

UFR PHYSIQUE ET INGENIERIE

**MASTER2-Physique de Rayonnements, Instrumentation, Détecteurs et Imagerie
(PRIDI)**

Rapport de stage

Auteur : NADLER William

Titre : Evaluation des performances d'un système ultra-léger de cartographie de la radioactivité environnementale par drone

Promotion : 2019 / 2020

Structure d'accueil : Centre national de la recherche scientifique, Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN, Dosimétrie, Simulation et Instrumentation (DeSIs)

Département / pays : Alsace-Lorraine / France

Code APE (NAF): 7219Z

Mots clés : système de détection aéroporté, simulation Monté Carlo, scintillateur, détection des rayonnements ionisants, rayonnement gamma, drone, spectres en énergie

Sommaire

Introduction	4
I. Descriptions des détecteurs étudiés.....	5
1) Détecteur RIUM :	5
2) Capteur type CMOS :	6
II. Etude du détecteur RIUM :	7
1) Modélisation Monte Carlo	7
2) Forme des spectres (Cs-137).....	8
3) Efficacité absolue en fonction de la distance	10
4) Efficacité absolue en fonction de l'énergie.....	13
5) Evaluation du temps de mesure par drone.....	15
III. Etude du détecteur CMOS :	17
1) Etude énergétique d'un capteur CMOS.....	17
2) Etude de l'efficacité absolue d'un capteur CMOS	19
Conclusion et perspective :	21
ANNEXE 1: Interactions rayonnement-matière	22
Bibliographie	24
Abstract	25

Introduction :

Il existe trois principaux types de surveillance radiologique : les surveillances statiques au sol (détecteurs de type balise fixe), les surveillances mobiles au sol (détecteurs manuels ou transportés sur des véhicules terrestres) et les surveillances par voie aérienne (détecteurs transportés sur des avions ou des hélicoptères). L'intérêt des drones (unité de vol autonome ou semi autonome) pour la localisation et la cartographie de la contamination radioactive a grandi ces dernières années, notamment après l'incident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011. Une cascade d'évènements a conduit, durant cet accident nucléaire, au rejet de nombreux radionucléides dans l'atmosphère [1][2]. Malheureusement le suivi cartographique des radioéléments n'a pas pu être effectué correctement juste après l'accident car 23 des 24 stations de surveillances statiques avaient été rendues inopérantes [3]. Le suivi radiologique a ainsi été perdu durant plusieurs heures. Des relevés ont été effectués par 15 voitures équipées d'instruments de mesure à 20km du site. Des relevés par méthodes aériennes ont aussi été effectués mais les résultats n'ont été disponibles que 11 jours après l'accident (méthode de reconstitution d'images très précise lente) [3]. Ainsi les seules données dont se sont servies les autorités pour les plans d'évacuation ont été les données estimées à partir des modèles de prédiction. Cet accident a montré le besoin en cas de situations d'urgence, pour les secours comme pour la population, de mesures rapides des zones de contamination. La spectrométrie gamma par drone est aujourd'hui considérée comme une des solutions les plus prometteuses pour ce genre de situation.

L'un des principaux avantages des mesures aéroportées est qu'elles ne nécessitent pas de présence humaine à proximité de la zone de danger. En comparaison des mesures par hélicoptère (l'autre moyen le plus utilisé en spectrométrie gamma aéroportée), les drones présentent l'intérêt d'être moins chers et beaucoup plus pratiques d'utilisation. Ils réduisent également très fortement le risque d'accident humain lors de la réalisation des mesures. La faible altitude de vol (généralement entre 1m et 10m) et la vitesse de déplacement (entre 5 m/s et 10 m/s) permettent d'obtenir des mesures rapides et précises de terrains contaminés de surfaces importantes [4]. Pour limiter les fluctuations statistiques (limites de détection et erreurs de mesure), il est cependant nécessaire d'utiliser des détecteurs de taille importante (typiquement un scintillateur 3"x3"). La majorité des systèmes par drone développés aujourd'hui pèsent ainsi de l'ordre de 10kg, ce qui nécessite de bonnes connaissances en pilotage et l'obtention de plusieurs autorisations administratives pour la réalisation des mesures [5]. La législation actuelle étant beaucoup moins contraignante pour les drones ultra-légers (< 800g), il est intéressant de s'interroger sur les performances de mesures accessibles par ce type de système.

L'objectif de ce travail de stage est ainsi d'estimer les performances de mesures d'un système de spectrométrie gamma par drone ultra-léger (drone + capteur < 800g). Ce projet est motivé par plusieurs résultats concluant de drone de petites tailles [6] [7]. Les utilisations envisagées pour ce type de système sont la recherche et la localisation de contaminations radioactives lors des interventions d'urgences, par exemple dans le cas d'une intervention de pompiers sur un site à risque. Le système pourrait être utilisé entre autre pour la recherche automatique de contamination radioactive en intérieur et en extérieur via des algorithmes de localisation couplés au système de pilotage. Le système serait ainsi utilisé pour définir une première cartographie rapide des zones de contamination, avant de réaliser des mesures plus précises avec d'autres systèmes. Le but ici est de développer un système de détection facile à prendre en main, et ne nécessitant pas d'autorisation de vol. Il s'agit de plus d'un système à faible coût.

Deux types de capteurs répondant aux critères de poids et de taille ont été sélectionnés pour ce stage : un scintillateur césium-iode dopé au thallium RIUM fabriqué par la société ICOHUP (<https://www.icohup.com/>), et un capteur de type CMOS.

Le but de ce stage est de vérifier si les performances de mesure de ces détecteurs (en particulier leur efficacité de détection) sont compatibles avec les mesures de radioactivité envisagées. Les deux détecteurs ont été modélisés avec le logiciel de simulation Monte Carlo GATE afin de déterminer l'efficacité absolue de détection en fonction de la distance source-détecteur, de l'énergie des rayonnements ainsi que l'activité d'une source de ^{137}Cs ¹. Ce stage a été financé dans le cadre du projet IDEX *Juxta Rhenum* de l'Université de Strasbourg.

¹ Cette étude par simulation Monte Carlo devait ensuite être complétée par une série de mesures expérimentales avec les deux types de détecteurs en utilisant différentes sources radioactives. Les événements exceptionnels survenus au cours de ce stage (épidémie de

I. Descriptions des détecteurs étudiés

1) Détecteur RIUM :

Le RIUM d'ICOHUP (**figure 1**) est un capteur conçu pour la spectrométrie gamma. Il permet de mesurer le débit de dose en temps réel et l'acquisition d'un spectre en énergie pouvant être utilisé pour l'identification des radioéléments (et non pas 1 seul radioélément comme certains outils pré-calibrés). C'est un capteur connecté (USB, Bluetooth, Wifi, 3G/4G). Ce capteur offre plusieurs avantages, il pèse moins de 190 grammes avec des dimensions totales (118x78x31mm **tableau 1**) compatibles avec un drone pesant moins 800 grammes. Il fonctionne de -20° à 50° et offre une autonomie de 15 heures environ.

Figure 1 : Image en vue éclatée du détecteur RIUM de la société ©Icohup [13]

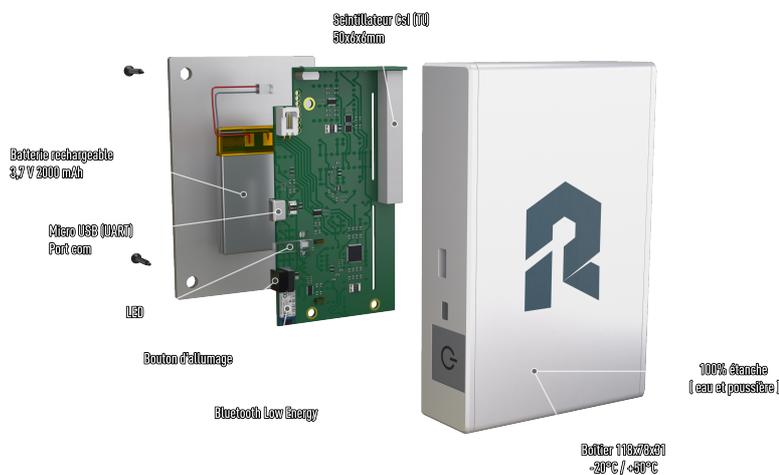


Tableau 1 : Spécifications du détecteur RIUM [13]

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU CAPTEUR RIUM*

Technologie du détecteur	Scintillateur CsI:TI
Dimensions du détecteur	50x6x6 mm
Types de rayons détectés	Gamma, Rayon X
Gamme en débit de dose	0,1 - 100 μ Sv/h
Sensibilité à 662keV (137 Cs)	3200 CPM/ μ Sv/h (54 cps/ μ Sv/h)
Gamme en énergie (γ /X)	40 keV - 2MeV
Rendement de détection à 662keV (137 Cs)	22%
Résolution en énergie à 662keV (137 Cs)	10%
Nombre de canaux	2200
Réponse angulaire	<15% d'erreur sur 360°
Dimensions - Poids	118x78x31 mm - 190g
Température de fonctionnement	-20°C à +50°C
Batterie	3,7V - 2000mAh
Autonomie	Sur batterie : 15h Sur secteur : ∞
Connectivité	Bluetooth Low Energy Port COM série (micro USB)

Options

Détection de particules alpha, beta, neutrons...
Gateway pour connectivité GSM/Wifi/...
Géolocalisation indoor

Ce détecteur a été choisi pour notre système drone-détecteur ultra-léger surtout pour les propriétés intéressantes qu'il possède. Le détecteur utilisé dans le capteur RIUM est un scintillateur CsI(Tl) de dimension 50x6x6 mm (pavé rectangulaire). Il dispose d'une batterie intégrée rendant le système autonome en énergie. Ce type de scintillateur est robuste et présente de bonnes propriétés mécaniques. Sa densité est de 4,51 g/cm³, avec un numéro atomique Z = 54. Il émet dans le spectre de la lumière visible (max à 550 nm). Il présente quelques mauvais points, son temps de décroissance assez long (de l'ordre de 1 μ s [8]) et le cristal est un peu hygroscopique. C'est l'un des scintillateurs inorganiques les plus brillants existant avec environ 54 photons / keV [8] (45% par rapport au scintillateur au NaI souvent considéré comme scintillateur de référence).

COVID-19) n'ont malheureusement pas permis la réalisation de cette deuxième partie de l'étude.

