

PHY-3004 — Physique expérimentale V

FILTRATION DES RAYONS X

Par : JERCZYNSKI, Sebastien et GBEASOR, Boris

Prof. Luc Beaulieu

Département de physique, de génie physique et d'optique
Université Laval

24 février 2020

Résumé

Cette expérience a pour but d'analyser le comportement d'une source de rayon X face à différentes conditions d'alimentation et de filtration afin de prévenir les effets néfastes des rayons X dont l'utilisation est de plus en plus accrue dans la société. Il a été observé qu'une augmentation du courant d'alimentation augmente la quantité d'un faisceau de rayons X alors que l'augmentation de la tension améliore la quantité et la qualité d'un faisceau de rayons X. La mesure de l'atténuation d'un filtre a permis de montrer que certains éléments comme le Cuivre représentait une excellente source de protection contre les rayons X par rapport à l'Aluminium. Les sections efficaces d'absorption calculées devaient être proportionnelles à Z^4 mais cette tendance n'as pas pu être confirmée exactement avec les données obtenues. Finalement, les valeurs de couches de demi-atténuations ont permises de démontrer la nature du faisceau.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes	1
3	Résultats	4
4	Discussion	8
5	Conclusion	10
6	Annexe	13

Table des figures

1	Schéma du montage pour l'acquisition de spectres avec un tube à rayons X .	2
2	Allure générale de spectres non filtrés avec des tensions d'alimentation et des courants variables	5
3	Effet de la variation de la tension et du courant sur le nombre de comptes totaux	5
4	Effet des filtres de l'Aluminium et du Cuivre sur l'allure générale du spectre non filtré à 40 kVp et 15 μ A	6
5	Comparaison de l'ordre des filtres du ^{74}W et ^{13}Al sur la filtration d'un spectre	6
6	Évolution de l'énergie moyenne du spectre dans le cas d'un courant et d'une tension variable	7
7	Mesures du coefficient d'atténuation de l'Aluminium et du Cuivre	7
8	Section efficace d'absorption évaluée pour des éléments chimiques de numéro atomique Z différents	8
9	Région de prédominance relative des trois formes d'interaction photon-matière	13
10	Coefficient d'atténuation massique théorique de l'Aluminium et du Cuivre de la base de données du NIST	13
11	Spectre filtré au Cuivre	14
12	Spectre filtré à l'Argent	14
13	Spectre filtré au mobylène	15

Liste des tableaux

1	Canaux correspondant aux pics de transition de ^{241}Am	4
2	Énergies de transition théorique des éléments et leur section efficace d'absorption théorique à 31 keV	4
3	Valeurs numériques de section efficace obtenues expérimentalement	8

1 Introduction

Les tubes à rayons X produisent une forme de rayonnement largement employée dans les secteurs de l'imagerie médicale, et la cristallographique. Ils sont aussi très présents dans les lieux quotidiens (aéroports...). Cependant les photons énergétiques des rayons X entraînent une ionisation des atomes et souvent des effets pathologiques sur les tissus et le corps. La filtration est donc utilisée pour modifier leur profil énergétique.

L'objectif de ce laboratoire sera donc de caractériser la réaction d'une source à rayons X soumise à différentes conditions d'alimentation et ensuite de quantifier les effets de la filtration d'un faisceau X de générateur dans le but de réduire les effets pathologiques des rayons X sur le corps humain.

La théorie derrière les tubes à rayons X est la suivante.

A l'intérieur du tube à rayons X, des électrons accélérés dans un filament chauffés (cathode), entrent en collision avec les atomes de l'anode. Il se produit alors deux types d'émissions. Lorsque l'électron se rapproche du noyau de l'atome, à cause de l'interaction électromagnétique, il ralentit et perd de l'énergie sous forme de rayonnement appelé Bremsstrahlung. Ce rayonnement est à l'origine de la distribution triangulaire en énergie dans le spectre d'acquisition. Dans un deuxième cas, l'électron, provenant du filament à une vitesse élevée, peut éjecter un électron orbitale, créant ainsi un trou. Les électrons des couches plus élevées se déplacent alors pour venir combler ce trou, générant ainsi un photon (rayons X). Un phénomène similaire à celui-ci se produit lorsque ces photons ionisants (rayons X), à leur tour, entrent à leur tour en collision avec les électrons orbitales d'un autre atome, c'est la fluorescence X. [4]

L'exposition est aussi une notion importante à définir dans le cas de la spectrométrie [3]. L'exposition définit la capacité des photons de rayons X à ioniser l'air. Elle peut se définir comme ceci :

$$E = \frac{Q}{m}$$

où Q représente la charge générée par les ions et m la masse de l'air.

2 Matériel et méthodes

Durant ce laboratoire, les spectres d'acquisition seront réalisés à l'aide de la source ^{241}Am , le générateur de faisceau Mini-X, le logiciel d'acquisition Amptek, et le détecteur Si-PIN "XR-100CR". Différents filtres composés de ^{47}Ag , ^{29}Cu , ^{13}Al , ^{74}W , ^{42}Mo , et d'épaisseurs différentes seront utilisés.

