

Fiche d'activité 3b – Faisceaux de photons petits champs

GONTIER Charlotte

Travail encadré par Stéphanie Josset

I. Introduction

L'objectif de ce travail est de comprendre les concepts et les problématiques entourant les mesures effectuées dans des faisceaux de faible dimension. En effet, les petits faisceaux sont difficiles à définir puisqu'ils sont sujets à trois problématiques. La première est l'occultation partielle de la source, la seconde la taille du détecteur et la troisième le manque d'équilibre électronique latéral. Ces problématiques n'apparaissent pas dans les mêmes conditions, ce qui implique qu'il n'est pas possible de définir une unique taille de champ sous laquelle nous pourrions considérer le faisceau comme petit et appliquer le protocole adapté pour ces mesures. Le protocole international qui encadre les mesures des petits faisceaux est le TRS-483.

L'utilisation de ces faisceaux est majeure dans le cadre des irradiations en conditions stéréotaxiques. Ces faisceaux sont produits en l'absence de filtre égalisateur car le but est de majorer le gradient de dose pour protéger les OARs et les tissus sains autour des volumes cibles. Les prescriptions de ces traitements sont généralement données pour les isodoses 80 % et non en dose médiane comme ce serait le cas pour de l'IMRT (recherche d'homogénéité).

1) Problématiques des petits faisceaux

a. Occultation partielle de la source

Lors de la création d'un faisceau de photons sur la cible, l'origine des photons primaires n'est pas un point mais une tâche appelée tâche focale. Lors de la diminution de la collimation primaire, il se peut que le champ, à ce niveau, se retrouve plus petit que cette tâche focale. Si tel est le cas, nous parlons d'occultation de la source. Plus la tâche est de dimension importante et plus l'occultation apparaît pour des champs plus grands. En général, cette problématique est rencontrée pour des champs de 5 à 8 mm [1]. La conséquence est la réduction de la fluence sur l'axe du faisceau.

b. Taille du détecteur

Lors de mesures, le détecteur intègre le signal sur son volume. Cependant, lorsque le détecteur est plus grand que la source, une sous-réponse du détecteur est mesurée par effet de moyennage.

c. Manque d'équilibre électronique latéral

La dose déposée dans la matière est liée à l'absorption de l'énergie des électrons secondaires. Hors, le parcours des électrons est plus chaotique que celui des photons, ils peuvent notamment déposer cette énergie latéralement. Une réduction de la fluence est donc observée sur l'axe. Cette problématique apparaît lorsque le rayon du faisceau est plus faible que le parcours latéral maximal des électrons et dépend donc de l'énergie du faisceau incident.

A titre comparatif, voici les rayons correspondant aux différentes énergies [1] :

Energie (MV)	1,33 (Co ⁶⁰)	6	10
r_{LCPE} (g/cm ²)	0,6	1,3	1,7

Le rayon de mise à l'équilibre électronique peut se calculer des manières suivantes selon les protocoles suivis :

$$r_{LCPE} = 8,369 * TPR_{20,10} - 4,382 [2]$$

$$r_{LCPE} = 0,67 * d_{max} + 0,2 \text{ cm} [3]$$

2) Protocoles internationaux et recommandations

Le protocole que l'on suit dans le cadre de ce travail est le TRS-483 de l'IAEA [2]. Il préconise l'orientation des détecteurs selon leur catégorie : solide ou chambre d'ionisation.

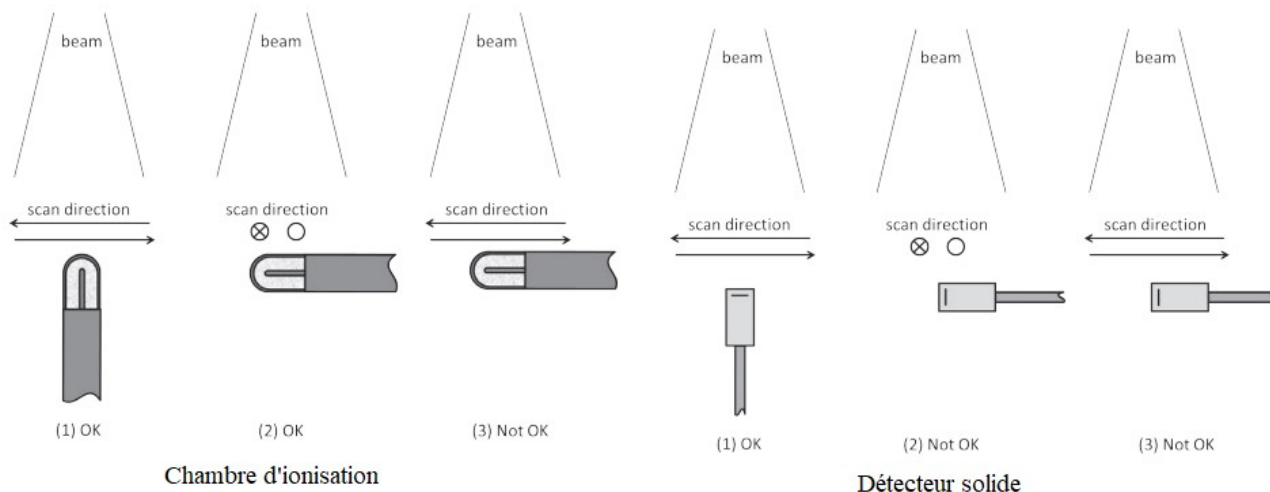


Figure 1 : Orientation préconisée des détecteurs dans le TRS-483

Pour la mesure des facteurs d'ouverture collimateur en petits champs, un facteur de correction est à introduire. Il permet de corriger les erreurs liées à ces 3 problématiques. Ce facteur est tabulé en fonction de la taille de champ d'irradiation, du détecteur utilisé, à 10 cm de profondeur, pour une énergie donnée, du type de machine utilisée [Table 26]. Il est indépendant du système de collimation (cône ou MLC) et n'est donné que s'il est inférieur à 5 %. Ce facteur se note $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$.

Pour calculer la taille de champ carrée équivalente, nous avons utilisé les valeurs mesurées par le logiciel MyQA. Ce logiciel utilise la méthode de normalisation basée sur les points d'inflexion puis normalise les profils en ces points à la dose de 50%. La taille de champ carré équivalente se calcule de la manière suivante : $c_{eq} = \sqrt{a \cdot b}$ avec a et b les côtés du champ d'irradiation mesuré.

La recommandation est que la taille de champs doit être supérieure à 2 fois la distance maximale parcourue par les électrons secondaires ajouté au diamètre du détecteur. Soit $FWHM > 2 * r_{LCPE} + d$, avec r_{LCPE} la distance latérale de mise à l'équilibre électronique latéral et d le diamètre du détecteur.