Les rayons gamma ne créent pas d'ionisations directes ou d'excitations du matériau lorsqu'ils passent au travers. Il est donc crucial pour des détecteurs à scintillateurs de transformer les rayons gamma en électrons par les processus expliqués en **annexe 1**. Les photons primaires sont "invisibles" à la détection, seuls les électrons rapides créés par interaction des rayons-gamma fournissent une indication sur la nature des rayons incidents.

Le scintillateur utilisé (CsI(Tl)) est un scintillateur inorganique "activé" (il fonctionne par propriété cristalline). La transition d'électrons des bandes de conduction vers les bandes de valences va provoquer une émission de lumière qui sera récoltée par une photodiode et induira un courant électrique ou une tension en fonction de la technologie de l'électronique d'acquisition utilisée qui permettra d'obtenir le spectre en énergie après traitement. La faible quantité d'impureté (ici le thallium) permet de produire de la luminescence.

2) Capteur type CMOS :

Un capteur CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) est un composant électronique photosensible. Il sert à transformer un rayonnement électromagnétique en un signal électrique (tension ou courant). C'est un semi-conducteur qui lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap (énergie qui sépare la bande de valence de la bande de conduction) est absorbé, va créer une paire électron/trou et induire un courant électrique. Les charges dans un CMOS sont directement converties au niveau du pixel en tension, permettant une cadence d'image élevée [9].

Figure 2 : Exemple de capteur CMOS [10]

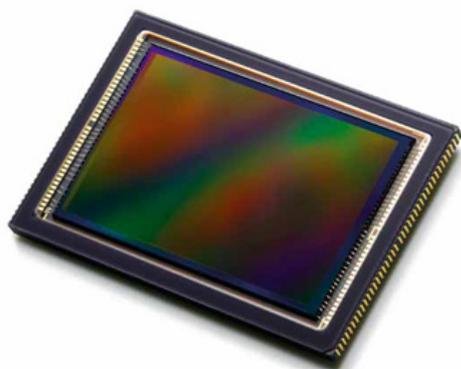
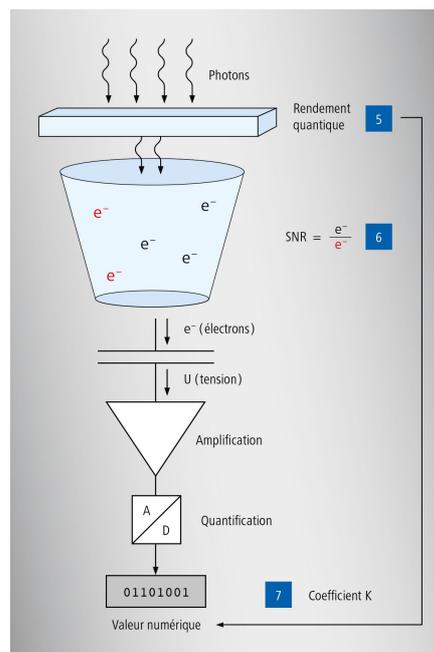


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'un CMOS [9]



Il est très facile actuellement de trouver des capteurs CMOS très bon marché (15 à 30 €) et très léger (quelques grammes). Il est le composant de base de nombreux appareils photos et caméras numériques. Les dimensions usuelles d'un pixel de CMOS sont de quelques micromètres (1 à 2 μm) pour les capteurs présents dans la plupart des téléphones portables de dernière génération pour une taille totale de quelques millimètres (ex : 6.16*4.6 mm). Les dimensions du CMOS pour des appareils photos et caméras sont de l'ordre du centimètre (ex : 22,3 x 14,9 mm) pour des pixels d'environ 10 μm . Bien que ces capteurs aient été conçus pour la détection des photons dans le domaine du visible, des études ont été faites sur l'utilisation de capteurs présents sur des téléphones portables pour la détection des rayonnements ionisants [11] [12]. Les résultats obtenus étant plutôt encourageant, un des objectifs de ce travail de stage est de vérifier si les capteurs CMOS commerciaux sont compatibles avec les utilisations envisagées du système de spectrométrie gamma par drone.

On cherche en particulier à vérifier s'il est possible d'estimer l'énergie des rayonnements et si l'efficacité absolue est compatible avec l'autonomie de vol du drone (~15-20 minutes).

II. Etude du détecteur RIUM :

1) Modélisation Monte Carlo

La modélisation du détecteur RIUM [13] a été réalisée avec le logiciel GATE [14]. C'est un logiciel de simulation par méthode Monte Carlo, basé sur le code de calcul Geant4 [15].

La **figure 4** présente la géométrie du détecteur césium-iode dopé au thallium (CsI(Tl)), en jaune sur l'image. Le choix de l'orientation du détecteur n'est pas anodin, en effet le détecteur sera placé à plat sous le drone afin de faciliter le vol (placer le capteur droit poserait des problèmes d'aérodynamisme et de centre de gravité pour le drone, ce qui affecterait grandement la maniabilité). La simulation GATE permet d'enregistrer dans un fichier au format ROOT le nombre de photons ayant interagi avec le détecteur et l'énergie totale déposée par chaque photon. Les données sont mises sous la forme d'un histogramme (spectre en énergie) allant de 0 à 3000 keV avec 3000 bins.

Le but de ce travail de simulation est d'estimer l'efficacité de détection du capteur RIUM en fonction de paramètres tels que l'énergie des rayonnements, la distance source-détecteur ou encore l'activité de la source radioactive. L'idée est d'obtenir ainsi une première idée des performances de ce capteur pour guider la réalisation des mesures expérimentales.

Le choix de la source s'est porté sur une source de Cs-137. Avec un temps de demi-vie relativement long (30.2 ans) au vu de la durée nos mesures (~15-20 minutes). Comme nous le montre le **tableau 2**, le césium-137 émet des β^- (électrons) avec un rendement de 94% et forme du baryum-137m émetteur de γ (photons) à 662keV pour donner du baryum-137(stable) et avec un rendement de 6% donne directement du baryum-137 (stable) en émettant des β^- (électrons ou positrons) d'énergie 1176 keV. Il constitue un des radioéléments artificiels les plus étudiés en « radioécologie ». [16] [17]

Figure 4 : Interface graphique d'une simulation effectuée sous GATE pour le détecteur RIUM. Sont visibles les trois axes (x,y,z en bleu, rouge et vert), la trajectoire des photons de la source de ^{137}Cs et le détecteur CsI(Tl) en jaune.

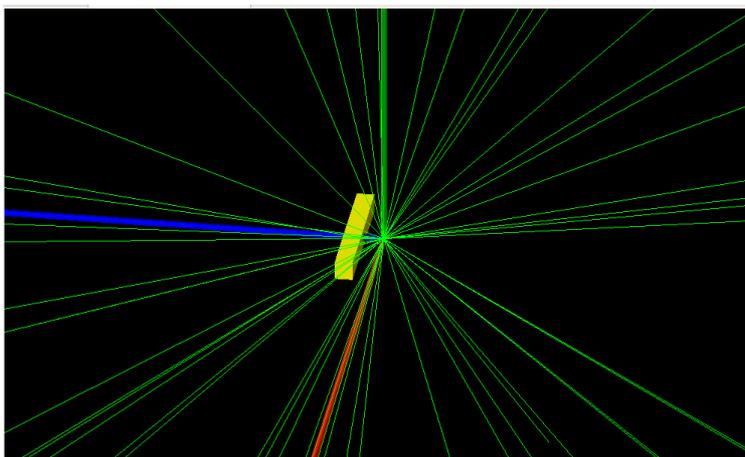


Tableau 2 : Filiation détaillée du césium-137 [17]

Produits de filiation	Baryum-137m (métastable), baryum-137 (stable)
Équations	$ \begin{array}{c} {}^{137}_{55}\text{Cs} \xrightarrow[\text{T}=30,1 \text{ ans}]{\beta^- (95\%), E_{\text{max}}=514 \text{ keV}} {}^{137\text{m}}_{56}\text{Ba} \xrightarrow[\text{T}=2,55 \text{ min}]{\gamma (90\%), E=662 \text{ keV}} {}^{137}_{56}\text{Ba} \\ \\ {}^{137}_{55}\text{Cs} \xrightarrow[\text{T}=30,1 \text{ ans}]{\beta^- (6\%), E_{\text{max}}=1176 \text{ keV}} {}^{137}_{56}\text{Ba} \end{array} $

Dans la partie suivante nous allons détailler l'allure des spectres en énergie correspondant à la modélisation de la réponse du capteur RIUM à une source de Cs-137.

2) Forme des spectres (Cs-137)

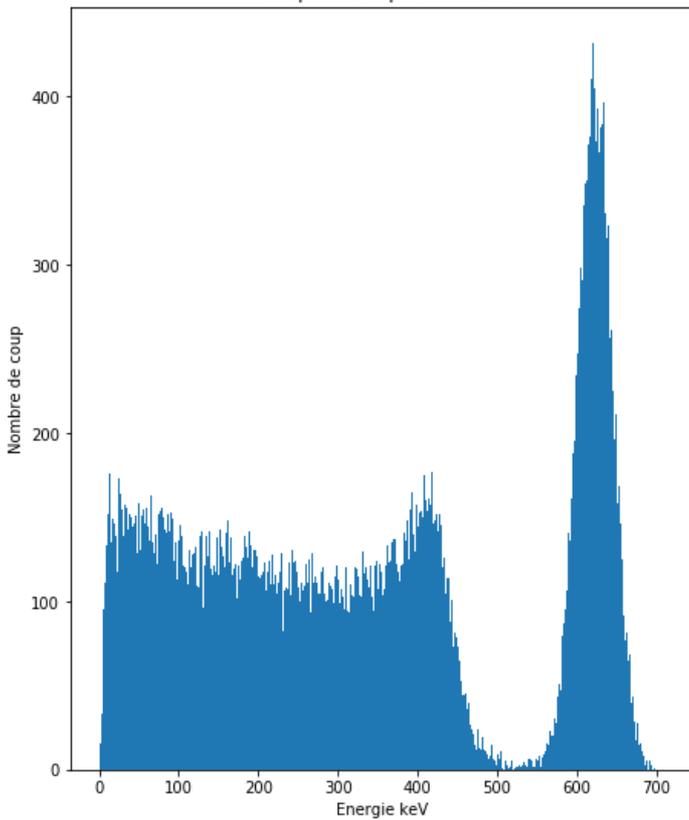
Nous avons modélisé avec le logiciel GATE une source de Cs-137 émettant 5.10^8 photons à une distance $z = 200 \text{ mm}$ du détecteur. Afin de déterminer l'efficacité absolue d'un détecteur, il faut compter le nombre de photons détectés dans le pic d'absorption totale par rapport au nombre total de photons émis par la source.