Une fois le circuit du montage branché à l'image de la figure 1, les paramètres du logiciel ADMCA sont réglés (DPP SETUP) tels que prescrits dans le protocole. Il est aussi important de maintenir le détecteur et le tube à rayons X à une distance d d'au moins 1 m ou plus dans le but de réduire le temps mort en bas de 25 %. Le temps mort correspond à la durée où

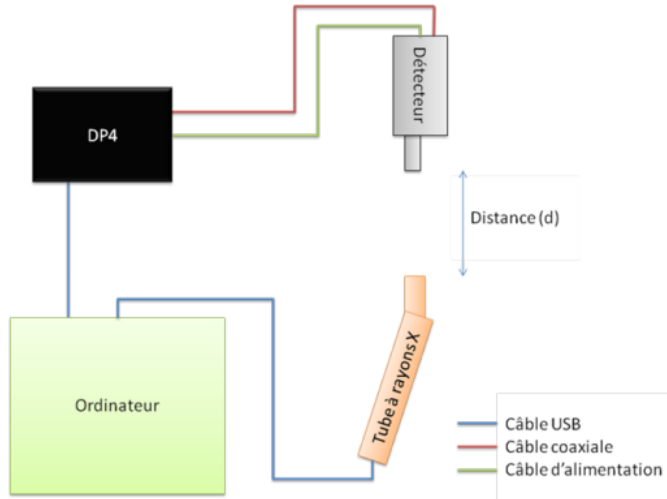


FIGURE 1 – Schéma du montage pour l'acquisition de spectres avec un tube à rayons X

le détecteur n'enregistre pas. Il y a donc une perte de comptes (de particules détectées). Cela peut influencer les mesures sur le coefficient d'atténuation. Ce coefficient peut ainsi paraître plus élevé qu'il ne l'est réellement du fait de cet effet. Une calibration en énergie [keV] des canaux sera effectuée à l'aide des deux pics caractéristiques de l'Américium 241 présentés à la table 1.

Chacun des spectres obtenus dans ce laboratoire sera caractérisé suivant cinq paramètres : le temps d'acquisition [secondes], l'énergie moyenne [keV], l'énergie maximum [keV] et le nombre de comptes de la région d'intérêt (aire sous la courbe). D'abord, l'attention est portée sur l'évolution du spectre en fonction du courant du générateur Mini-X. La tension du générateur est fixée à 30 kVp et différents spectres sont acquis pour des courants de 5 μA , 8 μA , 11 μA , 15 μA , 18 μA . Par la suite, des spectres sont réalisés pour un courant fixe de 15 μA et une tension variable de 10 kVp à 40 kVp par bond de 10 kVp.

Dans un second temps, on cherchera à caractériser les effets des filtres sur les spectres. Pour chacun des filtres de différents matériaux et épaisseurs, une acquisition à une tension de 40 kVp et un courant fixe de 15 μA sera exécutée. Comme mentionné dans la théorie en section 1, du fait de la fluorescence X, la désexcitation des électrons des couches supérieures correspondant aux transitions d'énergie K_α et K_β [table 2] des éléments chimiques présents dans le filtre sont observés sous la forme de pics sur le spectre. Dans d'autres cas ces transitions correspondent à des absorption des photons X, et seront observés sous la forme de "mur" sur le spectre. Il est important de faire des combinaisons de filtres, essentiellement l'un avec un numéro atomique Z faible et l'autre élevé, afin d'extirper l'effet de l'ordre des filtres.

D'après la théorie développée dans le protocole [9], la section efficace d'absorption à 31 keV donnée par :

$${}_a\tau = \frac{-\ln(N_t/N_0)}{\rho x} \frac{A}{N_A} - 0.20 \frac{A}{N_A} Z \quad (1)$$

se comporte comme une loi de puissance de type cZ^n avec c une constante égale à 10^{-24} , et n égal à 4 dans notre cas.

En prenant le logarithme de cette loi de puissance, cela devient :

$$\ln({}_a\tau) = \ln(cZ^n) \quad (2)$$

$$\ln({}_a\tau) = \ln(c) + n \ln(Z) \quad (3)$$

$$\ln\left(\frac{{}_a\tau}{10^{-24}}\right) = 4 \ln(Z) \quad (4)$$

En mesurant ce coefficient pour des filtres de Z différents, l'analyse graphique nous permettra de vérifier cette loi. En effet, en ajustant les points à l'aide de Python (fit linéaire), le comportement attendu est une fonction linéairement croissante de $\ln\left(\frac{{}_a\tau}{10^{-24}}\right)$ en fonction de $\ln(Z)$ avec une pente de 4.

Finalement, l'intérêt sera porté sur les coefficients d'atténuation de l'aluminium et du cuivre.

D'après la théorie présentée dans le protocole [9] le ratio du nombre de photons détectés sans filtre N_0 avec ceux détectés avec filtres N_t , est caractérisé par une décroissance exponentielle selon l'épaisseur du filtre t .

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\mu t} \quad (5)$$

Pareillement que précédemment en utilisant la fonction logarithmique, l'équation 5 peut être réécrite sous la forme :

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\mu t \quad (6)$$

$-\mu$ devient la pente de la droite décroissante de $\ln \frac{N_t}{N_0}$ en fonction de t .

De cette manière, le coefficient d'atténuation μ peut être extrait graphiquement. A l'aide des différentes mesures du ratio $\frac{N_t}{N_0}$ pris pour différentes épaisseurs t en cm , un ajustement linéaire des points (fit linéaire) réalisé sur Python, nous fournira le coefficient μ optimal dans ces conditions. Une fois ces droites tracées, tel qu'indiqué dans le protocole [9], la première et la deuxième couche de demi-atténuation pourront être analysées en prenant le ratio $\frac{N_t}{N_0}$ égal à 0.5 et 0.25 donc, dans notre cas, $\ln(0.5)$ et $\ln(0.25)$ respectivement et ainsi vérifier que notre faisceau est effectivement poly-énergétique.

Notre faisceau est poly-énergétique. Cependant, en ne considérant que l'énergie moyenne du faisceau, il sera possible de vérifier que les ordres de grandeur des coefficients d'atténuation déterminés expérimentalement sont en accord avec ceux des graphiques et données du NIST [10] [5], [6]. Selon ces données, dans le cas de l'aluminium, aux alentours de 20 keV, le rapport $\frac{\mu}{\rho}$ équivaut environ à 3.341 cm²/g. Et il est connu que la densité de l'aluminium est définie par $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$, ce qui donne un coefficient d'atténuation μ_{Al} théorique de l'ordre de grandeur de 9.02 cm⁻¹.

