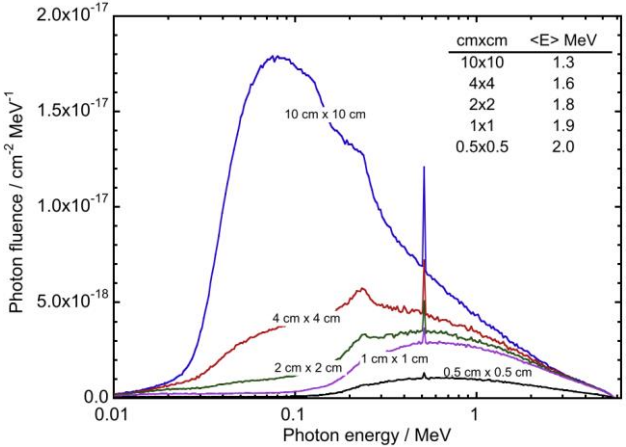


Fig. 1. 6 MV photon spectra in a small water volume for different field sizes at 10 cm depth. The variation of mean photon energy with field size is from 1.3 MeV (10 cm × 10 cm) to 2.0 MeV (0.5 cm × 0.5 cm). Note the photon peak at 511 keV resulting from positron annihilation. Adapted from Benmakhlouf et al. (2014) [24]. Copyright John Wiley & Sons Inc. Reproduced with permission.

Andreo, Radiother. Oncol. (126), 2018

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

- **Mesure de dose**
  - Théorie de Bragg-Gray améliorée de Spencer-Attix:

$$D_{water} = D_m \times s_{w,m} \times p_{det} \qquad \text{avec} \qquad s_{w,m} = \left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_m^w$$

Rapport des pouvoirs de ralentissement massiques par collision (restreints) dans l'eau et dans le milieu

Écart à la théorie : facteur de correction de perturbation lié à la présence du détecteur (paroi, électrode, etc…)

  - Conditions :
    - la cavité est suffisamment petite par rapport au parcours des électrons qui y pénètrent pour que sa présence ne perturbe pas la fluence des électrons
    - la dose absorbée dans la cavité est déposée uniquement par les particules chargées qui la traversent (les interactions des photons dans la cavité sont supposées négligeables, aucun électron n'est créé ou stoppé dans la cavité)

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

- **Mesure de dose**
  - Dosimétrie relative:

$$FOC\ (A) = \frac{M(A, z_{ref})}{M(A_{ref}, z_{ref})} \times \frac{[s_{w,m}]_A}{[s_{w,m}]_{A_{ref}}} \times \frac{p_{det,A}}{p_{det,A_{ref}}}$$

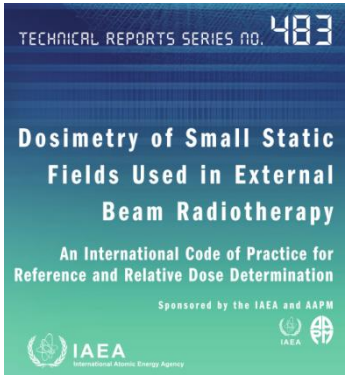
  - En champ large, on néglige les différences entre les champs d'irradiation de dimensions A et A_{ref}:
    - rapport des doses = rapport des lectures
  - En petit champ:
    - Pas d'équilibre électronique latéral au point de mesure
    - Spectres en énergie modifiés
    - Application de la théorie de la cavité? Détermination de p_{det} et de $S_{w,m}$?
      - Bouchard et al., Med. Phys. (42), 2015
      - Andreo, Radiother. Oncol. (126), 2018

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Conséquences

- **Mesure de dose**
  - Qu'est-ce-qui modifie la réponse du détecteur entre un champ large et un petit champ ? (p_{det})
    - Effet de la masse volumique du détecteur
    - Effet de la composition atomique du détecteur
    - Effet du moyennage sur le volume
    - Effet des éléments voisins du volume sensible : électrode, paroi, manche, matériau de Z élevé utilisé dans les diodes, etc…
  - Andreo et al., Phys. Med. Biol. (62), 2017: effet de la composition atomique prédominant
  - Fenwick et al., Phys. Med. Biol. (63), 2018: effet de la masse volumique prédominant
  - « Equivalence eau » d'un détecteur

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX

Formalisme du protocole AIEA TRS-483



- **Paru en 2017, issu de Alfonso et al., Med. Phys. (35) 2008**

- **En petits champs:**

$$FOC = \Omega^{f_{clin},f_{ref}}_{Q_{clin},Q_{msr}} = \frac{D^{f_{clin}}_{w,Q_{clin}}}{D^{f_{ref}}_{w,Q_{ref}}} = \frac{M^{f_{clin}}_{w,Q_{clin}}}{M^{f_{ref}}_{w,Q_{ref}}} k^{f_{clin},f_{ref}}_{Q_{clin},Q_{ref}}$$

Facteur de correction prenant en compte la différence de réponse du détecteur entre le faisceau (f_{msr},Q_{msr}) et le faisceau (f_{clin},Q_{clin})

- f_{msr} : champ de référence spécifique à un appareil de traitement
- f_{clin} : champ « clinique »
- Q_{msr} : qualité de faisceau du champ f_{msr}
- Q_{clin} : qualité du faisceau du champ f_{clin}

- f_{msr} est remplacé par f_{ref} pour les machines permettant de définir un champ de 10 x 10 cm² à 100 cm de la source

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Le facteur de correction est donné:**
  - à 10 cm de profondeur
  - pour un détecteur donné et un type de machine donné (linac, Gammaknife, Cyberknife, Tomotherapy)
  - pour une énergie donnée (et non un $TPR_{20,10}$)
  - indifféremment pour des faisceaux avec et sans cône
  - en fonction de la taille de champ d'irradiation équivalente
  - s'il est inférieur à 5 %

Detector	Equivalent square field size, S_{clin} (cm)												
	8.0	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
Real time solid state dosimeters													
IBA PFD3G shielded diode	1.000	1.000	0.998	0.995	0.992	0.986	0.976	0.968	0.961	0.952	—	—	—
IBA EFD3G unshielded diode	1.005	1.009	1.014	1.016	1.016	1.015	1.012	1.008	1.004	0.998	0.988	0.983	0.976
IBA SFD unshielded diode (stereotactic)	1.008	1.017	1.025	1.029	1.031	1.032	1.030	1.025	1.018	1.007	0.990	0.978	0.963
PTW 60008 shielded diode	1.000	1.000	1.000	0.998	0.995	0.990	0.977	0.962	—	—	—	—	—
PTW 60012 unshielded diode	1.005	1.010	1.015	1.017	1.017	1.016	1.010	1.003	0.996	0.985	0.970	0.960	—
PTW 60016 shielded diode	1.000	1.000	0.999	0.995	0.991	0.984	0.970	0.956	—	—	—	—	—
PTW 60017 unshielded diode	1.004	1.007	1.010	1.011	1.011	1.008	1.002	0.994	0.986	0.976	0.961	0.952	—
PTW 60018 unshielded diode (stereotactic)	1.004	1.007	1.010	1.011	1.009	1.006	0.998	0.990	0.983	0.973	0.960	0.952	—
PTW 60003 natural diamond	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003	1.009	1.026	1.045	—
PTW 60019 CVD diamond	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997	0.993	0.989	0.984	0.977	0.968	0.962	0.955

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Alignements du détecteur:**
  - Rendement en profondeur (IPEM 103) :
    - Champ 10 x 10 cm², décalage de 1 mm du détecteur : écart < 0,5 % sur rendement en profondeur
    - Champ 0,6 x 0,6 cm² : plus de 5%
  - FOC:
    - décentrage de 1.5 mm : 17 % d'écart pour un champ de 5 mm x 5 mm (diode)

  - Recommandations (IAEA TRS-483):
    - FOC :
      - Mesure de profils dans les deux directions
        - à vitesse lente
        - avec un pas approprié (~ 0.1 mm pour les plus petites tailles de champ)
      - Alignement sur :
        - Centre des 50 % de « dose »
        - Ou maximum de « dose » si profil symétrique
      - A faire à chaque mouvement du collimateur (pour MLC)
      - Vérifier la reproductibilité
      - L'alignement doit être réalisé à bien mieux qu'1 mm
    - Rendement en profondeur : même procédure à plusieurs profondeurs

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Orientation des détecteurs:**
  - Le TRS-483 recommande une orientation en fonction pour chaque dosimètre:

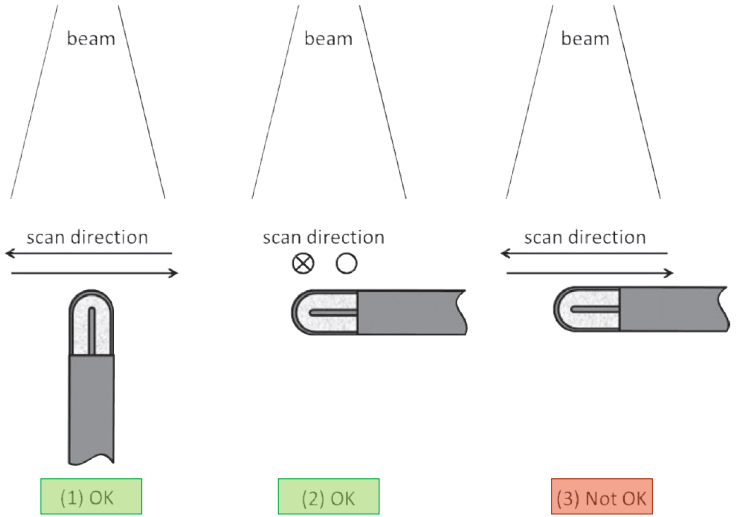


FIG. 18. Possible orientations of an ionization chamber for measurements of lateral beam profiles (arrows indicate scanning directions in the paper plane while circle and crossed circle symbols refer to scanning directions perpendicular to the paper plane).

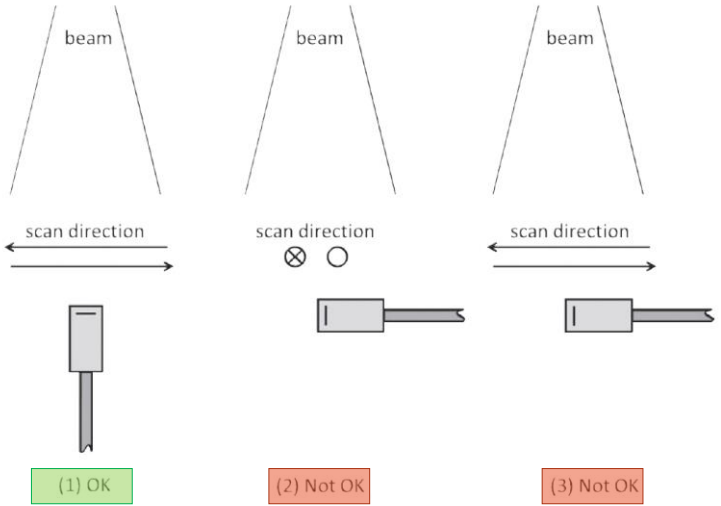
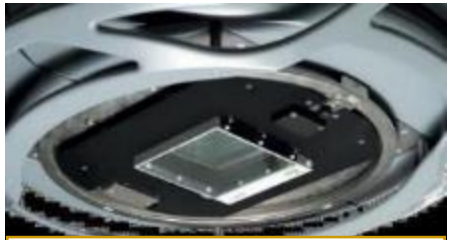


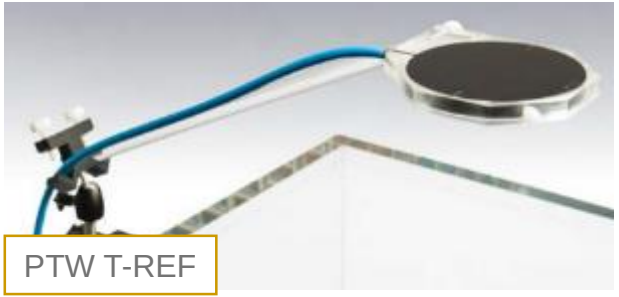
FIG. 19. Possible orientations of a solid state detector (diode, diamond) for measurements of lateral beam profiles (arrows indicate scanning directions in the paper plane while circle and crossed circle symbols refer to scanning directions perpendicular to the paper plane).

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES PETITS FAISCEAUX
Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Position du dosimètre de référence (rendements et profils):**
  - En champ large: dosimètre placé dans le coin du faisceau pour corriger les fluctuations du débit de l'accélérateur
  - En petit champ: champ trop petit pour placer un dosimètre dans le coin sans perturber la mesure
  - Solutions:
    - Ne pas utiliser de dosimètre de référence mais réaliser plusieurs fois la même mesure et avec des temps d'intégration plus longs
    - Utiliser une chambre à transmission



IBA Stealth chamber



PTW T-REF

SUN Nuclear ref detector

- Ne pas utiliser de chambre à transmission pour les mesures de FOC

Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Mesure de la dose de référence pour les accélérateurs spécifiques (Cyberknife, GammaKnife, Tomotherapy):**

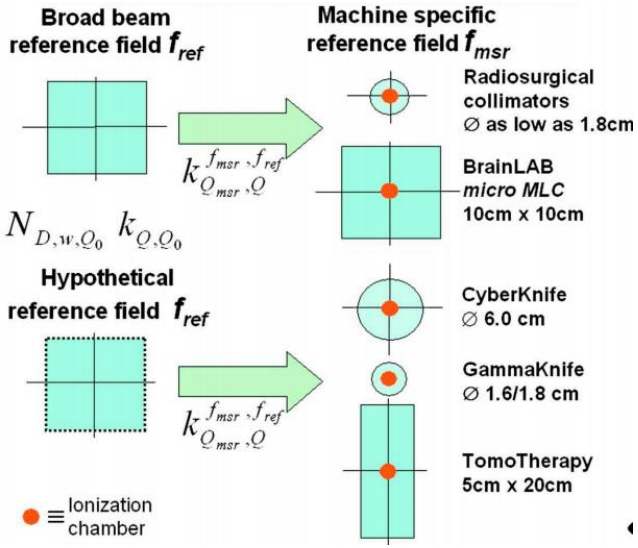
$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} \, N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} \, k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$$

- f_{msr}: champ de référence spécifique
- f_{ref}: champ de référence TRS-398
- Q_{msr}: qualité de faisceau du champ fmsr
- Q: qualité de faisceau selon le TRS-398

- Introduction d'un nouveau facteur de correction pour tenir compte des différences entre f_{msr} et f_{ref} (géométrie, taille de champ, qualité de faisceau, fantôme de mesure):

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

  - Tabulé dans le TRS483



- Nouveaux accélérateus spécifiques? (Zap-X, MR-linac)

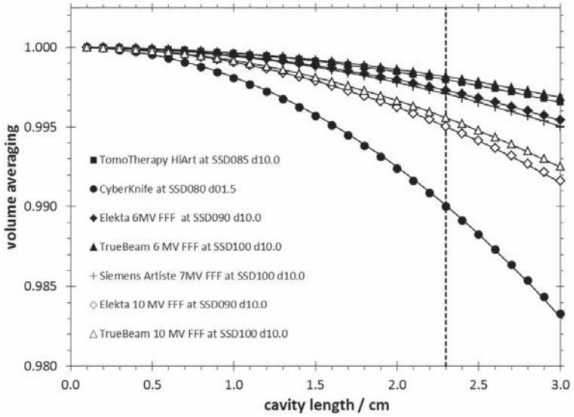
Formalisme du protocole AIEA TRS-483

- **Mesure de la dose de référence pour les faisceaux FFF:**
  - Pas de référence dosimétrique disponible en FFF
  - Relation entre $TPR_{20,10}$ et k_Q différente
  - Facteurs de correction de perturbation différents
  - Utilisation d'un facteur correctif?
    - 0.4 – 1 % (Xiong et al., Med. Phys. (35), 2008)
    - Inférieur à 0.2 % (Lye et al., Phys. Med. Biol. (61), 2016) ou à 0.4 % jusqu'à 10 MV (Dalaryd, Med.Phys. (41), 2014 - IAEA 483)
    - **Non nécessaire** (Budgell et al., Phys. Med. Biol. (61), 2016, De Prez et al. Phys. Med. Biol. (63) 2018, LNHB)

  - Moyennage sur le volume sensible et anisotropie du faisceau:
    - Utiliser une chambre d'ionisation de petit volume sensible

    et / ou

    - Appliquer un facteur de correction cf section 2.3 de l'appendice I du TRS 483



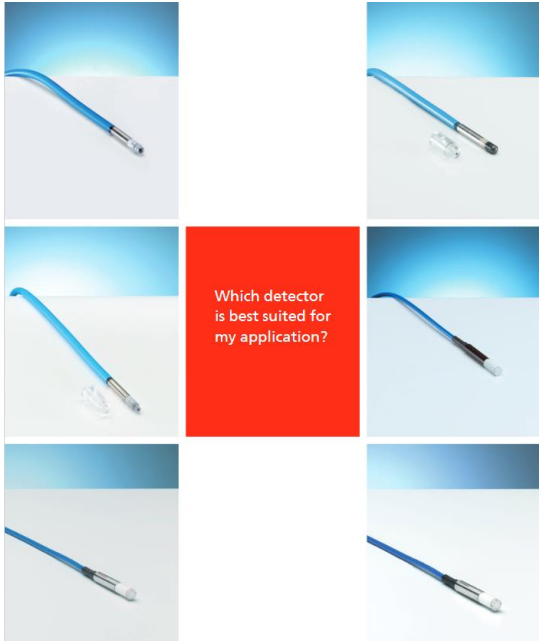
2

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Généralités

- **Le détecteur idéal, selon l'IAEA TRS-483 :**
  - Est stable
  - A une réponse linéaire avec la dose
  - A une réponse linéaire avec le débit de dose
  - A une réponse linéaire avec le débit de dose par pulse
  - A une réponse indépendante de l'énergie du faisceau
  - N'a pas de réponse angulaire
  - A une bonne résolution spatiale
  - A une réponse indépendante de son orientation
  - A un faible bruit de fond
  - Est indépendant des facteurs environnementaux

  - Ne nécessite pas de correction de l'effet de moyennage supérieure à 5 %
  - Est équivalent eau (masse volumique et composition atomique)



Small field dosimetry application guide, PTW

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Généralités

- **Stabilité:**
  - Stabilité à court terme meilleure que 0.1 % (même après de multiples irradiations avec accumulation de plusieurs centaines de kGy)
    - Importance de la pré-irradiation
  - Si la dérive est connue et linéaire, il est possible d'appliquer une correction

- **Réponse en fonction de la dose:**
  - Réponse linéaire à fonction de la dose à mieux que 0.1 % sur 3 ordres de grandeurs:
  - Si réponse non linéaire avec la dose, étalonnage en dose absorbée et correction (ex : films)

- **Réponse en fonction du débit de dose:**
  - Stable à mieux que 0.1% sur la gamme de débit de l'accélérateur en fonction des UM/min
  - Stable à mieux que 0.1% après correction de la recombinaison en fonction de la dose par pulse
  - Pour les chambres d'ionisation: relation linéaire entre le k_{rec} et la dose par pulse.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Généralités

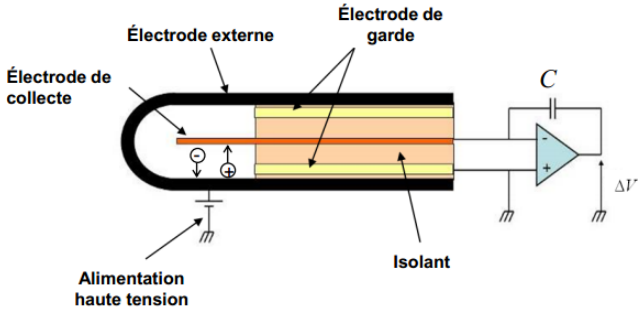
- **Réponse angulaire:**
  - Variation de la réponse < 0,5% entre 0 et 60° entre l'axe du faisceau et l'axe du détecteur

- **Facteurs environnementaux:**
  - Idéalement, réponse indépendante de la température, de la pression ou de l'hygrométrie
  - Alternative : appliquer une correction qui permet de limiter les variations de réponse à 0,3 %

- **Réponse en fonction de l'énergie:**
  - Variation la plus faible possible pour les rayons X entre 50 kV et 25MV (10 MV pour petits champs)
  - Importance de l'équivalence eau

- **Perturbation par le détecteur, bruit et sensibilité, résolution spatiale**
  - Les « meilleurs » possibles

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Les chambres d'ionisation



- **Nombreux modèles (PTW, Exradin, IBA)**
  - Liste (datée) dans l'IPEM 103
  - Facteurs de corrections publiés dans le TRS?
    - PTW 31022, PTW 31023, IBA CC003

- **Attention au matériau utilisé pour les électrodes**
  - IBA CC01 -> électrode en acier
  - Remplacée par la CC003 (Razor chamber) avec une électrode en graphite

- **Corrections à appliquer à la mesure:**

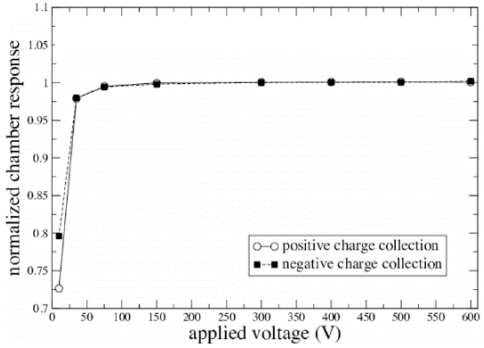
$$Q_{corr} = (Q_{coll} - MP).k_{T,p,H}.k_{pol}.k_S$$

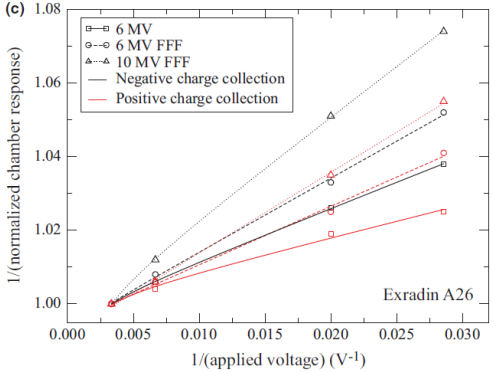
  - MP: mouvement propre: le bruit augmente lorsque le volume sensible diminue

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Les chambres d'ionisation

- **Courbe de saturation – recombinaison – polarité:**
  - Idéalement:
    - Le courant augmente lorsque la tension augmente jusqu'à atteindre la saturation
    - Effet de la polarité minime
    - 1/Q est linéaire en fonction de 1/V (Jaffé plot) pour permettre le calcul de k_{rec} avec la méthode des 2 tensions
    - k_{rec} augmente linéairement avec la dose par pulse
  - Les nouvelles chambres d'ionisation de petit volume ont été développées pour minimiser ces phénomènes
    - La tension recommandée n'est pas nécessairement 300V

Miller *et al.*, Med. Phys. (43), 2016





Hyun et al., Med. Phys. (44-2), 2017

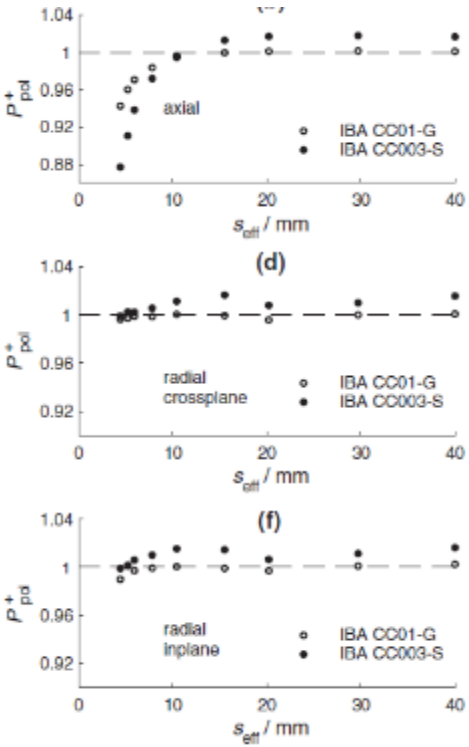
Table 2. Recombination factors k_s obtained from Jaffé plots and the two-voltage technique for 6WFF, 6FFF, 10WFF and 10FF beams and SSD 100 cm. For one standard deviation U = 0.2%.