Les interactions fondamentales principales d'un photon avec la matière sont rappelées dans l'**annexe 1**. Pour prendre en compte la résolution en énergie du détecteur, nous avons utilisé une fonction de type $a \cdot E^2 + bE + c$, où E correspond à l'énergie totale déposée par un photon dans le détecteur et les facteurs a , b , c sont des coefficients obtenus de manière expérimentale. Le pic d'absorption totale a l'allure d'une courbe gaussienne centrée en 662 keV pour une source de Cs-137, comme le montre le premier spectre de la **figure 5**.

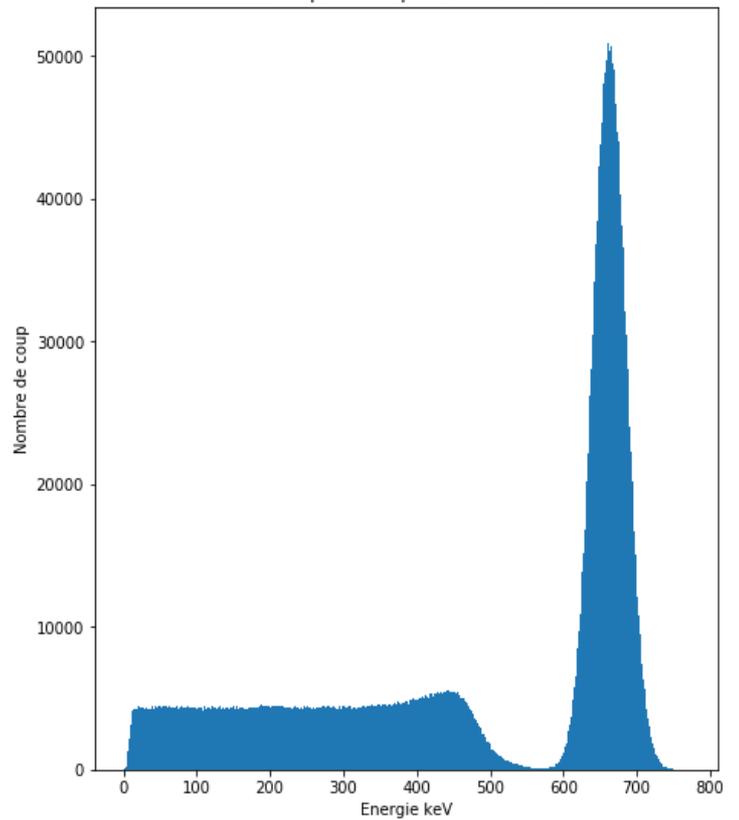
Pour comparer, nous avons également modélisé un détecteur NaI 3 "x3" qui est généralement considéré comme une référence en spectrométrie gamma. C'est le deuxième spectre présent sur la **figure 5**, il représente le spectre de 137-Cs reconstruit dans le détecteur NaI.

Figure 5 : Spectres obtenus par simulation GATE d'irradiation d'un détecteur avec une source de césium-137
 1) Spectre réponse pour le détecteur CsI(Tl), 2) Spectre réponse pour le détecteur NaI(Tl)

1) Histogramme (détecteur CsI(Tl))
à distance $z=200\text{mm}$ de la source 137-Cs
Centre du pic : 662.121
FWHM : 36.065
Coup dans le pic : 15551.0



2) Histogramme (détecteur NaI(Tl))
à distance $z=200\text{mm}$ de la source 137-Cs
Centre du pic : 662.12
FWHM : 34.792
Coup dans le pic : 1875262.0



Sur la **figure 5.1** nous observons les caractéristiques de ce que nous pouvons appeler un petit détecteur (< 1 ou 2 cm) Il n'y a quasiment que les processus à interaction unique qui ont lieux (**figure 6**). On observe un fond Compton très important. Le détecteur étant très petit, la plupart des effets Compton font s'échapper les photons du détecteur.

Figure 6 : Différents effets de spectroscopie gamma sur un petit détecteur [18]

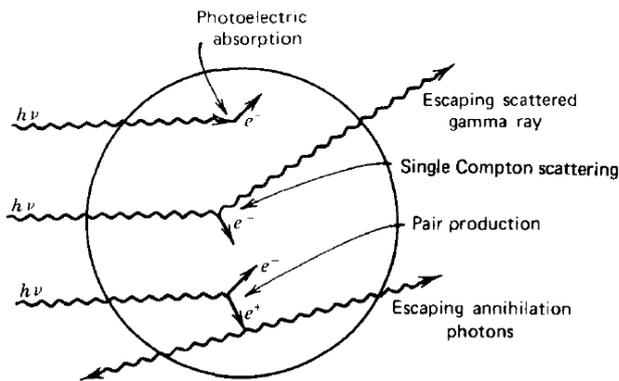
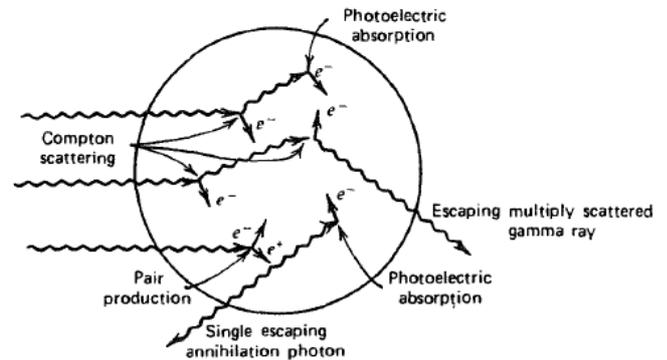


Figure 7 : Différents effets de spectroscopie gamma sur un détecteur moyen [18]



Sur la **figure 5.2** nous pouvons voir les caractéristiques d'un détecteur de volume moyen (**figure 7**). Des événements multiples peuvent avoir lieu dans le détecteur. Pour un effet Compton, le temps entre l'évènement primaire et secondaire étant inférieur à quelques nanosecondes (déplacement des gammas secondaires à la vitesse de la lumière), et parce que les détecteurs actuels n'ont pas une détection aussi rapide, la détection de ces éléments a lieu en coïncidence (comprendre au même moment temporel). Peu de photons Compton s'échappent du détecteur, d'où un fond Compton plus petit que pour la **figure 3.1**. Pour beaucoup d'événements, le détecteur va sommer des pertes d'énergie multiples jusqu'à atteindre la totalité de l'énergie d'un photon (662 keV). Ainsi la réponse du détecteur est telle que s'il n'y avait eu qu'une simple absorption photoélectrique.

3) Efficacité absolue en fonction de la distance

Il existe de nombreux paramètres à déterminer pour caractériser un scintillateur inorganique, la résolution en énergie, le rendement lumineux (ou efficacité intrinsèque), le temps de décroissance, les domaines d'émission (étendue, maximum, minimum), la réponse en température du cristal, les facteurs mécaniques, (l'hygroscopie), l'efficacité géométrique et l'efficacité absolue. L'utilisation du drone peut se faire pour des températures allant de -20°C à 50°C , notre utilisation se fera plutôt pour des températures tempérées (de -5°C à 35°C). Une étude de référence montre que le rendement relatif de scintillation est proche de 1 à ces températures [19], ce que nous considérerons par la suite.

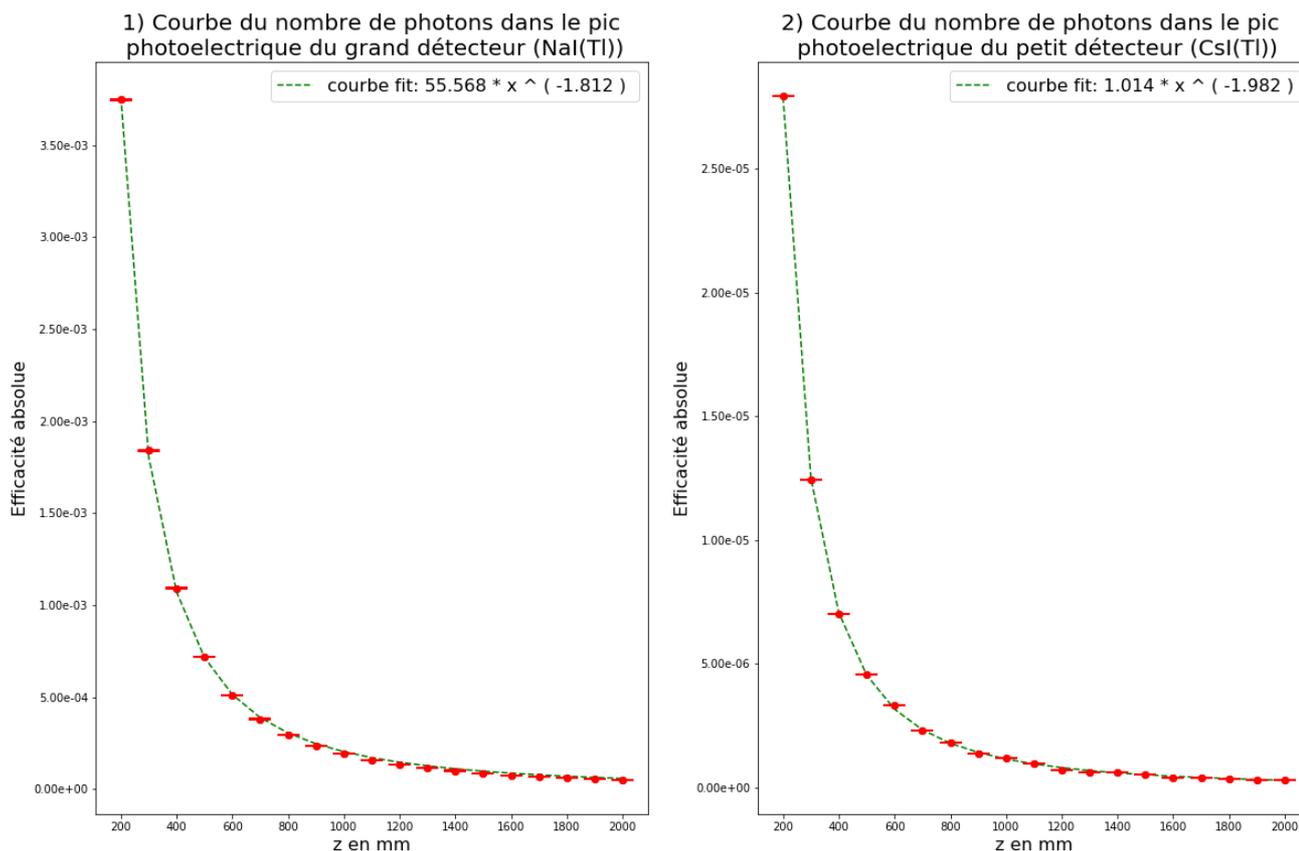
Le paramètre qui nous intéresse le plus pour notre système ultra léger drone-détecteur est l'efficacité absolue, notamment sa réponse en fonction de la distance cristal-source et en fonction de l'énergie de la source. En effet, il est nécessaire de connaître le nombre de photons auxquels nous devons nous attendre en fonction de l'altitude du drone et savoir quel type de source il est possible d'étudier par ce système. L'étude des autres paramètres ne sera pas faite ici.