3) Détecteurs

Pour réaliser les mesures présentées ci-dessous, nous avons utilisé 4 détecteurs dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Chambre	Nano Razor	Diode SFD	MicroDiamant	Stealth (IBA)
Type de détecteur	Chambre d'ionisation cylindrique	Semi-conducteur	Solide	Chambre d'ionisation parallèle
Volume sensible (mm ³)	0,03	0,017	0,004	/
Tension d'utilisation (V)	300	0	0	- 420
Orientation RDM	Verticale	Vertical	Vertical	Chambre fixée à la tête du LINAC
Orientation profils	Verticale ¹	Vertical	Vertical	
Orientation FOC	Verticale	Vertical	Vertical	
Centrage de la hauteur	Centre géométrique de la chambre	Surface du détecteur	Sur la marque	Non concerné

¹ Aucune documentation trouvée ne nous a permis de savoir précisément comment centrer la chambre en hauteur avec une orientation verticale, nous avons donc fait le choix de positionner la Razor Nano horizontalement pour ce travail.

II. Mesures

Les mesures ont été réalisées sur un appareil Novalis TrueBeam (Varian) avec MLC 120HD. Les conditions de mesure sont les suivantes :

Mesure	DSP (cm)	DSA (cm)	Pas d'acquisition (mm)	Profondeur (cm)	Chambre de référence
Rendement	90	Non concerné	0,05	Non concerné	Stealth
Profil	90	100	0,05	10	Stealth
FOC	90	100	0,05	10	Aucune

Avant chaque mesure pour un détecteur, nous avons réalisé une chauffe du détecteur de 2000 UM puis un bruit de fond et enfin une normalisation. Nous avons commencé par réaliser des profils de centrage à une faible profondeur et à une forte profondeur soit respectivement la profondeur du maximum (1,4 cm) et une profondeur de 25 cm dans les deux directions. Ces profils permettent de réaligner le détecteur au centre du champ d'irradiation et de vérifier que la cuve à eau est de niveau. Avant chaque changement de taille de champ, nous avons réalisé des profils de centrage à la profondeur de 10 cm dans les 2 axes.

Pour la mesure des facteurs d'ouverture collimateur, la chambre Stealth a été retirée car l'absorption due à sa présence modifie le spectre en énergie et induirait un biais lors de ces mesures.

Toutes les courbes présentées ci-dessous ont été rééchantillonnées tous les 0,1 mm (sauf pour l'investigation de l'influence du pas de mesure) et normalisées au maximum pour les rendements et au centre du champ pour les profils.

1) Profils

a. En fonction de la taille de champs

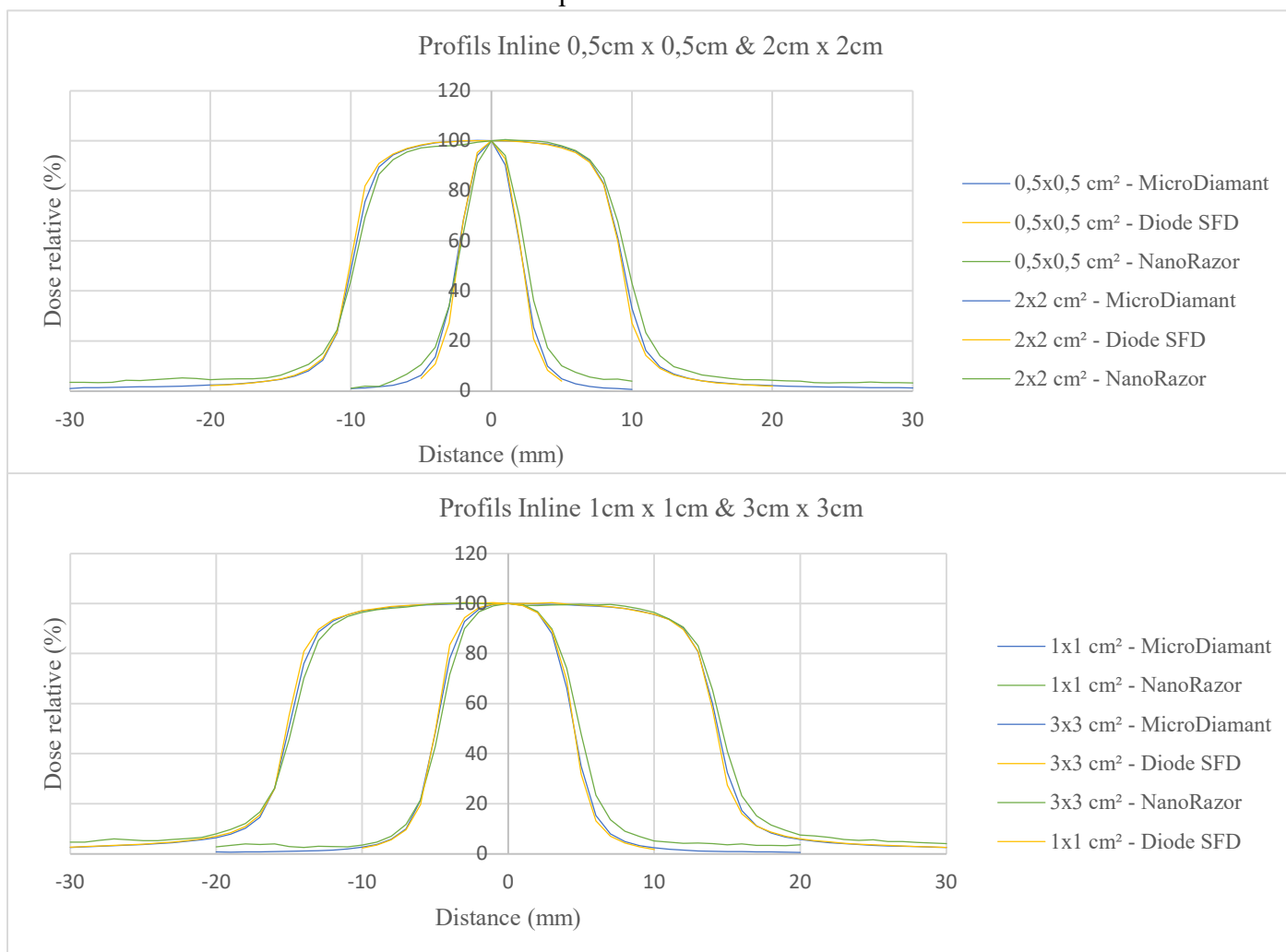


Figure 2 : Profils Inline en fonction de la taille de champ

Nous observons que la chambre Razor Nano mesure des profils asymétriques. En effet, en queue de profil, un signal plus fort est remarqué sur la droite du graphe. Cela est dû à l'orientation d'utilisation de la chambre, horizontale ici et orientée dans le sens Inline.

