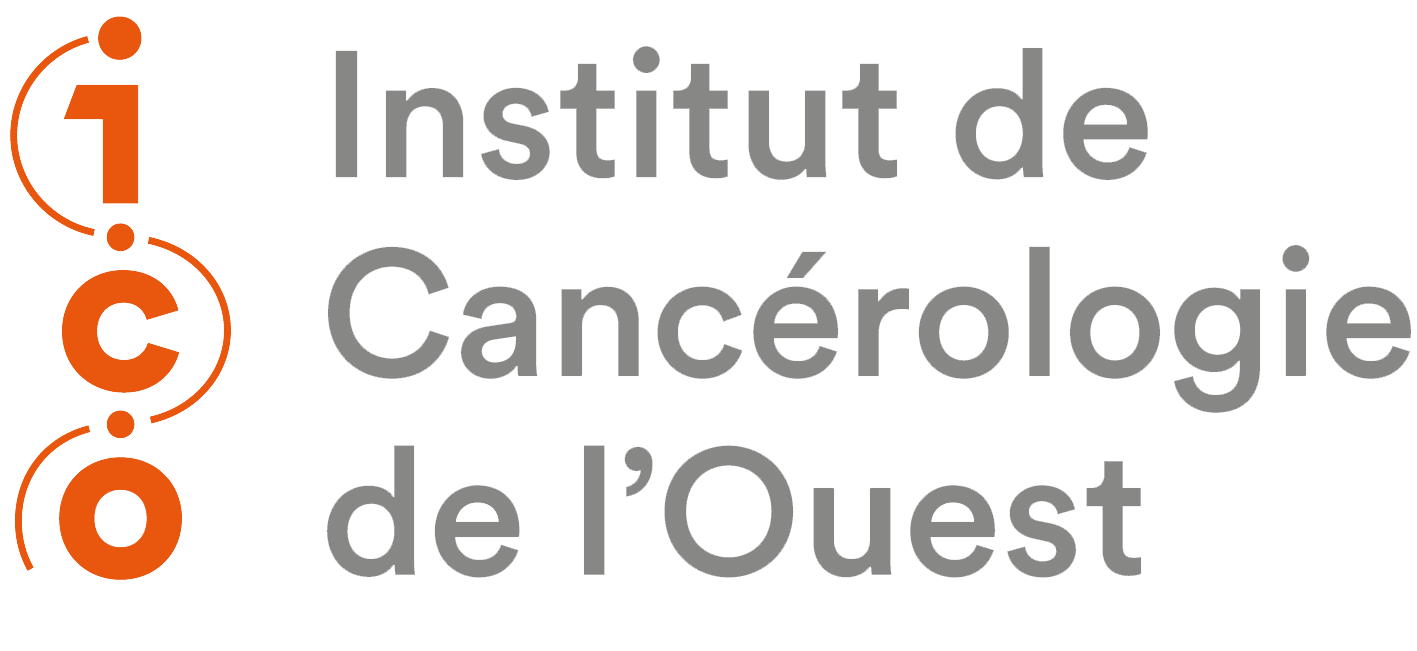
**



*Fiche d’activité 4 – Faisceaux d’électrons de haute énergie : étude de la variation relative de la dose absorbée et détermination de la dose absorbée de référence*

GONTIER Charlotte

*Travail encadré par Thomas Marsac et Camille Llagostera*

[I. INTRODUCTION 3](#_Toc115953972)

[1) Dosimétrie relative 3](#_Toc115953973)

[a. Rendement en profondeur 3](#_Toc115953974)

[b. Profil 3](#_Toc115953975)

[c. Facteur d’ouverture collimateur 4](#_Toc115953976)

[2) Dosimétrie absolue 4](#_Toc115953977)

[a. TRS 277 4](#_Toc115953978)

[b. TRS 398 4](#_Toc115953979)

[c. Etalonnage croisé 5](#_Toc115953980)

[d. Corrections appliquées à la chambre d’ionisation 5](#_Toc115953981)

[e. Incertitudes 6](#_Toc115953982)

[3) Matériel 7](#_Toc115953983)

[II. MESURES ET RESULTATS 7](#_Toc115953984)

[1) Rendements en profondeur 8](#_Toc115953985)

[a. Dépendance en énergie 8](#_Toc115953986)

[b. Dépendance selon la taille de champ 8](#_Toc115953987)

[c. Dépendance selon la DSP 9](#_Toc115953988)

[d. Dépendance selon le détecteur 9](#_Toc115953989)

[2) Profils 10](#_Toc115953990)

[a. Dépendance en énergie 10](#_Toc115953991)

[b. Dépendance avec la taille de champ 11](#_Toc115953992)

[c. Dépendance avec l’orientation 11](#_Toc115953993)

[d. Dépendance avec la vitesse de balayage 12](#_Toc115953994)

[e. Dépendance avec la DSP 12](#_Toc115953995)

[f. Dépendance selon la position de la chambre de référence 13](#_Toc115953996)

[g. Dépendance avec le détecteur 13](#_Toc115953997)

[3) Facteur d’ouverture collimateur 14](#_Toc115953998)

[4) Dosimétrie absolue 14](#_Toc115953999)