Une source de ^{137}Cs émettant 5.10^8 photons a été modélisée sous GATE, ainsi qu'un détecteur NaI (référence) et le détecteur RIUM tels que décrits dans la **partie I**. Dans cette simulation, on fait varier la distance source-détecteur par pas de 100 mm entre un contact entre la source et le détecteur (distance = 0 m) et une distance de 2 m. Cette distance est définie comme étant la distance entre la source (ponctuelle dans la simulation donc sans volume) et la face d'entrée du détecteur.

Pour rappel, l'efficacité absolue se détermine en spectrométrie gamma en divisant le nombre de photons dans le pic photoélectrique (de forme gaussienne centré en 662keV voir **figure 5**) par le nombre total de photons délivré par la source.

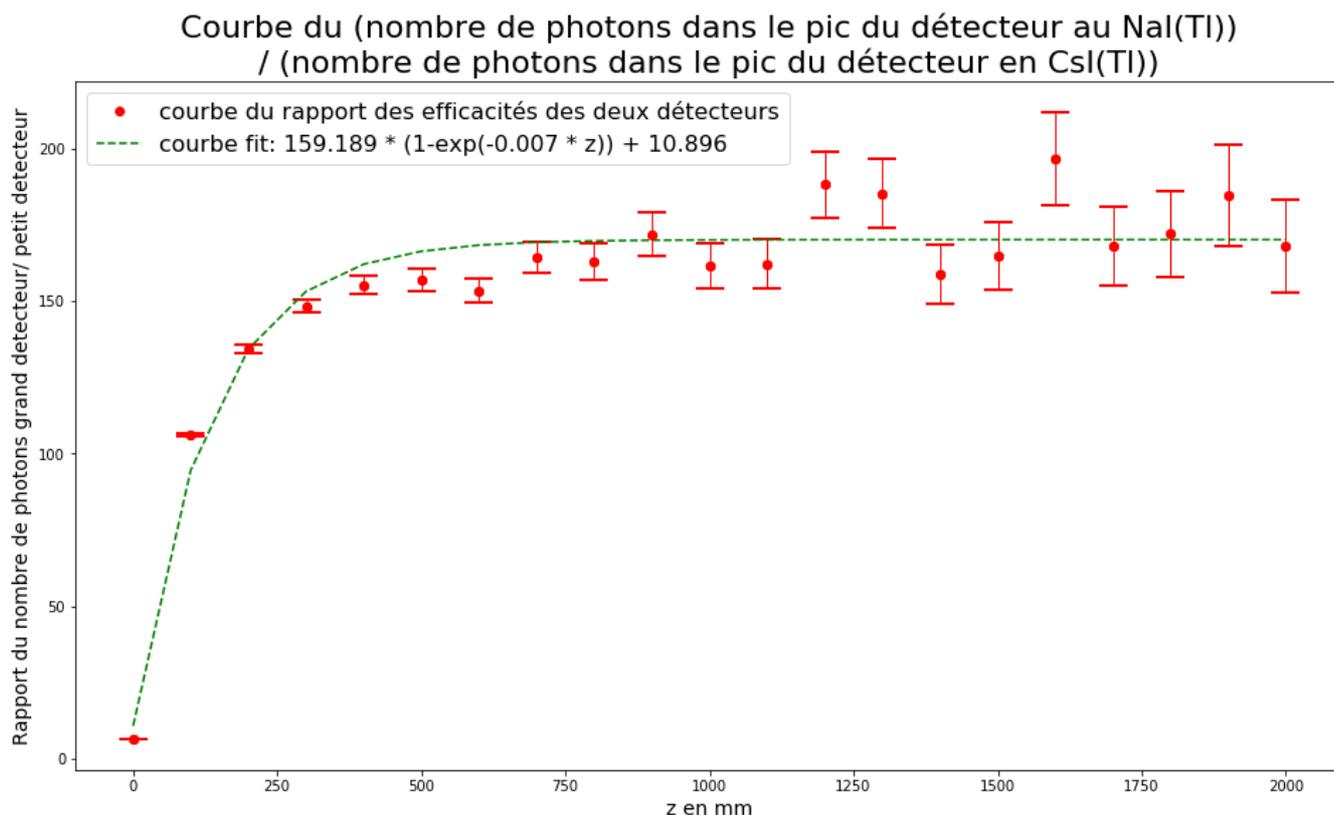
La **figure 8** montre les courbes obtenues lorsque nous traçons l'efficacité absolue des détecteurs NaI(Tl) et CsI(Tl) en fonction de la distance source-détecteur. On observe, comme attendu, un très grand écart de valeur entre le détecteur NaI(Tl) et CsI(Tl) qui s'explique en grande partie par la différence de volume des deux détecteurs. Lorsque l'on observe les courbes dans le détail, on peut deviner une forme en $\frac{1}{z^2}$ pour les courbes. Ceci est confirmé par l'équation de la courbe obtenue par une méthode d'ajustement (voir les courbes 'fit' **figure 8**). L'équation obtenue pour le détecteur au NaI(Tl) est $55.568x^{-1,812}$ et pour CsI(Tl) $1.014x^{-1,982}$.

Figure 8 : Courbes d'efficacité absolue en fonction de la distance pour le cristal de NaI(Tl) et le cristal de CsI(Tl) (il est important de noter que par soucis de visibilité des courbes les efficacités obtenues en $z = 0$ mm et $z = 100$ mm ont été omises.)



Nous allons maintenant chercher à quantifier la différence qui existe entre notre système de mesure par drone ultra-léger (CsI) et un système plus classique (NaI). Pour ce faire nous allons effectuer un rapport point à point de la valeur de l'efficacité du scintillateur NaI(Tl) par la valeur de l'efficacité du scintillateur CsI(Tl) en fonction de la distance (**figure 9**).

Figure 9 : Rapport du nombre de photons détectés dans le pic d'absorption totale (entre NaI et CsI, ajusté par une fonction du type $a*(1-\exp(-b*z))+c$)



Les incertitudes ont été calculées à partir des erreurs poissoniennes sur le nombre de photons détectés dans chaque détecteur pour les différentes valeurs de distances.

Afin de lisser la courbe obtenue nous proposons le modèle d'ajustement suivant : $a * (1 - \exp(-b * z)) + c$. Ce modèle n'a pas de base scientifique, mais il semble bien correspondre à l'allure de la distribution obtenue par simulation.

Avant de discuter des résultats, nous avons cherché à vérifier si les valeurs du rapport d'efficacité obtenues par simulation semblent cohérentes avec les caractéristiques des deux détecteurs (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Valeurs physiques caractéristiques des détecteurs NaI(Tl) et CsI(Tl)

	Densité g/cm ³	Hauteur (cm)	Rayon/longueurs (cm)	Volume (cm ³)	Formules du volume
NaI(Tl):	3,67	7,62	7,62	347,5	$3,82*3,81*PI*7,62$
CsI(Tl):	4,51	5	0,6	1,8	$0,6*0,6*5$

	Rapport des densités (1)		Rapport des rayons/longueurs (2)	Rapport volume	Rapport volume * rapport densité	(1)*(2)
NaI/CsI	0,81		12,70	193,06	157,10	10,3346
CsI/NaI	1,23		0,08	0,01	0,01	0,0968

Nous rappelons tout d'abord la formule suivante :

$$\text{Efficacité absolue} = \text{efficacité géométrique} * \text{efficacité intrinsèque}$$

Au contact nous pouvons considérer que le terme géométrique est approximé par le rapport de la longueur d'interaction moyenne (environ égale à l'épaisseur du cristal) et que l'efficacité intrinsèque est approximée par le rapport des densités. Nous obtenons ainsi un rapport d'efficacité "théorique" de l'ordre de 10 au contact. Nous supposons que proche du contact la surface du détecteur remplit l'espace sur un angle solide de 2π .

A grande distance nous pouvons plutôt considérer que le terme géométrique est approximé par le rapport des volumes et le terme intrinsèque par le rapport des densités des deux cristaux. Nous obtenons alors un rapport d'efficacité "théorique" de l'ordre de 160 à grandes distances.

Cela n'est qu'un calcul approximatif (un calcul plus précis doit faire apparaître le coefficient d'atténuation des deux matériaux et l'angle solide de détection), mais les valeurs obtenues sont en bon accord avec les résultats de simulation.

Sur la **figure 9**, à faibles distances (de 0 à 500 mm), nous observons de très fortes variations du rapport des efficacités absolues. Cela veut dire que l'efficacité absolue du détecteur NaI(Tl) augmente plus fortement que celle du CsI(Tl). Cela s'explique par le facteur géométrique, la surface de NaI(Tl) étant très supérieure à la surface de CsI(Tl). Ce qui est également très intéressant à observer sur cette courbe est l'apparition d'un palier après 700 mm. Nous pouvons considérer le rapport constant après cette valeur. Cela signifie qu'au dessus d'une altitude de vol de 700 mm la différence d'efficacité entre un système de mesure par drone « classique » (NaI) et un système ultra-léger (CsI RIUM) ne varie plus qu'elle que soit l'altitude de vol.

Sur les deux courbes de la **figure 8**, on voit que l'efficacité (et donc le nombre de photons dans le pic d'absorption totale) baisse fortement avec l'altitude de vol (suivant une loi en $1/d^2$).

Pour information l'efficacité absolue à 1 mètre est de $1.19 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-8}$ pour le détecteur RIUM, contre $1.92 \cdot 10^{-4} \pm 7 \cdot 10^{-7}$ pour un détecteur NaI 3 "x3".