Détecteur	Taille de champ nominale (cm x cm)	Taille de champs calculée (cm x cm)	Pénombre Gauche (cm)	Pénombre droite (cm)	Centre (cm)
MicroDiamant	0,5 x 0,5	0,48	0,20	0,19	-0,01
Razor Nano		0,50	0,24	0,22	0,01
Diode SFD		0,46	0,17	0,15	-0,01
MicroDiamant	1 x 1	0,95	0,22	0,22	-0,02
Razor Nano		0,97	0,25	0,26	0,01
Diode SFD		0,95	0,19	0,19	-0,02
MicroDiamant	2 x 2	1,93	0,26	0,26	-0,03
Razor Nano		1,95	0,30	0,30	0,00
Diode SFD		1,94	0,22	0,24	-0,04
MicroDiamant	3x3	2,94	0,28	0,28	-0,03
Razor Nano		2,94	0,33	0,32	-0,01
Diode SFD		2,94	0,25	0,26	-0,05

Les pénombres mesurées avec la diode SFD sont plus faibles que celles du MicroDiamant, elles-mêmes plus faibles que pour la chambre d'ionisation. Cela provient de la surface sensible dans le sens du balayage qui est différente entre les 3 détecteurs. La chambre, placée horizontalement montre une surface plus importante que le MicroDiamant qui lui-même montre une surface plus élevée que la **diode**.

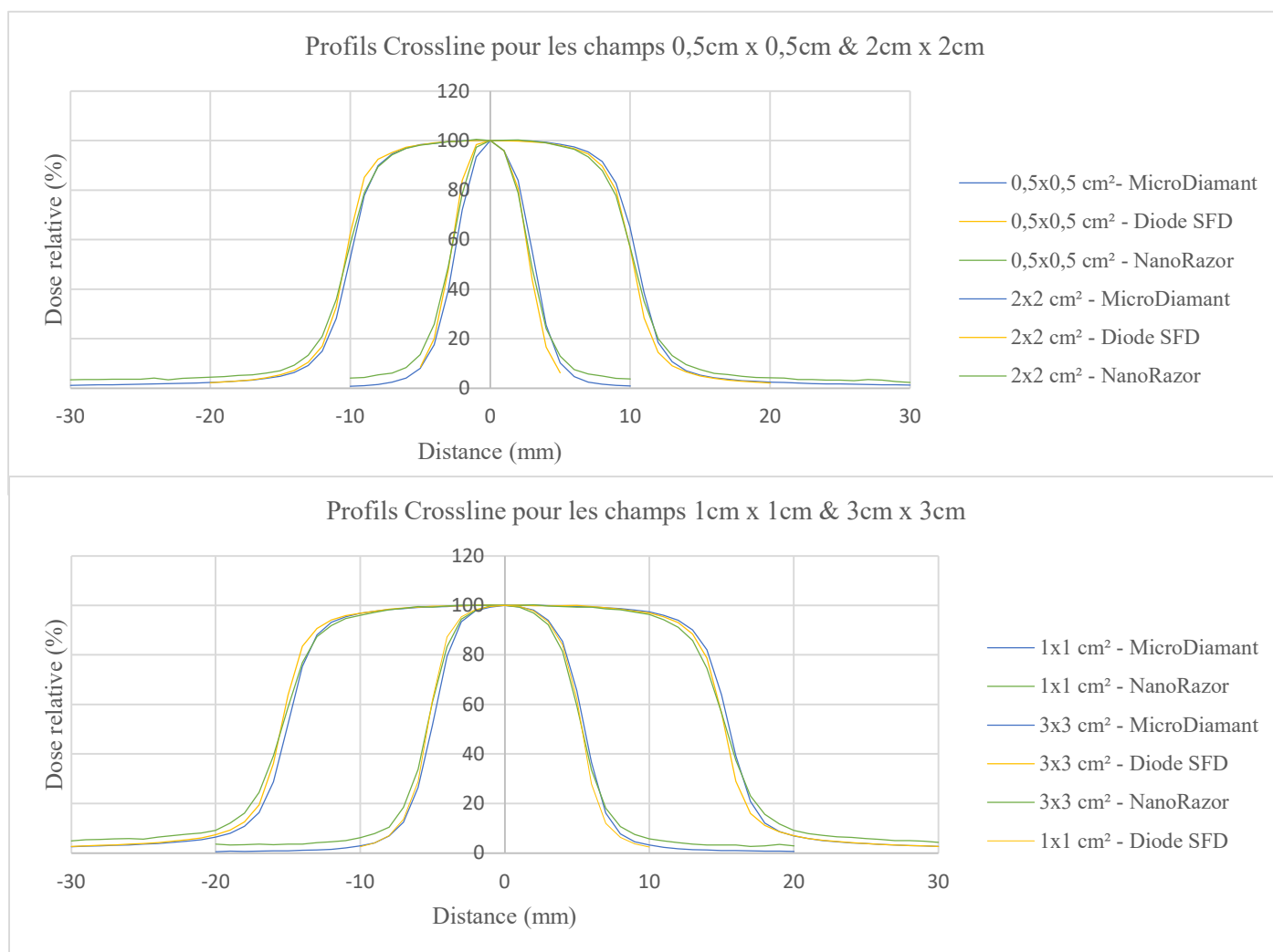


Figure 3 : Profils Crossline en fonction de la taille de champ

Détecteur	Taille de champ nominale (cm x cm)	Taille de champs d'irradiation (cm x cm)	Pénombre Gauche (cm)	Pénombre droite (cm)	Centre (cm)
MicroDiamant	0,5 x 0,5	0,58	0,22	0,22	0,02
Razor Nano		0,59	0,25	0,23	0,00
Diode SFD		0,58	0,19	0,18	0,00
MicroDiamant	1 x 1	1,06	0,24	0,24	0,02
Razor Nano		1,07	0,27	0,28	0,00
Diode SFD		1,06	0,21	0,22	0,00
MicroDiamant	2 x 2	2,07	0,28	0,28	0,02
Razor Nano		2,07	0,32	0,32	0,00
Diode SFD		2,06	0,25	0,26	-0,01
MicroDiamant	3x3	3,06	0,30	0,30	0,02
Razor Nano		3,08	0,38	0,39	-0,01
Diode SFD		3,07	0,28	0,28	-0,01

Nous observons une meilleure symétrie, notamment en queue de profils pour le détecteur Razor Nano dans cette orientation de balayage par rapport aux profils Inline. Cela conforte le fait que l'asymétrie est due à l'orientation du détecteur. Le calcul de la taille de champs est similaire entre les détecteurs. L'observation sur les pénombres explicitée pour les profils Inline est également visible sur ces profils Crossline. En revanche, nous nous serions attendu à voir une diminution de la pénombre pour la Razor Nano en Crossline par rapport à l'Inline à cause de cette orientation.

b. En fonction du pas de mesure

Nous avons souhaité étudier l'effet de la valeur du pas de la mesure. Le temps d'intégration n'a pas été modifié et est égal à 1 seconde. La série de mesure supplémentaire est cette fois-ci acquise avec un pas de 0,1 mm. Augmenter la distance du pas permet de réaliser des acquisitions plus rapides. Ces mesures ont été réalisées avec la diode SFD pour un champ de 1cm x 1cm avec une collimation assurée par le MLC.