[a. Etalonnage croisé 14](#_Toc115954000)

[b. Mesure de la dose absolue 14](#_Toc115954001)

[c. Incertitudes sur la mesure de la dose absolue 15](#_Toc115954002)

[III. CONCLUSION ET DISCUSSION 15](#_Toc115954003)

[IV. ANNEXES 17](#_Toc115954004)

[V. BIBLIOGRAPHIE 18](#_Toc115954005)

# INTRODUCTION

Les électrons sont des particules chargées négativement présentes dans les atomes constituant la matière. Ils peuvent être utilisés dans le cadre de traitements de radiothérapie sous forme de faisceaux générés par des appareils de traitement, notamment pour traiter des pathologies peu profondes. L’énergie déposée par ces particules est majoritaire dans les premiers centimètres de tissu rencontrés. Afin d’assurer des traitements de qualité avec ces particules, il est primordial de connaître les caractéristiques dosimétriques des appareils utilisés.

Dans le cadre de ce travail, nous avons acquis différents spectres de mesure de dose relative en faisant varier de nombreux paramètres d’acquisition. Le but est de comprendre et de quantifier l’influence de ces changements sur les résultats dosimétriques obtenus. De plus, nous avons également appliqué les protocoles internationaux en vigueur afin de mesurer la dose absolue dans la matière.

## Dosimétrie relative

### Rendement en profondeur

Le rendement en profondeur (RP) est la mesure de la variation de dose en fonction de la profondeur sur l’axe du faisceau (Coste, 2020).

*Dz* représente la dose mesurée à la profondeur *z* et *Dmax* est la dose maximale enregistrée sur la courbe.

Pour cette mesure, la distance source-peau[[1]](#footnote-1) (DSP) est fixe et le détecteur se déplace le long de l’axe. La courbe est normalisée à 100 % par rapport à la dose maximale obtenue à la profondeur notée zmax. Pour les faisceaux d’électrons, il est nécessaire de corriger la mesure pour obtenir une courbe en dose et non pas une courbe d’ionisation. Cette correction se base sur les pouvoirs d’arrêt qui varient en fonction de la profondeur (AAPM, 2000), contrairement aux faisceaux de photons. Les métriques permettant de caractériser les rendements sont :

* La profondeur du maximum notée *R100*,
* La profondeur de traitement notée *R85*,
* La profondeur du 50 % de dose notée *R50*,
* La dose à la surface notée *Dsurface*.

La mesure du rendement en profondeur est mesuré à DSP 100 cm avec un champ 10x10 cmxcm.

### Profil

Le profil est la mesure de la dose absorbée le long d’un axe perpendiculaire à l’axe du faisceau (Coste, 2020). Un profil peut être acquis dans l’axe nommé « inline », c’est-à-dire le long de la table dans sa position de référence (GT : Gantry-Target), et dans l’axe nommé « crossline », dans l’axe perpendiculaire du long de la table (AB : Droite-Gauche patient).

Pour caractériser un profil, trois grandeurs sont calculées : l’homogénéité, notée *F*, et la symétrie, noté *S*, exprimées en pourcentage, puis la pénombre, exprimée en cm. La taille de champ est la distance séparant les deux points du profil dont la dose vaut 50 % de la dose maximale. La pénombre est la distance séparant, de chaque côté du profil, le point à 80% de la dose de celui à 20% de la dose.

*Dmax* est la dose maximale mesurée, *Dmin* la dose minimale mesurée, *L* est la dose mesurée en un point dans la partie gauche du champ et *R* la dose mesurée en un point symétriquement placée par rapport à *L* dans la partie droite du champ.Le profil se mesure à la profondeur du maximum de chaque énergie, à DSP 100 cm pour un champ 10x10 cmxcm.

### Facteur d’ouverture collimateur

Le facteur d’ouverture collimateur (FOC) correspond à la variation de la dose absorbée en un point sur l’axe du faisceau en fonction de la taille de champ (Coste, 2020).

*D(a,hν)* est la dose mesurée pour un champ *a* et une énergie *hν*, *D(aref,hν)* est la dose mesurée pour le champ de référence avec la même énergie *hν* donnée. Le FOC se mesure à DSP 100 cm et à la profondeur du maximum qui dépend de chacune des énergies.

## Dosimétrie absolue

### TRS 277

Selon le protocole AIEA TRS-277 (AAPM, 1987), la chambre d’ionisation est étalonnée en kerma dans l’air. La qualité de faisceau dépend de , l’énergie moyenne du spectre d’électrons à la surface du fantôme. La mesure de la dose s’effectue grâce à l’équation suivante (Llagostera, 2020).

* est la charge (nC) mesurée et corrigée des conditions de mesure,
* est le coefficient d’étalonnage de la chambre en kerma dans l’air pour un faisceau de Cobalt,
* est le facteur de correction de l’atténuation et de la diffusion due à la paroi de la chambre d’ionisation (CI),
* est le coefficient compensant la non-équivalence à l’air de la paroi et due au capuchon de mise à l’équilibre électronique,
* est la fraction d’énergie perdue par les particules secondaires due au rayonnement de freinage,
* est le rapport des pouvoirs d’arrêt,
* est le facteur de correction de perturbation.
* est un facteur corrigeant la non équivalence à l’eau de la paroi,
* est un facteur compensant la non homogénéité du milieu induit par la présence de la cavité,
* est un facteur qui compense l’effet de déplacement du volume d’eau due à la présence de la cavité d’air.