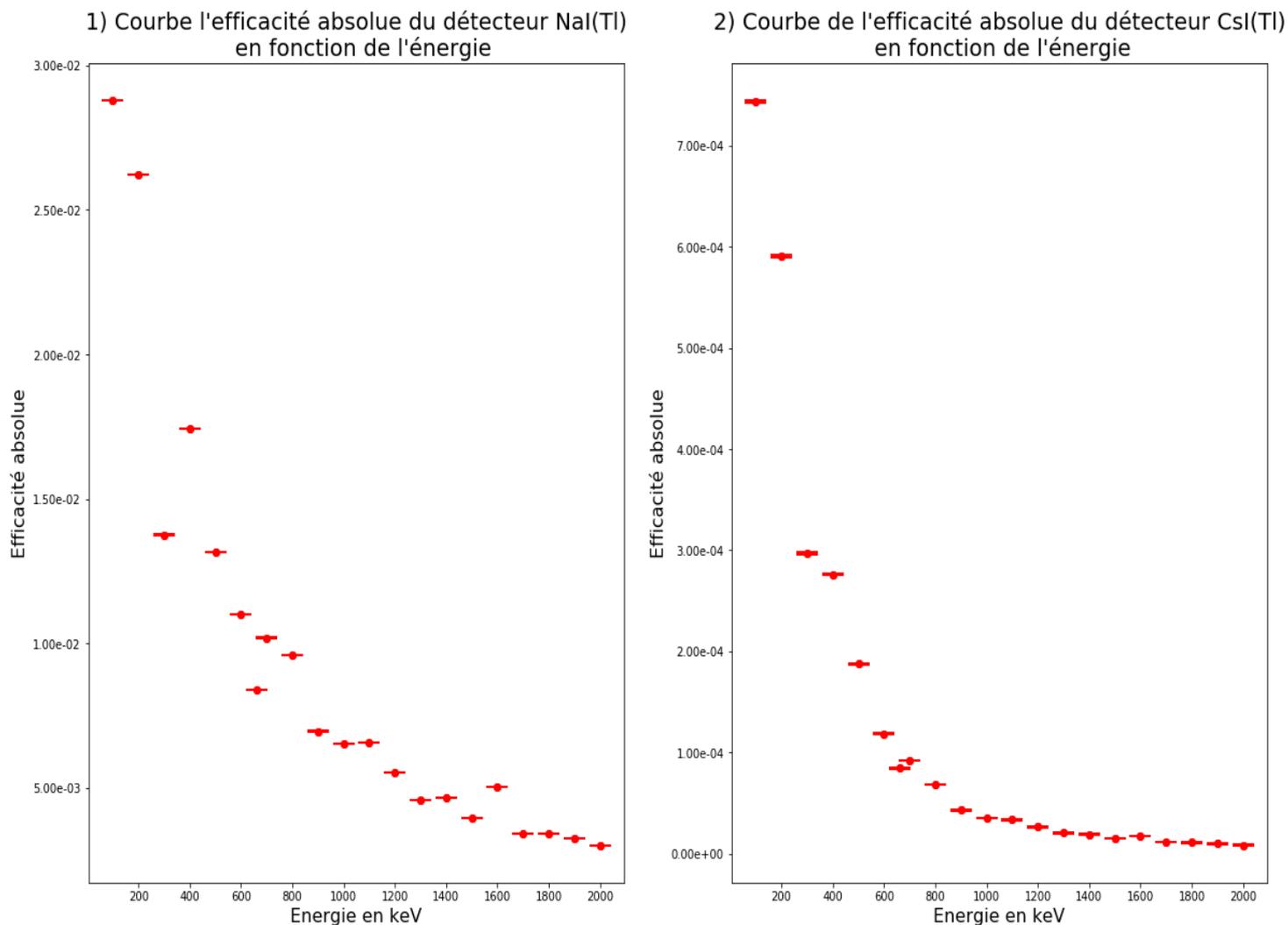
4) Efficacité absolue en fonction de l'énergie

Dans cette partie nous cherchons à observer l'effet de l'énergie sur l'efficacité absolue des deux détecteurs. La simulation se fait sous GATE à l'aide d'une source de ^{137}Cs émettant $5 \cdot 10^8$ photons. Dans la simulation GATE décrite précédemment, nous avons placé les détecteurs NaI et CsI à 10 cm de la source. Dans cette simulation, nous avons fait uniquement varier l'énergie d'une source par pas de 100 keV (de 100 keV à 2 MeV), qui est le domaine d'utilisation préconisé pour le détecteur RIUM (cf. **tableau 1**).

Sur les deux courbes de la **figure 10**, on observe une décroissance rapide de l'efficacité absolue en fonction de l'énergie. Plus l'énergie est élevée, moins la probabilité d'interaction est importante.

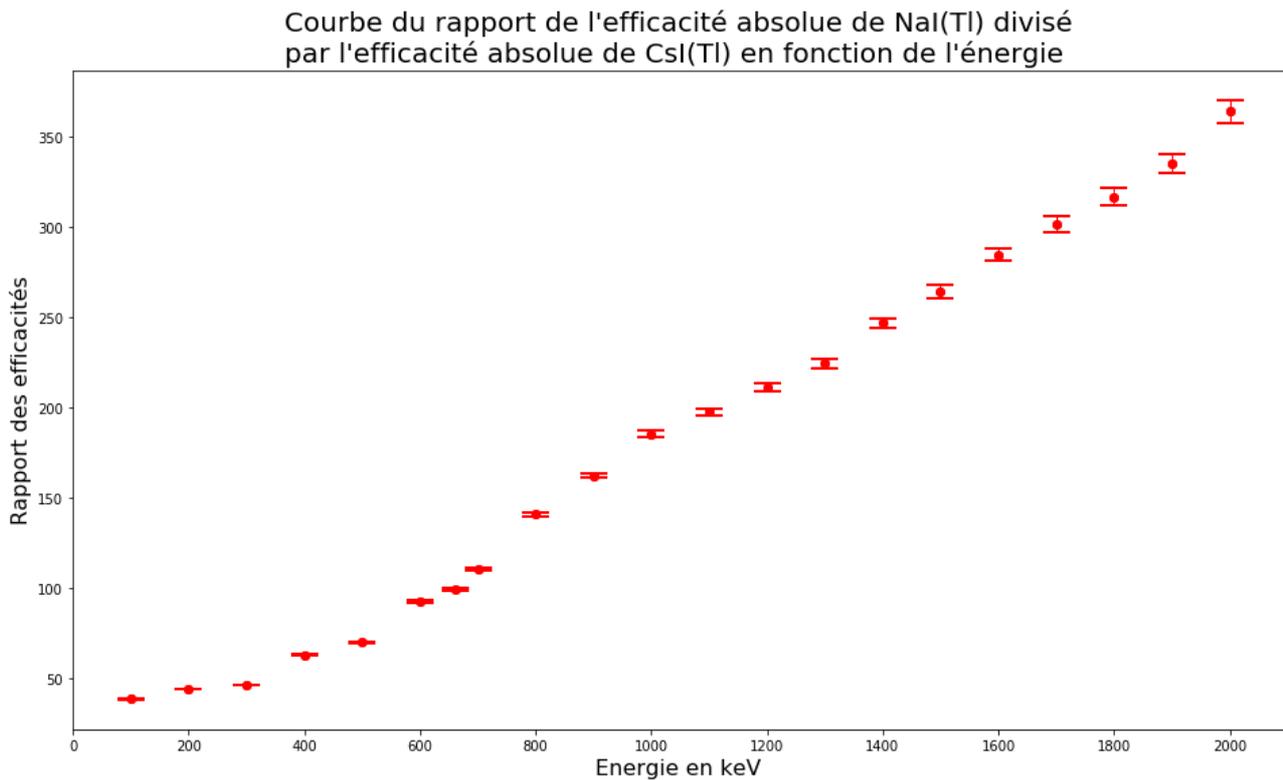
Pouvoir différencier les énergies des rayonnements émis par les contaminants radioactifs est crucial pour identifier les zones de contamination et les risques associés afin de sécuriser au maximum les opérateurs sur le terrain.

Figure 10 : Courbes de l'efficacité absolue en fonction de l'énergie pour 1) le scintillateur en NaI et 2) le scintillateur en CsI(Tl)



Tout comme pour l'étude en fonction de la distance, nous avons calculé un rapport point à point entre les valeurs d'efficacité absolue entre NaI(Tl) et CsI(Tl) afin de comparer les deux cristaux (**figure 11**). Les valeurs relativement faibles d'efficacité absolue sur la **figure 10.2** s'expliquent par les faibles dimensions du détecteur au CsI(Tl).

Figure 11 : Courbe du rapport des efficacités absolues NaI(Tl)/CsI(Tl) en fonction de l'énergie



La **figure 11** présente une courbe quasiment linéaire. La courbe est strictement croissante, cela signifie que le rapport entre les efficacités des détecteurs NaI et CsI augmente avec l'énergie. Cette courbe souligne la dépendance très forte en énergie des deux scintillateurs étudiés, avec une dépendance plus importante pour le CsI à cause de son faible volume de détection. Nous retrouvons la valeur 110 du rapport en 662 keV (à $z = 100$ mm) du point précédent (**figure 9**), alors que le rapport est près de 3 fois plus important à 2 MeV.

Les mesures radiologiques à l'aide du système ultra-léger drone-détecteur seront donc très dépendantes de l'énergie de la source mesurée.

5) Evaluation du temps de mesure par drone

Le temps nécessaire pour faire une mesure est une donnée cruciale à maîtriser à cause de l'autonomie de vol du drone. Il y a une corrélation directe entre le temps de la mesure et le nombre d'évènements détectés, et donc entre le temps et la précision des spectres en énergie.

En nous plaçant à une altitude de 1m, nous avons cherché à calculer analytiquement l'erreur sur le nombre de photons détectés en fonction du temps de mesure.

Pour ce calcul analytique, nous avons utilisé la valeur d'efficacité obtenue dans les études précédentes (soit une efficacité absolue à 1m de $1.19 \cdot 10^{-6} \pm 5.10^{-8}$).

La **figure 12** présente l'erreur de mesure obtenue en fonction du temps de comptage pour une source de Cs-137 de forte activité (300 MBq) et de faible activité (300 kBq). La **figure 13** présente les activités mesurées avec une erreur de 30% en fonction du temps de comptage pour des activités d'ordre 10^7 et 10^5 Bq respectivement.