Dans le cas du cuivre, $\frac{\mu}{\rho} = 33.79 \text{ cm}^2/\text{g}$, avec un $\rho_{Cu} = 8.96 \text{ g/cm}^3$, ce qui donne théoriquement un coefficient μ_{Cu} de l'ordre de grandeur de 302.76 cm⁻¹.

Channel	energie[keV]
0	0
1006	13.95
1280	17.74

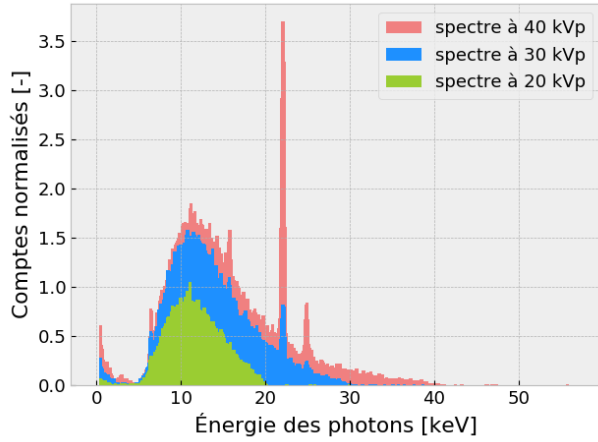
TABLEAU 1 – Canaux correspondant aux pics de transition de ²⁴¹Am

	⁴⁷ Ag	²⁹ Cu	¹³ Al	⁷⁴ W	⁴² Mo
Transitions K_α [keV]	22.162	8.047	1.486	59.318	17.479
Transitions K_β [keV]	24.941	8.904	1.557	67.244	19.606
Section efficace $a\tau$ [$\times 10^{-24}$ cm ² /a]	6094	1060	36.5	6195	4130

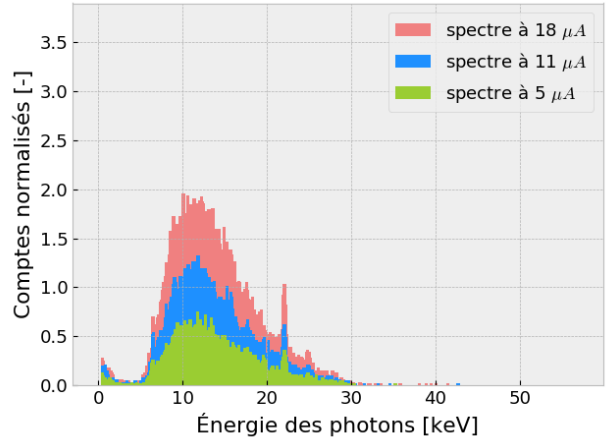
TABLEAU 2 – Énergies de transition K_α et K_β de certains éléments apparaissant dans les spectres de rayons X [1], en plus de leur section efficace d'absorption théorique à 31 keV. [7]

3 Résultats

Chacune des acquisitions ont été réalisée sur des échelles de temps différents. Pour cette raison et dans le but de pouvoir comparer les spectres d'acquisition entre eux, le nombre de comptes a été normalisé par le temps d'acquisition, lors de la reconstruction de ces spectres sur Python.

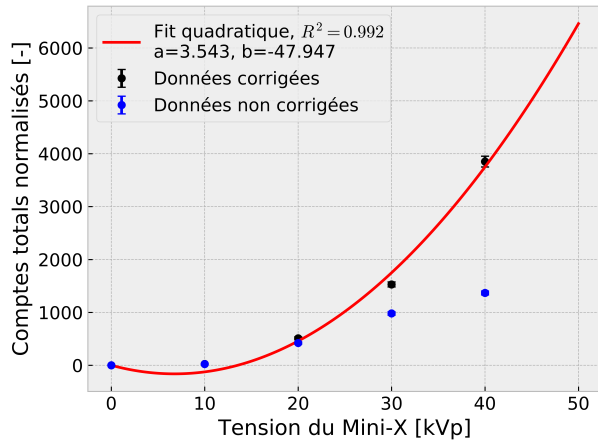


(a) Spectres à courant constant de $15 \mu A$

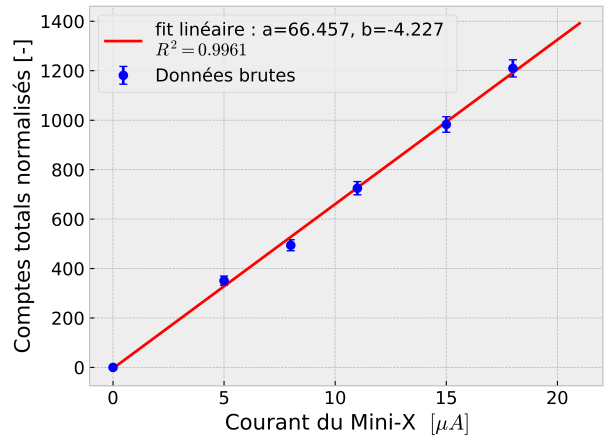


(b) Spectres avec tension constante à 30 kVp

FIGURE 2 – Allure générale de spectres non filtrés avec des tensions d’alimentation variables à gauche et à des courants variables à droite. On remarque la présence de deux pics importants à environ 22 et 25 keV provenant de l’anode dans le tube à rayons X Mini-X.

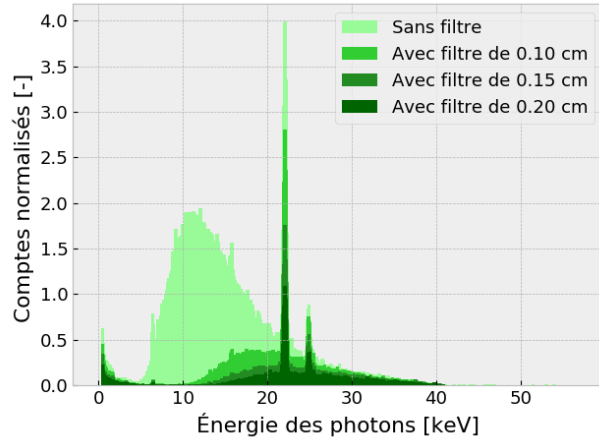


(a) Nombre d’événements par seconde avec tension variable et courant constant de $15 \mu A$.