Les conditions de référence pour la mesure de la dose absolue sont les suivantes.

|  |  |
| --- | --- |
| Fantôme | Fantôme d’eau |
| Chambre d’ionisation | Chambre plate pour toutes les énergies  CI cylindrique pour *Eo* > 10 MeV |
| Point de mesure | *zmax* |
| Point de référence de la chambre | Pour les CI plates : à la surface et au centre de la fenêtre  Pour les CI cylindriques : sur l’axe central et au centre de la cavité |
| Déplacement de la chambre | Pour les CI cylindriques :  Pour les CI plates : pas de déplacement |
| DSP (cm) | 100 |
| Taille de champ (cmxcm) | 10x10 |

### TRS 398

Dans ce protocole (AAPM, 2000), la chambre d’ionisation (CI) de référence est calibrée en termes de dose dans l’eau pour une qualité de faisceau Q0. La qualité du faisceau est *R50*, ce qui représente le parcours des électrons qui correspond au dépôt de 50% de la dose maximale. Ce parcours s’exprime en g/cm². Pour l’utilisation d’une CI, les formules suivantes sont à utiliser pour effectuer la conversion de la mesure à la qualité du faisceau :

pour un *R50,ion* ≤ 10 g/cm²

pour un *R50,ion* > 10 g/cm²

Les conditions de référence pour la mesure de la dose absolue dans les faisceaux d’électrons sont résumées dans le tableau ci-dessous.

|  |  |
| --- | --- |
| Fantôme | Fantôme d’eau pour *Q* ≥ 4 g/cm²  Fantôme d’eau ou plastique pour *Q* < 4 g/m² |
| Chambre d’ionisation | CI plate ou cylindrique pour *Q* ≥ 4 g/cm²  CI plate pour *Q* < 4 g/cm² |
| Point de mesure |  |
| Point de référence de la chambre | Pour les CI plates : à la surface et au centre de la fenêtre  Pour les CI cylindriques : sur l’axe central et au centre de la cavité |
| Déplacement de la chambre | Pour les CI cylindriques : la CI doit être déplacée de |
| DSP (cm) | 100 |
| Taille de champ (cmxcm) | Pour *Q* ≤ 7 g/cm² : 10x10  Pour *Q* > 7 g/cm² : 20x20 ou 10x10 si *R50* ne varie pas de plus de 0,1 g/cm² entre ces 2 tailles de champ |

L’explorateur de faisceau doit être suffisamment large pour garantir une marge de 5 cm dans les quatre côtés de la plus grande taille de champ utilisée à la profondeur de mesure, et doit être suffisamment profond pour garantir une marge de 5 g/cm² sur l’axe après la profondeur du maximum. La dose dans l’eau est calculée à l’aide de la formule suivante :

* est la charge mesurée corrigée des facteurs ,
* est le coefficient d’étalonnage de la chambre en terme de dose dans l’eau pour un faisceau de qualité *Q0*,
* est le facteur qui permet de passer d’une qualité d’étalonnage *Q0* à la qualité de notre faisceau *Q*.

### Etalonnage croisé

Historiquement, les chambres d’ionisation sont étalonnées dans des faisceaux de Co-60 au laboratoire primaire. Cependant, les chambres plates étalonnées dans ces conditions induisent une incertitude de la mesure de près de 2 %. Ce problème est lié à la correction de perturbation de la paroi de la chambre plate. Pour remédier à cette problématique, il est possible d’effectuer un étalonnage croisé de la chambre plate à l’aide d’une CI cylindrique étalonnée dans un faisceau au Co-60 selon le TRS-398.

Pour effectuer l’étalonnage croisée, il est nécessaire d’utiliser un faisceau de haute énergie (*Q* > 7 g/cm², soit environ 16 MeV ou plus). Le facteur d’étalonnage de la chambre plate vaut alors :

* est la mesure corrigée avec la CI cylindrique dans le faisceau de qualité *Qcross* avec la chambre de référence,
* est la mesure corrigée avec la CI plate dans le faisceau de qualité *Qcross* avec la chambre à calibrer,
* est le coefficient d’étalonnage de la CI cylindrique de référence dans un faisceau de qualité *Q0*[[2]](#footnote-2),
* est le facteur de conversion pour passer d’un faisceau de qualité *Q0* à un faisceau de qualité *Qcross*.

Le facteur est égal au rapport des deux facteurs et tabulés dans le protocoles TRS-398. Pour obtenir la dose mesurée, il suffit d’appliquer l’équation suivante :

### Corrections appliquées à la chambre d’ionisation

La correction des conditions de mesure s’effectue en multipliant les facteurs correctifs suivants avec la mesure de la charge mesurée par l’électromètre.

#### Température et pression

Le facteur, noté , permet de corriger la mesure de la température et de la pression par rapport aux conditions de référence. Il se calcule grâce à la formule suivante : .

Avec et la pression et la température de référence respectivement 1013,25 hPa et 20°C.