PinPoint ion chambers	6WFF		6FFF		10WFF		10FFF	
	Jaffé plot	Two-voltage	Jaffé plot	Two-voltage	Jaffé plot	Two-voltage	Jaffé plot	Two-voltage
T31022	1.002	1.003	1.004	1.004	1.002	1.003	1.005	1.005
T31016	1.001	1.003	1.002	1.004	1.002	1.003	1.005	1.005

Vieillevigne et al., Biomed. Phys. Eng. Express (4), 2018

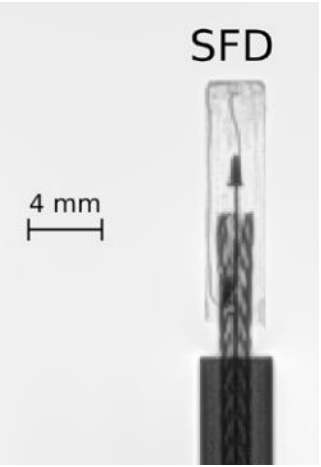
LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Les chambres d'ionisation

- **Polarité:**
  - Variation de la correction de polarité en fonction de la taille du champ d'irradiation
  - Variation de la correction de polarité en fonction de l'orientation
    - Forte variation de k_{pol} lorsque la chambre est placé parallèlement à l'axe du faisceau (asymétrie des charges due majoritairement au courant radio-induit dans le câble)
    - Effet augmente lorsque le volume sensible diminue
    - Variation non significative de k_{pol} lorsque la chambre est perpendiculaire à l'axe du faisceau



Looe et al., Med. Phys., 45 (12), 2018

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Les diodes



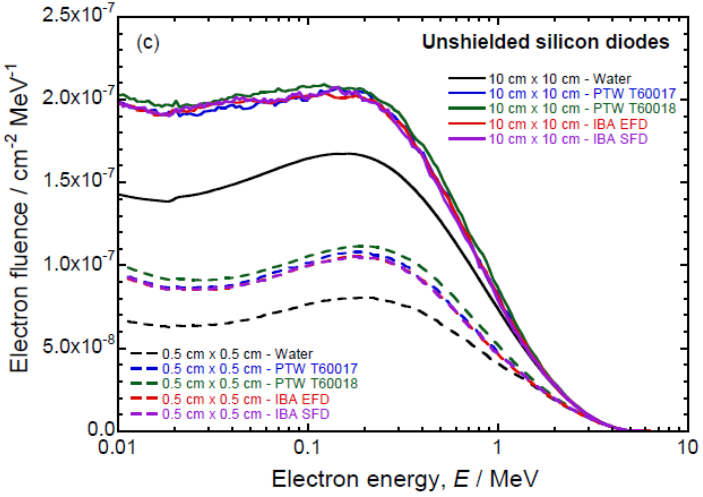
- **Il existe 2 types de diode:**
  - Diode blindée : diode P(hoton)
    - Ajout d'une couche de matériau de Z élevé pour absorber les photons diffusés de basse énergie
    - Nécessaire en champ large pour corriger de l'influence du rayonnement diffusé
    - Réduction des photons de basse énergie quand la taille du champ diminue
    - Modification possible de la réponse en fonction de la taille du champ
  - Diode non blindée : diode E(lectron)

- **Privilégier les diodes non-blindées: perturbation de la fluence photonique plus faible (Eklund et al., Phys. Med. Biol. (54), 2009)**

- **Nombreux modèles (PTW, Exradin, IBA)**
  - Liste (datée) dans l'IPEM 103
  - Facteurs de corrections publiés dans le TRS?
    - PTW 60023, IBA Razor
  - Tension: 0V

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS

Les diodes



- **Avantages:**
  - Sensibilité élevée
  - Petit volume sensible (entre 0.3 et 3 mm²)
  - Lecture en temps réel
  - Réponse linéaire avec la dose (Schönfeld *et al.*, Med. Phys. (46)

- **Inconvénients:**
  - Sensibilité dépendante de la dose accumulée
  - Variation avec la température (≈ 0.3 % / °C)
  - Augmentation du bruit au cours de l'irradiation (G. Reggiori *et al.*, Phys. Med. (32), 2016)
  - Variation de la réponse en fonction du débit de dose pour les débit élevés (Larraga-Guitiérrez et al., Phys. Med. Biol. (60), 2015)
  - Variation avec la dose par pulse, a priori diminuée pour les nouveaux modèles (Schönfeld *et al.*, Med. Phys. (46), 2019)
  - Z=14 (eau : Z_{eff}~7): sur-réponse aux basses énergies
  - Masse volumique (2.3 g.cm-3) différente de l'eau : perturbation de la fluence électronique importante (Andreo, Radiother. Oncol. (126), 2018)

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Le diamant

- **Avant: diamant naturel de dimensions variable**
  - Réponse non reproductible d'un exemplaire à l'autre
  - Arrêt de la commercialisation
  - Facteurs de corrections tabulés dans le TRS!

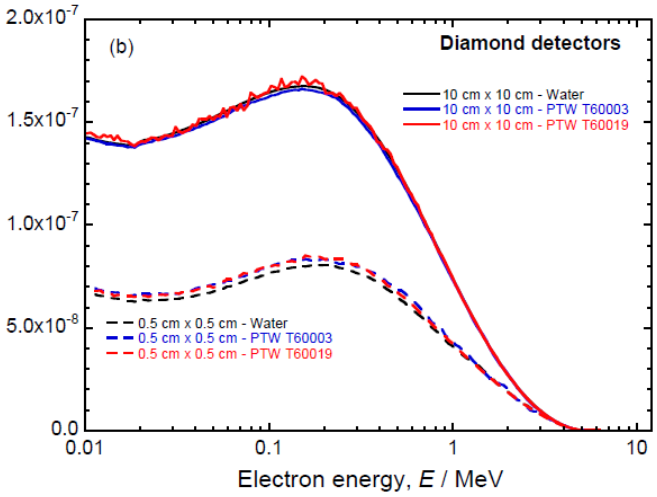
- **Diamant synthétique PTW 60019 CVD**
  - Volume sensible : 0,004 mm^3
  - Surface sensible : 4 mm^2
  - Épaisseur sensible : 0.001 mm
  - Haute tension : 0V
  - Sensibilité : 1 nC/Gy
  - Pré-irradiation : 5 Gy

Useful ranges:

Radiation quality	100 keV ... 25 MV photons (6 ... 25) MeV electrons (70 … 230) MeV protons[2] (115 … 380) MeV/u carbon ions[2]
Field size	(1 x 1) cm^2 ... (40 x 40) cm^2
Small fields[3]	down to 0.4 cm

PTW detectors 2021

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Le diamant



- **Avantages:**
  - Bonne stabilité
  - Lecture indépendante de la température et de l'angulation
  - Réponse linéaire avec la dose
  - Faible dépendance en fonction du débit
  - Faible dépendance en fonction de l'énergie (aux hautes énergies)
  - Faible perturbation de la fluence photonique et électronique (Andreo, Radiother. Oncol. (126), 2018)

- **Inconvénients:**
  - Surface sensible (4 mm²) relativement grande pour des mesures dans les petits champs
  - Variation de la réponse en fonction du débit de dose par pulse (Brualla-Gonzalez et al., Phys. Med. Biol. (61), 2016)
  - Variabilité des dimensions de la couche active (TG155, Med. Phys. (48) 2021)

- **Intérêt grandissant pour la dosimétrie des petits faisceaux (De Coste et al., Phys. Med. Biol. (62), 2017; Hartmann et al., Med. Phys. (46), 2019)**

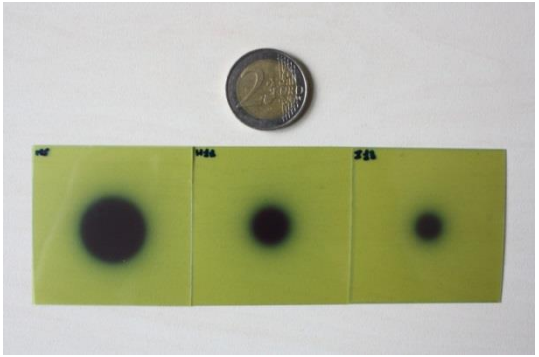
LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Le scintillateur

- **Avantages:**
  - Résolution spatiale (diamètre: 1 mm, longueur: 3 mm)
  - Masse volumique (1.05 g.cm-3)
  - Faible dépendance en fonction de l'énergie (aux hautes énergies)
  - Réponse indépendante de la dose par pulse (Beierholm *et al.*, Rad. Meas. (69),2014)
  - Rapport des doses ≈ rapport des lectures

- **Inconvénients:**
  - Faible sensibilité
  - Variation linéaire de la réponse en fonction de la température (≈ 0.2 % / °C) (Carrasco et al., Med. Phys. (42), 2015)
  - Correction de l'effet Cerenkov nécessaire, qui dépend de la longeur de fibre irradiée

- **Commercialisation du W2:**
  - 3 % d'écart sur les FOC (/ W1) en champ 0.5 cm x 0.5 cm ? (Galavis et al., Med. Phys. (46), 2019)

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Les films



- **Avantages:**
  - Résolution spatiale
  - Masse volumique (1.2 g.cm-3)
  - Faible dépendance en fonction de l'énergie (aux hautes énergies)
  - Faible dépendance en fonction du débit de dose par pulse

- **Inconvénients:**
  - Lecture indirecte
  - Variation de la réponse en fonction de la dose (courbe d'étalonnage)
  - Nécessité d'un protocole d'utilisation rigoureux (Devic *et al.*, Phys. Med. (32), 2016)
  - Variation de la réponse inter-lot (León-Marroquín *et al.*, Med. Phys. (46),2019)
  - Reproductibilité des mesures (et incertitude associée)

- **Pour aller plus loin: Report of AAPM Task Group 235 Radiochromic Film Dosimetry: An Update to TG-55. (Niroomand-Rad A *et al.*, Med Phys. (47), 2020)**

LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉTECTEURS
Bilan

	Chambre	Diode	Diamant	Scintillateur	Films
Résolution spatiale	-	++	+	++	+++
Masse volumique ($g.cm^{-3}$)	0.0012	2.3	3.5	1.05	1.2
Facilité d'utilisation	+	+	+	-	-
Réponse aux basses énergies (< 100 keV)	+	--	--	--	-
Réponses aux hautes énergies	+	+	+	+	+
Réponse avec le débit de dose	+	Dépend des modèles	+ (UM/min) - (dose/pulse)	+	+
Linéarité avec la dose	+	+	+	+	-

- **Il n'existe pas de détecteur idéal**
  - En utiliser plusieurs (IAEA TRS-483)

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Synthèse des détecteurs et des facteurs de correction TRS 483**

Type	Orientation / remarques	Réponse en petits champs	Disponibilités facteurs de correction
Films gafchromic	Perpendiculaire	pas de correction à appliquer	
Scintillateur Exradin W1	Selon condition de détermination de correction de l'effet Cerenkov	Correction = 1,000 aux incertitudes près (mais quelle incertitude ?)	
Diamant PTW 60019	Parallèle	Sur-réponse	Champs ≥ 4 mm
Diodes blindées	Parallèle	Sur-réponse	Champs ≥ 10 mm Voir cas particulier dans TRS-483
Diodes non blindées	Parallèle	Sur-réponse	Champs ≥ 4 à 6 mm Selon diodes et faisceaux
Chambres d'ionisation	Perpendiculaire Correction de k_{pol} et k_{rec} à appliquer avant utilisation facteurs de correction	Sous-réponse	Champs ≥ 5 à 20 mm Selon chambres d'ionisation et faisceaux

3

RETOUR D'EXPÉRIENCE

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Manuels de référence constructeurs:**
  - Type et nombre de mesure
  - Conditions de mesure
  - Recommandations particulières:
  - Détecteur à utiliser:
    - « use a very small detector for high-resolution profile measurements and dosimetry of small fields. Brainlab recommends to use an unshielded stereotactic diode » (Iplan)
    - "It is recommended to use an ionization chamber for all beam data measurements for the source model" (Eclipse)
    - "Do not mix depth dose measurements performed with different detector types (for example diodes and cylindrical ion chamber) as this may lead to errors in the electron contamination model" (Eclipse)
  - Paramètres d'acquisition:
    - « to provide sufficient information about the penumbra region and the area blocked by the MLC, the profiles should cover the entire field size with a resolution of 0.5 mm » (Iplan)
  - Existence d'un gold standard?

8.4 Paramètres de base du faisceau pour le MLC HD120 de Varian (irradiation standard et sans filtre égalisateur)

Liste de contrôle

Description	Nombre de mesures	Matériel	Voir aussi	Terminé
Profils CAX dans l'air *Tailles de champ du MLC* : entièrement rétracté *Tailles de champ des mâchoires* : 20 x 20, 40 x 40, 60 x 60, 100 x 100, 150 x 150, 220 x 220, 50 x 220, 250 x 50 Z = 850 ... 1 150	8	Chambre d'ionisation avec capuchon	Page 120	☐
Profils X dans l'air *Tailles de champ du MLC* : entièrement rétracté *Tailles de champ des mâchoires* : 20 x 20, 40 x 40, 60 x 60, 100 x 100, 150 x 150, 220 x 220, 50 x 220, 250 x 50 Y = 0 ; Z = 850, 1 000, 1 150	24	Chambre d'ionisation avec capuchon		☐
Profils Y dans l'air *Tailles de champ du MLC* : entièrement rétracté *Tailles de champ des mâchoires* : 20 x 20, 40 x 40, 60 x 60, 100 x 100, 150 x 150, 220 x 220, 50 x 220, 250 x 50 X = 0 ; Z = 850, 1 000, 1 150	24	Chambre d'ionisation avec capuchon		☐
Facteurs de diffusion dans l'air *Tailles de champ du MLC* : entièrement rétracté *Tailles de champ des mâchoires* : 20 x 20, 40 x 40, 60 x 60, 100 x 100, 150 x 150, 220 x 220, 50 x 220, 250 x 50 X = 0 ; Y = 0 ; Z = 1 000	8	Chambre d'ionisation avec capuchon		☐
Dose absolue en Gy par UM *Taille de champ du MLC et des mâchoires* : 100 x 100 ; SSD = 900 ; X = 0 ; Y = 0 ; Z = 100	1	Chambre étalonnée	Page 122	☐
Dose absolue en Gy par UM *Taille de champ du MLC et des mâchoires* : 100 x 100 ; SSD = 1 000 ; X = 0 ; Y = 0 ; Z = 100	1	Chambre étalonnée		☐
PDD CAX dans l'eau *Taille de champ du MLC et des mâchoires* : 100 x 100 ; SSD = 1 000	1	Chambre d'ionisation	Page 122	☐
Profils X dans l'eau *Taille de champ du MLC et des mâchoires* : 100 x 100 ;	3	Détecteur haute résolution		☐

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Matériel**
  - Anticiper l'achat de détecteurs spécifiques
  - Le meilleur détecteur, c'est celui dont on dispose…

- **Inventaire du matériel disponible**
  - En état de marche ?
  - Complet ? (adaptateur, support de fixation, …)
  - Adapté ?

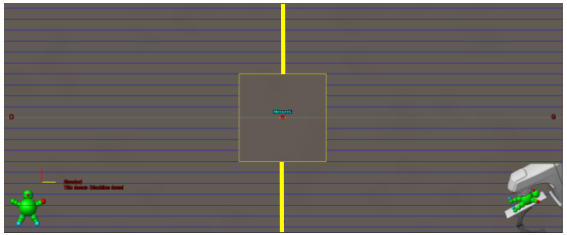
- **Mesures de caractérisation:**
  - A minima des mesures de répétabilité, reproductibilité et linéarité
  - Attention aux détecteurs dont la sensibilité varie avec la dose accumulée (diode)

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

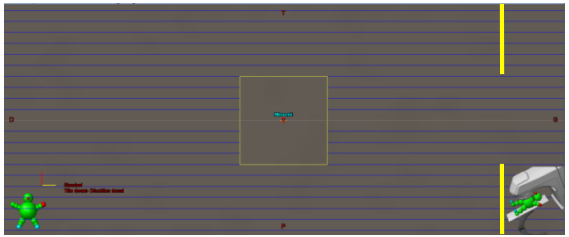
- **Planning prévisionnel:**
  - Grands champs: compter environ 1 jour par énergie
  - Petits faisceaux: compter environ 1 jour par détecteur
  - Anticiper les « arrêts forcés »: jusqu'à 5 jours d'arrêt en deux semaines!
    - Défaut accélérateur
    - Coupure de courant, arrêt du circuit d'eau froide
    - Intervention d'entreprises extérieures
  - Prévoir le temps de traiter les données et de les enregistrer dans le TPS
    - Les templates d'acquisition avec les paramètres (énergie, taille de champ, DSP, etc…) permettent de s'y retrouver plus facilement et de gagner du temps

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Vigilence, vigilence, vigilence:**
  - Position des lames:

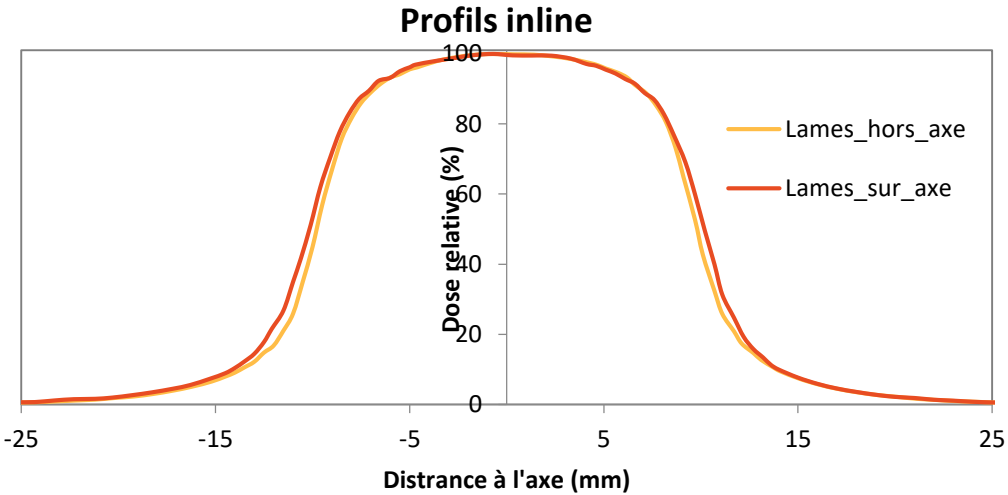


  - Fermées sur l'axe



  - Fermées loin de l'axe

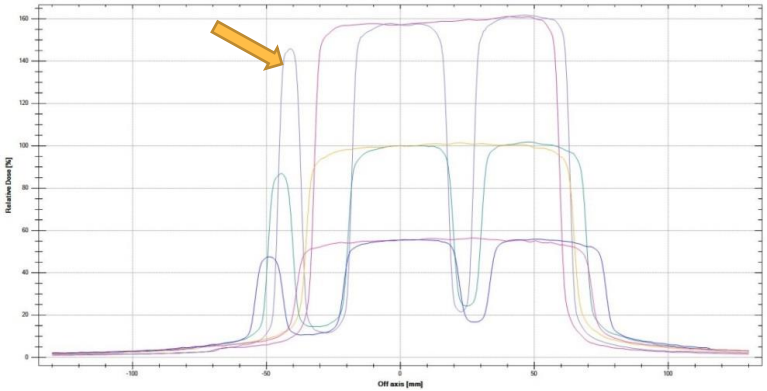
- **Impact sur les profils:**
  - 0.6 mm d'écart sur la largeur à mi-hauteur (champ 2 cm x 2 cm)