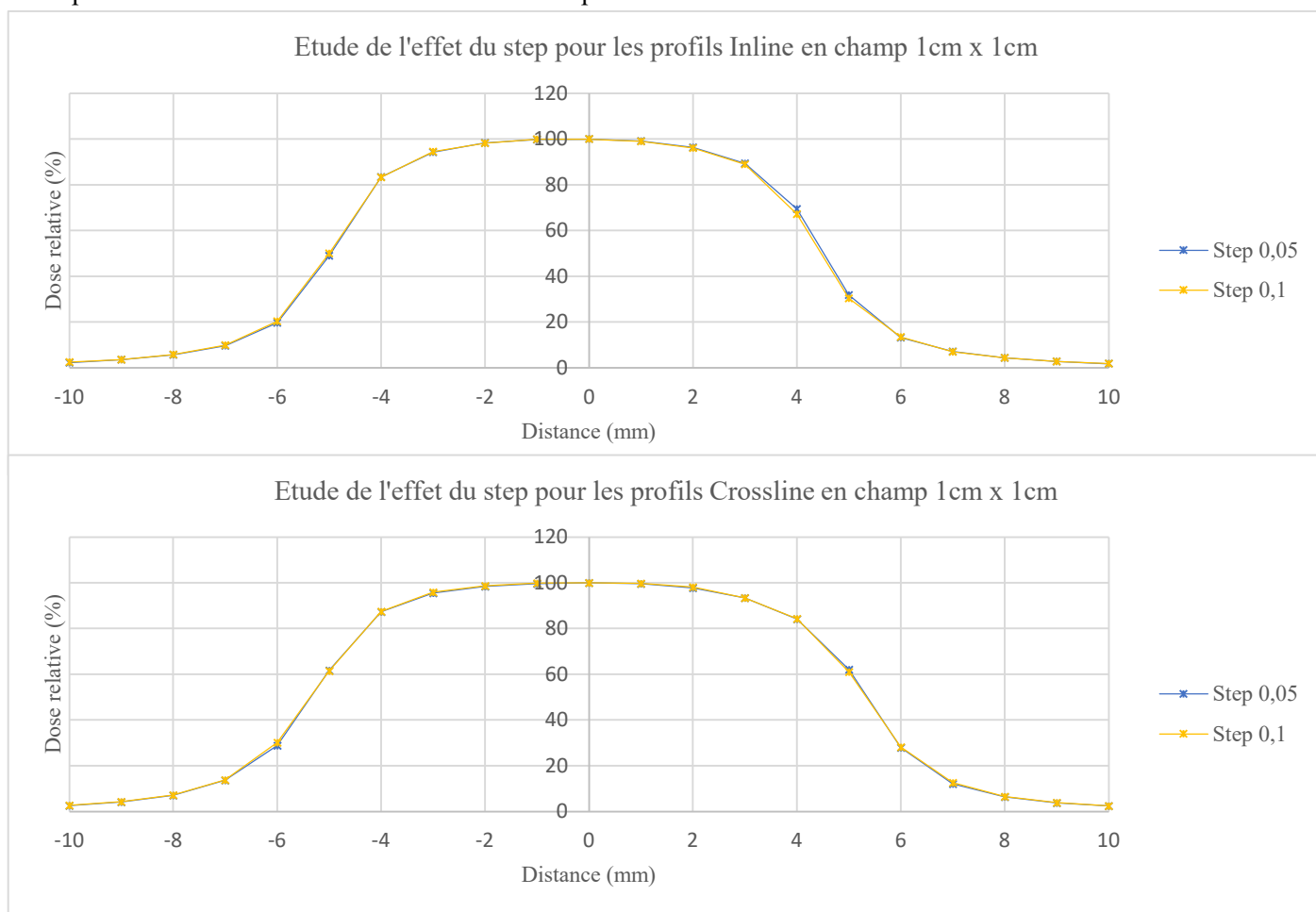


Figure 4 : Profils en fonction du pas de mesure

Step (cm)	Orientation de balayage	Taille de champs calculée (cm x cm)	Pénombre Gauche (cm)	Pénombre droite (cm)	Centre (cm)
0,05	Inline	0,95	0,19	0,19	-0,02
0,1		0,95	0,19	0,22	-0,02
0,05	Crossline	1,06	0,21	0,22	0,00
0,1		1,07	0,23	0,23	0,00

Nous observons que la taille de champ n'est pas impactée par ce changement de pas de mesure. Une légère diminution de la pénombre est constatée pour la mesure avec le pas le plus faible. C'est une observation logique lié à l'augmentation du point de mesure dans la zone de fort gradient.

c. En fonction de la collimation

Nous avons investigué sur les systèmes de collimation et l'impact que le choix peut avoir sur les profils. Ces mesures ont été réalisées avec la diode SFD pour des champs de 1cm x 1cm.