#### Hygrométrie

Le facteur, noté , permet de corriger de l’hygrométrie par rapport à des mesures réalisées dans des conditions de référence. Il est égal à 1 pour des conditions normales d’hygrométrie, c’est-à-dire pour une humidité comprise entre 20 et 80 %.

#### Effet de recombinaison

Le facteur, noté , permet de corriger l’effet de recombinaison. En effet, le nombre de charges collectées dans la chambre d’ionisation est sous-estimé du fait de la recombinaison des ions dans la cavité d’air du détecteur. Le facteur se calcule à l’aide de la formule suivante :

Avec et les réponses respectives aux tensions et , et et des facteurs tabulés selon le rapport .

#### Effet de polarité

Le facteur, noté , permet de corriger l’effet de polarité car le nombre de charges mesurées varie selon la polarité de la tension appliquée à la chambre d’ionisation. Il se calcule à l’aide de la formule suivante : .

Avec respectivement les réponses à une tension et , et la réponse à la tension d’utilisation en clinique ( ou ).

### Incertitudes

Les incertitudes correspondent à la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuée à la quantité mesurée (Llagostera, 2020). Il est indispensable de pouvoir quantifier la qualité d’une mesure en attribuant une valeur à l’incertitude associée à cette mesure. Il est possible d’exprimer les incertitudes de manière absolue ou relative (incertitude absolue rapportée à la valeur du résultat de mesure). Une incertitude type correspond à une incertitude exprimée sous la forme d’un écart-type. Deux types d’incertitudes existent dans cette catégorie, les incertitudes de type A et de type B.

* Incertitudes de type A :

Il s’agit d’une méthode d’évaluation de l’incertitude qui se base sur une analyse statistique des séries d’observation. Pour une série de *n* résultats, l’incertitude vaut : .

* Incertitudes de type B :

L’incertitude de type B est quant à elle basée sur une méthode d’évaluation par tout autre méthode d’analyse que celle introduite ci-dessus. La méthode d’évaluation peut être basée sur des données de mesures antérieures, sur un comportement d’un instrument de mesure connu ou encore sur les spécifications du fabricant. Le calcul de l’incertitude relative pour les différentes méthodes de mesure sont les suivantes.

* + - Pour une lecture sur une échelle :
    - Pour une tolérance fournie :
    - Pour un appareil numérique :

Généralement, la mesure réalisée est le fruit de plusieurs valeurs mesurées. Dans ce cas, il existe une loi de propagation de l’incertitude. Pour un résultat *m* étant le produit de *i* facteurs, nous pouvons calculer l’incertitude combinée relative comme suit : . De plus, il peut être judicieux de définir un intervalle à l’intérieur duquel la distribution des valeurs mesurées se situe. Dans ce cas, nous multiplions l’incertitude type par un facteur d’élargissement, noté *k*. Il est généralement compris entre 2 et 3. Le résultat est appelé l’incertitude élargie.

## Matériel

Pour réaliser nos mesures, nous avons utilisé le matériel suivant :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Matériel | Marque | N° de série | Date d’étalonnage |
| Electromètre | PTW Unidos | 020505 | 12/01/2021 |
| Chambre d’ionisation 0,13 cc de ref | IBA CC13 | 3922 |  |
| Chambre d’ionisation 0,13 cc de mesure | IBA CC13 | 3923 |  |
| Chambre d’ionisation 0,65 cc | PTW TW30013 | 011924 | 12/01/2021 |
| Chambre d’ionisation plate | PTW ROOS 34001 | 01689 | 30/06/2022 |
| Chambre d’ionisation PinPoint | PTW 31014 | 00787 |  |
| Niveau à bulle |  |  |  |
| Explorateur de faisceau | IBA Blue Fantom 2 | 8174 |  |
| Water Reservoir Typ 306/1 | IBA | 8263 |  |
| Clinac iX 2300 | Varian | H141033 |  |

Dans le cadre de ces mesures, l’analyse des résultats a été réalisée avec le logiciel MyQA Accept (IBA, version 9.0.9.0). Les caractéristiques techniques des CI utilisées pour réaliser ces mesures sont disponibles en *Annexe I*.

# MESURES ET RESULTATS

Les conditions qui constituent notre référence pour la dosimétrie relative sont celles décrites ci-dessous.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Energie (MeV) | Détecteur | DSP (cm) | Profondeur (cm) | Taille de champ (cmxcm) | Orientation de balayage | Vitesse de balayage (cm/s) |
| Rendements en profondeur | 12 | ROOS | 100 |  | 10x10 |  | 0,3 |
| Profils | 12 | CC13 | 100 | Zmax | 10x10 | Inline | 0,3 |

Les paramètres explorés sont résumés dans le tableau ci-dessous.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Rendements en profondeur | | |
|  | **Paramètre de référence** | **Paramètres testés** |
| Energie (MeV) | 12 | 6, 9, 15, 18 |
| Taille de champ (cmxcm) | 10x10 | 6x6, 15x15, 20x20 |
| DSP (cm) | 100 | 105, 110 |
| Détecteur | ROOS | CC13 |
| Profils | | |
|  | **Paramètre de référence** | **Paramètres testés** |
| Energie (MeV) | 12 | 6, 18 |
| Taille de champ (cmxcm) | 10x10 | 6x6, 15x15, 20x20, 25x25 |
| Orientation | Inline | Crossline |
| Vitesse (cm/s) | 0,3 | 1, 2 |
| DSP (cm) | 100 | 105, 110 |
| Position de la CI de référence | Dans le coin du champ | Centrée, hors champ, désactivée |
| Détecteur | CC13 | ROOS, PinPoint |