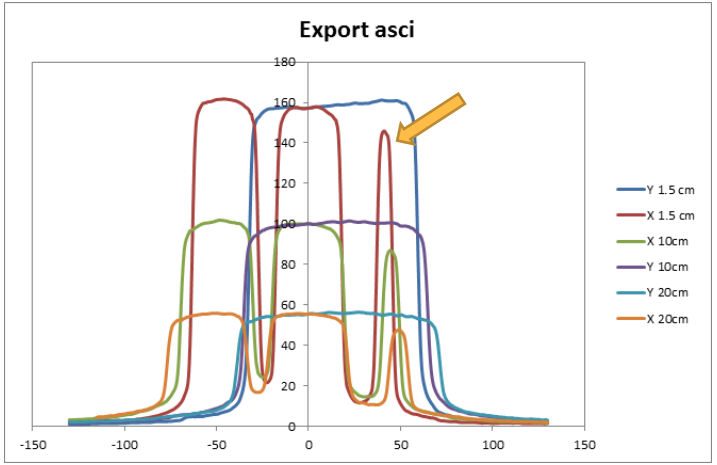


- Retour du constructeur:
  - « These shaper files are outdated and should have been removed from our data base. Our support department is already informed. Thank you very much for pointing out this issue. Otherwise, we wouldn't be aware of the outdated files. »

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Vigilence, vigilence, vigilence:**
  - Export au format asci:

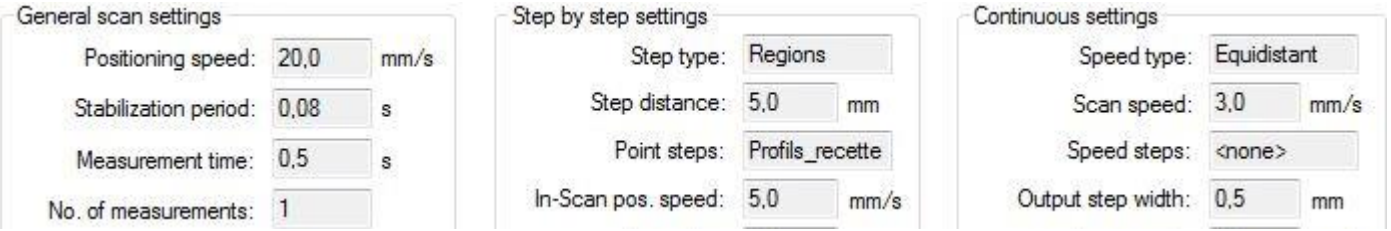




  - Profils mesurés
  - Profils exportés
  - Retour du constructeur:
    - « Due to the difference in the OPA *.asc and IEC coordinate systems, the x,y and z coordinates, read from *.asc file are different versus IEC 61 217:
      - X (RFAasc) = - Y (IEC 61 217)
      - Y (RFAasc) = X (IEC 61 217)
      - Z(RFAasc) = - Z (IEC 61 217)
    - Modification du guide utilisateur

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

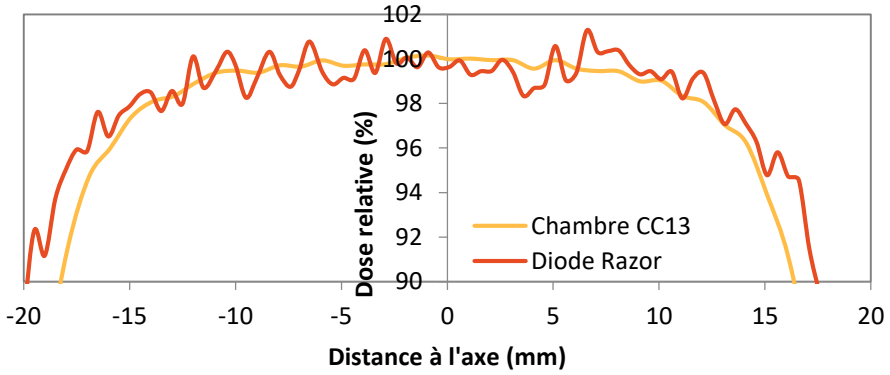
- **Paramètres d'acquisition:**
  - Mode continu:
    - Vitesse de déplacement (vitesse minimale: 3 mm.s-1)
    - Résolution
  - Mode pas-à-pas:
    - Temps d'intégration
    - Résolution
    - Temps de stabilisation
    - Vitesse de déplacement entre 2 points



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

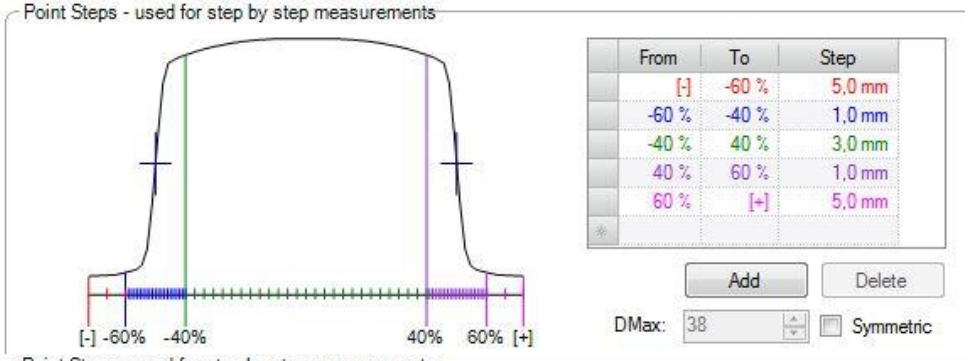
- **Le choix du mode et des paramètres d'acquisition dépend:**
  - De la sensibilité du dosimètre
  - De la présence ou non d'un dosimètre de référence (et de sa sensibilité)
  - De la gamme de l'électromètre choisie
  - De la précision souhaitée
  - Du temps total d'acquisition

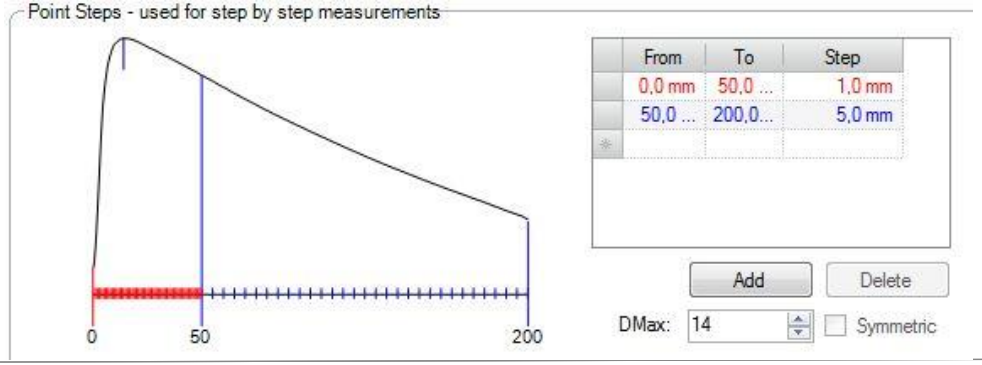
- **Exemple dans un champ 4x4 avec une diode et une chambre d'ionisation:**



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Possibilité de modifier la vitesse de déplacement (mode continu) ou la résolution (mode pas-à-pas) en fonction de la zone de mesure:**

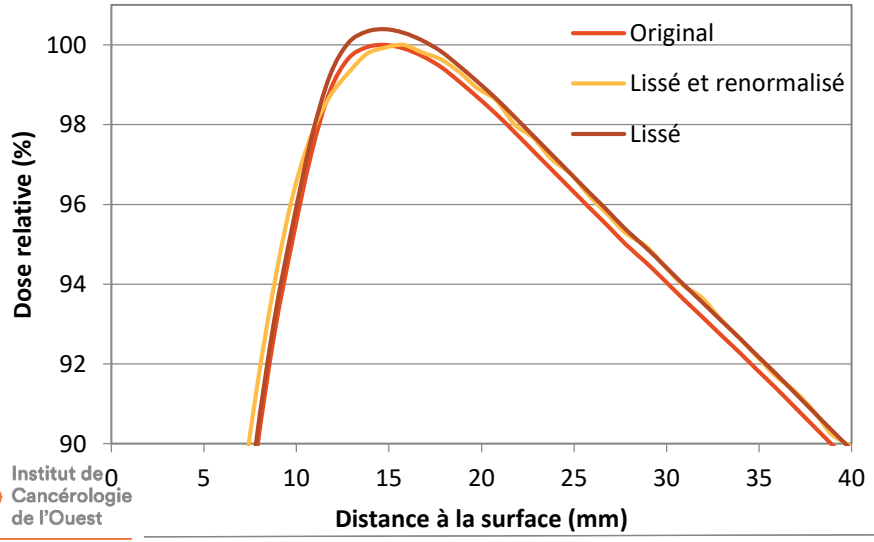


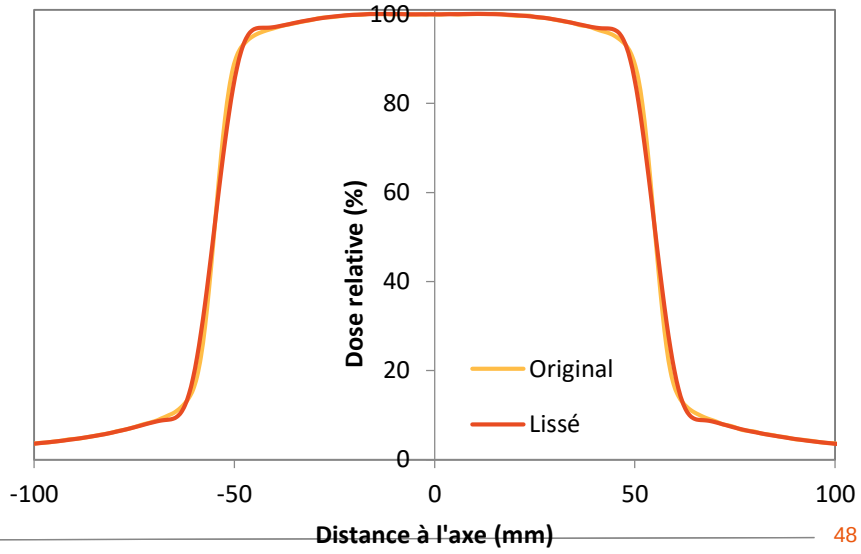


RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Paramètres de lissage**
  - Différents types de filtres
  - Différents paramètres réglables

- **Impact sur les mesures:**





RETOUR D'EXPÉRIENCE
Généralités

- **Configuration de mesure:**
  - Mesures réalisées sur un TrueBeam STx en X6, X16 et X6 FFF
    - Champs définis par un MLC
    - Cônes
  - Détecteur utilisés:

Détecteur	Diamètre du volume sensible
Chambre CC13 (IBA)	6 mm
Chambre CC01 (IBA)	2 mm
Diode Razor (IBA)	0.6 mm
Diamant synthétique (PTW)	2.2 mm

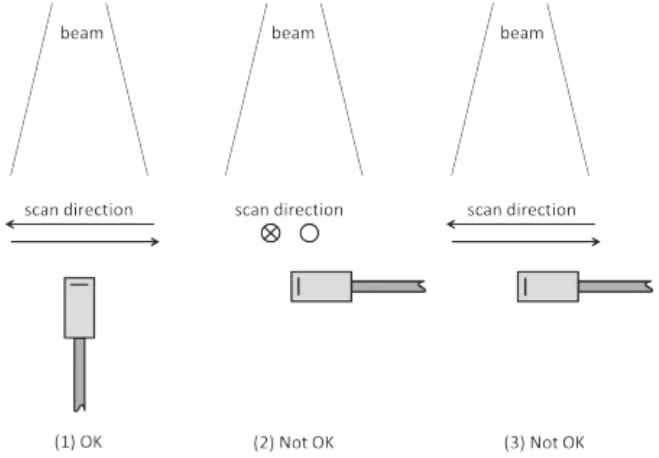


FIG. 19. Possible orientations of a solid state detector (diode, diamond) for measurements of lateral beam profiles (arrows indicate scanning directions in the paper plane while circle and crossed circle symbols refer to scanning directions perpendicular to the paper plane).

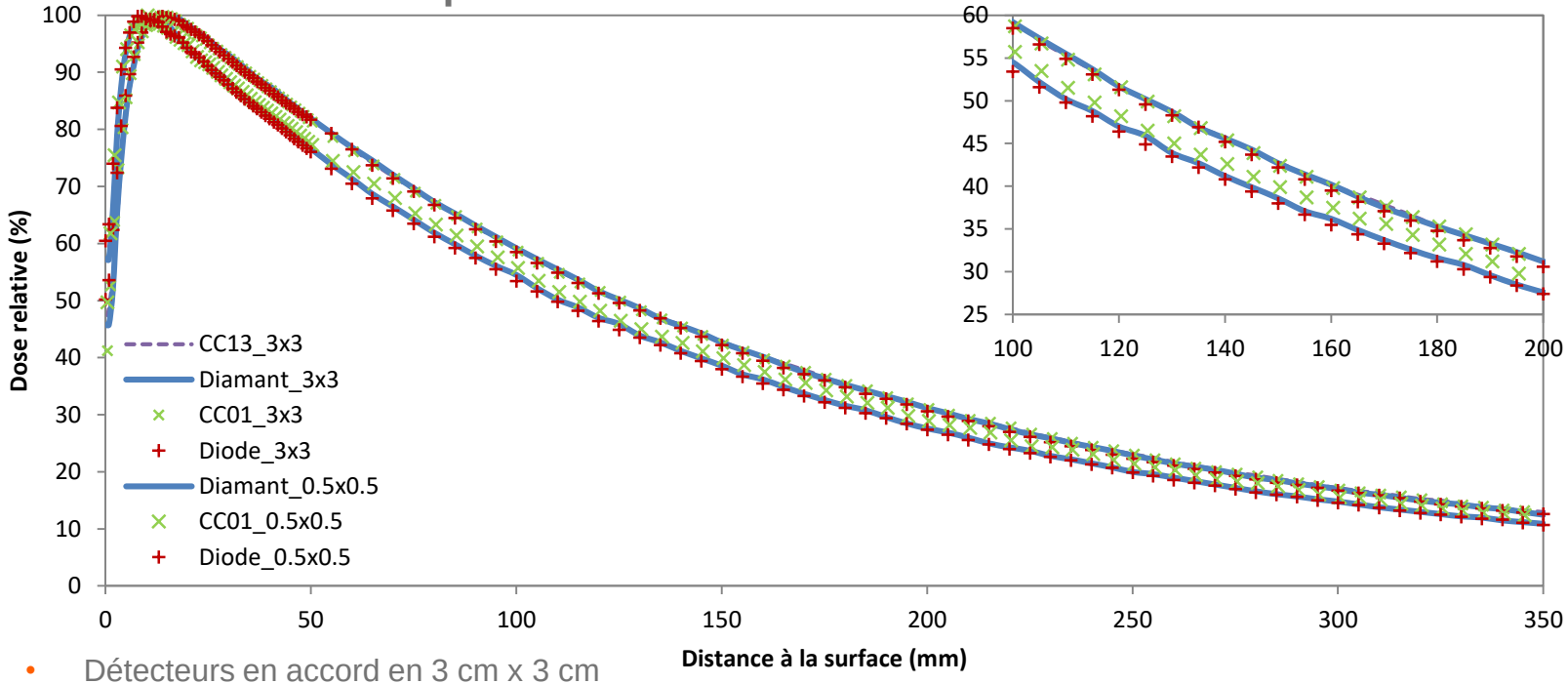
- Le diamètre du volume sensible dépend de l'orientation du détecteur

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Rendements:**
  - Précautions d'acquisition :
    - Utiliser 2 types de détecteurs (IAEA 483, IPEM 103)
    - Préférer une vitesse de déplacement faible et un pas fin
    - Utiliser une chambre de référence (de l'accélérateur ou à transmission)
    - Prendre en compte le point effectif de mesure
    - Centrer le détecteur à l'aide de profils mesurés à différentes profondeurs
    - Profondeur minimale: 20 cm
    - Acquérir tous les rendements en même temps (même origine, même niveau d'eau)
    - Si besoin, prévoir une taille de champ pour la recoupe entre deux dosimètres

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

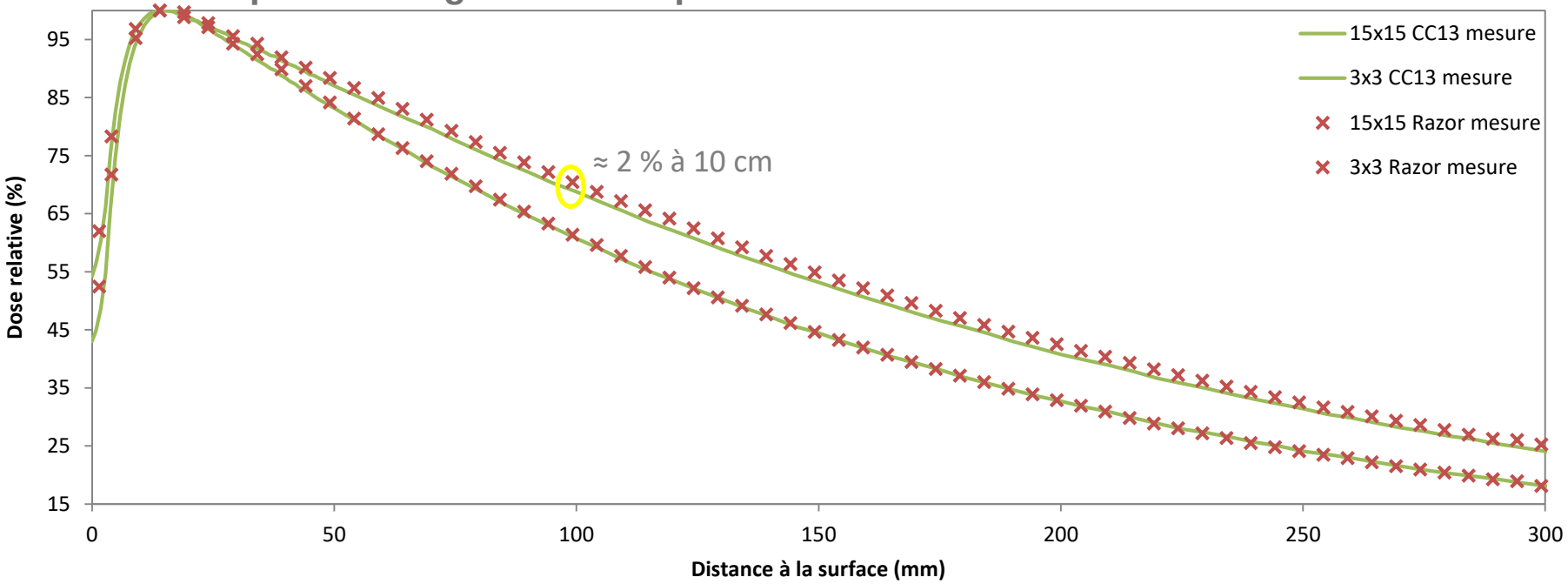
- **Rendements - champs MLC :**



- Détecteurs en accord en 3 cm x 3 cm
- CC01: mesure bruitée et $Z_{électrode}$ élevé