Figure 12 : Erreurs de mesures en fonction du temps de comptage pour une source de ^{137}Cs de 300 MBq 1) et 300 kBq 2)

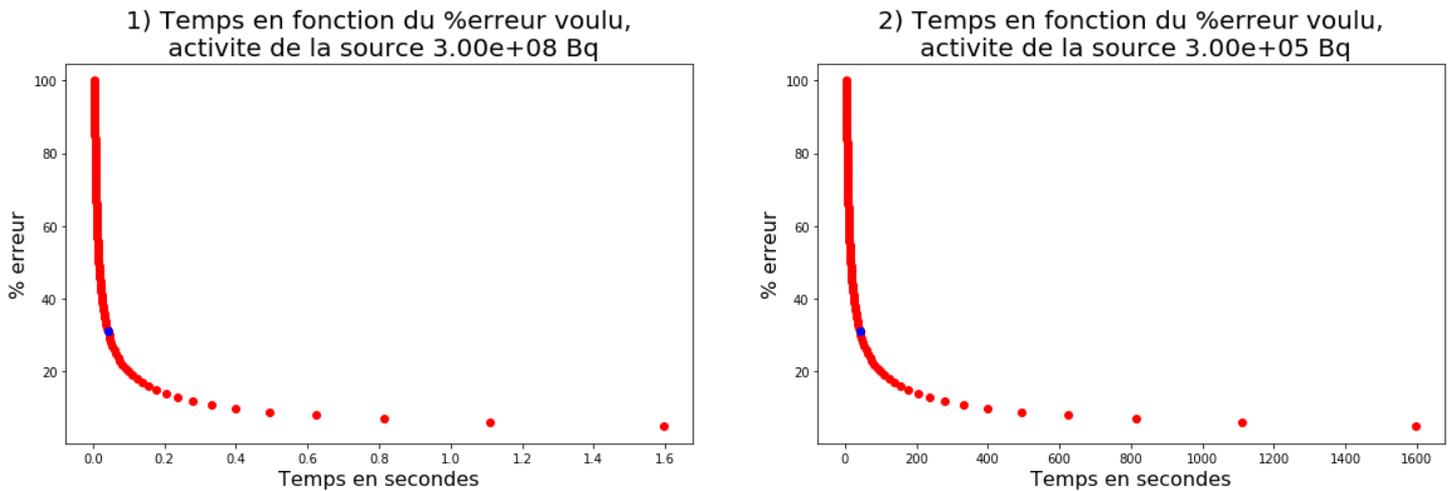
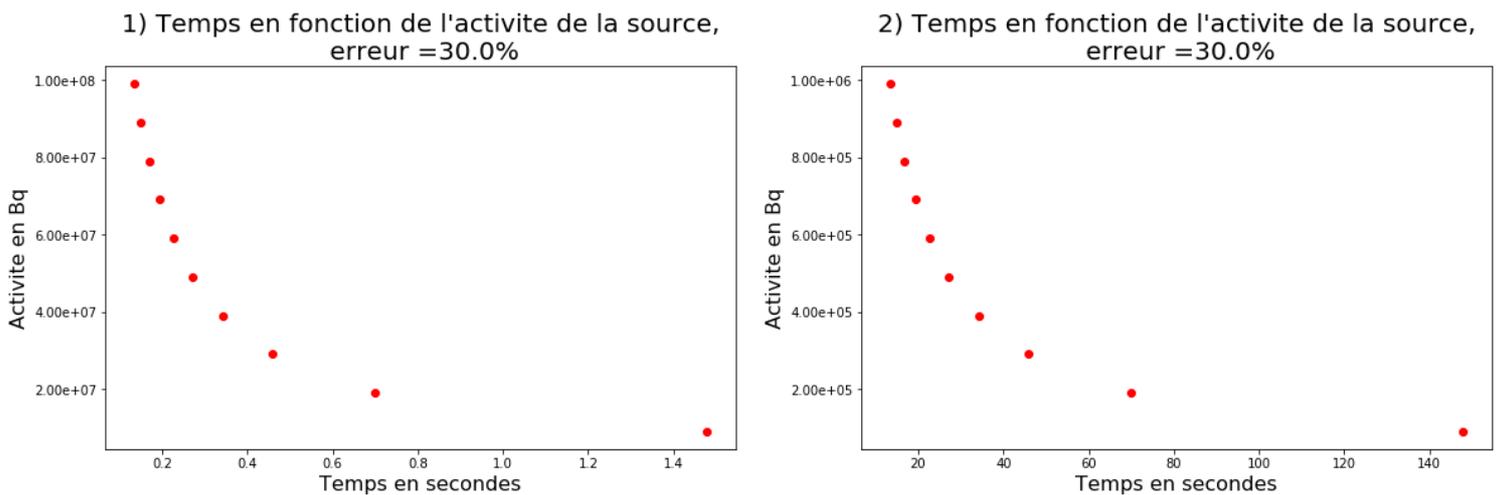


Figure 13 : Activités mesurées avec une erreur de 30% en fonction du temps de comptage pour deux gammes d’activités différentes (ordre de grandeur 1) dizaine de méga becquerels et 2) centaine de kilo becquerels).



Grâce aux courbes obtenues, nous constatons que l’utilisation du détecteur RIUM pour des mesures par drone est compatible avec une autonomie de l’ordre de 15-20 minutes. Le type de mesures dépend en revanche de l’activité de la contamination radioactive.

Par exemples pour une erreur voulue de 30% en bleu sur les courbes (**figure 12**):

- Cas 1) courbe 1) à supposer une durée de vol de 15 minutes, une source d’activité 300 MBq, il est possible de faire $15 \cdot 60 / (42 \cdot 10^{-3}) = 20000$ images pour une source de 300MBq.
- Cas 2) courbe 2) à supposer une durée de vol de 15 minutes, une source d’activité 300 kBq, il est possible de faire $15 \cdot 60 / 42 = 20$ images seulement avec une source de 300 kBq.

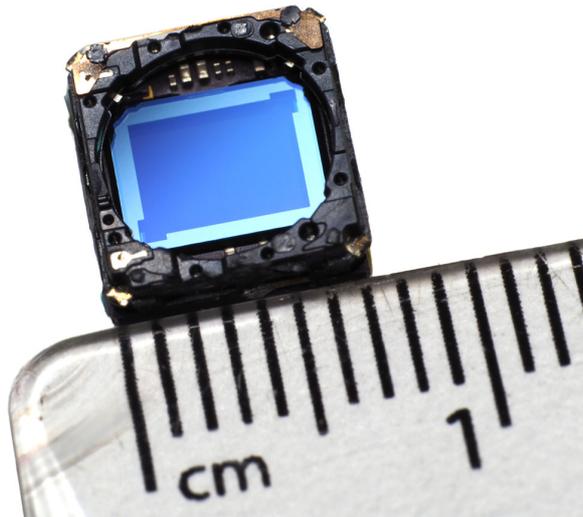
Nous pouvons constater un rapport de 1000 entre ces deux cas.

En considérant que les spectres en énergie sont les paramètres d’entrés d’algorithmes d’analyse statistique notre travail démontre qu’il sera possible d’effectuer une cartographie précise pour des fortes activités et une triangulation de la position des sources dans le cas d’activités plus faibles.

III. Etude du détecteur CMOS :

Dans une deuxième partie du stage, nous avons cherché à vérifier si les capteurs CMOS commerciaux décrits en I)2 sont compatibles pour des mesures effectués par drone. Nous avons en particulier étudié les possibilités de discrimination en énergie des rayonnements.

Figure 14 : Image sur un ordre de grandeur d'un capteur CMOS en centimètres [20]



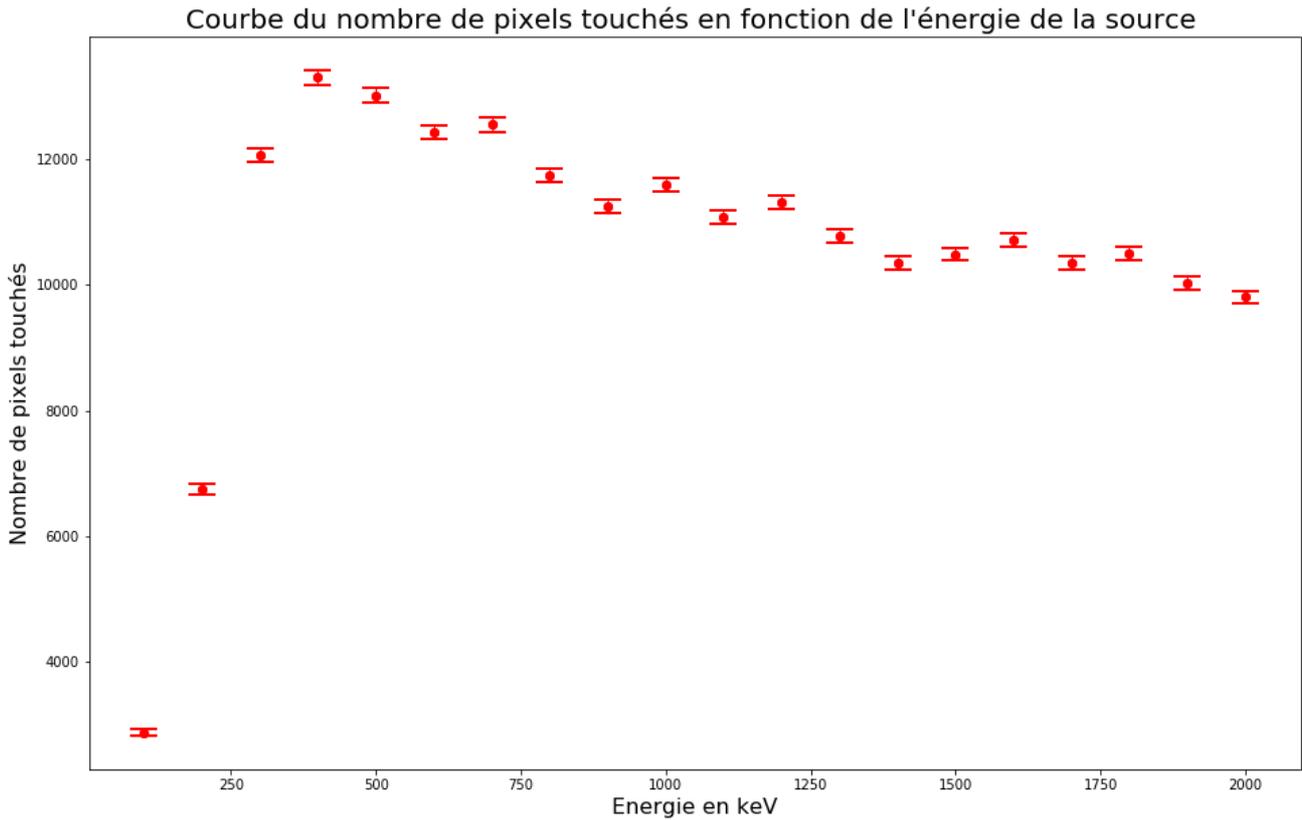
1) Etude énergétique d'un capteur CMOS

Pour ce travail, une modélisation sous GATE a été réalisée sous la forme d'une nappe de silicium (SiO_2) de dimensions $2 \times 2 \times 0.1$ mm de résolution 200:200:1 pour obtenir des pixels de $10 \mu\text{m}$. Les dimensions actuelles de certains pixels peuvent atteindre le $1\text{-}2 \mu\text{m}$ [20] pour les capteurs de téléphone et de l'ordre de la dizaine de micro mètre pour des appareils photos dont la nappe est bien plus grande (environ 2×3 cm).