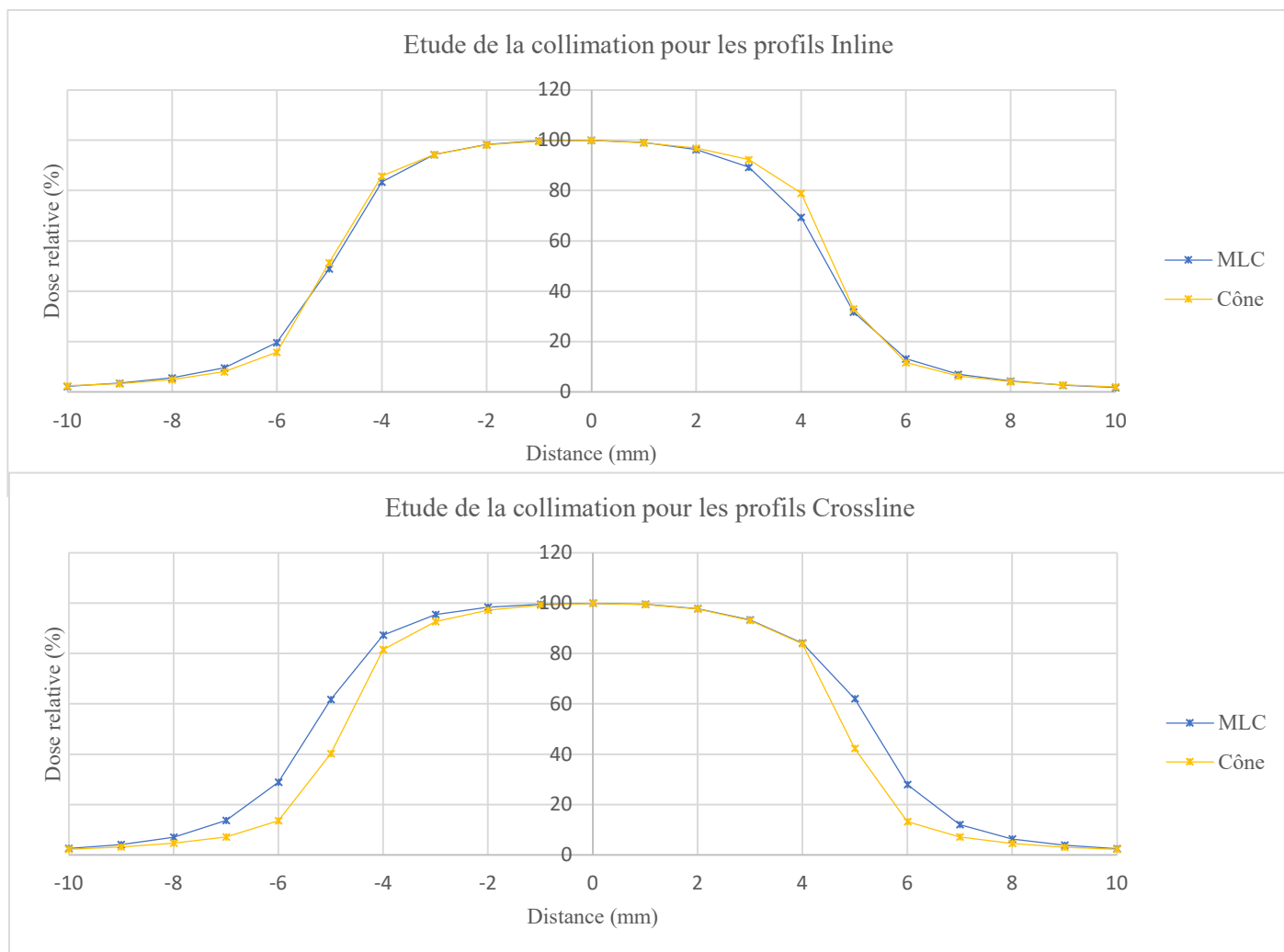


Figure 5 : Profils en fonction de la collimation

Collimation	Orientation de balayage	Taille de champs calculée (cm x cm)	Pénombre Gauche (cm)	Pénombre droite (cm)	Centre (cm)
MLC	Inline	0,95	0,19	0,19	-0,02
Cône		0,97	0,15	0,14	-0,02
MLC	Crossline	1,06	0,21	0,22	0,00
Cône		0,97	0,15	0,14	0,00

Nous observons que la taille de champ d'irradiation est plus proche de la valeur nominale pour le cône. La pénombre est également plus faible pour le cône. Cela est dû à la géométrie plus droite et plus longue pour le cône et à la collimation qui se retrouve plus proche de l'isocentre avec cette même collimation.

d. En fonction de l'énergie

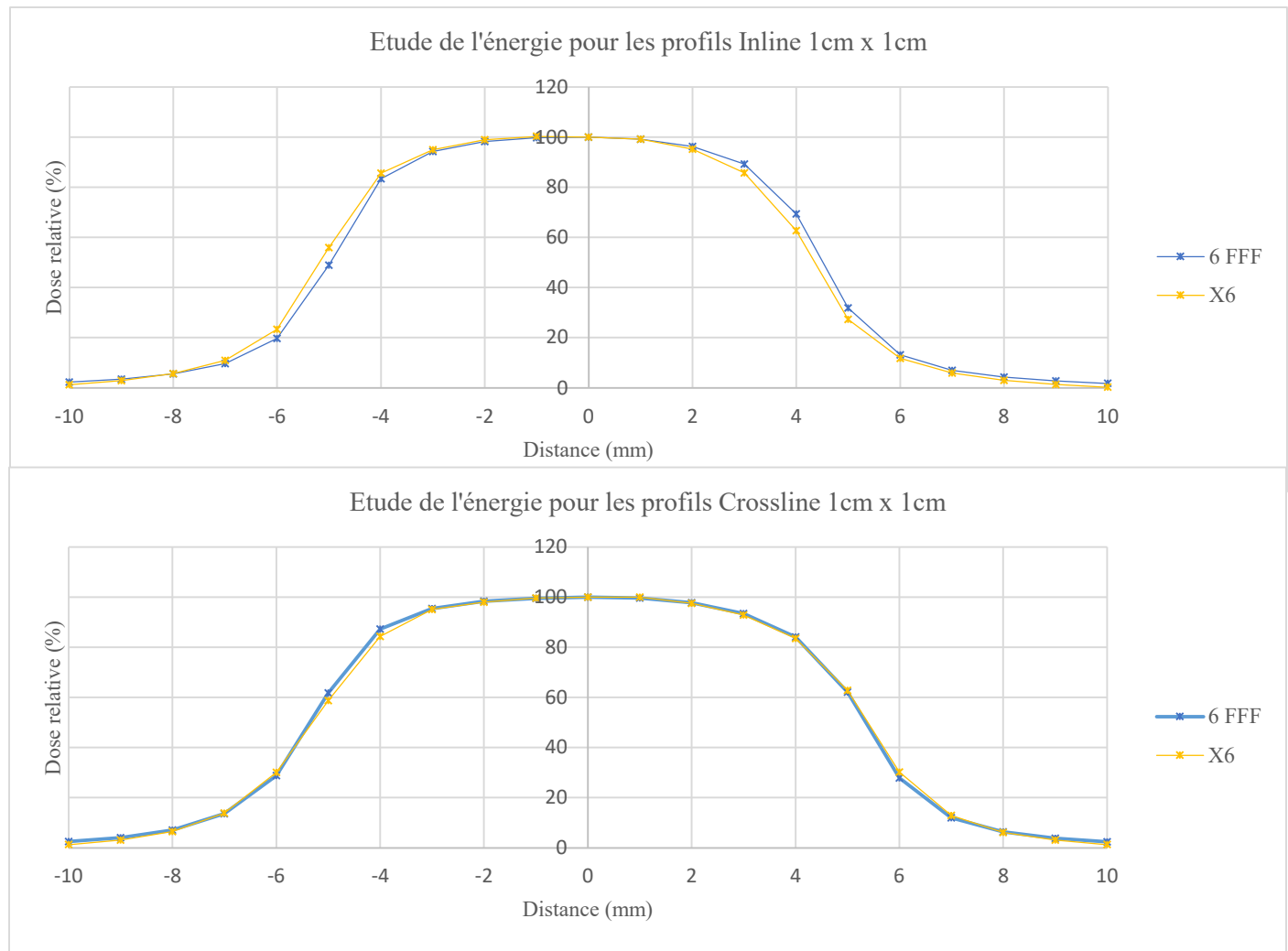


Figure x : Profils en fonction de l'énergie

Energie (MV)	Orientation de balayage	Taille de champs calculée (cm x cm)	Pénombre Gauche (cm)	Pénombre droite (cm)	Centre (cm)
6FFF	Inline	0,95	0,19	0,19	-0,02
X6		0,95	0,20	0,20	-0,04
6FFF	Crossline	1,06	0,21	0,22	0,00
X6		1,07	0,23	0,22	0,01

Nous observons une bonne cohérence de la taille de champ d'irradiation entre les profils 6FFF et X6. La pénombre mesurée est très similaire entre ces acquisitions. La différence due à la présence ou non du cône égalisateur aura un impact plus important pour les champs de grande dimension.