## Rendements en profondeur

### Dépendance en énergie

Figure 1 : Rendements en profondeur selon l'énergie

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Energie (MeV) | R100 (cm) | R50 (cm) | R85 (cm) | Ds (%) |
| 6 | 1,26 | 2,35 | 1,88 | 80,29 |
| 9 | 2,15 | 3,58 | 2,92 | 83,89 |
| 12 | 2,60 | 4,88 | 3,97 | 89,27 |
| 15 | 3,12 | 6,25 | 5,07 | 93,44 |
| 18 | 2,13 | 7,42 | 5,86 | 95,52 |

Les rendements sont très différents lorsque l’on modifie l’énergie. Premièrement, nous observons que pour les faisceaux plus énergétique, la profondeur du maximum est plus profonde et la dose à l’entrée est plus élevée. Cela est dû à la diffusion moins importante et à des angles plus faibles pour ces faisceaux plus énergétiques. Concernant la partie décroissante des courbes, la pente est moins raide pour les électrons de plus fortes énergies car le parcours de ces particules est plus grand. Enfin, la queue des rendements est plus élevée pour les fortes énergies car la part de photons de contamination créée dans le milieu par rayonnement de freinage augmente avec l’énergie des électrons.

### Dépendance selon la taille de champ

Figure 2: Rendement en profondeur selon la taille de champ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Taille de champ (cmxcm) | R100 (cm) | R50 (cm) | R85 (cm) | Ds (%) |
| 6x6 | 2,63 | 4,98 | 4,02 | 90,30 |
| 10x10 | 2,60 | 4,88 | 3,97 | 89,27 |
| 15x15 | 2,75 | 5,00 | 4,09 | 89,00 |
| 20x20 | 2,75 | 5,00 | 4,09 | 90,62 |

Les paramètres décrits ci-dessus sont très similaires pour chacun des applicateurs. Pour les plus faibles champs, un défaut d’équilibre électronique latéral peut être responsable d’une diminution de la dose. Plus l’énergie est élevée et plus la différence de dose sera marquée en profondeur entre les tailles de champ (Perdrieux, 2017).

### Dépendance selon la DSP

Figure 3 : Rendements selon la DSP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| DSP (cm) | R100 (cm) | R50 (cm) | R85 (cm) | Ds (%) |
| 100 | 2,60 | 4,88 | 3,97 | 89,27 |
| 105 | 2,87 | 4,99 | 4,10 | 87,60 |
| 110 | 2,88 | 4,99 | 4,10 | 86,70 |

La seule partie du rendement qui est modifiée avec la DSP est la dose à l’entrée. En effet, plus la distance dans l’air est grande et plus il y a de diffusions dans ce milieu avant que le faisceau ne rencontre la surface de l’eau, ce qui diminue la dose à la surface.

### Dépendance selon le détecteur

Figure 4 : Rendement en profondeur selon le détecteur

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Détecteur | R100 (cm) | R50 (cm) | R85 (cm) | Ds (%) |
| CC13 | 1,27 | 7,36 | 5,69 | 95,27 |
| ROOS | 3,12 | 6,25 | 5,07 | 93,44 |

Le choix du détecteur est très important lors de la réalisation de mesures, quelles qu’elles soient. En effet, les électrons ont un parcours très faible dans l’eau en comparaison avec les photons. Dans ces conditions, c’est-à-dire avec une majoration des gradients, il est recommandé de choisir un détecteur de plus faible dimension (dont les électrodes sont plus proches), notamment une chambre plate (AAPM, 1995) afin d’obtenir une plus grande résolution de mesure. Ce qu’offre la chambre ROOS en comparaison de la CC13.

## Profils

### Dépendance en énergie

Figure 5 : Profils selon l'énergie

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Energie | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| E6 | 5,21 | 1,2 | 1,20-1,18 |
| E12 | 5,94 | 1,36 | 1,36-1,35 |
| E18 | 1,82 | 0,7 | 0,70-0,69 |

Une légère dégradation des trois paramètres d’analyse est observée pour le faisceau de 12 MeV comparé à celui de 6 MeV, ce qui est dû à la profondeur de mesure et à l’augmentation du diffusé dans le milieu. Nous observons une amélioration de la symétrie, de la pénombre et de l’homogénéité pour les électrons de 18 MeV. Cela peut être dû au fait que pour l’énergie 18 MeV, la profondeur de mesure est plus faible que pour le 12 MeV. De plus, l’angle de diffusion est plus faible pour les électrons de plus forte énergie.