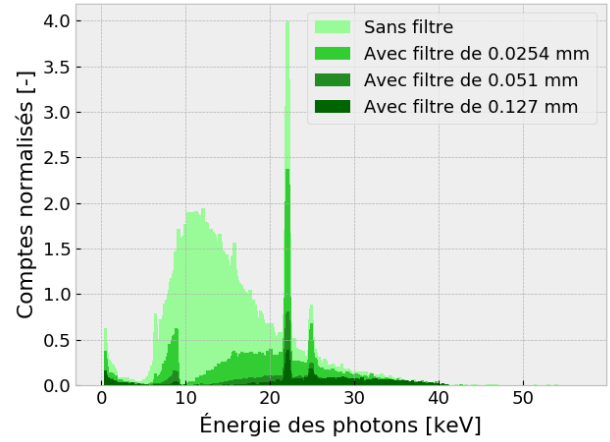


(b) Nombre d’événements par secondes avec courant variable et à tension constante de 30 kV.

FIGURE 3 – Effet de la variation de la tension et du courant sur le nombre de comptes totaux. La courbe de données ajustées utilise des données corrigées par rapport à l’efficacité du détecteur, laquelle diminue en fonction de l’augmentation de l’énergie. Les incertitudes des données brutes sont de \sqrt{N} étant donné que c’est un processus de Poisson.

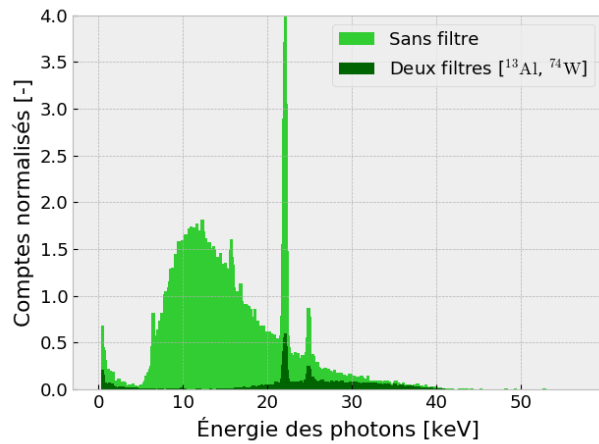


(a) Spectres filtrés à l'Aluminium avec différentes épaisseurs

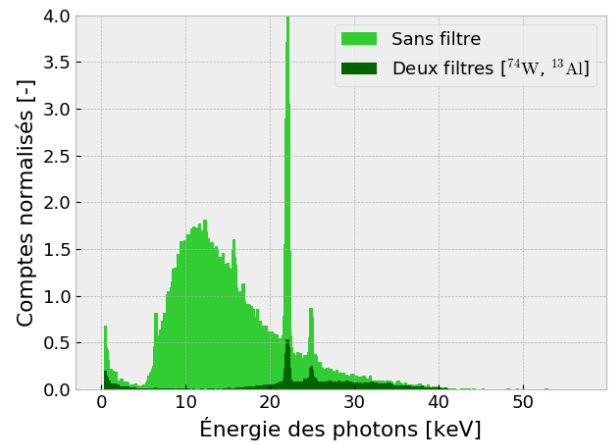


(b) Spectres filtrés au Cuivre avec différentes épaisseurs

FIGURE 4 – Effet des filtres de l'Aluminium et du Cuivre sur l'allure générale du spectre non filtré à 40 kVp et 15 μ A

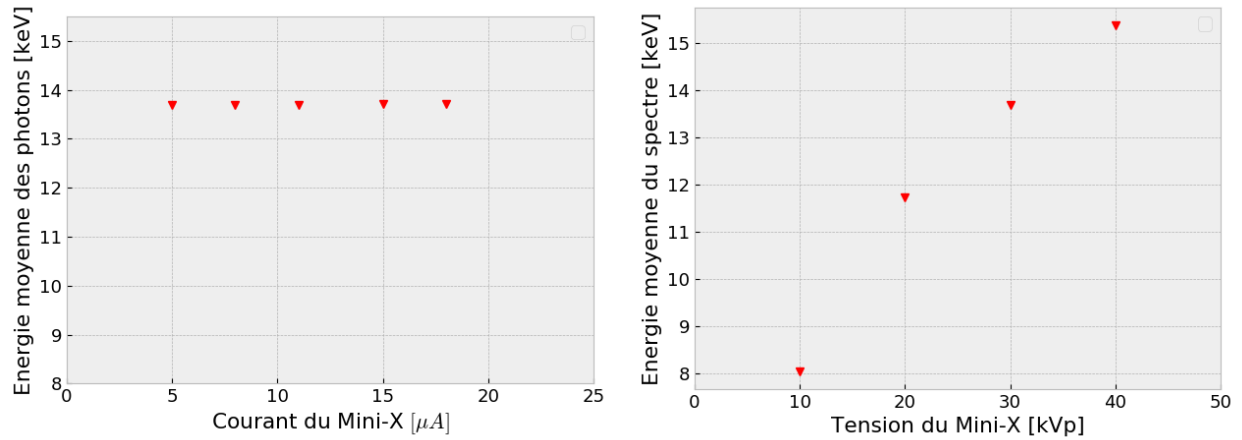


(a) Spectres filtrés par la superposition des filtres ⁷⁴W et ¹³Al dans un certain ordre



(b) Spectres filtrés par la superposition des filtres ⁷⁴W et ¹³Al dans l'ordre inverse

FIGURE 5 – Comparaison de l'ordre des filtres du ⁷⁴W et ¹³Al sur la filtration d'un spectre



(a) Évolution de l'énergie moyenne des photons avec le courant du générateur
(b) Évolution de l'énergie moyenne des photons avec la tension du générateur

FIGURE 6 – Évolution de l'énergie moyenne du spectre dans le cas d'un courant variable à gauche, et celui d'une tension variable à droite.