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

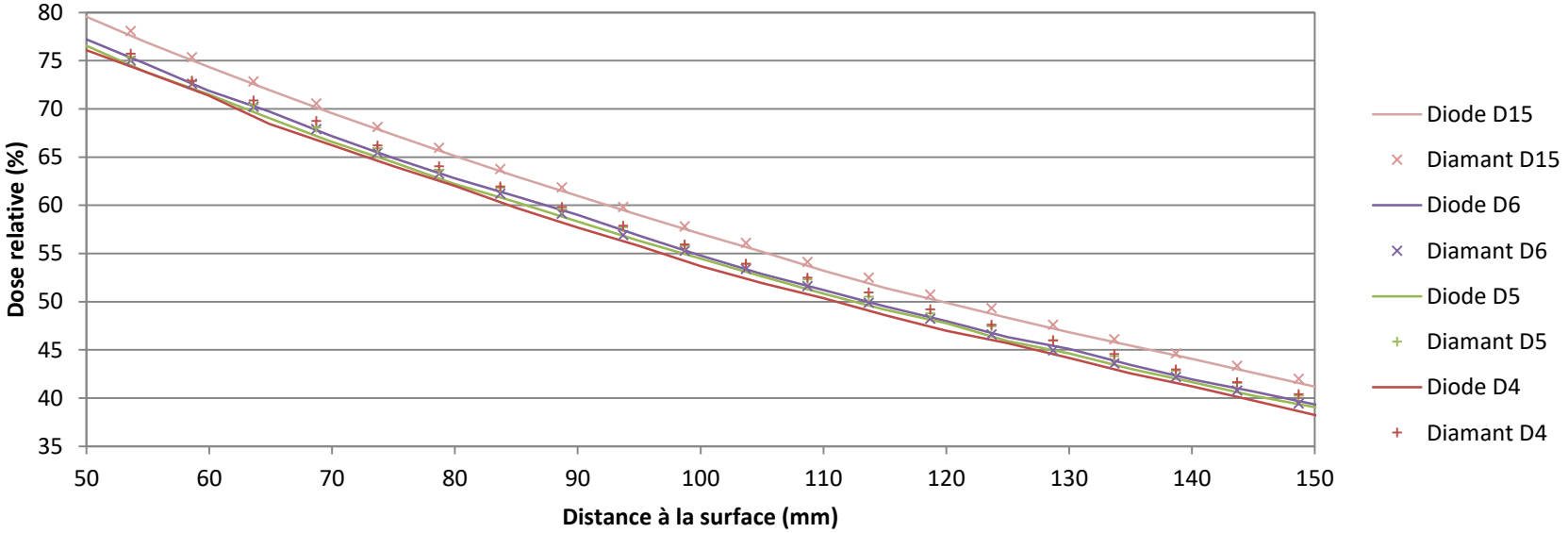
- **Remarque sur les grands champs:**



- **Changer de détecteur pour les mesures de rendements en grands et petits champs**

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Rendements - cônes:**

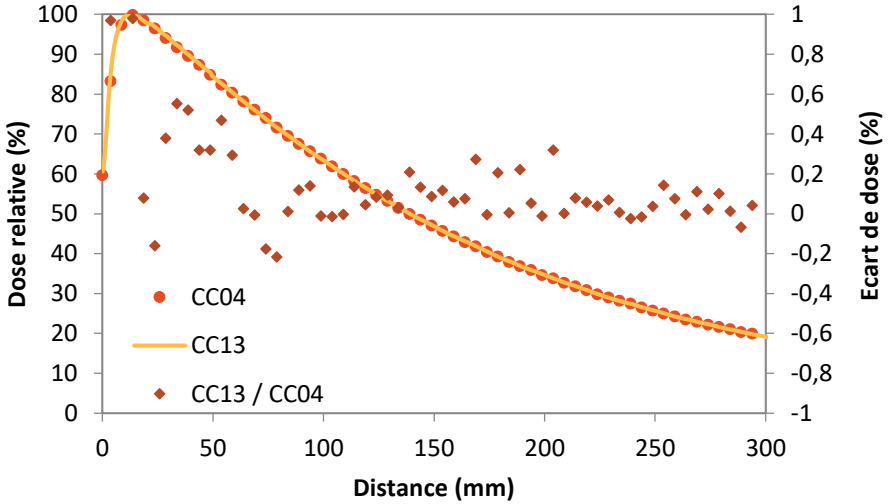


- **Détecteurs en accord jusqu'à 6 mm de diamètre**
- **Lorsque la taille de champ diminue, la dose en profondeur:**
  - Diminue pour la diode
  - Diminue jusqu'à 6 mm pour le diamant puis reste constante

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Rendements - FFF:**
  - La correction de la recombinaison est plus importante pour les faisceaux FFF que pour les faisceaux classiques (1.012 contre 1.005 pour une FC65)
  - Dépend du modèle de la chambre d'ionisation et de la profondeur (Sudhyadhom et al., Med. Phys. (43), 2016):
    - A prendre en compte pour la mesure de la dose de référence et la mesure du $TPR_{20,10}$
    - Impact sur la mesure de rendements?

			P_{ion} (clinical beam)		
Energy	Depth (cm)	PDD (%)	Farmer	CC13	CC04
6XFFF	1.3	100	1.009 ± 0.0004	**1.015** ± 0.0005	1.004 ± 0.0005
	10	62.8	1.006 ± 0.0004	1.009 ± 0.0005	1.003 ± 0.0005
	20	34.1	1.004 ± 0.0004	1.006 ± 0.0005	1.001 ± 0.0005
	35	14.0		**1.003** ± 0.0005	1.003 ± 0.0005
10XFFF	2.2	100	1.015 ± 0.0004	**1.026** ± 0.0005	1.008 ± 0.0005
	10	70.4	1.011 ± 0.0004	1.018 ± 0.0005	1.006 ± 0.0005
	20	42.4	1.006 ± 0.0004	1.012 ± 0.0005	1.004 ± 0.0005
	35	20.5		**1.010** ± 0.0005	1.003 ± 0.0005

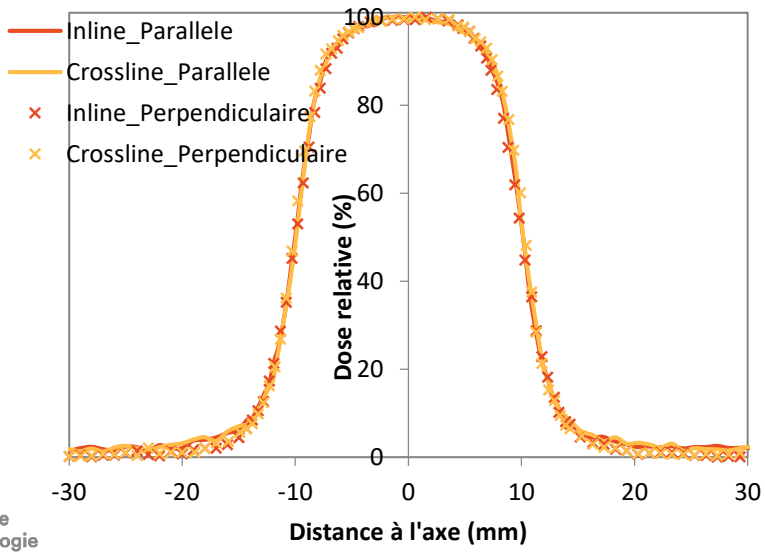


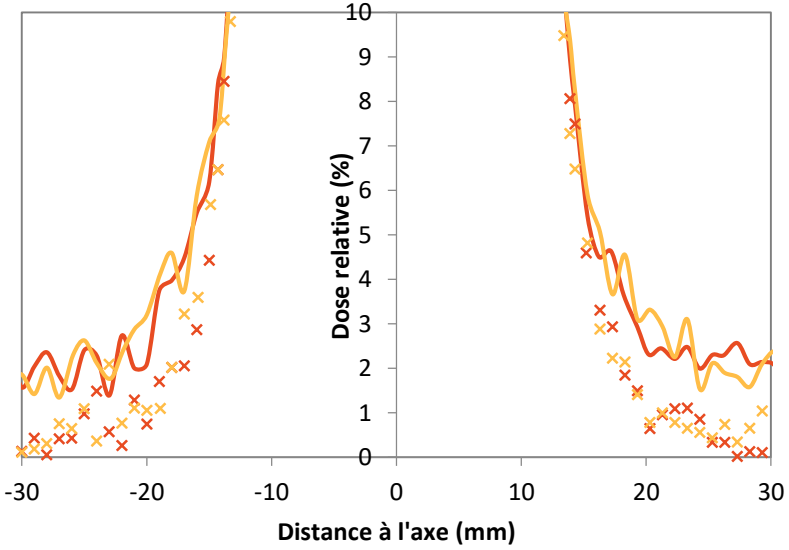
- Privilégier les chambres de petits volumes

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Profils - précautions d'acquisition :**
  - Commencer la mesure suffisamment loin de l'axe
  - Adapter les paramètres d'acquisition à la taille de champ

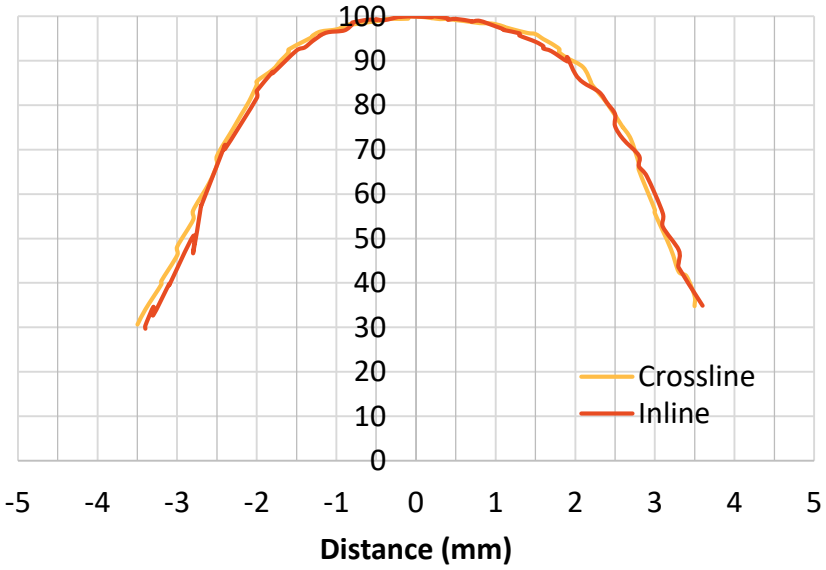
  - Chambre d'ionisation parallèle / perpendiculaire à l'axe du faisceau? Impact sur le point effectif de mesure?

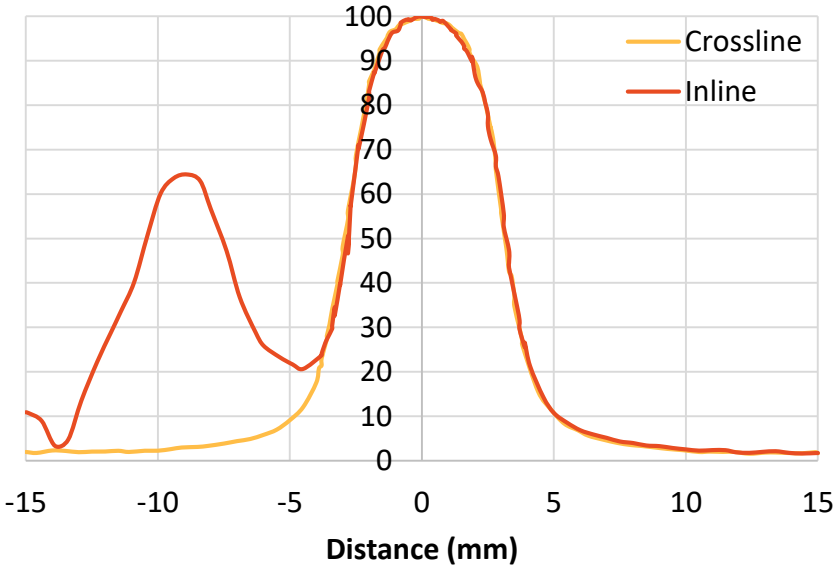




RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

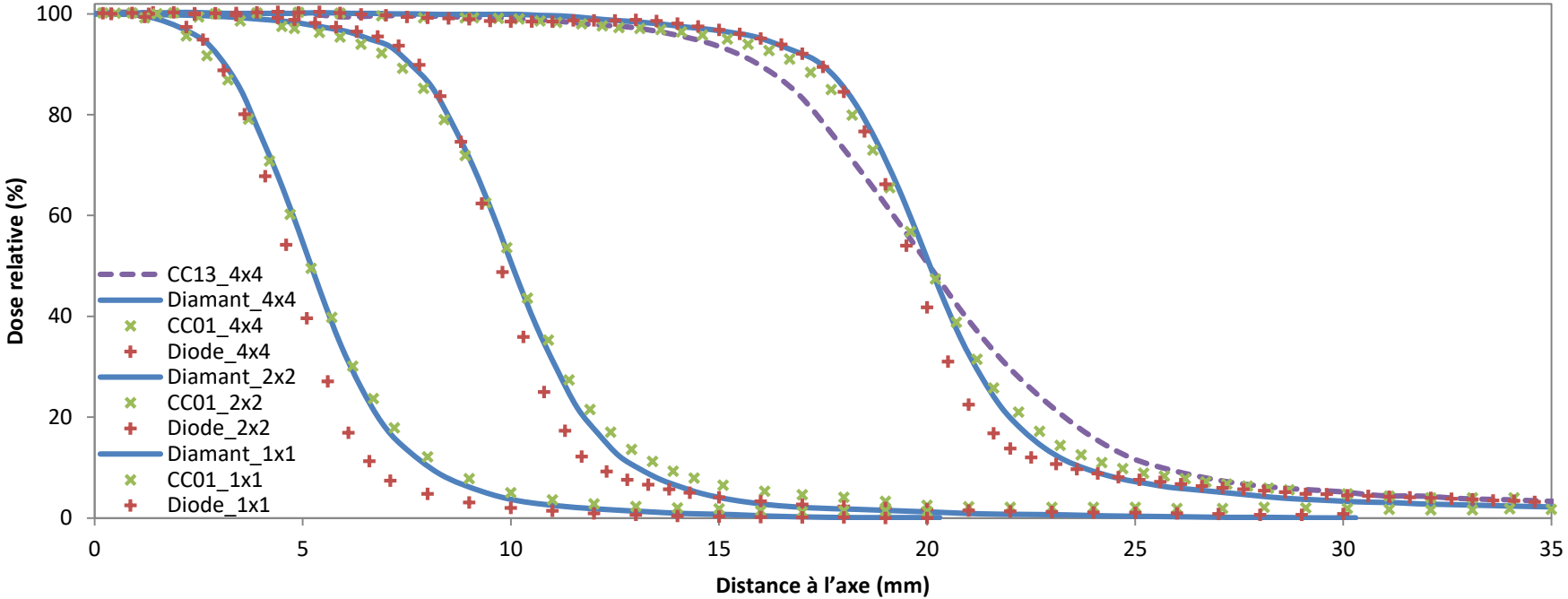
- **Profils - précautions d'acquisition :**
  - Mesure avec une chambre d'ionisation: attention à l'effet de manche!





RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

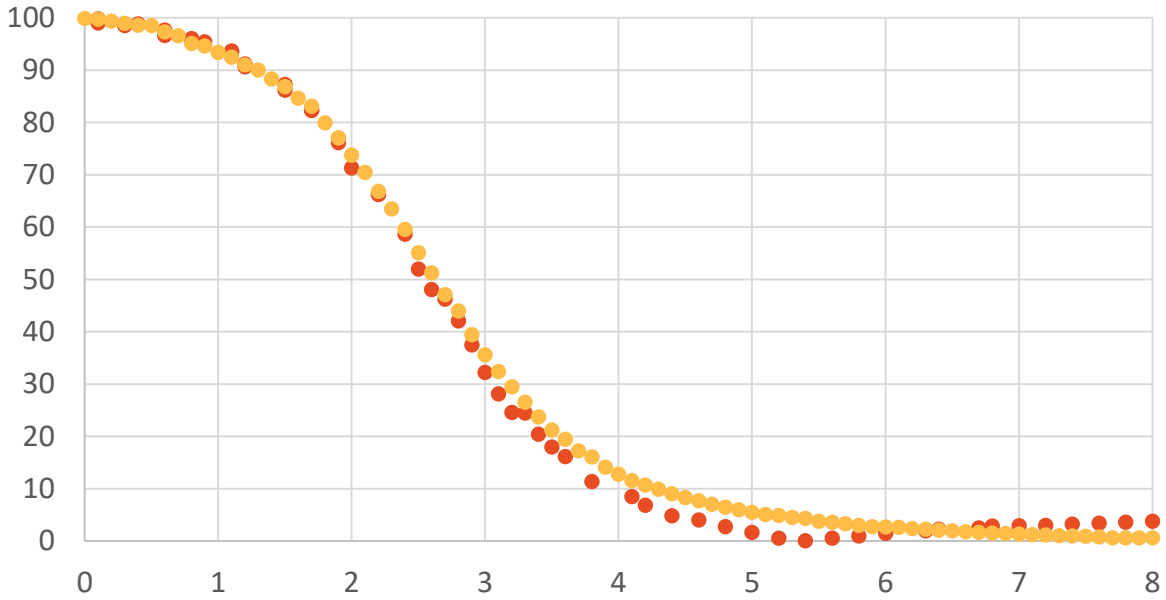
- **Profils - champs MLC:**



- Diamant et CC01 en accord (même volume sensible?)
- Détecteur sélectionné : diode Razor pour toutes les tailles de champ

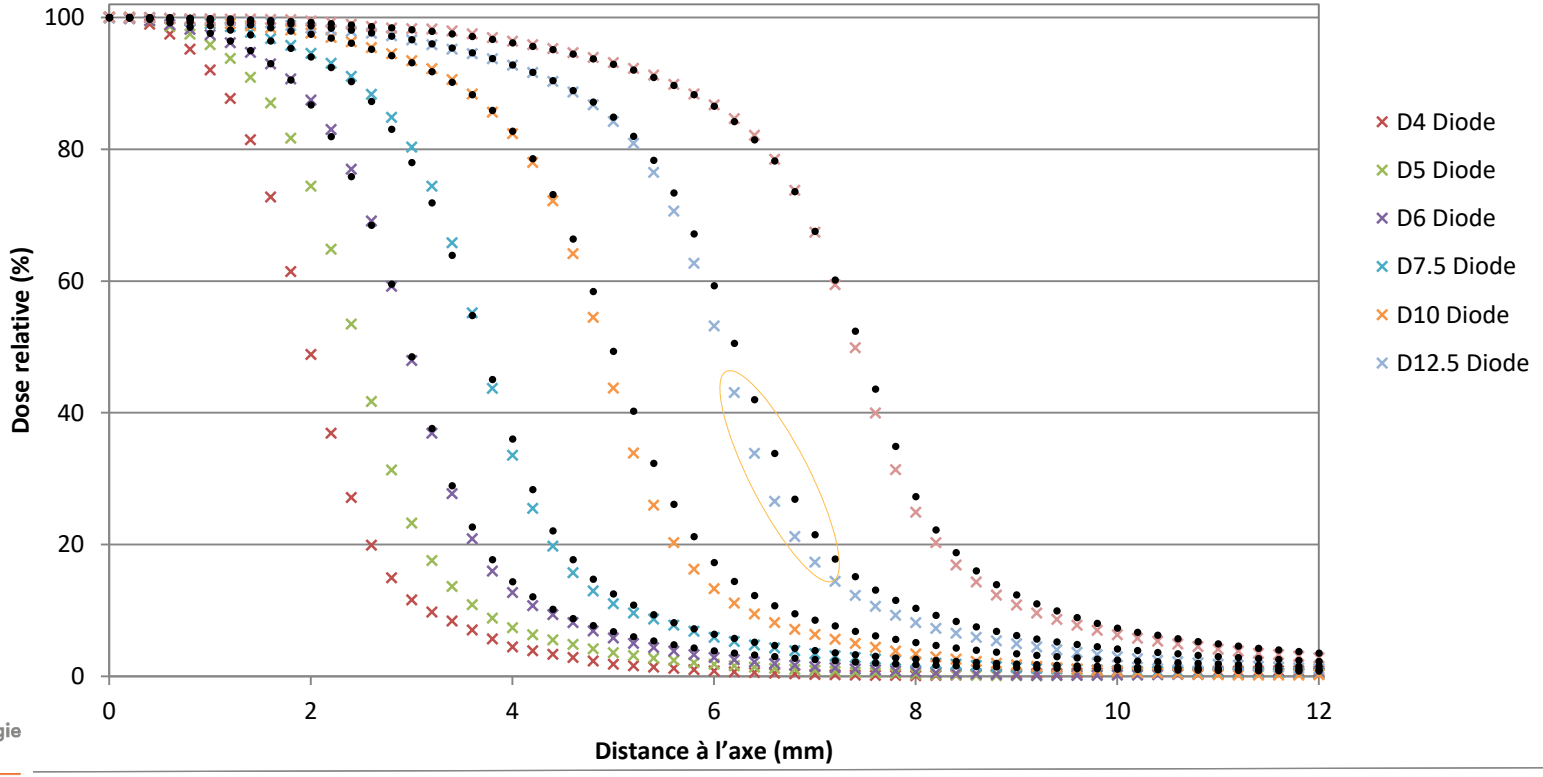
RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Profils - champs MLC:**
  - Diodes: ne pas oublier de faire une pré-irradiation
  - Attention à la correction de bruit de fond