### Dépendance avec la taille de champ

Figure 6 : Profils selon la taille de champ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Taille de champ (cmxcm) | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| 5x5 | 3,01 | 10,66 | 1,22-1,20 |
| 10x10 | 4,09 | 5,59 | 1,27-1,28 |
| 15x15 | 1,76 | 3,56 | 1,38-1,39 |
| 20x20 | 0,6 | 1,17 | 1,34-1,35 |
| 25x25 | 0,52 | 1,15 | 1,28-1,28 |

Nous pouvons observer que la symétrie et l’homogénéité se dégradent lorsque la taille de champ diminue. Cela est dû au manque de diffusé latéral pour les plus faibles champs. Quant à la pénombre, elle augmente avec les tailles de champs croissantes jusqu’au champ 15cmx15cm puis diminue. Cette augmentation est due à la pénombre géométrique et à la diffusion des électrons dans le milieu.

### Dépendance avec l’orientation

Figure 7 : Profils selon l'orientation de balayage

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Orientation | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| Inline | 4,16 | 5,69 | 1,29-1,27 |
| Crossline | 3,53 | 5,39 | 1,24-1,23 |

Les profils en inline et crossline sont plutôt équivalents. Seule la symétrie semble différente. La symétrie est réglée à l’aide de bobines de déviation placées dans la tête de l’accélérateur. Il est donc normal de ne pas trouver une symétrie identique dans les 2 directions de scan.

### Dépendance avec la vitesse de balayage

Figure 8 : Profils selon la vitesse de déplacement de la chambre

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Vitesse (cm/s) | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| 0,3 | 4,16 | 5,69 | 1,29-1,27 |
| 1 | 3,25 | 5,78 | 1,29-1,28 |
| 2 | 3,99 | 5,82 | 1,28-1,27 |

Nous observons que l’homogénéité se dégrade avec la vitesse. Cela est dû au temps d’intégration de chaque mesure qui est diminué lorsque la vitesse est augmentée. De plus, pour les mesures avec électrons, la profondeur de mesure est celle de la profondeur du maximum. La chambre se déplacent donc proche de la surface et, à une vitesse trop importante, il est possible que le déplacement de la CI puisse créer un mouvement du volume d’eau au-dessus de la chambre, des vaguelettes. Cela peut donc modifier la mesure puisque la profondeur varie aléatoirement.

### Dépendance avec la DSP

Figure 9 : Profils selon la DSP

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| DSP (cm) | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| 100 | 4,19 | 5,94 | 1,36-1,35 |
| 105 | 2,32 | 6,56 | 1,50-1,48 |
| 110 | 3,75 | 7,17 | 1,68-1,67 |

La pénombre est augmentée avec la DSP, ce qui est dû à l’augmentation de la pénombre géométrique. L’homogénéité est dégradée avec la DSP puisque la probabilité d’interaction des électrons dans l’air est augmentée, tout comme le diffusé qui en découle.

### Dépendance selon la position de la chambre de référence

Figure 10 : Profils selon la position de la chambre de référence

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Position de la chambre de ref | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| Dans le coin | 1,76 | 3,56 | 1,38-1,39 |
| Centrée | 2,77 | 4,61 | 1,42-1,41 |
| Hors champ avec normalisation | 8,92 | 8,35 | 1,45-1,47 |
| Désactivée | 7,27 | 5,00 | 1,37-1,33 |

Nous observons une dégradation de l’homogénéité lorsque la chambre de référence est positionnée hors du champ ou est désactivée. Ce résultat était attendu puisque cette chambre permet de normaliser la mesure par rapport au débit de dose qui n’est pas constant lors de l’irradiation. L’homogénéité est également dégradée lorsque cette chambre se trouve au centre du champ. En effet, dans ce cas, elle peut perturber la mesure du profil en captant une partie du faisceau participant à la dose. La symétrie est également très dégradée lorsque la CI de référence est hors du champ. Cela est lié à la variation aléatoire du débit de dose qui n’est plus corrigée par cette dernière. La pénombre est en revanche peu impactée par la position de la chambre de référence.

### Dépendance avec le détecteur

Figure 11 : Profils selon le détecteur

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Détecteur | Symétrie (%) | Homogénéité (%) | Pénombre G-D (cm) |
| CC13 | 4,19 | 5,94 | 1,36-1,35 |
| PinPoint | 1,38 | 5,84 | 1,34-1,31 |
| ROOS | 2,51 | 7,89 | 1,61-1,60 |

Nous observons une dégradation de la pénombre pour la mesure effectuée à la chambre ROOS. Cela est dû à la géométrie de la chambre plate qui possède une large zone de comptage dans le plan perpendiculaire au faisceau en comparaison des chambres cylindriques. L’homogénéité est également dégradée pour la chambre ROOS puisque la chambre est plus fine dans l’axe du faisceau, elle sera donc plus sensible aux faibles variations. Les deux chambres cylindriques montrent une homogénéité et une pénombre comparable. En revanche, la symétrie est meilleure pour la chambre PinPoint, ce qui est assez étonnant puisque le volume d’intégration de mesure est plus faible, nous aurions pu nous attendre à observer plus de fluctuations statistiques de la dose mesurée au niveau du plateau du profil comme c’est souvent le cas au niveau de la queue des profils (Bellec, 2019).

## Facteur d’ouverture collimateur

Pour effectuer la mesure des FOC, nous avons utilisé les applicateurs avec les inserts constructeurs. Nous avons effectué un tir de 200 UM à débit 300 UM/min pour chacune des tailles de champ. La profondeur de la chambre est celle du maximum pour chaque énergie et la DSP à 100 cm.