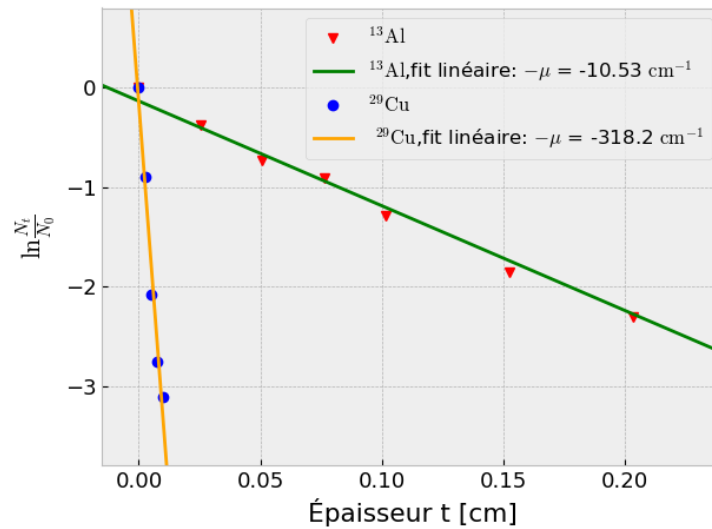


FIGURE 7 – Mesures du coefficient d'atténuation de l'Aluminium et du Cuivre

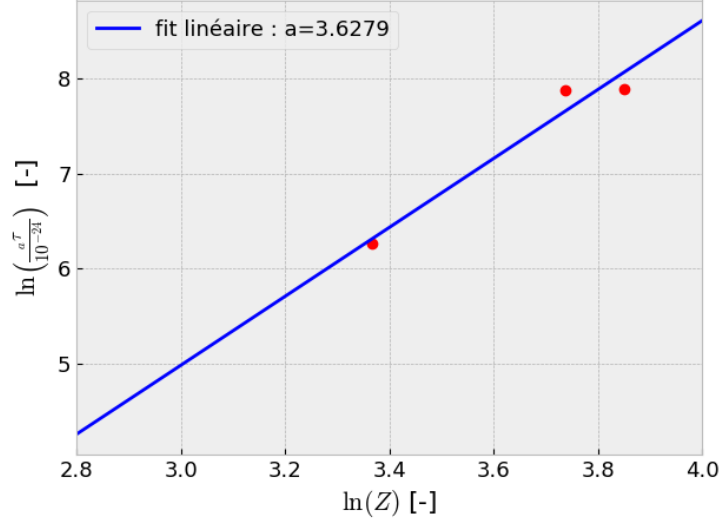


FIGURE 8 – Section efficace d’absorption évaluée pour des éléments chimiques de numéro atomique Z différents (^{13}Al , ^{29}Cu , ^{42}Mo , ^{47}Ag , ^{74}W). De ces cinq éléments chimiques, seulement 3 sont représentés graphiquement car les calculs de la section efficace des éléments ^{13}Al , ^{74}W ont produit un $a\tau$ négatif incompatible avec le domaine de définition de la fonction logarithme.

	^{47}Ag	^{29}Cu	^{13}Al	^{74}W	^{42}Mo
Section efficace $a\tau$ [$\times 10^{-22}\text{cm}^2/a$]	26.78	5.238	-1.776	-13.35	2.649

TABLEAU 3 – Valeurs numériques de section efficace obtenues expérimentalement

4 Discussion

Parmi tous ces spectres, le premier détail qui n’échappe pas à l’œil est la présence constante des deux pics de transition K_α et K_β de l’anode du Mini-X, aux alentours de 22 keV et 25 keV . La table 2 nous permet d’affirmer que l’anode du générateur est composé d’Argent. De plus, pour ce qui est des incertitudes, les rayons X détectés par le capteur peuvent être modélisés par une distribution de Poisson. Cela implique que l’écart-type sur la moyenne du nombre de comptes obtenus sera la racine carrée du nombre de comptes. C’est cet écart-type qui est utilisé comme incertitude, alors une diminution de l’incertitude relative sur la mesure des nombre de comptes est possible en prenant de plus longues acquisitions.

D’après l’allure des spectres présentés à la figure 2b, le nombre de comptes ou l’aire sous le spectre augmentent avec le courant du Mini-X, pour une tension fixe. Cela est d’autant plus visible et quantifié sur la figure 3b où il est intéressant de noter que l’aire totale sous le spectre est linéairement croissante avec le courant avec une pente très élevée, de 66.457, et un coefficient R^2 de 0.9961, qui affirme bien cette linéarité. Par contre, à cette même figure 2b, la hausse du courant ne change pas globalement l’énergie des photons présents

dans le faisceau. La figure 6a vient confirmer cela en montrant que l'énergie moyenne des photons est pratiquement constant avec le courant , aux alentours de 13.7 keV pour un voltage de 30 kVp . Le courant du tube à rayons X augmente donc la proportion du nombre de photons à différentes énergies sans changer l'énergie des photons du faisceau.

Dans le cas d'une tension variable, aux figures 2a et 3a, l'accroissement de l'aire spectrale est toujours d'actualité. En observant le compte total en fonction de la tension d'alimentation, le comportement semble plutôt linéaire. Toutefois, les données obtenues ont été ajustées en fonction de l'efficacité de détection variable du détecteur [2] en normalisant les données sur une efficacité de 100%. Avec cette normalisation, la tendance des données obtenues se rapproche beaucoup plus d'une tendance quadratique, ce qui est le résultat attendu. Les figures 2a et 6a montrent respectivement l'apparition de photons de plus hauts énergies à mesure que la tension augmente et donc par conséquent l'augmentation de l'énergie moyenne du faisceau. En effet la hausse de l'énergie des électrons à l'intérieur du tube améliore l'efficacité générale de production des rayons X par le processus Bremsstrahlung. Ce comportement est attendu théoriquement [11].