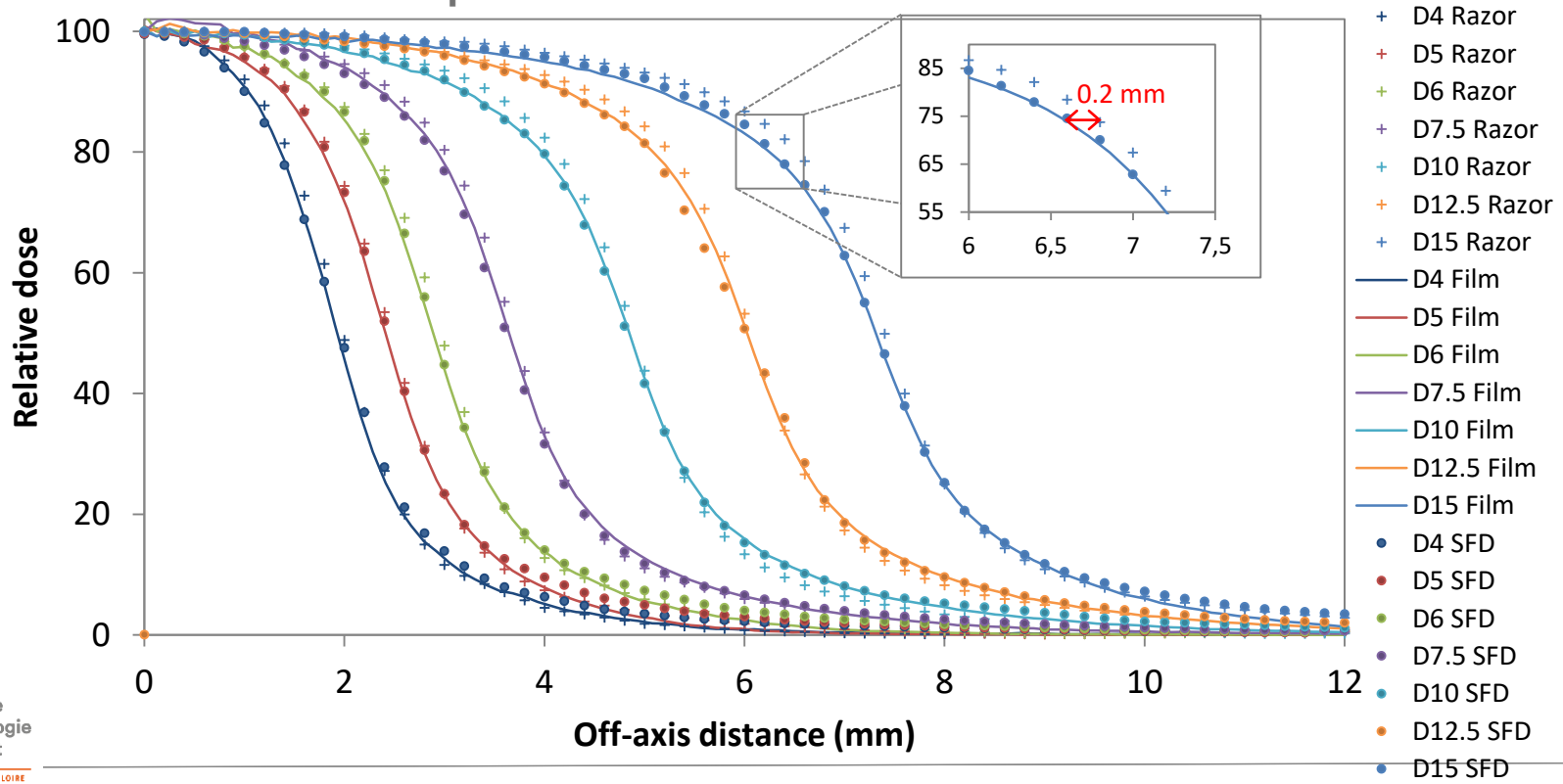
RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Profils - cônes:**



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

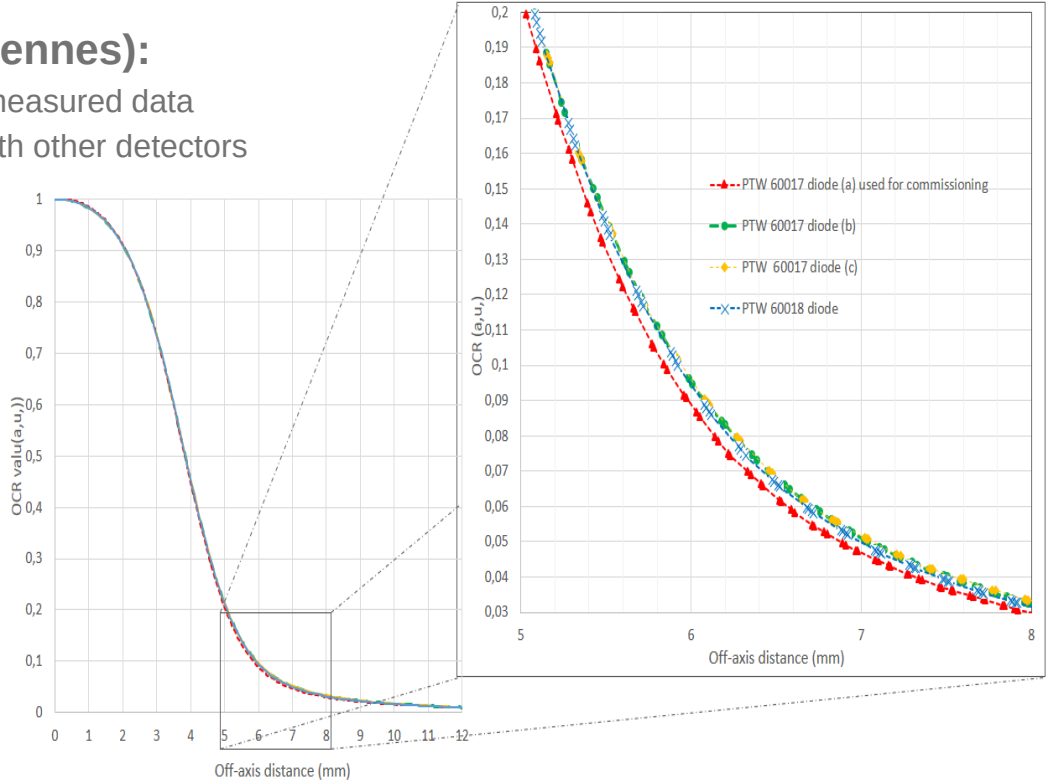
- **Profils - cônes: comparaison avec d'autres dosimètres:**



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Profils au Cyberknife (CEM – Rennes):**
  - RayTracing algorithm used directly your measured data
  - If possible perform a cross comparison with other detectors

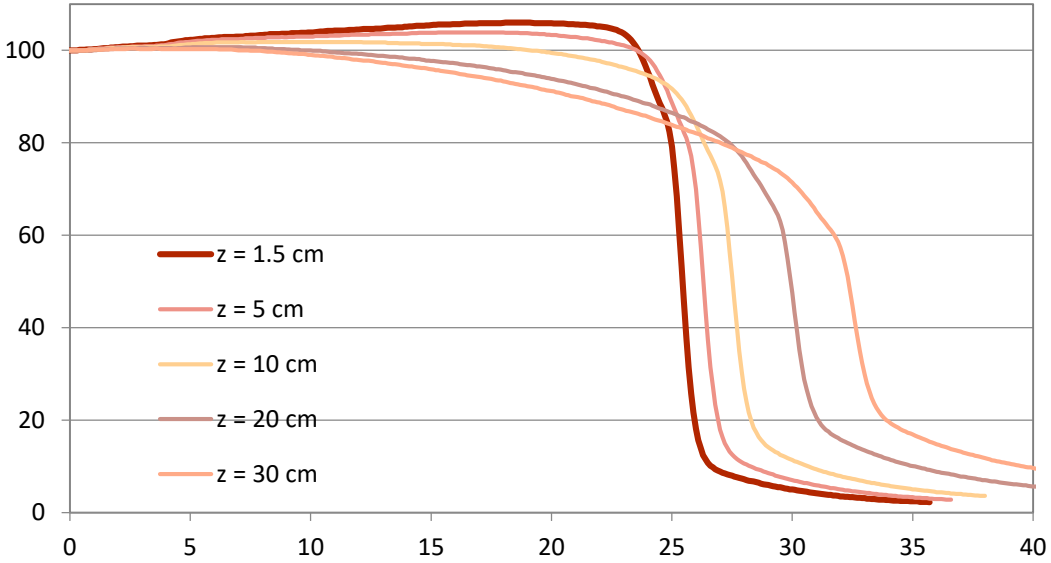
  - Tail region of OCR is especially important for CyberKnife nonisocentric plans (can cause a plan dose undestimation > 5 %)



Example of an OCR obtained for a Fixed 7.5 mm (SSD 75 cm, z= 5 cm)

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Profils diagonaux:**
  - Décentrer la cuve, sans placer le boitier de commande sous le faisceau…
  - Tourner le collimateur à 45° et 135°
  - Mesure de demi-profils (d'où l'importance de la position du zéro du détecteur)



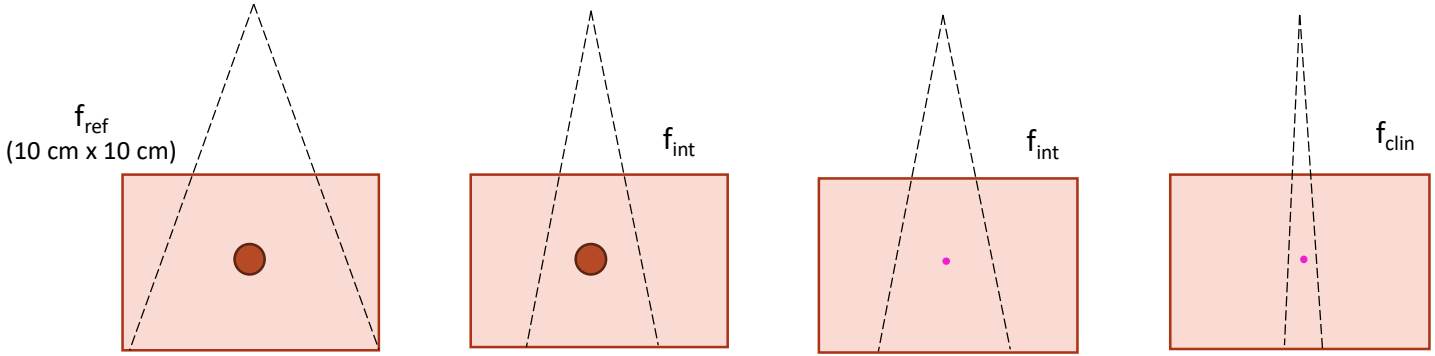
RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de rendements et de profils

- **Bilan:**
  - Rendements: adapter le détecteur à la taille de champ
    - Détecteur recommandé:
      - (IPEM 103) : petite chambre d'ionisation, diode, film
      - (Underwood et al., Phys. Med. Biol. (60) 2015): scintillateur , diamant (> diode)
      - (TG155): diode non blindée, scintillateur, diamant
      - (Wegener et al., Med. Phys. (47) 2020): film, diamant, chambres d'ionisation, (diode)

  - Profils: garder le même détecteur pour toutes les tailles de champ
    - Détecteur recommandé:
      - (IAEA 483, Underwood et al., Phys. Med. Biol. (60) 2015) : film, scintillateur, diamant, (diode): risque de réduction des pénombres du fait de la perturbation de la fluence des électrons (Thèse C. Moignier 2014)
      - (TG155): diode, scintillateur, diamant
      - (Francescon et al., Phys. Med. Biol. (62) 2017): diamant

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Daisy-chaining:**
  - Objectif: limiter la dépendance en énergie des détecteurs en réalisant un étalonnage croisé dans un champ de taille intermédiaire (Dieterich et al., Med. Phys. (38), 2011)
    - Intérêt discuté dans la littérature



$$FOC = \left[\frac{M_{Q_{int}}^{f_{int}}}{M_{Q_{ref}}^{f_{ref}}} \times k_{Q_{int},Q_{ref}}^{f_{int},f_{ref}}\right]_{CI} \times \left[\frac{M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}}{M_{Q_{int}}^{f_{int}}} \times k_{Q_{clin},Q_{int}}^{f_{clin},f_{int}}\right]_{det}$$

≈ 1

- La taille de champ intermédiaire doit être aussi petite que possible mais sans être dans les conditions de petit champ: FWHM > 2 r_{LCPE} + d

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Daisy-chaining: Exemple: mesure dans un champ de 1 cm x 1 cm (sans MLC)**
  - Daisy chaining: CI + diode (f_{int}: 3 cm x 3 cm)
    - Rapport des lectures: 0.690
    - Facteur de correction:

$$\left[k_{Q_{clin},Q_{int}}^{f_{clin},f_{int}}\right]_{det} = \frac{\left[k_{Q_{clin},Q_{msr}}^{f_{clin},f_{msr}}\right]_{det}}{\left[k_{Q_{int},Q_{msr}}^{f_{int},f_{msr}}\right]_{det}} = \frac{1.018}{1.029} = 0.989$$

    - FOC : 0.682
  - Mesure directe (diode)
    - Rapport des lectures : 0.673 (+ 2.5 %)
    - Facteur de correction :

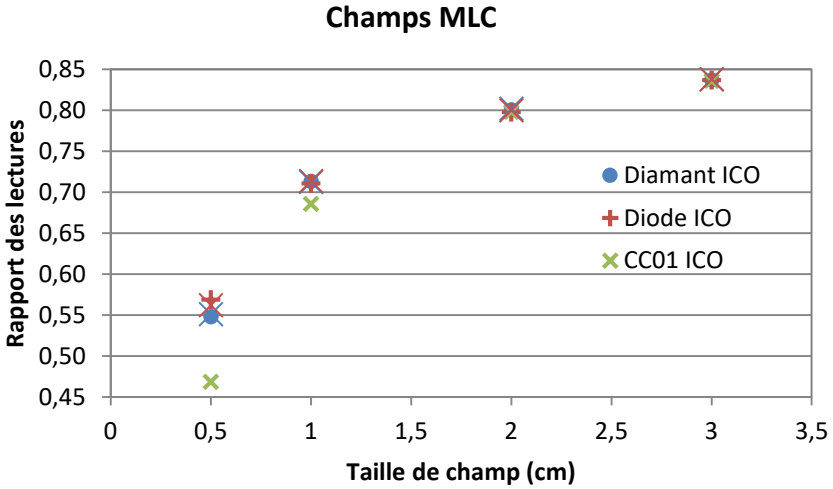
$$\left[k_{Q_{clin},Q_{int}}^{f_{cin},f_{int}}\right]_{det} = 1.018$$

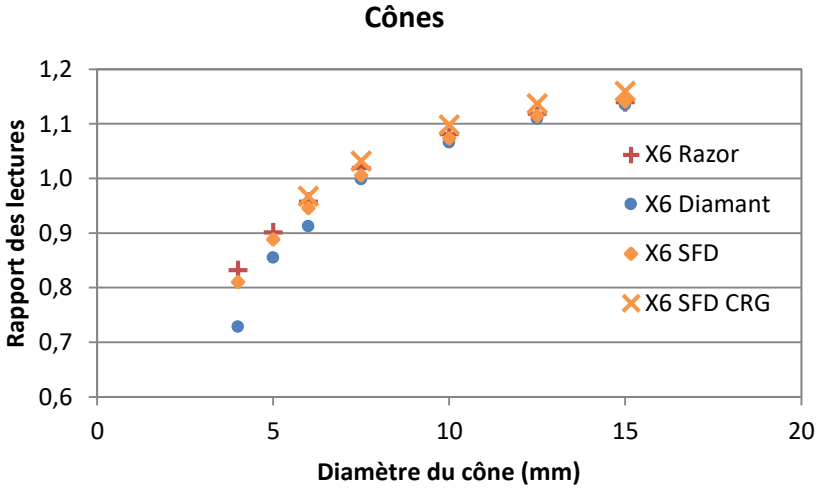
    - FOC : 0.685 (+ 0.4 %)

- **Une petite chambre d'ionisation (0.01-0.3 cc) peut être utilisée jusqu'à 2 cm x 2 cm (IAEA 483)**

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Avant la parution du TRS 483:**





- Ecart < 1 % entre la diode et le diamant jusqu'à 1 cm de côté; écart de 3.5 % pour le plus petit champ
- Comparaison inter-centre : écart maximal pour un même type de détecteur: 1.2 %

- Reproductibilité des mesures < 1 %
- Accord < 2 % entre les diodes Razor et SFD jusqu'à 5 mm de diamètre
- Comparaison inter-centre: écart max de 2.6 % jusqu'à 6 mm de diamètre (même détecteur)

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Avant la parution du TRS 483:**
  - Bibliographie pour déterminer le facteur de correction: Liu *et al.*, Phys. Med. (32), 2016:
    - Publié après notre recette…
    - Pas les mêmes conditions de mesures
    - Pas la même énergie pour les cônes
    - Référence: scintillateur « maison »: Tyler *et al.*, Phys. Med. Biol. (58), 2013
    - Facteur de correction allant jusqu'à 6.7 % dans nos configurations
    - Incertitude sur les facteurs de correction annoncée à 1 %
    - Ecart parfois importants avec d'autres publications…

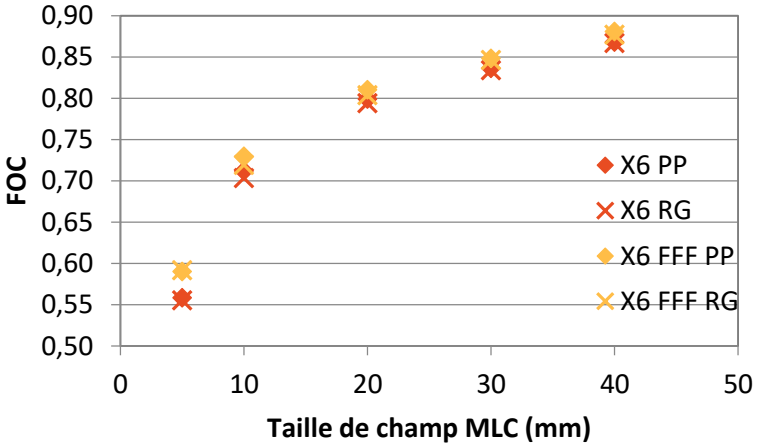
Table 2
The average small field correction factors ($k^{f_{clin},f_{msr}}_{Q_{clin},Q_{msr}}$) of the IBA Razor. Correction factors are to be applied to output ratio measured using the IBA Razor at a depth of 50 mm and normalized at the 30 mm MLC field or 30 mm stereotactic cone. The FWHM of each field has been measured from Gafchromic film.

Linac and field	FWHM (mm, ±0.2)	Correction factor (±0.010)
EDGE MLC		
6X 5 mm	6.0	0.964
6X 10 mm	10.5	0.996
6FFF 5 mm	6.0	0.975
6FFF 10 mm	10.9	0.999
10FFF 5 mm	6.0	0.976
10FFF 10 mm	10.5	0.992
EDGE cones[a]		
6X 4 mm	4.0	0.928
6X 7.5 mm	7.7	0.967
6X 10 mm	10.2	0.985
6FFF 4 mm	4.0	0.927
6FFF 7.5 mm	7.5	0.973
6FFF 10 mm	10.3	0.987
Truebeam MLC		
6X 5 mm	5.8	0.957
6X 10 mm	10.3	0.987
6FFF 5 mm	5.5	0.971
6FFF 10 mm	10.2	0.999
10X 5 mm	5.7	0.974
10X 10 mm	10.4	0.978
10FFF 5 mm	6.1	0.966
10FFF 10 mm	10.8	0.993
Novalis MLC		
6X (SRS) 5 mm	5.9	0.968
6X (SRS) 10 mm	10.9	0.994
Novalis cones[a]		
6X (SRS) 4 mm	3.7	0.933
6X (SRS) 7.5 mm	7.3	0.977
6X (SRS) 10 mm	9.8	0.990

[a] For cone collimations the correction factors are for Razor 1 only.