Figure 12 : Courbes de FOC électrons

Nous observons que les 2 courbes ne sont pas cohérentes l’une avec l’autre. Pour l’énergie 6 MeV, le rapport de dose tend vers une augmentation avec la taille de champ jusqu’au champ 20x20 alors que pour l’énergie 12 MeV, la tendance est inverse du champ 10x10 à 25x25. De plus, l’appellation FOC est un abus de langage puisque c’est l’applicateur et son insert qui détermine la taille de champ et non le collimateur primaire. En effet, contrairement aux photons, si le collimateur jouait ce rôle de collimation, le faisceau d’électrons ne serait pas focalisé à DSP 100 à cause de la grande probabilité d’interaction dans l’air.

## Dosimétrie absolue

### Etalonnage croisé

Pour effectuer l’étalonnage croisé, nous avons réalisé 2 séries de mesures, l’une avec la chambre de référence étalonnée en dose dans l’eau dans un faisceau de Cobalt et l’autre avec une chambre ROOS. Le coefficient d’étalonnage croisé est égal à **7,35.10-2 Gy/nC** pour la chambre ROOS. L’incertitude élargie à k = 2 associée à cette valeur est de 3,72 %. Le détail des mesures est consultable en annexe. La profondeur de mesure est de 4,28 cm avec la chambre ROOS, ce qui correspond à la profondeur du maximum diminué de l’épaisseur de la paroi de la chambre. La profondeur de mesure de la chambre FC-65P est de 4,57 cm, ce qui correspond à la profondeur de référence majorée de la moitié du rayon de la chambre.

### Mesure de la dose absolue

Pour la détermination de la dose absolue dans les conditions de référence, seule les incertitudes du Krec (caluclé pour chaque énergie) et de la mesure sont différentes entre les différentes énergies.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | E18 | E15 | E12 | E9 | E6 |
| Profondeur de mesure (cm) | 4,28 | 3 ,56 | 2,78 | 1,92 | 1,16 |
| Krec | 1,009 | 1,009 | 1,010 | 1,010 | 1,010 |
| Kpol | 1,000 | | | | |
| KTP | 1,002 | | | | |
| KQQcross | 1,000 | 1,008 | 1,019 | 1,033 | 1,050 |
| Coefficient d’étalonnage (Gy/nC) | 7,35.10-2 | 7,41.10-2 | 7,49.10-2 | 7,60.10-2 | 7,72.10-2 |
| Dose mesurée (Gy) | 1,860 | 1,973 | 2,030 | 2,052 | 2,089 |
| Ecart relatif avec la recette (%) | 6,90 | 1,11 | -1,42 | -2,45 | -4,46 |
| Incertitude élargie (k=2) | 2,474 | 2,454 | 2,471 | 2,453 | 2,455 |

Nous observons que, pour les énergie E18, E9 et E6, l’écart relatif est important entre la dose mesurée et celle de la recette. Cela peut être dû au fait que la chambre de référence n’est plus la même. L’étalonnage croisé diffère donc du jour de la recette pour ces 3 énergies.

### Incertitudes sur la mesure de la dose absolue

Pour caractériser nos mesures, voici le résumé des incertitudes que nous avons identifié et analysé.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Méthode utilisée | E6 | E9 | E12 | E15 | E18 |
| Mesures |  | 0,026 | 0,016 | 0,033 | 0,026 | 0,025 |
| KQ,Qcross | Valeur donnée par le TRS-398 | 1,000 | | | | |
| Krec |  | 0,046 | 0,032 | 0,147 | 0,032 | 0,161 |
| KT,P |  | 0,283 | | | | |
| Mesure de la DSP |  | 0,144 | | | | |
| Mesure de la profondeur |  | 0,632 | | | | |
| Electromètre |  | 0,058 | | | | |
| Coefficient d’étalonnage | Donné par le laboratoire primaire | 0,550 | | | | |
| Incertitude totale |  | 1,345 | 1,344 | 1,352 | 1,344 | 1,354 |
| Incertitude élargie (k=2) |  | 2,690 | 2,689 | 2,705 | 2,689 | 2,708 |

Nous observons que l’incertitude est plutôt homogène pour nos mesures de dose absolue. En effet, seules les composantes de mesures et du facteur de correction de recombinaison varient entre les différentes énergies.

# CONCLUSION ET DISCUSSION

L’augmentation des facteurs identifiés qui influencent les différentes grandeurs caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-dessous.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Rendement en profondeur | | | | |
|  | **Energie** | **Taille de champ** | **DSP** | **ROOS vs CC13** |
| *R100* |  |  | = |  |
| *R50* |  |  | **=** |  |
| *R85* |  |  | = |  |
| *Dsurface* |  |  |  |  |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Profil | | | | | |
|  | **Energie** | **Taille de champ** | **DSP** | **Orientation de balayage** | **Vitesse de déplacement de la Chambre d’ionisation** |
| Symétrie[[3]](#footnote-3) |  |  |  | **=** |  |
| Homogénéité |  |  |  | = |  |
| Pénombre |  |  |  | = | **=** |

Concernant la position de la chambre de référence, l’homogénéité et la symétrie sont très impactées. Ces deux métriques sont dégradées lorsque la chambre est placée centrée, hors du champ ou n’est pas activée. La pénombre est en revanche très peu impactée. A propos du choix du détecteur, nous observons qu’une chambre ROOS n’est pas adaptée pour la mesure du profil puisque la pénombre et l’homogénéité sont surestimées. La chambre PinPoint permet un meilleur résultat quant à la mesure de la symétrie par rapport à la chambre ROOS et CC13.