2) Rendements en profondeur

a. En fonction de la taille de champ

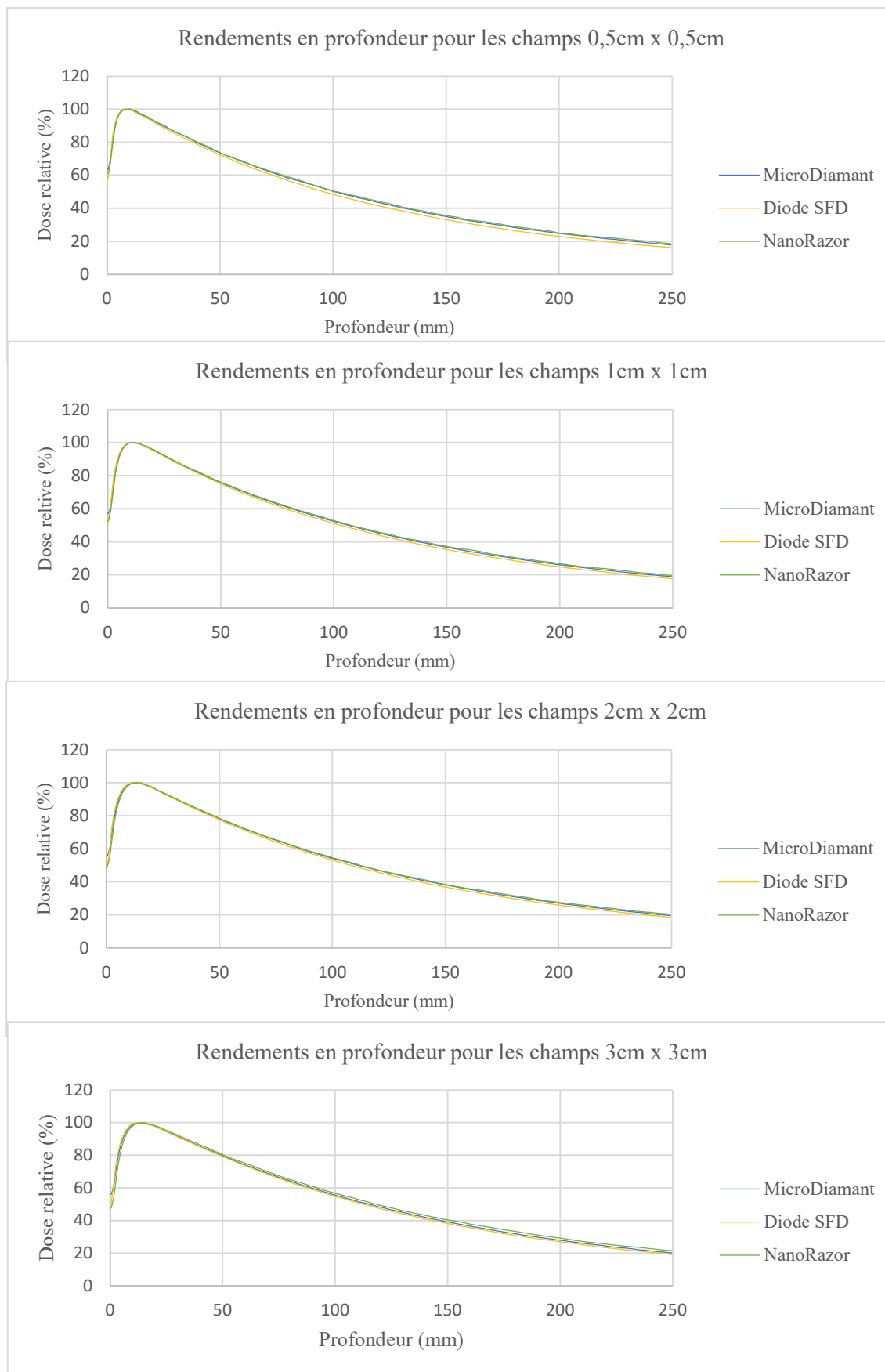


Figure x : Rendements en profondeur selon la taille de champ

Détecteur	Taille de champ nominale (cm x cm)	R100 (cm)	R50 (cm)	D10 (%)	D20 (%)
MicroDiamant	0,5 x 0,5	1,00	10,03	50,12	24,63
Razor Nano		1,00	10,13	50,39	24,86
Diode SFD		0,91	9,59	48,41	22,99
MicroDiamant	1 x 1	1,00	10,64	52,29	26,05
Razor Nano		1,10	10,73	52,74	26,72
Diode SFD		1,01	10,29	51,06	24,80
MicroDiamant	2 x 2	1,30	11,13	54,20	27,05
Razor Nano		1,30	11,24	54,52	27,58
Diode SFD		1,31	10,82	53,20	25,96
MicroDiamant	3 x 3	1,41	11,50	55,52	27,87
Razor Nano		1,50	11,81	56,63	29,21
Diode SFD		1,31	11,25	54,71	26,94

Nous observons sur ces rendements que le signal mesuré par la Diode SFD est plus faible en fin de rendement par rapport aux deux autres détecteurs. Cela peut être dû à la perte de sensibilité de ce détecteur avec la dose reçue. Cette différence est amoindrie lorsque le champ augmente. Nous observons également que la distance du maximum de dose est atteinte légèrement avant pour la diode SFD.