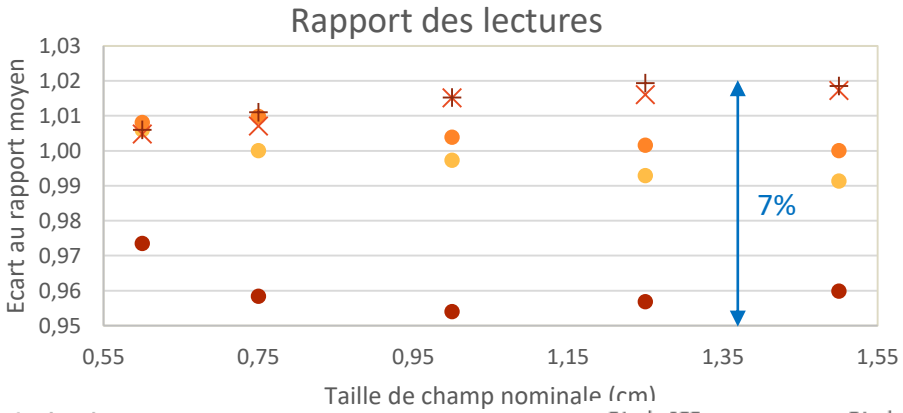
RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

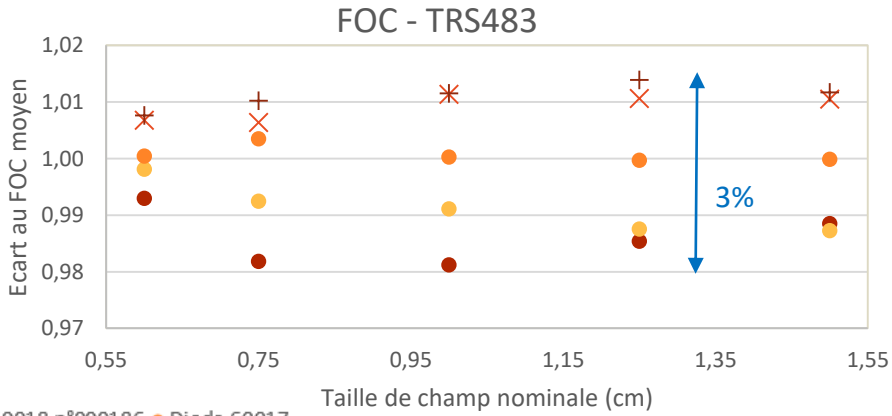
- **Avant la parution du TRS 483:**
  - Nombreuses publications mais:
    - Difficulté de trouver le détecteur souhaité dans les mêmes conditions d'irradiation et pour le même type d'accélérateur
    - Grande variabilité des valeurs du facteur de correction
  - Facteur de correction a priori inférieur à 2 % jusqu'à 1 cm de diamètre et dépassant 5 % à partir de 5 mm de diamètre
    - Pas de facteur de correction appliqué
    - Moyenne lectures diode et diamant (champs MLC)
    - Taille de champ minimale autorisée: 0.8 cm
    - Avertissement des médecins de la plus grande incertitude lorsque la taille de champ est inférieure à 1 cm
  - Comparaison inter-centre pour validation
    - Ecart max: 1.7 %



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Après la parution du TRS 483:**
  - Modification des valeurs de FOC:
    - De 1.3 % pour un champ de 1 cm de côté et de 4.5 % pour un champ de 0.5 cm de côté
    - Moyenne lectures diode et diamant (champs MLC)
    - Taille de champ minimale autorisée: 0.8 cm
    - Avertissement des médecins de la plus grande incertitude lorsque la taille de champ est inférieure à 1 cm
  - Convergence des mesures de FOC en fonction des détecteurs?

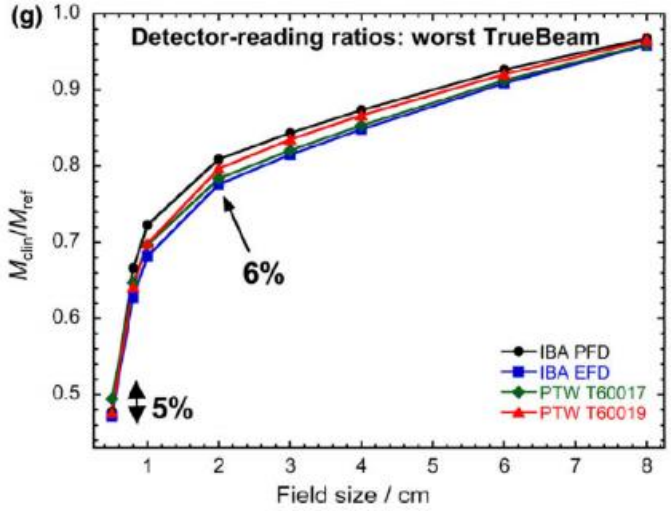


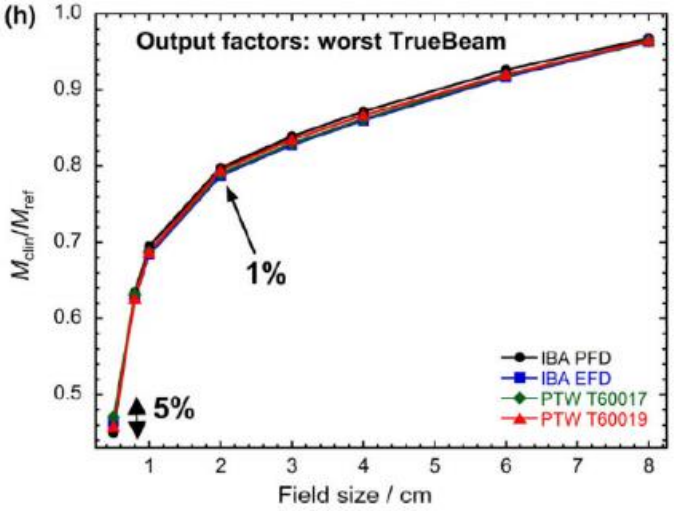


Diode SFD · Diode 60018 n°000186 · Diode 60017 · Diamant n°123788 · Diamant n°122271 v2

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

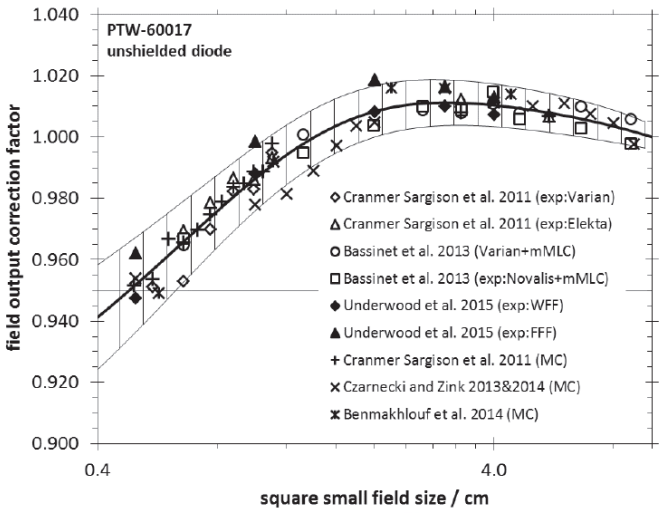
- **Après la parution du TRS 483:**
  - Convergence des mesures de FOC en fonction des détecteurs?
    - Ghazal et. al., Med. Phys. (46), 2019
      - 6 Varian Clinac et 6 Varian Truebeam (linacs de même type matchés)
      - Trubeam: entre 3 et 5 % de dispersion pour le champ de 0,5 x 0,5 cm²



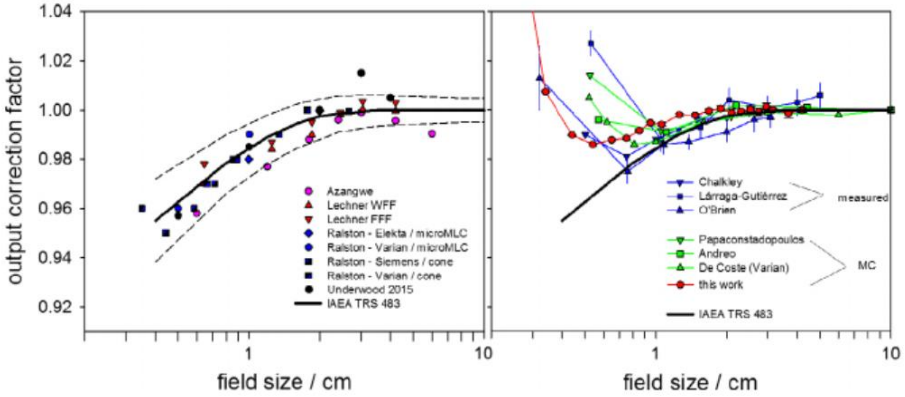


RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Limites du TRS 483:**
  - Incertitude associée au facteur de correction:
    - Comprise entre 0.4 et 0.8 % en fonction de la taille de champ selon le TRS

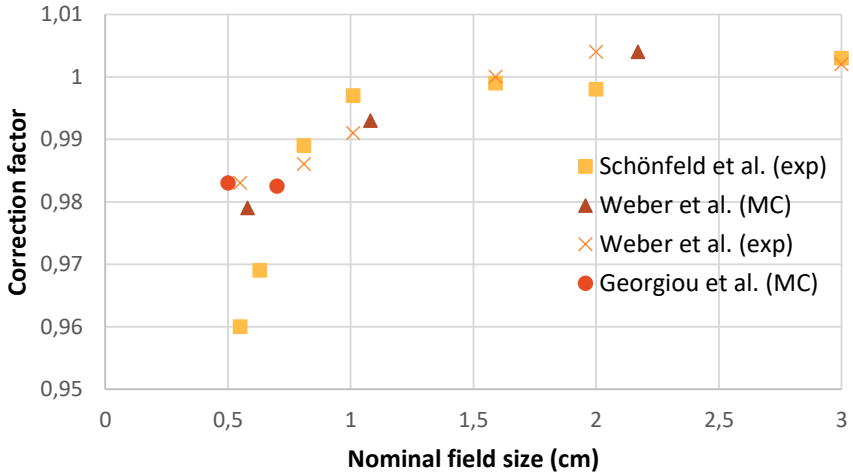


  - Débat dans la littérature pour le diamant:
    - De Coste *et al.*, Phys. Med. Biol. (62), 2017
    - Das *et al.*, Med. Phys. (45), 2018
    - Palmans *et al.*, Med. Phys. (45), 2018
    - Francescon *et al.*, Phys. Med. Biol. (64), 2019
    - Hartmann *et al.*, Med. Phys. (46), 2019



RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Limites du TRS 483:**
  - Valeurs pour les nouveaux détecteurs? Pour les plus petites tailles de champ?
    - TRS 483 publié en 2017, littérature considérée jusqu'en 2015
    - Exemple pour la diode PTW 60023:
      - Schönfeld et al. Med. Phys. (46), 2019
      - Weber et al., Med. Phys. (47), 2020
      - Georgiou et al., Med. Phys., 2021



  - Certains détecteurs tabulés dans le TRS 483 ne sont plus commercialisés
  - Valeurs pour les plus petites tailles de champ?

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Comparaisons à la littérature:**
  - Pour les accélérateurs:
    - Russo *et al.*, Phys. Med. (32) 2016 (a)
    - Akino *et al.*, Phys. Med. Biol. (63) 2018 (b)
    - Akino *et al.*, J. Appl. Clin. Med. Phys. (21) 2020 (c)
    - Casar *et al.*, Med. Phys. (46) 2019
    - De Coste *et al.*, Phys. Med. Biol. (62), 2017
  - Pour le cyberknife:
    - Russo *et al.*,, Phys. Med. (32) 2016
    - Masi *et al.*, Phys. Med. (32) 2016
    - De Coste *et al.*, Phys. Med. Biol. (62), 2017
  - Bien lire les publis:
    - (a) Valeurs de rapport de lectures (non corrigées) par type d'accélérateur et par type de détecteur
    - (b) et (c) DSP 100
  - Dans les études multicentriques et multidétecteurs, l'influence de la valeur du facteur de correction pour un type de détecteur est moins importante

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Comparaisons à la littérature:**
  - GT SFPM: « Field output factors for small fields: A large multicentre study», Dufreneix *et al.*, Phys. Med. (81) 2021
    - Recueil des données mesurées sur les appareils délivrant des petits faisceaux avec les détecteurs utilisés en clinique (accélérateurs Varian, Elekta, CyberKnife)
    - Critère de sélection:
      - 1 série de données = 1 accélérateur, 1 type de collimation, 1 configuration DSP/z, 1 énergie
      - Au moins 3 séries de données provenant d'au moins 3 équipements différents

Company	Linac model	Collimation	SSD (cm)	Depth (cm)	Energy	Number of Linacs
Accuray	CyberKnife M6	Circular fixed aperture collimator	78.5	1.5	6 FFF	7
Elekta	Versa HD / Synergy	Agility MLC	90	10	6 WFF	8
					6 FFF	6
Varian	TrueBeam STx	HD120 MLC "Brainlab configuration"	90	10	6 WFF	7
					6 FFF	4
			95	5	6 WFF	3
					6 FFF	3
			100	10	6 WFF	3
					6 FFF	3
		Jaws only	90	10	6 WFF	3
					6 FFF	3

    - Calcul des valeurs de FOC moyens et de leur écart-type associé:

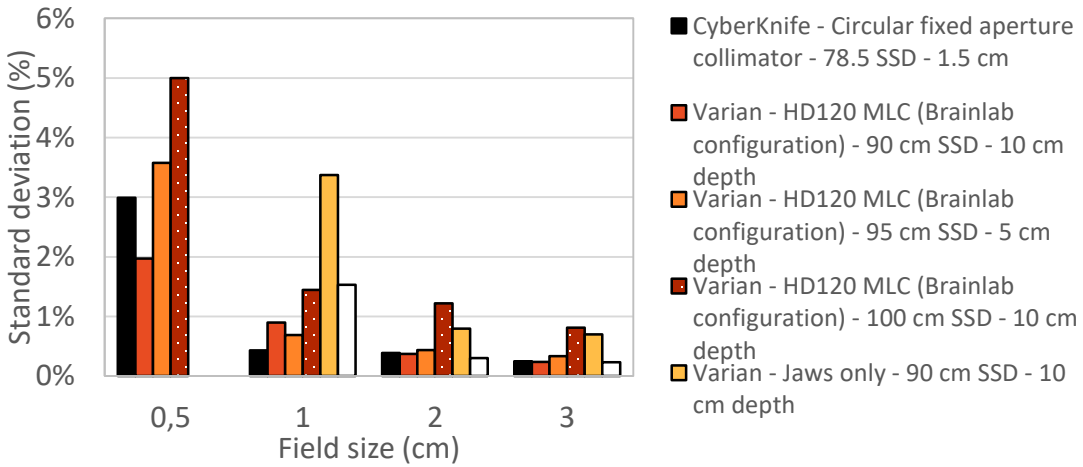
Table 3

Mean field output factors $\Omega^{f_{clin},f_{msr}}_{Q_{clin},Q_{msr}}$ and standard deviations SD in parentheses for 6WFF and 6FFF Elekta linacs (n represents the number of data collected).

Collimation	SSD (cm)	Depth (cm)	Nominal field size (cm)	6 WFF		6 FFF	
				$\Omega^{f_{clin},f_{msr}}_{Q_{clin},Q_{msr}}$ (SD)	n	$\Omega^{f_{clin},f_{msr}}_{Q_{clin},Q_{msr}}$ (SD)	n
Agility MLC	90	10	0.6	–	–	–	–
			1.0	0.673 (0.010)	15	0.694 (0.011)	11
			2.0	0.800 (0.004)	15	0.828 (0.003)	11
			3.0	0.845 (0.003)	15	0.875 (0.002)	11

RETOUR D'EXPÉRIENCE
Mesure de FOC

- **Comparaisons à la littérature:**
  - GT SFPM: « Field output factors for small fields: A large multicentre study», Dufreneix *et al.*, Phys. Med. (81) 2021
    - Ecart-type incluant la reproductibilité des accélérateurs, la diversité des détecteurs et de leurs facteurs de correction associés ainsi que les incertitudes de positionnement



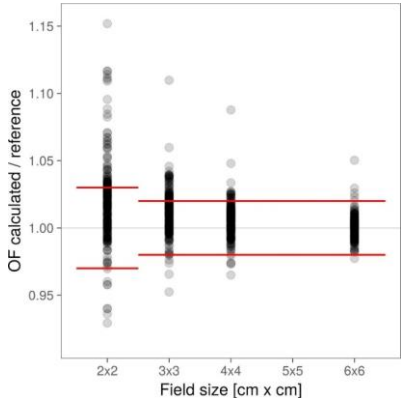
- **Attention taille de champ nominale ≠ taille de champ effective** (Cagni et al., Med. Phys. (43), 2016)

4

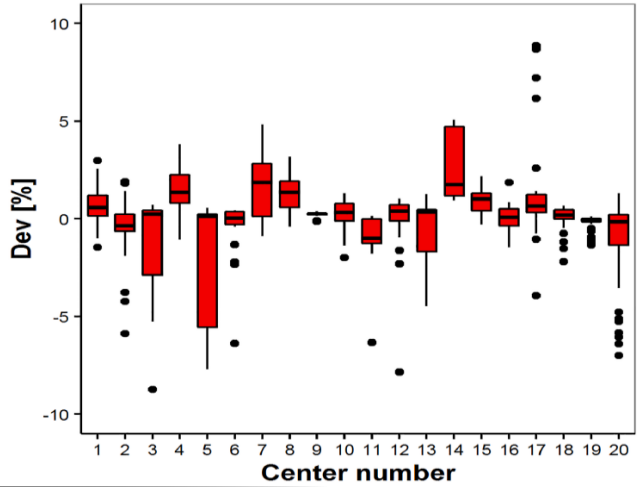
UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
FOC

- **Lechner *et al*., Phys. Imaging Radiat. Oncol. (5), 2018**
  - 103 institutions, tous accélérateurs et TPS confondus
  - Les TPS surestiment les FOC dans les petits champs (> 2 % pour un champ de 2 cm x 2 cm)
  - Les résultats variant selon le couple accélérateur-TPS considéré (écart plus important pour Varian-Eclipse que pour Elekta-Monaco)



- **Falco *et al.*, Phys. Med. (88), 2021:**
  - 21 centres, tous accélérateurs et TPS confondus
  - Ecart moyen entre FOC calculé et mesuré faible (< 0.5 %) mais écart maximal important (7.8 % max pour 1 cm x 1 cm)



UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
FOC

- **Sendani *et al.*, Med. Phys. (46), 2019:**
  - 3 modèles : mesure des FOC avec un scintillateur (clinical) et une chambre d'ionisation (A1SL) avec (corrected) et sans facteur de correction (uncorrected)
  - Réalisation de différents plans et CQ associés
  - Calcul avec le CCC (Pinacle), AAA et AcurosXB (Varian)

TABLE II. Percentage difference between measured and calculated dose at isocenter and γ analysis of intensity modulated radiation therapy (IMRT) and volumetric modulated arc therapy (VMAT) plans in the three configured machines for Eclipse treatment planning system.

				Clinical		Uncorrected		Corrected	
Site of treatment	# Segments	#Fields	Field size (cm)	%diff	Y (2%–2 mm)	%diff	Y (2%–2 mm)	%diff	Y (2%–2 mm)
Pelvis VMAT	356	2	17–21	−0.3	94.4	−0.5	92.7	−0.6	94.2
Abdomen IMRT	134	6	10.1–2.8	−1.4	99.4	−1.4	99.6	−1.0	99.1
Head and neck IMRT	282	9	13.6–17.6	−0.3	95.8	−0.2	95.7	−0.5	95.9
Head and neck VMAT	356	2	18.9–21.4	1.2	94.0	0.8	95.5	1.2	94.2
Partial brain VMAT	228	2	1.6–1.9	5.2	87.0	7.7	91.6	6.4	89.6
Partial brain IMRT	116	6	2.1–2.3	1.6	94.0	1.5	86.6	2.5	97.9

  - La modification des valeurs de FOC dans le TPS a un faible impact sur les plans de traitement

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
FOC

- **Mamesa *et al.*, J Appl Clin Med Phys, 2020:**
  - 3 modèles : mesure des FOC avec une chambre d'ionisation (CC01), une diode blindée (PFD) et une diode non-blindée (EFD), mesures renseignées brutes et corrigées
  - Réalisation de 10 plans AcurosXB (Varian)
  - L'application du TRS-398 diminue la dispersion des UM calculés par les 3 modèles

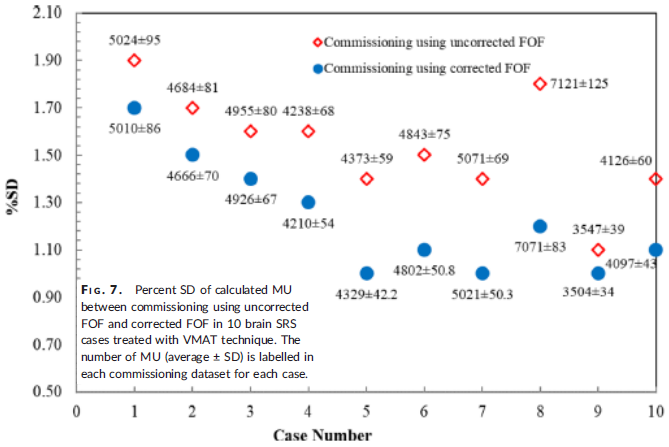
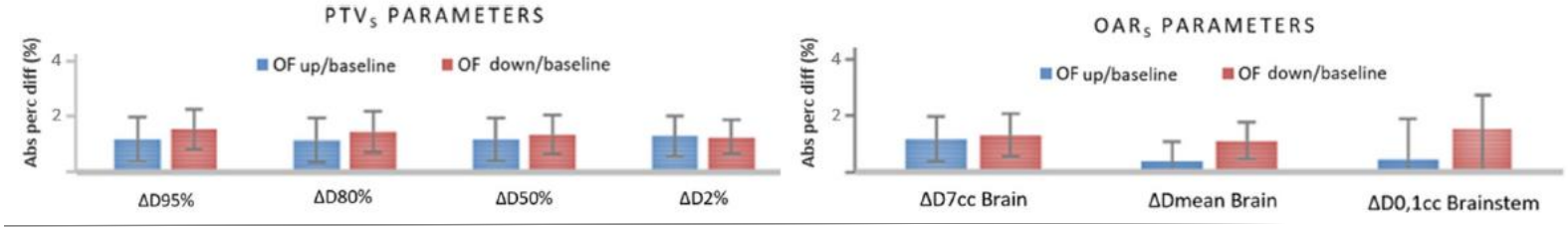


FIG. 7. Percent SD of calculated MU between commissioning using uncorrected FOF and corrected FOF in 10 brain SRS cases treated with VMAT technique. The number of MU (average ± SD) is labelled in each commissioning dataset for each case.