Ce travail a permis de mettre en exergue de nombreux facteurs influençant la mesure de la dose relative et absolue avec des faisceaux d’électrons. Il a permis de prendre connaissance des conditions à mettre en œuvre pour les différents types de mesures et d’acquérir un sens plus critique quant aux résultats obtenus.

# ANNEXES

*Annexe 1 : Caractéristiques des chambres d’ionisation*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Nom de la CI | IBA CC13 | IBA FC-65P | PTW PinPoint | PTW ROOS |
| Volume de la cavité (cm3) | 0,13 | 0,65 | 0,016 | 0,35 |
| Longueur de la cavité sur l’axe du faisceau (mm) | 3,0 | 3,1 | 1,45 | 2 |
| Longueur/rayon de la cavité dans le plan perpendiculaire au faisceau (mm) | 5,8 | 23,1 | 2,9 | 7,8 |
| Matériau de la paroi | C552[[4]](#footnote-4) | POM[[5]](#footnote-5) | PMMA, graphite | PMMA, graphite |
| Epaisseur de la paroi (g/cm²) | 0,070 | 0,057 | 0,085 | 0,132 |
| Matériau de l’électrode | C552 | Aluminium | Aluminium |  |
| Coefficient d’étalonnage (Gy.nC-1) |  | 5,356.10-2 |  | 7,32.10-2 |
| Tension d’utilisation (V) | +300 | +400 | +400 | +200 |

*Annexe 2 : Conditions de mesure et incertitudes associées au calcul du coefficient d’étalonnage croisé de la ROOS*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Conditions de mesure | | | | | | | | | | |
| Profondeur de mesure (cm) | 4,28 | | | | | | | | | |
| Température (°C) | 20,4 | | | | | | | | | |
| Pression (hPa) | 2012,5 | | | | | | | | | |
| KT,P | 1,002 | | | | | | | | | |
| Chambre | **FC-65P de référence** | | | | | **ROOS** | | | | |
| Tension (V) | +300 | | +100 | -300 | | +200 | | +50 | | -200 |
| Mesure (nC) | 38,23 | | 37,31 | 38,31 | | 25,13 | | 24,46 | | 25,19 |
| Krec | 1,012 | | | | | 1,009 | | | | |
| Kpol | 1,001 | | | | | 1,001 | | | | |
| Incertitudes de mesure | | | | | | | | | | |
|  | | FC-65P | | | | | ROOS | | | |
|  | | **Incertitude de type A (%)** | | | **Incertitude de type B (%)** | | **Incertitude de type A (%)** | | **Incertitude de type B (%)** | |
| Mesures | | 0,000 | | |  | | 0,046 | |  | |
| KQ,Q0 | |  | | | 1,1 | |  | | 1,1 | |
| Krec | |  | | | 0,161 | |  | | 0,031 | |
| KT,P | |  | | | 0,283 | |  | | 0,283 | |
| Mesure de la DSP | |  | | | 0,144 | |  | | 0,144 | |
| Mesure de la profondeur | |  | | | 0,632 | |  | | 0,632 | |
| Electromètre | |  | | | 0,058 | |  | | 0,058 | |
| Incertitude totale | | 1,319 | | | | | 1,310 | | | |
| Incertitude élargie (k=2) | | 2,638 | | | | | 2,620 | | | |

# BIBLIOGRAPHIE

AAPM. (1987). *Technical reports series no277 : Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams - An Internal Code of Practice.* Vienne.

AAPM. (1995). *Technical reports no381 : The use of plane parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams.* Vienne.

AAPM. (2000). *Technical reports no398 : Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy - An International Code of Practice Based on Standards of Absorbed Dose to Water.* Vienne.

Bellec, J. (2019). Choix et utilisation des systèmes de mesure associés aux contrôles dosimétriques en radiothérapie. INSTN.

Coste, F. (2020). Faisceaux d'électrons - Qualité et distribution de dose. IMT Atlantique, Nantes.

Llagostera, C. (2020). Cours de Master 2 - Protocole de dosimétrie. IMT Atlantique, Nantes.

Perdrieux, M. (2017). Dosimétrie des faisceaux d'électrons. Université de Rennes I.

1. La distance source-peau correspond à la distance source-surface de l’eau dans notre cas. [↑](#footnote-ref-1)
2. Q0 = 60Co [↑](#footnote-ref-2)
3. Pour la symétrie et l’homogénéité, un signe ↗ désigne une amélioration et un signe ↘ une dégradation. [↑](#footnote-ref-3)
4. Le C552 est un métal équivalent air. [↑](#footnote-ref-4)
5. Le polyoxyméthylène (POM) est un polymère. [↑](#footnote-ref-5)