Une source de 6.10^7 photons est placée à 10 cm de distance du CMOS. Elle irradie uniquement le pixel central afin de simplifier l'étude de la forme des distributions de pixels touchés (clusters) en fonction de l'énergie des rayonnements.

Nous avons étudié dans un premier temps le nombre de pixels touchés par le dépôt d'énergie d'un photon dans le capteur en fonction de l'énergie du photon (figure 15).

Figure 15 : Courbe du nombre de pixels touchés en fonction de l'énergie du faisceau de photons



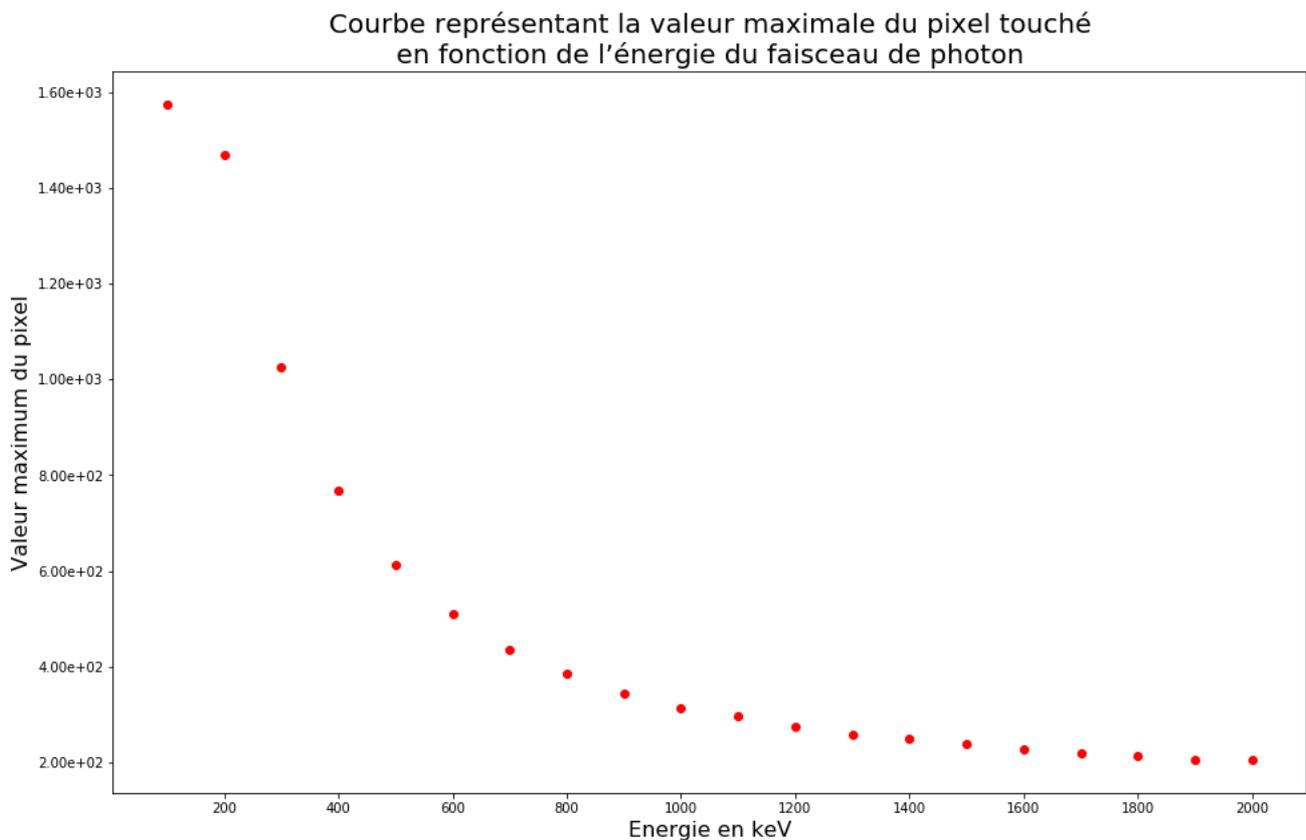
La courbe obtenue sur la **figure 15** montre qu'il est difficile de discriminer l'énergie des photons uniquement via le nombre de pixels touchés. En effet la courbe a un nombre de pixels touchés commun pour différentes énergies (par exemple 300 keV et entre 700-800 keV). Nous avons donc cherché une méthode complémentaire à celle-ci pour discriminer l'énergie.

Même si la valeur réelle du signal (charge) collecté par chaque pixel d'énergie n'est pas directement disponible dans la simulation, nous pouvons étudier la valeur de l'énergie déposée dans chaque pixel. Nous avons donc utilisé la valeur de l'énergie maximale déposée en fonction de l'énergie des photons pour obtenir la **figure 16**.

La courbe obtenue étant strictement décroissante, la discrimination en énergie est possible avec ce paramètre. Il est cependant important de noter que :

- 1- En fonction du nombre de pixels touchés par un unique photon, l'énergie se répartie de manière **quasi** uniforme dans les pixels (distribution gaussienne autour du pixel central)
- 2- Si le photon n'arrive pas à la perpendiculaire (avec un angle), la réponse peut être différente de celle présentée dans notre étude
- 3- Le résultat obtenu est l'accumulation de l'énergie déposée par 60 millions de photons

Figure 16 : Courbe représentant la valeur maximale du pixel touché en fonction de l'énergie du faisceau de photon

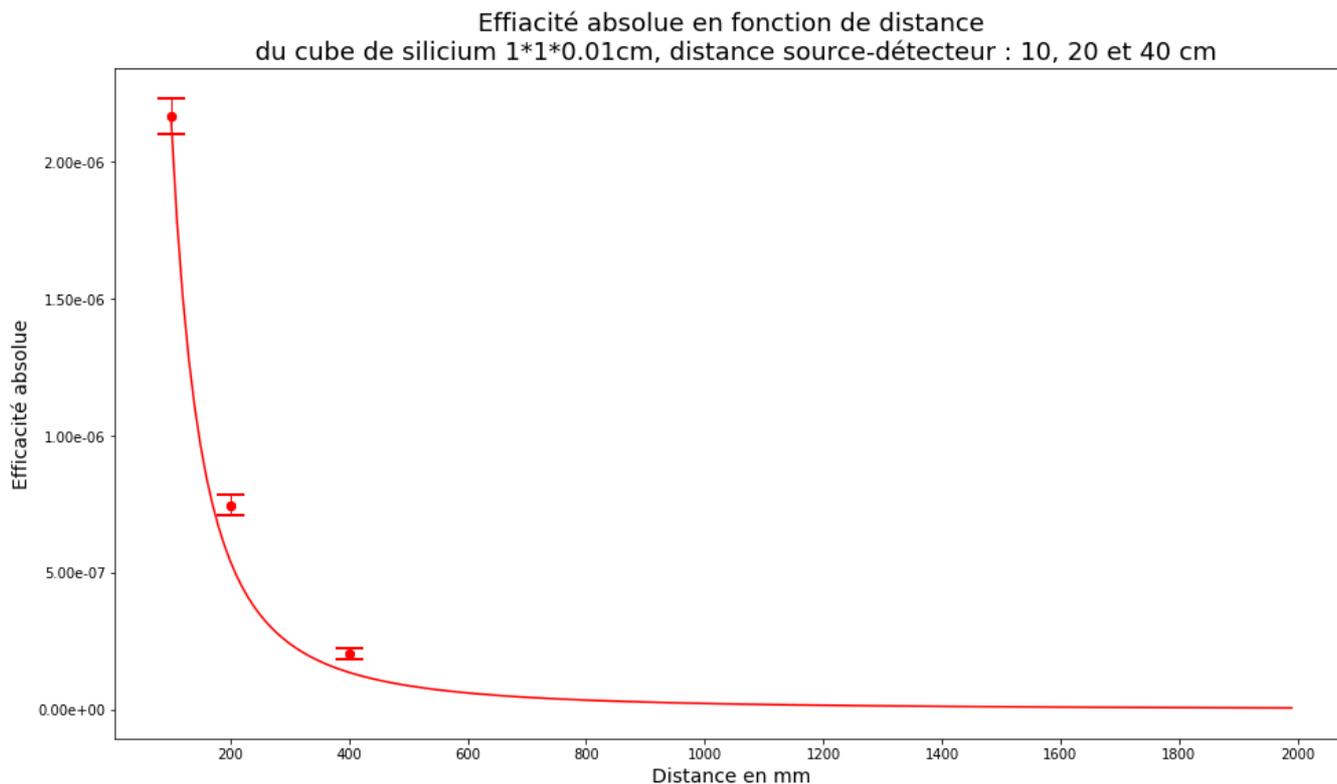


Après ces considérations, avec les algorithmes de détections adéquats et un étalonnage en énergie du CMOS, la simulation montre qu'il est possible de discriminer les énergies et donc d'obtenir des informations sur le type de source. Il reste à savoir si le temps de mesure est compatible avec l'utilisation d'un drone et de calculer pour se faire l'efficacité absolue du CMOS.

2) Etude de l'efficacité absolue d'un capteur CMOS

Cette seconde simulation se fait à l'aide d'un cube de silicium (SiO_2) de dimension $1*1*0.01$ cm. Une source de césium-137 émettant 500 millions de photons est placée à 10 cm de distance du CMOS. On utilise ensuite l'approximation en $\frac{1}{z^2}$ pour tracer la courbe de l'efficacité en fonction de la distance à l'aide du point calculé à 10cm. L'objectif est d'avoir un ordre de grandeur de l'efficacité du capteur en fonction de la distance. Le résultat de simulation est présent sur la **figure 17**. Afin de vérifier la cohérence du modèle deux autres points ont été ajoutés pour $z = 20$ cm et $z = 40$ cm.