- **Clemente *et al.*, Br J Radiol., 2021:**
  - 9 centres, 5 plans VMAT
  - Modification des FOC pour les champs < 3 cm de ± 3 %
  - Impact dosimétrique faible



UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Rendements

- **Eclipse:**
  - Pas de paramétrage spécifique pour les petits champs
  - Les mesures dans les champs inférieurs à 3 cm de côté sont optionnelles
  - Il n'est pas nécessaire d'avoir un modèle dédié aux petits champs
  - Seule la taille de la source (en X et en Y) est ajustable

Recommended Measurements for Open Beam

Measure the following for small fields:

- Depth dose curves and profiles from 3x3 cm^2 up to maximum field size deliverable with the machine (for example 40x40 cm^2).

  The measurement set must contain field sizes at least up to 10x10 cm^2.

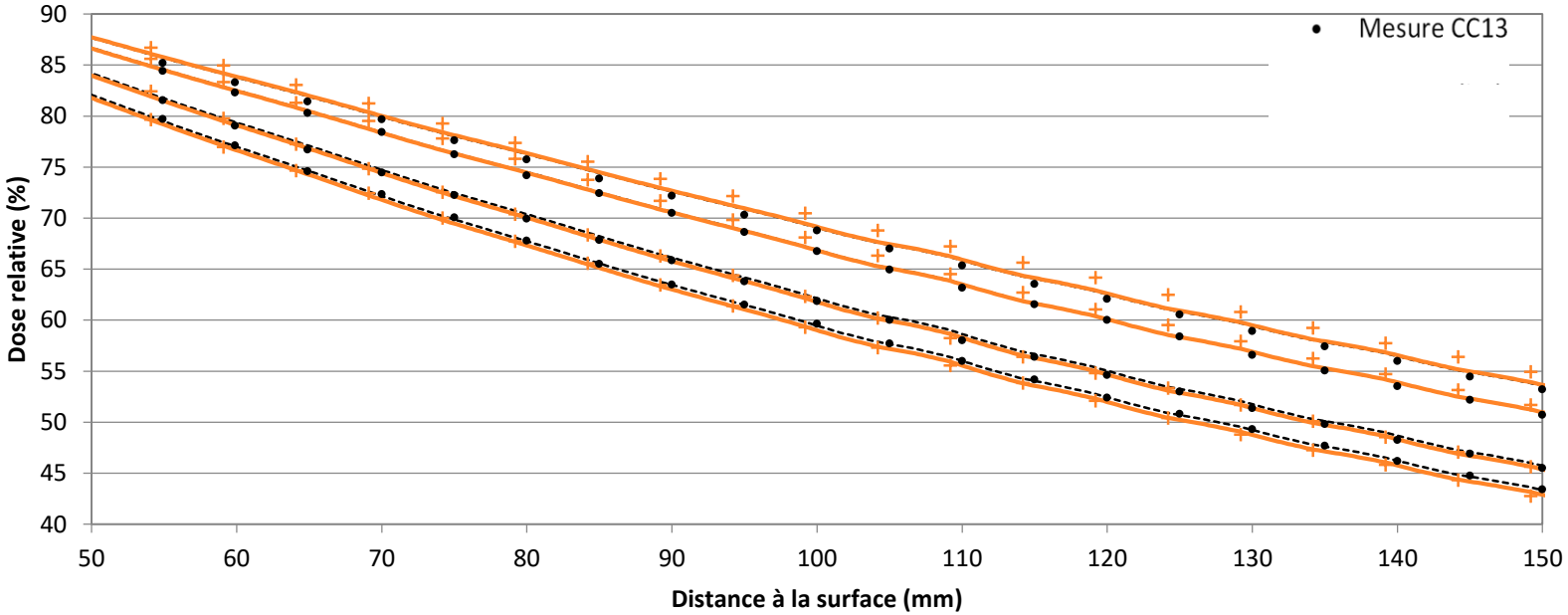
  Inclusion of measurements for smaller field sizes than 3x3 cm^2 does not have a significant impact on the calculated beam data parameters. Beam model should be accurate even though the measurement data does not contain very small field sizes (1x1 cm^2 and 2x2 cm^2).
- Diagonal profiles for the maximum field size.
- Output factors from 3x3 cm^2 up to the maximum field size deliverable with the machine.

  Output factors for field sizes 1x1 cm^2 and 2x2 cm^2 can be included, if desired. However, these will not affect the calculation results for small MLC collimated fields in treatment units, where MLC is located below the jaws (for example Varian). This is because the backscatter in these cases is determined from the size of the jaw opening. If small jaw-collimated fields are used in the treatments, the inclusion of output factor measurements for these field sizes may improve the accuracy slightly.

Beam Data Configuration

A single beam data containing both small and large field measurements is expected to produce accurate results for all field sizes. There is no need to create separate models for the calculation of small and large field sizes.

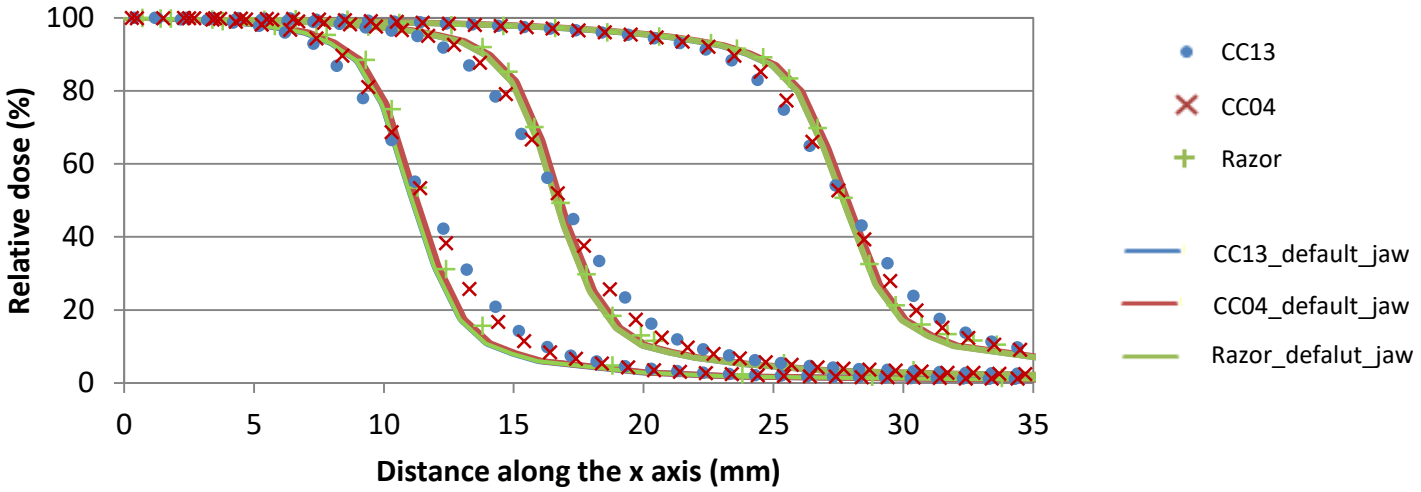
UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Rendements



- **Modèle CC13 en accord avec les mesures CC13**
- **Modèle diode en accord avec les mesures CC13**

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **3 détecteurs pour la mesure de profils**
  - CC13: volume sensible 0.13 cc (longueur 5.8 mm, largeur: 6 mm)
  - CC04: volume sensible 0.04 cc (longueur 3.6 mm, largeur: 4 mm)
  - Diode Razor: volume sensible de 0.6 mm

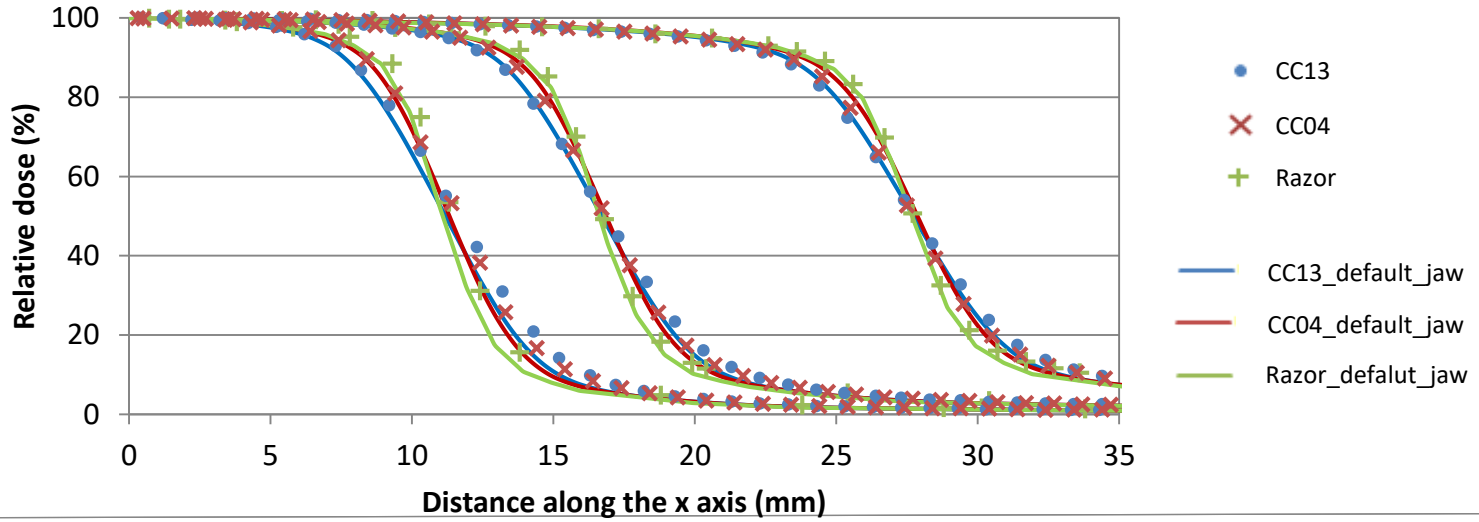


- Un même modèle, « en accord » avec les profils mesurés avec la diode (grille de calcul: 1 mm)

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **Oui, mais:**
  - Prise en compte de l'effet de moyennage sur le volume sensible en moyennant les profils calculés sur le volume sensible

Détecteur	Chambre CC13 (IBA)	Chambre CC04 (IBA)	Diode Razor (IBA)
Dimension du volume sensible	6 mm	4 mm	0.6 mm
Grille de calcul	6 mm	4 mm	1 mm



UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **La modélisation d'un faisceau nécessiterait la connaissance du profil déconvolué de la réponse du détecteur utilisé pour la mesure**
  - Fox *et al.*, Med. Phys. (37) 2010
  - Yan *et al.*, Med. Phys. (35) 2008
  - Barraclough *et al.*, Med. Phys. (43) 2016
  - Mund *et al.*, J Appl Clin Med Phys, 2020

- **Profil modélisé =? Profil « vrai »**

- **Pas d'impact du choix du détecteur?**

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **Gersh et al., J Appl Clin Med Phy (15), 2014:**
  - Mesure des profils (de 2 à 40 cm) à l'aide de 3 détecteurs: CC13 et 2 diodes
  - Calcul de chaque modèle de faisceau (6 MV), rendements et FOC identiques pour tous les modèles pour se concentrer sur la modélisation de la pénombre
  - Recalcul de plans de traitement (statiques, VMAT, …) avec Acuros XB (Eclipse)
  - Peu d'impact du choix du détecteur

TABLE 7. Mean dose values for planning target volumes (PTV) and organs at risk (OAR) for the evaluated SBRT liver plans, and for each of the detector-specific models. The percent difference from the CC13 values are calculated by subtracting the tested values by the CC13 values, and normalized to 100% using the CC13 values.

		CC13	*60012*	*% diff from CC13*	*EDGE*	*% diff from CC13*
			SBRT Liver 1			
Mean Dose (cGy)	PTV	5216	5197	-0.4	5215	0.0
	Liver	1513	1513	0.0	1513	0.0
	Cord	231	231	0.1	231	0.0
	Rt. Kidney	1230	1231	0.1	1229	0.0
	Lt. Kidney	122	122	0.3	122	0.0
	Lt. Lung	68	68	0.7	68	0.0
	Bowel	692	697	0.7	692	0.0
	Heart	88	92	4.2	88	0.1
	Conformity Index	1.21	1.20	---	1.21	---
			SBRT Liver 2			
Mean Dose (cGy)	PTV	6311	6301	-0.2	6311	0.0
	Liver	1582	1583	0.1	1581	0.0
	Cord	226	227	0.4	226	0.0
	Rt. Kidney	28	30	4.6	28	0.0
	Lt. Kidney	22	23	2.3	22	0.0
	Rt. Lung	83	84	0.4	83	0.0
	Lt. Lung	429	432	0.6	429	-0.1
	Heart	242	273	0.5	272	0.0
	Conformity Index	1.00	0.99	---	1.00	---

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **Garcia-Garduno et al., Med. Phys. (41), 2014:**
  - Mesure des données de base à l'aide de 6 détecteurs: 3 diodes, 1 CI et 2 types de film (EBT et EBT2)
  - Mesures pour des cônes de 4 à 20 mm de diamètre au 6 MV
  - Comparaison des distributions de dose calculées (EBT en ref) et des HDV (Iplan)

TABLE V. Gamma-index analysis for IDLs for circular collimator with 4.0 mm diameter and grid calculation matrices of 1, 2, and 3 mm; percentage of points with γ ($\Delta\delta$, ΔD) $\leq$ 1 is shown.

	Circular collimator diameter 4.0 mm					
	1 mm/1%	1 mm/3%	1 mm/5%	2 mm/2%	2 mm/3%	3 mm/3%
	Grid matrix 1 mm					
CC01	81.8	86.5	99.5	93.8	92.5	100
Diode E	84	100	100	100	100	100
EBT2	14	100	100	100	100	100
SFD	92.6	100	100	100	100	100
SRS	29.8	89.3	100	100	100	100

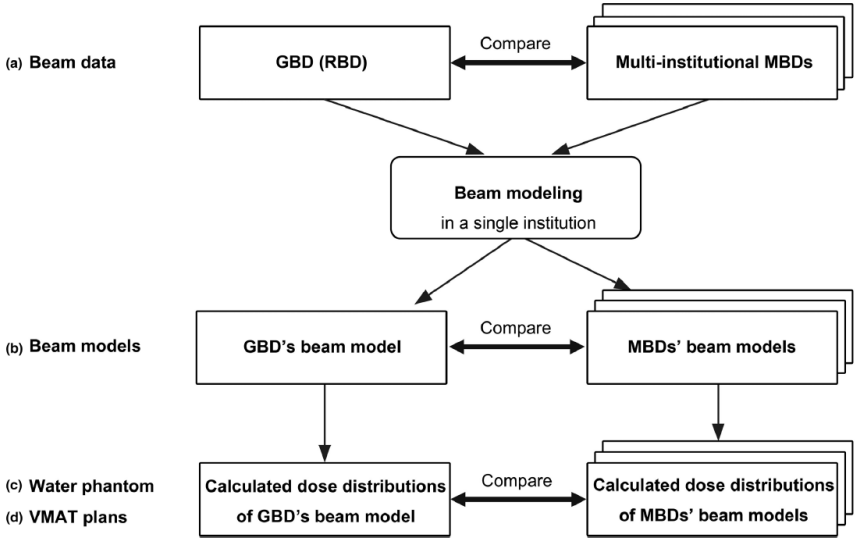
TABLE VIII. DVH analysis for three different grid calculation matrices of 1, 2, and 3 mm, used to evaluate the percentage of the lesion volume covered by a 100% dose and normal tissue volume receiving a dose of 12 Gy or higher.

	Grid 1 mm		Grid 2 mm		Grid 3 mm	
Detector	D100 (%)	V12 (%)	D100 (%)	V12 (%)	D100 (%)	V12 (%)
	Circular collimator diameter 4.0 mm					
CC01	100	8.53×10^{-14}	100	0.002	100	0.002
Diode E	99	1.42×10^{-14}	99	0.002	99	0.002
EBT2	99	8.53×10^{-14}	99	0.002	99	0.002
SFD	99	2.84×10^{-14}	99	0.002	99	0.002
SRS	100	1.42×10^{-14}	100	0.002	100	0.002
EBT	99	5.68×10^{-14}	99	0.002	99	0.002

  - Peu d'impact du choix du détecteur

UTILISATION DES DONNÉES MESURÉES DANS LES TPS
Profils

- **Tani *et al.*, Med. Phys. (47), 2020:**
  - Comparaison de données de base, de modèles de faisceaux et de plans de traitement



  - Ecart sur les contraintes de dose: [-5.6% ; 3%] pour AXB, [-24.1 % ; 2.8%] pour CCC
    - D'où la nécessité de rentrer ses données mesurées dans le TPS!

5

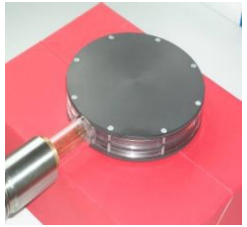
ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

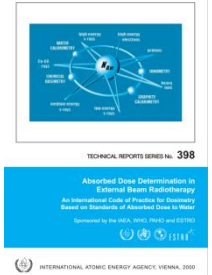
ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Traçabilité de la dose absorbée dans l'eau :**
  - Mesure de la dose absorbée dans les services de radiothérapie :
    - A l'aide d'un dosimètre secondaire (chambre d'ionisation)
    - Nécessite un étalonnage dans un laboratoire

Mesures calorimétriques → Etalonnage d'une chambre d'ionisation de référence → Etalonnage des dosimètres des utilisateurs → Etalonnage du faisceau de l'utilisateur → Dose absorbée dans l'eau

Laboratoire — *Laboratoire* — *Laboratoire* — *Utilisateur* — *Utilisateur*

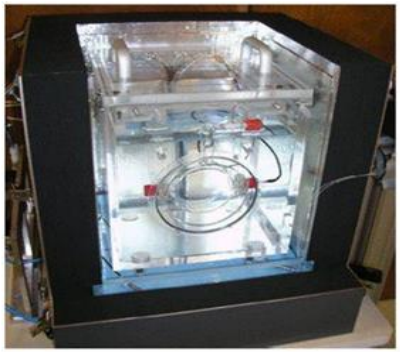


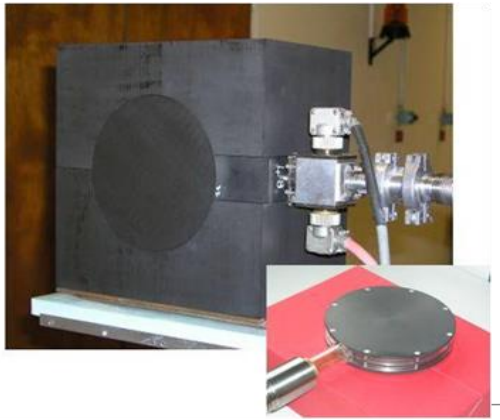


Etablissement et transfert d'une référence dosimétrique dans les conditions de référence (taille de champ : 10 cm x 10 cm)

ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

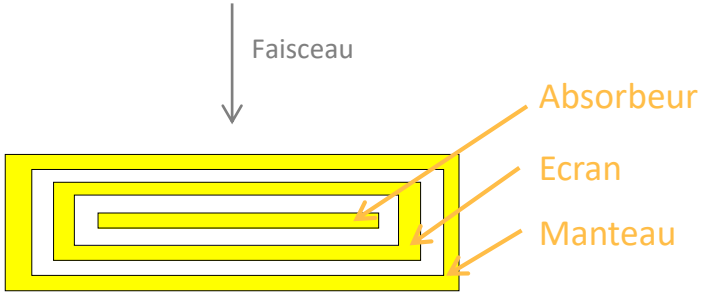
- **Rappel de calorimétrie:**
  - Principe : mesure directe de l'énergie absorbée par le milieu (eau ou graphite) lors de l'interaction des rayonnements ionisants avec la matière via une mesure de l'élévation de température.
  - Incertitude-type sur la dose absorbée dans l'eau : 0,4-0,5 %
  - Sensibilité :
    - ~ 0,2 mK/Gy pour le calorimètre eau
    - ~ 1 mK /Gy pour le calorimètre graphite

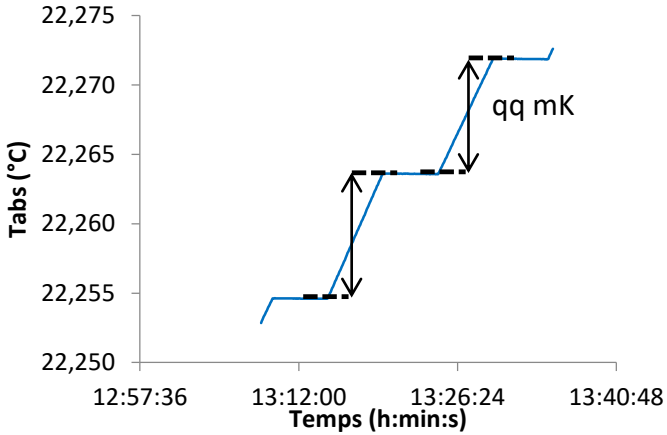


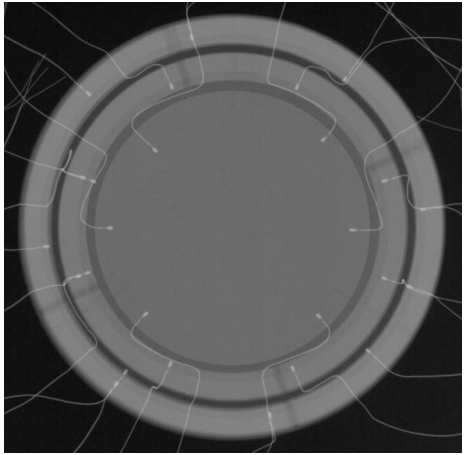


ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Rappel de calorimétrie:**
  - Principe général :
    - Mesure de l'élévation de température induite par l'irradiation
      - Dans un corps isolé thermiquement
      - Rendement calorifique du graphite égal à 1
    - Dépôt d'énergie dans un élément de masse connue