Du fait de la définition de l'exposition à la section 1, cette quantité peut être reliée proportionnellement aux nombres de photons à l'intérieur d'un faisceau de rayons X. Or, comme mentionné dans ce livre [8], l'exposition varie linéairement et quadratiquement avec le courant et la tension respectivement. Ce qui explique aussi les résultats décrits plus haut.

Le courant ne change que la quantité du faisceau alors que la tension permet de changer la qualité et la quantité du faisceau. Cette effet du courant explique l'utilisation d'un courant élevé en radiologie pour imager des portions du corps plus épaisses [12]. En effet l'augmentation du nombre de photons dans le faisceau permet d'augmenter le ratio du signal par rapport au bruit et par conséquent d'obtenir des images plus nettes.

Parmi les figures 4 et 5 et celles de l'Annexe 6, il convient de constater que la filtration permet d'atténuer ou de faire disparaître la distribution triangulaire dans les basses énergies de l'effet Bremsstrahlung du spectre. Sur la figure 4b, (et aussi sur certaines de celles situées en Annexe 6) , la présence d'un "mur", dans les spectres filtrés, correspondant à une chute abrupte du nombre de photons pour une certaine énergie (8.904keV pour le Cuivre) désigne une absorption des photons à ces énergies lors de l'interaction du faisceau avec les atomes des éléments, entraînant un déplacement des électrons vers les couches plus hautes. Ces observations étaient attendues puisqu'elles correspondent aux transitions d'énergies K_α et K_β présentées à la table 2.

Dans le cas des filtres composés d'aluminium et de cuivre, la figure 4 nous montre que les filtres au cuivre ont un effet filtrant plus élevé que les filtres à l'aluminium. En effet une épaisseur de cuivre (de l'ordre de 0.1 mm), environ 10 fois moins épaisse que celle de l'aluminium(de l'ordre de 0.1 cm) réduit considérablement mieux le profil énergétique par rapport au filtre à l'aluminium. Cet effet est beaucoup mieux quantifié par la mesure de leur coefficient d'atténuation à la figure 7. Le coefficient d'atténuation du cuivre est environ 30 fois plus élevé par rapport à celui de l'aluminium. Sur cette figure, la droite décroissante du cuivre est très verticale par rapport à celle de l'aluminium. Il est pertinent de mentionner que l'ordre de grandeur des coefficients d'atténuation obtenus expérimentalement correspondent à ceux prédits avec les données du NIST à la section 2.

Comme proscrit en section 2, la nature poly-énergétique de notre faisceau nécessite que la première couche de demi-atténuation (CDA1) soit différente de la deuxième (CDA2). Dans le cas de l'aluminium, la figure 7 permet de trouver une épaisseur de 0.0552 cm pour $\ln(0.5)$ correspondant à CDA1, et une épaisseur de 0.119 cm pour $\ln(0.25)$. La soustraction de cette dernière valeur à CDA1 nous fournit CDA2 égale à 0.0638 cm . Il y a donc bien CDA1 différent de CDA2. L'incertitude sur ces valeurs est de 0.01 cm qui correspond à la manière dont variait ces valeurs lorsque la souris se déplaçait d'un pixel dans la recherche des points du graphique. L'écart entre ces deux valeurs :

$$\frac{0.0638 - 0.0552}{0.0552} \times 100 = 13.5\%$$

En répétant similairement, pour le cuivre, CDA1 vaut 0.00170 cm et CDA2 0.00220 cm avec un écart de 22.7%. Ces résultats sont cohérents avec la nature du faisceau.

La figure 5 nous démontre clairement que l'ordre des filtres n'a pas d'importance sur la filtration du spectre.

Finalement, la figure 8 montre la dépendance en Z de la section efficace d'absorption. Néanmoins, il est très difficile de caractériser ce comportement dû à l'insuffisance du nombre de points de mesures. En effet les mesures pour le cas de l'Aluminium et du Tungstène fournissaient un ratio $\frac{N_t}{N_0}$ supérieur à 1 dans la région de 31 keV , lequel entraînait, à l'aide de l'équation 1, une section efficace $a\tau$ négative. Cette anomalie dans le ratio du nombre de photons est la cause d'une mauvaise acquisition de données due à un temps mort qui était près de 30% durant les acquisitions de N_t et N_0 contrairement à ce qui était voulu dans le protocole [9]. La pente obtenue sur ce graphique (3.6279) est donc relativement éloignée du résultat attendu (4) avec un écart d'au moins 10%. Cela est aussi remarquable dans la différence entre les valeurs expérimentales et théoriques des tableaux 3 et 2. Toutefois, il est toujours possible d'observer que la section efficace d'absorption croît très rapidement avec le numéro atomique et représente une forme importante d'interaction photon-matière

5 Conclusion

En conclusion, cette expérience a cherché à caractériser le comportement d'une source à rayons X sous différentes conditions d'alimentation et de filtration. Une augmentation du courant d'alimentation permettrait d'améliorer la résolution de tissus épais mais avec le désavantage d'augmenter la proportion de photons dans le faisceau. La hausse de la tension, quant à elle pourrait être d'autant plus dangereuse car elle augmente l'énergie moyenne des photons. Pour ce qui est de la filtration, l'utilisation d'un filtre permet de réduire le profil énergétique vers les basses énergies. Les matériaux composés de Cuivre représentent une meilleure protection face aux rayons X que l'Aluminium. Toutefois l'atténuation des autres éléments chimiques n'a pas été quantifié. La section efficace pour différents matériaux a été calculée mais la dépendance en Z^4 n'a pas pu être confirmée avec les données obtenues. Finalement, les couches de demi-atténuations CDA1 et CDA2 ont confirmé la nature poly-énergétique du faisceau. Maintenant que le comportement d'une source de rayons X et que

le phénomène de filtration sont mieux connus, il serait intéressant de faire une analyse plus poussée sur les avantages et inconvénients des différents filtres et lesquels sont mieux adaptés suivant un contexte particulier.