b. En fonction de la collimation

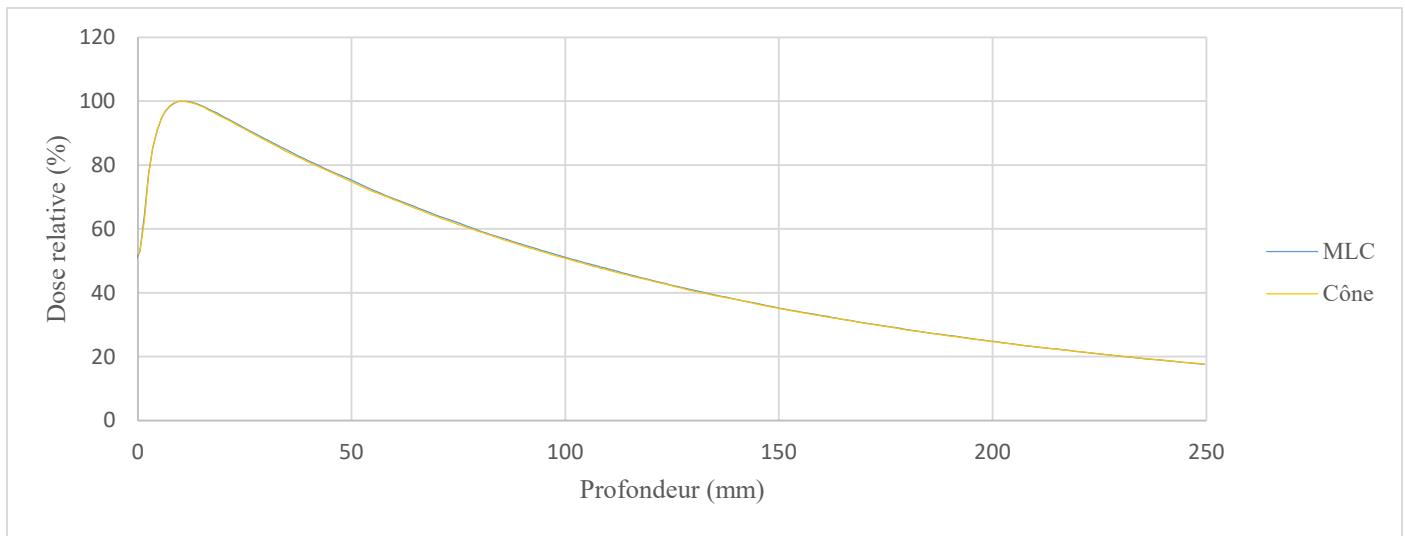


Figure x : Rendements en profondeur en fonction de la collimation

Collimation	R100 (cm)	R50 (cm)	D10 (%)	D20 (%)
MLC	1,01	10,29	51,06	24,8
Cône	1,01	10,20	50,75	24,7

Nous observons une bonne superposition entre les 2 courbes. Les distances relevées à 100 % et 50 % de la dose sont plutôt similaire. De même pour les doses à 10 et 20 cm de profondeur. La méthode de collimation a peu d’impact sur les rendements en profondeur.

c. En fonction de l'énergie

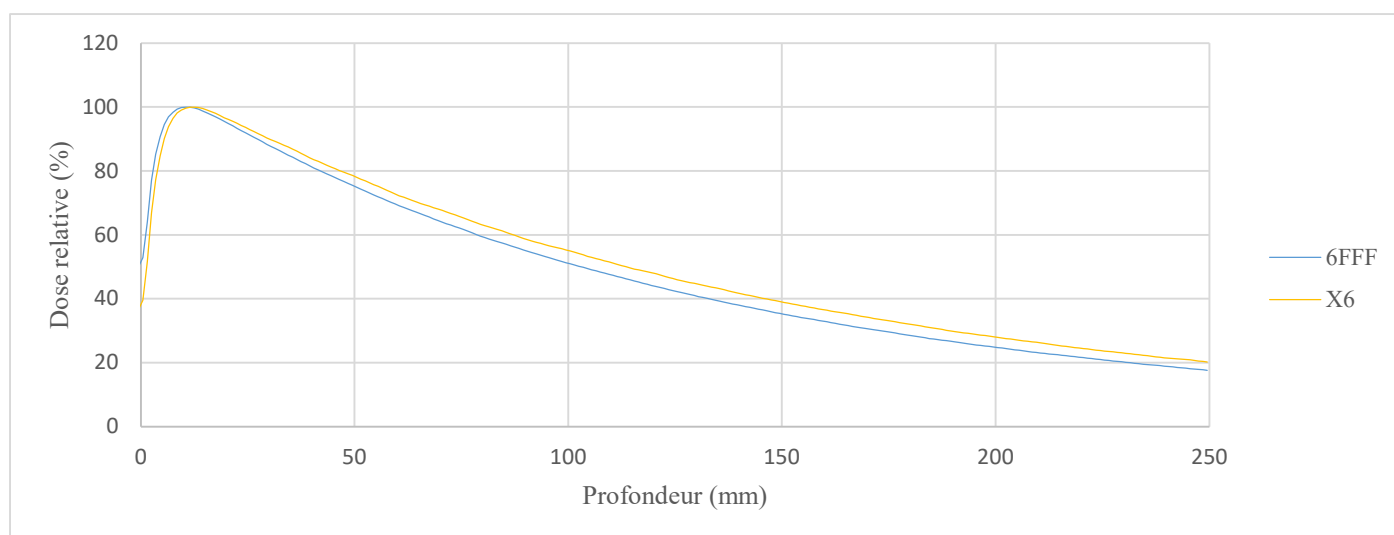


Figure x : Rendement en profondeur selon l'énergie

Energie (MV)	R100 (cm)	R50 (cm)	D10 (%)	D20 (%)
6FFF	1,01	10,29	51,06	24,8
X6	1,20	11,34	55,08	27,99

Nous observons que pour le profil X6, la diminution de la dose en fonction de la profondeur est moins rapide. Pour cette énergie, la dose maximale est également atteinte plus lentement. Ce qui est dû à la dureté du faisceau plus importante. En effet, le cône égalisateur agit comme un filtre pour le faisceau et le nombre de photons de basse énergie est plus faible.

3) Facteurs d'ouverture collimateur

Pour mesurer les valeurs FOC, nous avons réalisé 3 mesures ponctuelles pour 200 UM à 10 cm de profondeur avec le champ d'intérêt puis nous réalisons 3 mesures dans les mêmes conditions de mesure avec un champ 10 cm x 10 cm. Cela nous a permis de déceler une problématique rencontrée avec la diode qui est la baisse de réponse après l'absorption d'une dose importante. Le calcul des rapports a été fait en normalisant chaque mesure par sa mesure de référence (champ 10 cm x 10 cm) qui a suivi. De plus, nous avons corrigé ces rapports par les facteurs $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ tabulés dans le TRS-483 (Table x).