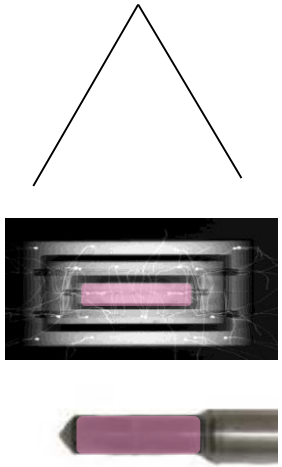


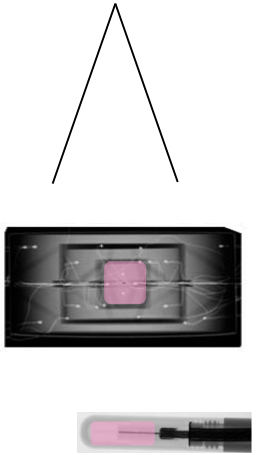




ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Références dosimétriques dans les petits faisceaux:**





10 cm x 10 cm 4 cm x 4 cm	
Calorimètre GR09	Ø: 1.6 cm
Chambre de référence: NE 2571 / NE 2577	V: 0.6 / 0.2 cm^3

2 cm x 2 cm	
Calorimètre GR10	Ø: 0.6 cm
Chambre de référence: Exradin A1SL	V: 0.057 cm^3

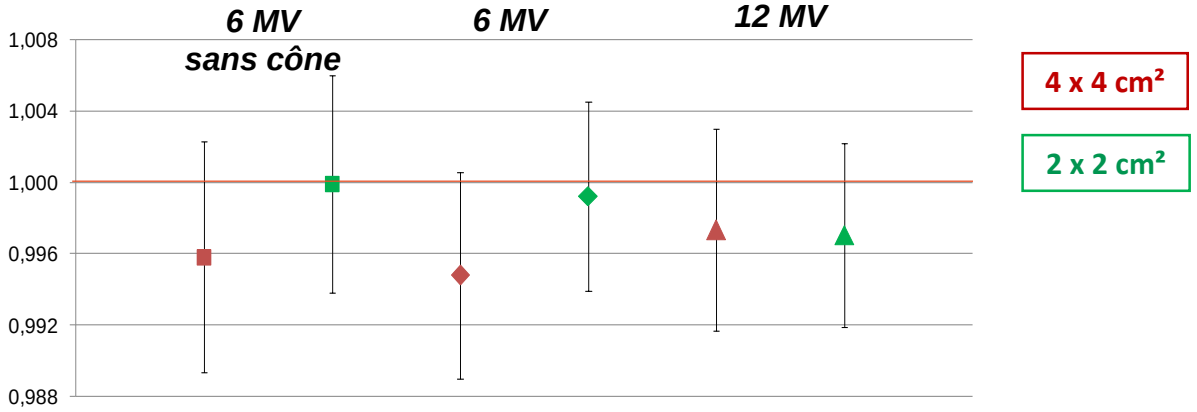
- Projet européen EMRP (2008-2011)

- La construction d'un nouveau calorimètre permet de garder une irradiation uniforme de l'absorbeur

ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

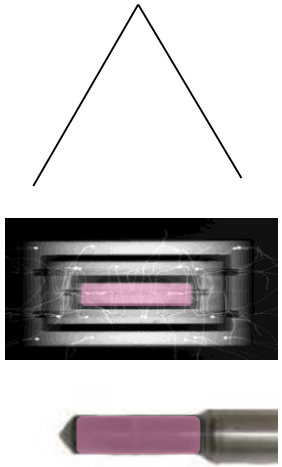
- **Choix de la chambre d'ionisation de transfert (Le Roy et al., Phys. Med. Biol. (56), 2011):**
  - Evaluation de la stabilité et des courbes de saturation
  - Exradin A1SL à +150 V

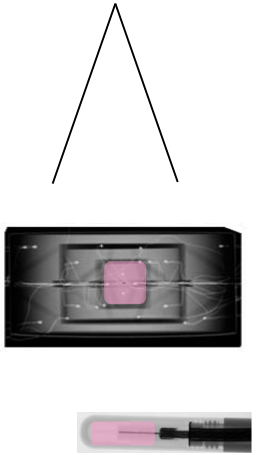
- **Variation du coefficient d'étalonnage de la chambre de transfert en fonction de la taille du champ**
  - Pas de différence à un écart-type

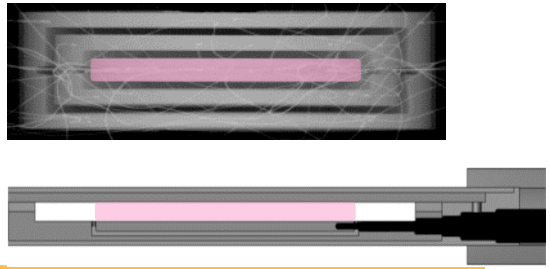


ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Références dosimétriques dans les petits faisceaux:**







10 cm x 10 cm 4 cm x 4 cm	
Calorimètre GR09	Ø: 1.6 cm
Chambre de référence: NE 2571 / NE 2577	V: 0.6 / 0.2 cm^3

2 cm x 2 cm	
Calorimètre GR10	Ø: 0.6 cm
Chambre de référence: Exradin A1SL	V: 0.057 cm^3

- Projet européen EMRP (2008-2011)

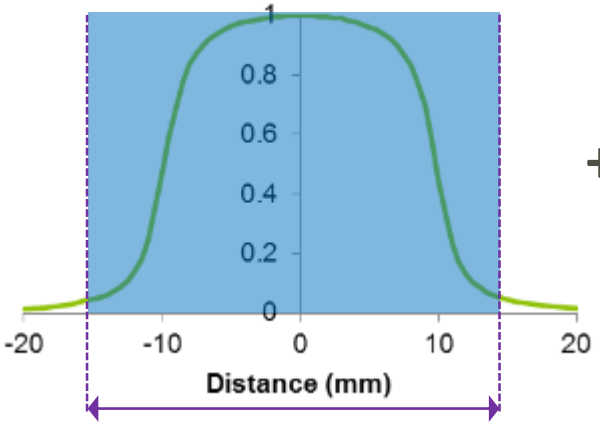
< 2 cm	
Calorimètre GR11	Ø: 3 cm
Chambre de référence: plate parallel	Ø: 3 cm

- Projet européen EMRP (2012-2015)
- Projet LNHB (2019-2021)

ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Le produit dose-surface :**
  - Il représente l'énergie communiquée par le champ de rayonnement sur la totalité de la surface sensible du dosimètre (unité : Gy.cm²)
- **Lien avec le formalisme classique :**
  - Possible via la mesure de la cartographie de dose relative du mini-faisceau
  - Augmente l'incertitude sur le résultat

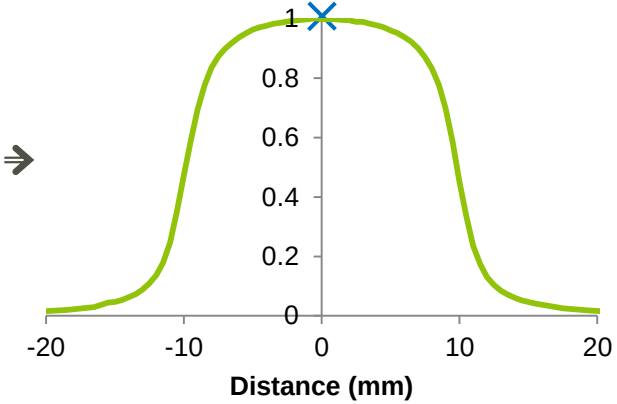
Produit dose-surface



Volume sensible du calorimètre

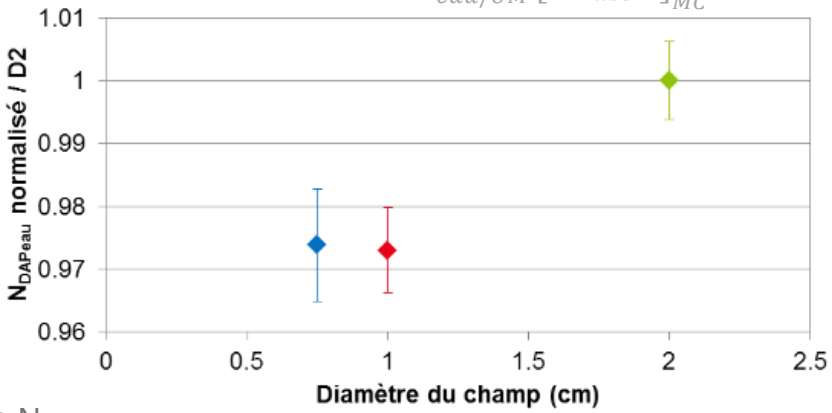
+ Correction de profil →

Dose absorbée en un point



ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Coefficients d'étalonnage en DAP_{eau} dans les mini-faisceaux (Dufreneix *et al.*, Phys. Med. Biol. (61), 2016):**
  - N_{DAPeau} pour la chambre de référence : $N_{DAPeau} = \frac{D_{abs/UM}}{Q^*_{eau/UM}} \left[\frac{D_{eau}(V)}{D_{abs}}\right]_{MC} S$



  - Incertitude-type sur le N_{DAPeau} :
    - Dans le champ de 2 cm de diamètre : 0.62 %
    - Dans le champ de 1 cm de diamètre : 0.68 %
    - Dans le champ de 0.75 cm de diamètre : 0.89 %
  - N_{DAPeau} indépendant de la taille de champ entre 1 et 0.75 cm de diamètre
  - Interrogations sur la valeur à 2 cm de diamètre

ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Coefficients d'étalonnage en DAP_{eau} dans les mini-faisceaux (Jurczak *et al.*, Phys. Med. (98), 2022):**
  - Nouvelles chambres d'ionisation
  - Mesures dans un faisceau de 6 FFF

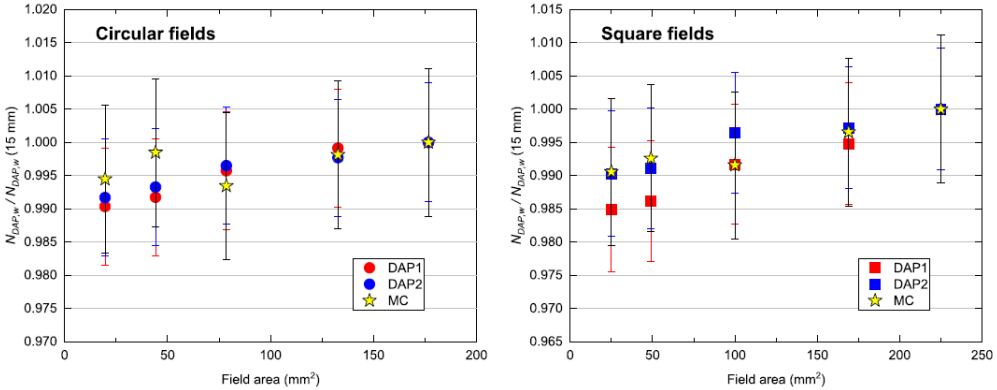
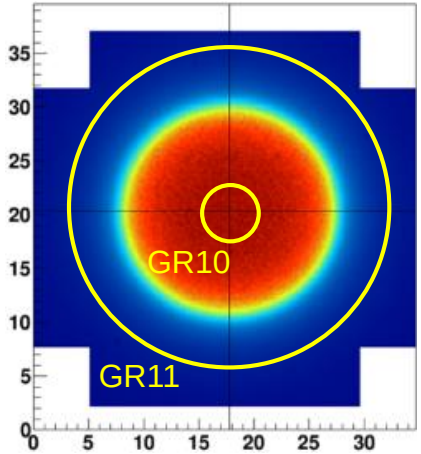


Fig. 9. Calibration coefficients variations of the two DAP plane-parallel ionization chambers determined by graphite calorimetry and calculated dose ratios of the ideal DAP plane-parallel ionization chamber simulated by Monte Carlo for circular fields (left) and square fields (right), normalized to the largest field size (15 mm side length or 15 mm diameter respectively). The scale is the same for the two graphs.

  - Incertitude-type sur le N_{DAPeau} : 0.6 % (k=1)
  - N_{DAPeau} indépendant de la forme du champ
  - Variation de 1.1% ou 1.8% avec la taille de champ équivalente entre 5 et 15 mm

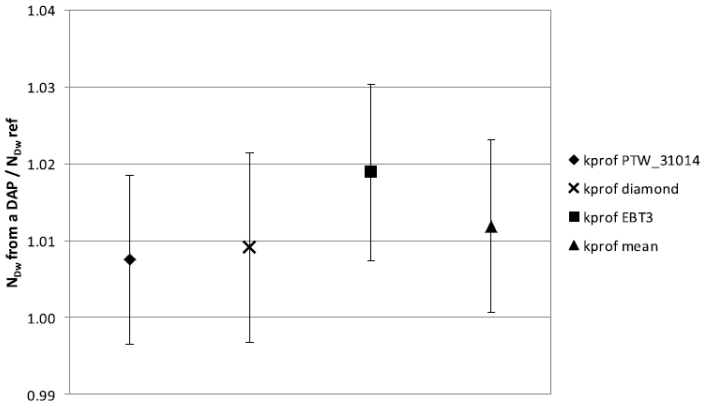
ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Lien avec le formalisme classique (Dufreneix *et al.*, Med. Phys. (43), 2016):**



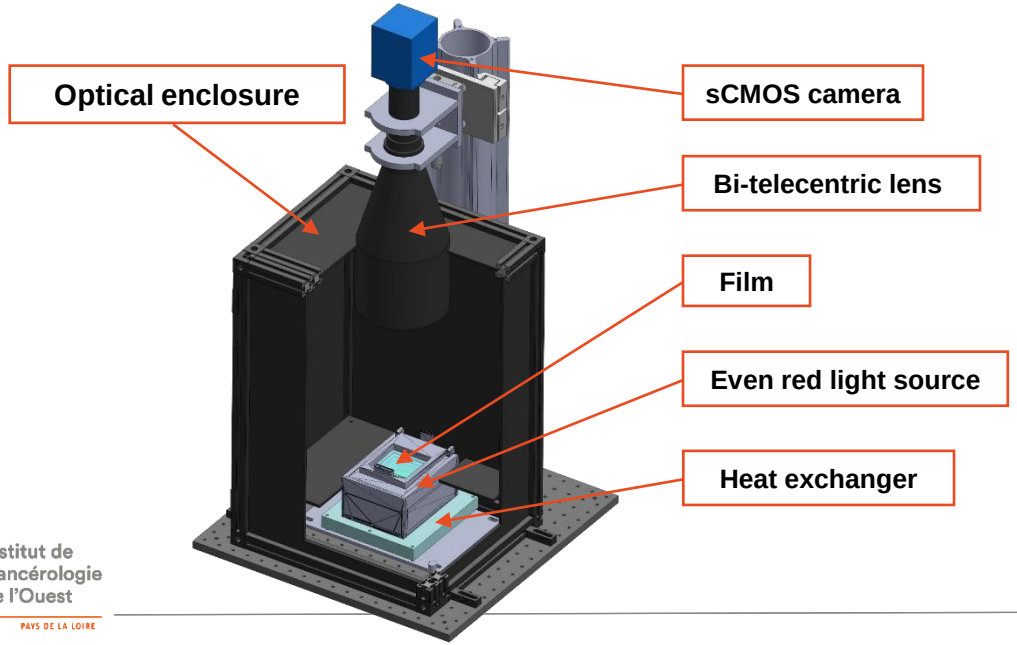
  - Dans le champ de 2 cm de diamètre :
    - GR11 => produit dose-surface
    - GR10 => dose absorbée en un point

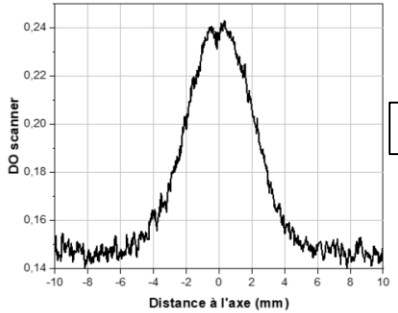
  - Comparaison en termes de dose absorbée en un point
    - Mesure des profils avec
      - Une chambre PTW 31014
      - Un diamant LCD développé au CEA
      - Des films EBT3 => cartographie 2D
    - Accord à k = 2 :
      - Difficulté de mesurer le k_{prof} sur une grande surface
      - Utiliser d'autres dosimètres
      - Comparaison dans un champ de 1,5 cm de diamètre ?



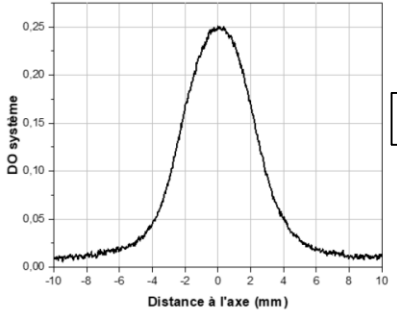
ETABLISSEMENT DE RÉFÉRENCES DOSIMÉTRIQUES EN PETITS FAISCEAUX

- **Travail en cours au LNHB (J. Jurczak – B. Rapp):**
  - Développement d'un nouveau système de lecture optique pour les films
  - Comparaison des courbes de FOC selon l'approche AIEA TRS-483 et DAP extrapolée puis validation ou invalidation de l'approche DAP





Flatbed scanner

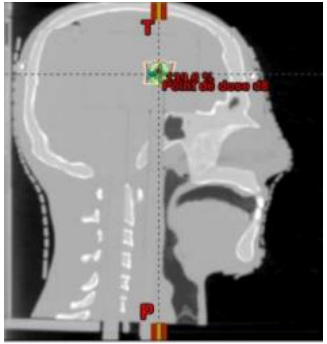


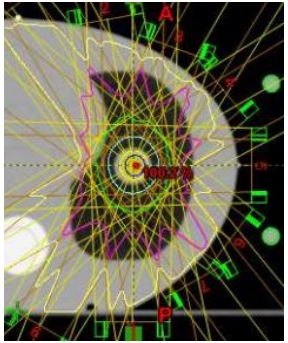
Optical reader

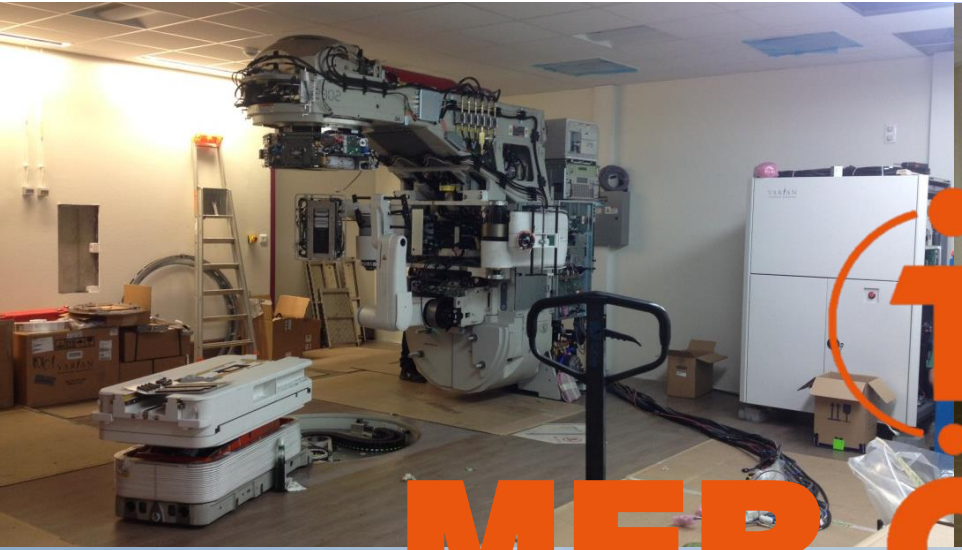
CONCLUSION

- **Les mesures dans les petits champs restent délicates:**
  - Pas de détecteur idéal -> en utiliser plusieurs
  - Chambre d'ionisation utilisable jusqu'à une taille de champ intermédiaire de 2-3 cm
  - Utilisation des facteurs correctifs du TRS 483: réduction de l'erreur systématique
  - En dessous de 1 cm : augmentation de l'incertitude sur le FOC
    - Marino et al., Phys. Med. (65), 2019 : audit italien sur la stéréo: 50 % des centres n'ont pas renseigné la plus petite valeur de FOC mesurée dans leur TPS

- **Les modèles de faisceaux dans les petits champs doivent être spécifiquement vérifiés**
  - Contrôle end-to-end
  - Quel fantôme?
  - Quel détecteur? Quel facteur de correction?
  - Quel type de plan?
  - Quelle tolérance?







MERCI