Références

- [1] Periodic table of elements and x-ray energies. URL : https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/X-rayDiffraction_ElementalAnalysis/HH-XRF/Misc/Periodic_Table_and_X-ray_Energies.pdf [cited 21/02/2020].
- [2] Amptek. Xr-100cr si-pin x-ray detector, 2014. URL : <https://www.amptek.com/products/si-pin-x-ray-detectors-for-xrf/xr-100cr-si-pin-x-ray-detector> [cited 21/02/2020].
- [3] Dr Usman Bashir Dr Monica Wong. Exposure, 2013. URL : <https://radiopaedia.org/articles/exposure> [cited 21/02/2020].
- [4] Paul Frame. Coolidge x-ray tubes, 2009. URL : <https://www.orau.org/ptp/collection/xraytubescoolidge/coolidgeinformation.htm> [cited 16/02/2020].
- [5] S. M. Seltzer J. H. Hubbell. X-ray mass attenuation coefficients, 2004. URL : <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z29.html> [cited 21/02/2020].
- [6] S. M. Seltzer J. H. Hubbell. X-ray mass attenuation coefficients, 2004. URL : <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html> [cited 21/02/2020].
- [7] S. M. Seltzer J. H. Hubbell. Xcom : Photon cross sections database, 2004. URL : <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [8] Faiz M. KHAN. *The Physics of Radiation Therapy*. Wolters Kluwer Health, 2010. URL : <https://books.google.ca/books?id=pWDQnxd-r1UC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>.
- [9] L.Beaulieu. Filtration des rayons x. URL : <https://sitescours.monportail.ulaval.ca/contenu/sitescours/036/03613/202001/site111946/modules706155/module910556/page2468976/bloccontenu2307612/Filtration-Rayons-X-2020.pdf?identifiant=0caf16e67edbla8d179886ce9ad0a40814ae9412> [cited 17/02/2020].
- [10] E.B. PODGORSK. *Radiation oncology physics : a handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency, 2005. URL : https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf.
- [11] Perry Sprawls. X-ray production. URL : <http://www.sprawls.org/ppmi2/XRAYPRO/#Spectrum> [cited 21/02/2020].
- [12] Dr J Yeung. Signal-to-noise ratio, 2012. URL : <https://radiopaedia.org/articles/signal-to-noise-ratio-1> [cited 21/02/2020].

6 Annexe

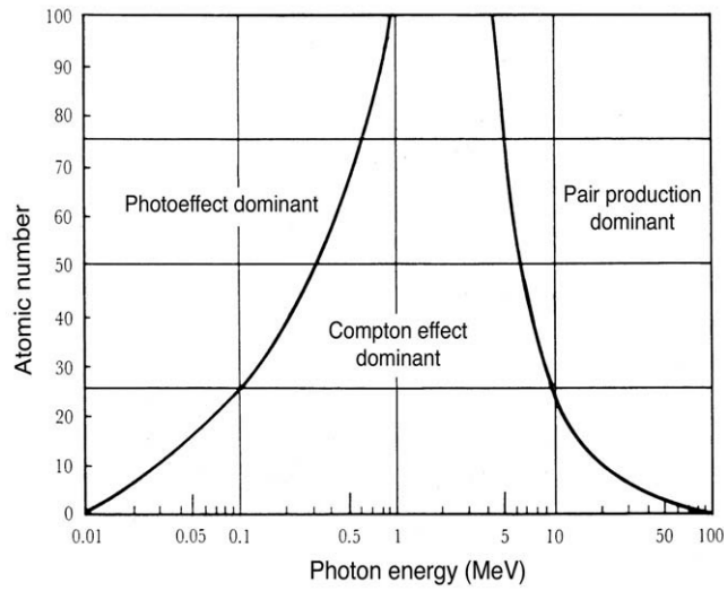
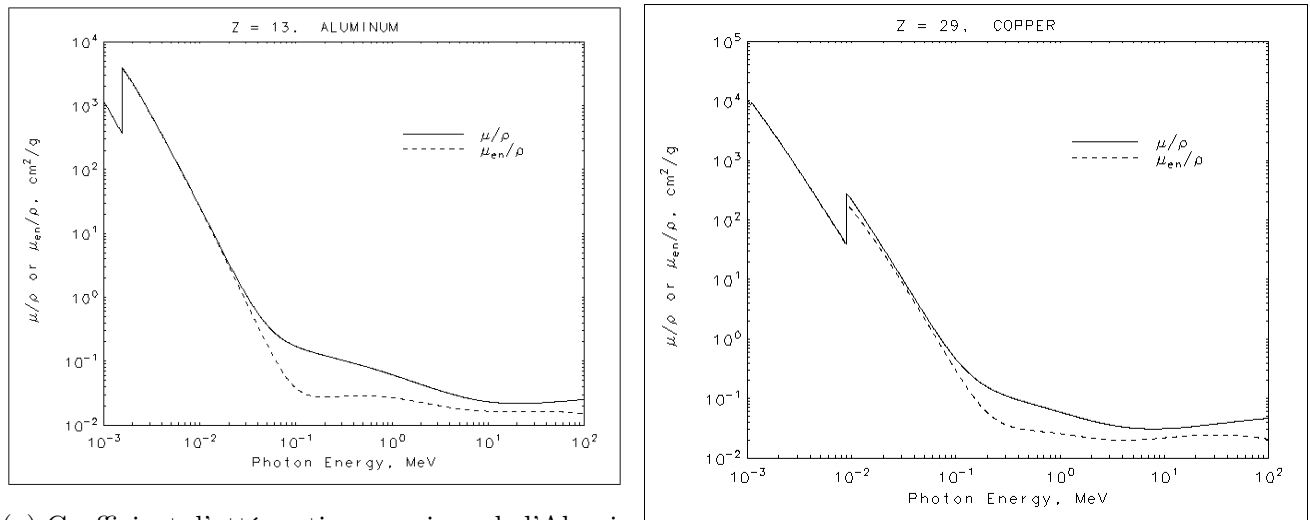