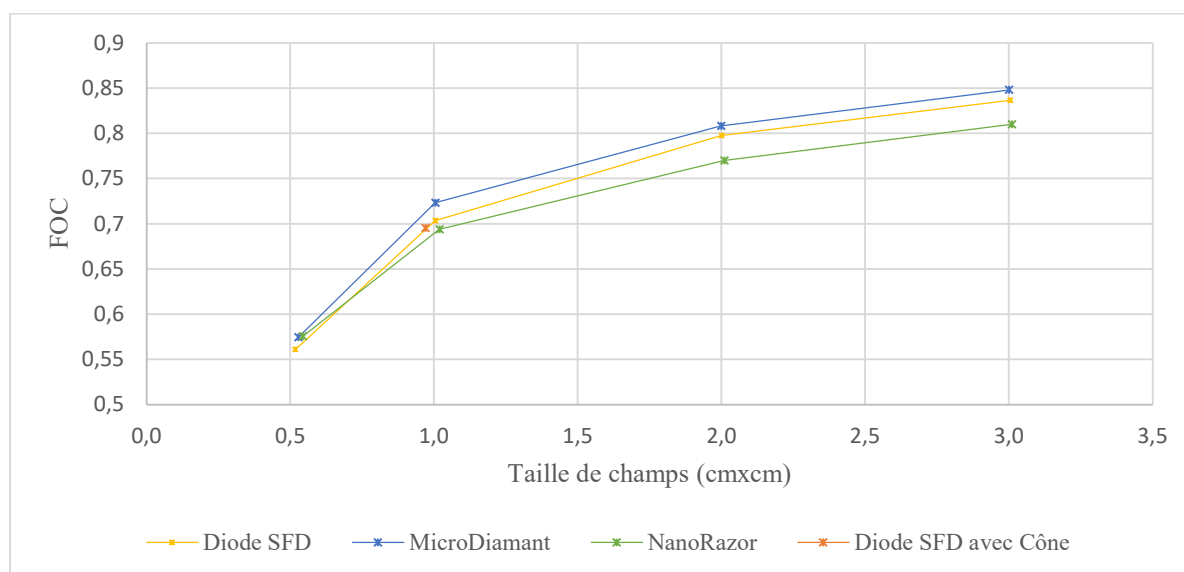


Figure x : Facteurs d'ouverture collimateur

Diode SFD				
Champ nominal (cm x cm)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée² (nC)	Dufreinx & al, 2021	Ecart relatif (%)
0,5 x 0,5	0,980	0,561	0,567	1,04
1 x 1	1,018	0,703	0,714	1,50
2 x 2	1,032	0,797	0,808	1,32
3 x 3	1,029	0,837	0,847	1,24
MicroDiamant				
Champ nominal (cm x cm)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée² (nC)	Dufreinx & al, 2021	Ecart relatif (%)
0,5 x 0,5	0,964	0,575	0,567	-1,36
1 x 1	0,984	0,723	0,714	-1,28
2 x 2	0,997	0,808	0,808	0,00
3 x 3	1,000	0,848	0,847	-0,12
Razor Nano				
Champ nominal (cm x cm)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée³ (nC)	Dufreinx & al, 2021	Ecart relatif (%)
0,5 x 0,5	1,0312391	0,576	0,567	-1,55
1 x 1	1,00198123	0,694	0,714	2,82
2 x 2	0,992	0,770	0,808	4,71
3 x 3	ND	0,810	0,847	4,37

Nous observons que le détecteur MicroDiamant donne des résultats plus élevés et la chambre Razor Nano des résultats plus faibles en comparaison à la diode SFD. Pour la chambre Razor Nano, il est important de rappeler que son orientation est perpendiculaire au faisceau, la correction proposée ne tient pas compte de cette orientation. De plus, les valeurs récoltées par Dufreinx & al, 2021 nous indique que les FOCs moyens sont plus proches des valeurs mesurées par le MicroDimant et la diode SFD. Les facteurs de correction ont été tabulés en fonction d'une orientation parallèle au faisceau.

III. Conclusion et discussion

	Détecteur idéal selon le TRS-483	MicroDiamant	Razor Nano	Diode SFD
Réponse linéaire avec la dose				
Réponse linéaire avec le débit de dose				
Réponse linéaire avec le débit de dose par pulse				
Réponse indépendante avec l'énergie				
Résolution spatiale				
Réponse indépendante de l'orientation				
Réponse indépendante de l'environnement			$K_{T,P}$, k_{pol} , k_{rec}	
Faible bruit de fond				
Equivalence à l'eau				

² Facteurs de correction tirés de la table 26 du TRS-483

³ Facteurs de correction tirés de Partanen & al, 2021

- Sensibilité
- Résolution spatiale
- Masse volumique
- Stabilité
-

Il est important de garder à l'esprit qu'aucun détecteur n'est idéal et l'utilisation de plusieurs détecteurs reste une bonne méthodologie pour ces mesures plus sensibles dans les petits champs. La chambre Razor Nano semble légèrement moins adaptée à la mesure dans les champs de très faibles dimensions. Cependant, le meilleur détecteur reste celui disponible et maîtrisé.

IV. Annexes

Diode SFD	Taille de champ d'irradiation		C_{eq} (cm x cm)	Mesure moyenne⁴ (nC)	Mesure de référence⁵ (nC)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée (nC)
Champ nominal (cm x cm)	Inline (cm)	Crossline (cm)					
0,5 x 0,5	0,46	0,58	0,5165	12,617	22,037	0,980	0,561
1 x 1	0,95	1,06	1,0035	14,813	21,445	1,018	0,703
2 x 2	1,94	2,06	1,9991	16,553	21,424	1,032	0,797
3 x 3	2,94	3,07	3,0043	17,196	21,152	1,029	0,837
MicroDiamant	Taille de champ d'irradiation		C_{eq} (cm x cm)	Mesure moyenne² (nC)	Mesure de référence³ (nC)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée (nC)
Champ nominal (cm x cm)	Inline (cm)	Crossline (cm)					
0,5 x 0,5	0,48	0,58	0,528	1,095	1,836	0,964	0,575
1 x 1	0,95	1,06	1,003	1,347	1,833	0,984	0,723
2 x 2	1,93	2,07	1,999	1,488	1,836	0,997	0,808
3 x 3	2,94	3,06	2,999	1,557	1,836	1,000	0,848
Razor Nano	Taille de champ d'irradiation		C_{eq} (cm x cm)	Mesure moyenne² (nC)	Mesure de référence³ (nC)	$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	Valeur corrigée (nC)
Champ nominal (cm x cm)	Inline (cm)	Crossline (cm)					
0,5 x 0,5	0,50	0,59	0,543	0,923	1,662	1,0312391	0,576
1 x 1	0,97	1,07	1,019	1,153	1,665	1,00198123	0,694
2 x 2	1,95	2,07	2,009	1,276	1,644	0,992	0,770
3 x 3	2,94	3,08	3,009	1,326	1,637	ND	0,810

V. Bibliographie :

Partanen & al (2021)

[2] IAEA TRS no 483 Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy (2017)

Bellec 2022 DQ1

[3] TG155, *Small Field Dosimetry : Overview of AAPM TG-155 and the IAEA AAPM Code of Practice* (2015)

[1] Dufreneix, *Support de cours de 2^{ème} année du DQPRM : Dosimétrie des petits faisceaux* (2023)

⁴ Trois mesures à la suite ont été réalisées

⁵ Après chaque mesure pour une taille de champ, nous avons réalisé une mesure pour un champ 10cm x 10cm