FIGURE 9 – Région de prédominance relative des trois formes d'interaction photon-matière [10]



(a) Coefficient d'atténuation massique de l'Aluminium

(b) Coefficient d'atténuation massique du Cuivre

FIGURE 10 – Coefficient d'atténuation massique théorique de l'Aluminium et du Cuivre de la base de données du NIST [5] [6]

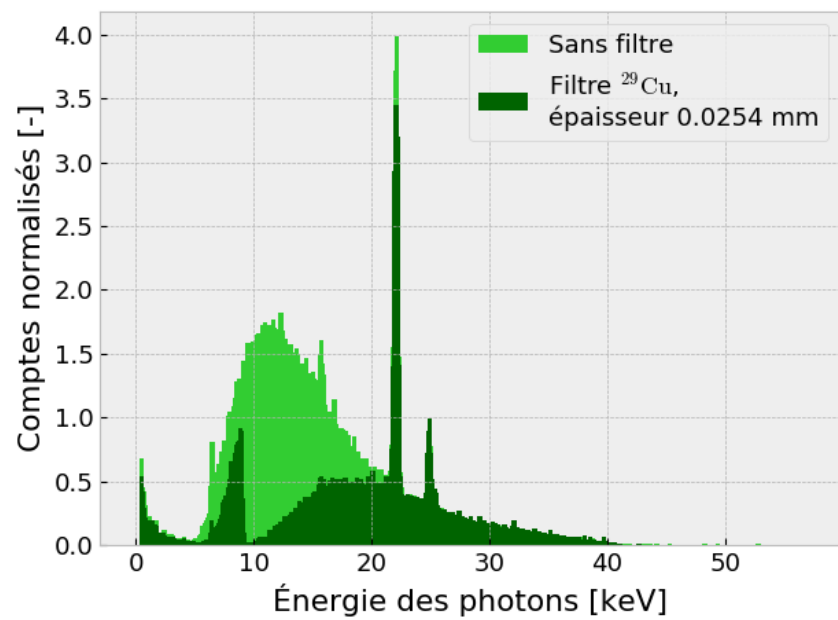


FIGURE 11 – Spectre filtré au Cuivre

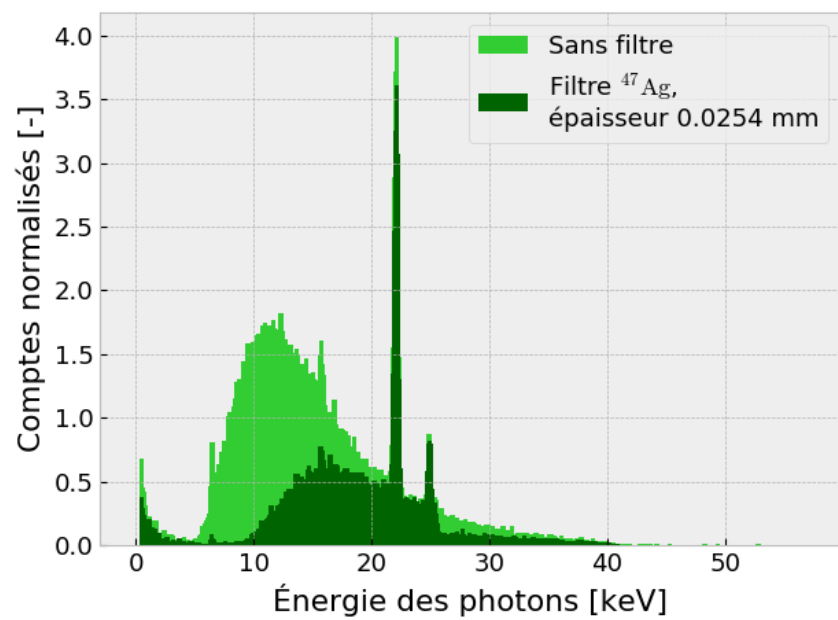


FIGURE 12 – Spectre filtré à l'Argent

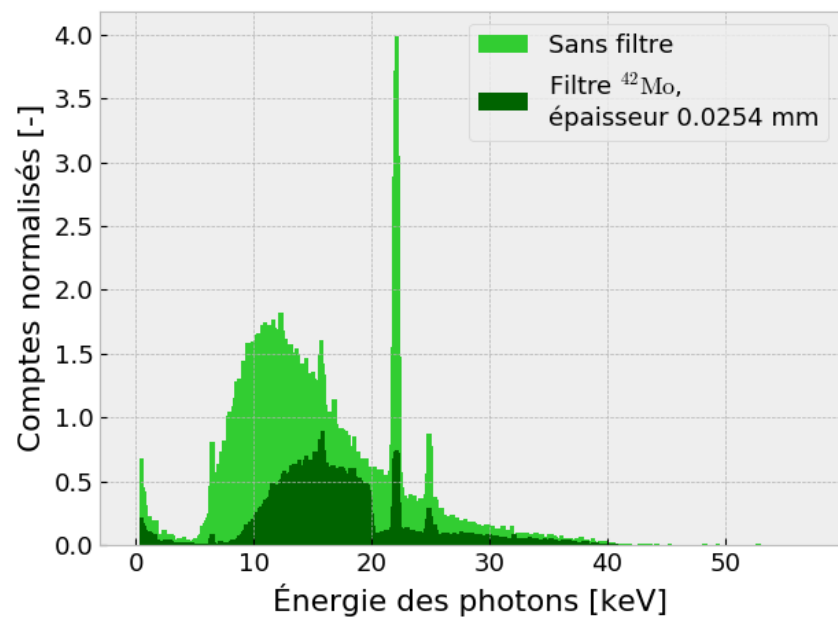


FIGURE 13 – Spectre filtré au molybdène