Figure 17 : Efficacité absolue (énergie de photon de 662 keV) d'un cube de silicium de volume $1 \times 1 \times 0.01 \text{ cm}^3$ en fonction de la distance



Sur la courbe de la **figure 17**, nous pouvons observer une efficacité absolue à 1m de l'ordre de 10^{-8} ($1.79 \cdot 10^{-8} \pm 6 \cdot 10^{-9}$), en comparaison nous avons des valeurs d'efficacité absolue de l'ordre de 10^{-4} pour le détecteur au NaI et de 10^{-6} pour le détecteur au CsI obtenues précédemment.

Pour une source d'activité équivalente, il faudra donc 100 fois plus de temps avec le capteur CMOS pour obtenir une mesure de précision équivalente à celle obtenue avec le CsI. Il ne faut cependant pas négliger le facteur coût et légèreté des capteurs CMOS, ainsi que la possibilité d'augmenter l'efficacité absolue en réalisant une matrice de capteur (une matrice 10×10 permettrait d'obtenir une efficacité comparable à celle du CsI RIUM).

Conclusion et perspective :

Un système drone-détecteur ultra-léger (< 800 grammes) peut être une alternative intéressante au système aéroporté plus lourd, tant au niveau de la praticité que du coût de son utilisation. Nous avons étudié au cours de ce stage deux types de détecteurs pouvant être transportés par des drones de ce type.

Pour le détecteur RIUM (scintillateur CsI), les résultats d'efficacité absolue sont plutôt encourageants. Il devrait être possible de mesurer à 1 mètre de l'ordre de 500 photons en 80 minutes environ avec une source de 300kBq disponible au laboratoire (rappelons que c'est un détecteur de très petite taille, 50*6*6 mm). Pour des activités plus importantes (de l'ordre de 100 MBq), il semble même envisageable de réaliser des cartographies de la contamination en moins de 15 minutes (autonomie typique d'un drone léger).

Le capteur CMOS semble lui uniquement réservé à des mesures de très fortes activités. Son efficacité est 100 fois plus faible que celle du détecteur au CsI(Tl). Cette faible efficacité pourrait cependant être compensée par l'utilisation d'une matrice de capteurs.

Bien que ce rapport donne une première idée des performances de mesures de ces deux détecteurs, il faut tout de même rester prudent. Les valeurs présentées dans ce rapport sont des valeurs obtenues par simulation, il y a donc plusieurs points importants à étudier dans la suite de ce travail. Aucune étude sur l'incidence du bruit sur les mesures n'a été faite. L'utilisation d'algorithmes de filtrage sera peut-être nécessaire sur des mesures réelles afin d'obtenir des spectres en énergie, tel que présentés, facilement exploitables. Quant à l'étude sur le détecteur CMOS, une étude plus poussée doit prendre en compte les phénomènes aux interfaces des pixels notamment lorsqu'un photon touche un des pixels périphérique ou plusieurs pixels en même temps. L'usure du matériel face à des énergies et activités fortes est à prendre en compte également pour une utilisation dans la durée. Tous ces effets seront étudiés au cours de mesures expérimentales en laboratoires.

ANNEXE 1: Interactions rayonnement-matière

Les rayons gamma interagissent principalement de 3 manières, par effets photoélectrique, par effets Compton (diffusion) et par production de paire.

Ces processus permettent de transférer totalement ou partiellement l'énergie du photon au détecteur par émission d'électrons. En fonction du processus soit le photon disparaît complètement soit il est dévié.

• Effet photoélectrique :

Un photon incident d'énergie $E_p = h\nu$ est totalement absorbé par un atome (avec h la constante de Plank en J.s et ν la fréquence en s^{-1}). En résulte l'éjection d'un électron d'énergie $E = E_l - h\nu$ (avec E_l l'énergie de liaison de l'électron à l'atome).

Figure 1a : Image d'un photon incident faisant un effet photoélectrique [21]

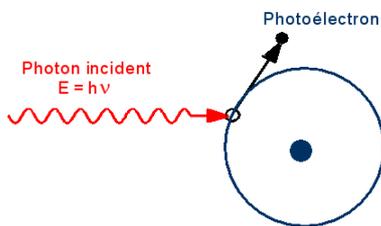
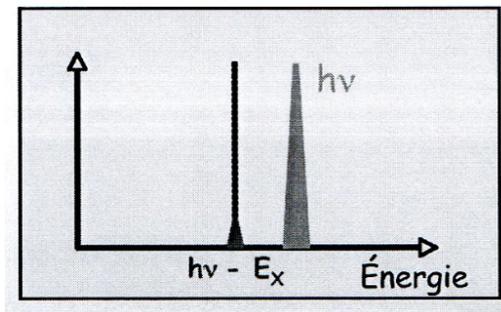


Figure 1b : Spectre en énergie résultant d'un effet photoélectrique [22].



• Effet Compton :

Appelée aussi diffusion Compton, un photon interagit directement avec un électron de la couche externe de l'atome étudié.

C'est un des effets prédominants pour des valeurs d'énergie proche de celle des sources radioisotopiques (de quelque keV à une centaine de MeV). Une partie de l'énergie du photon est cédée à l'électron, le photon et l'électron sont déviés de leur trajectoire initiale. Il est possible d'observer l'effet Compton **figure 2a** et son résultat sur un spectre en énergie **figure 2b**.

Figure 2a : Photon incident ayant un effet Compton [18]

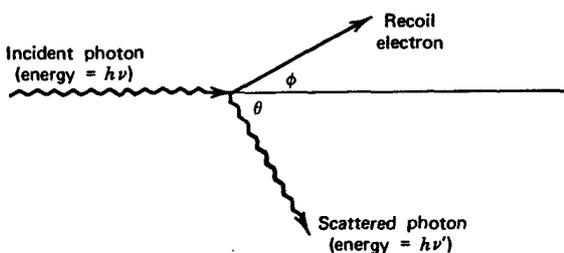
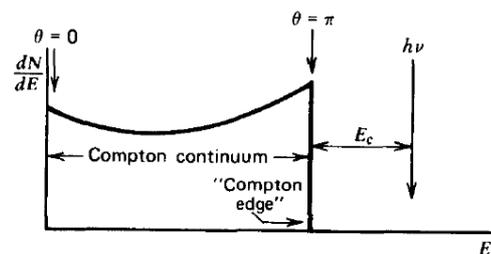


Figure 2b : Spectre en énergie résultant d'une diffusion Compton [18]



On peut montrer que :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{\left(1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos(\theta))\right)}$$

Avec m_0c^2 l'énergie au repos de l'électron touché et θ l'angle de diffusion

Ainsi pour de faibles énergies l'angle de diffusion est faible.

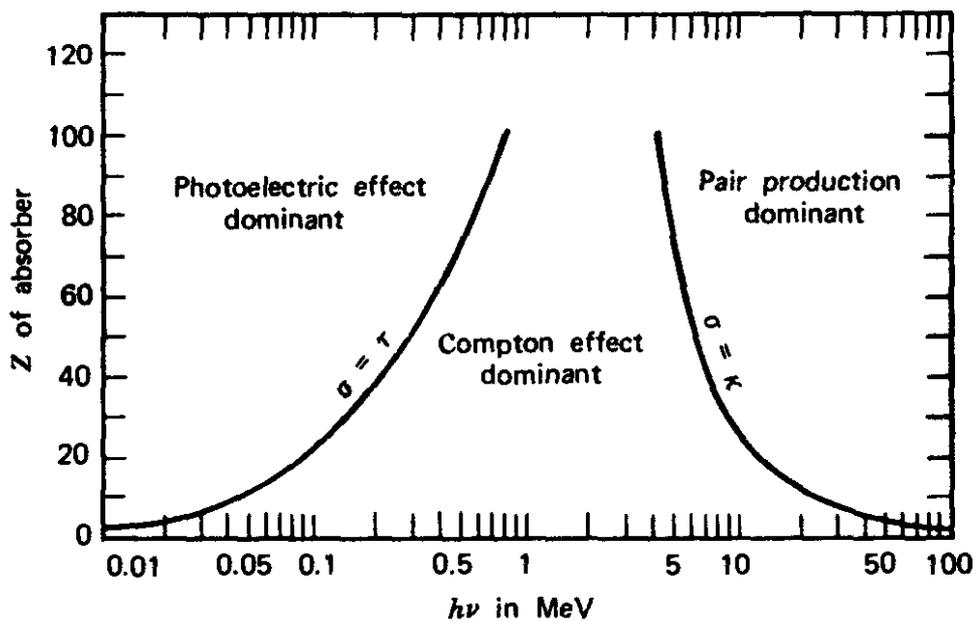
- **Création de paire :**

Cette interaction se fait uniquement pour des énergies supérieures ou égales à $E=2m_0c^2=1.022$ MeV. Plus l'énergie du photon incident est importante plus la probabilité d'effet de création de paire augmente. Cette interaction se fait dans le noyau, le photon est remplacé par une paire d'électron-positron. Tout excès d'énergie (>1.022 MeV) est converti en énergie cinétique. Il y a de grande chance que le positron se recombine à courte portée à faible énergie.

Globalement cette interaction ne va pas trop nous intéresser pour notre projet.

Pour résumé voici les interactions possibles en fonction du Z du matériau et de l'énergie (**figure 3**).

Figure 3 : Importance relative des 3 types d'interactions impliquant des rayons gamma. La figure présente l'effet du nombre de proton du noyau en fonction de l'énergie du photon (source indirecte : [18])



Bibliographie

- [1] A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J.F. Burkhart, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas et T.J. Yasunari, «Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Daiichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition», *Chem. Phys.*, vol. 12, 2313-2343, 2012. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2313-2012>
- [2] Masamichi CHINO, Hiromasa NAKAYAMA, Haruyasu NAGAI, Hiroaki TERADA, Genki KATATA et Hiromi YAMAZAWA, «Preliminary Estimation of Release Amounts of 131I and 137Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere», *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 48, n° 7, 2011. <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711799>
- [3] Government of Japan, «The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent : Executive summary», 2012.
- [4] P.G. Martin, O.D. Payton, J.S. Fardoulis, D.A. Richards, Y. Yamashiki et T.B. Scott, «Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation», *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 151, n°58-63, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.007>
- [5] Service-public français, «Drone : règles de pilotage à respecter», 02 décembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34630>.
- [6] J.W. MacFarlane, O.D. Payton, A.C. Keatley, G.P.T. Scott, H. Pullin, R.A. Crane, M. Smilion, I. Popescu, V. Curlea et T.B. Scott, «Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies», *Journal of Environmental*, vol. 136, n° 127-130, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.008>
- [7] K. Boudergui, F. Carrel, T. Domenech, N. Guénard, J.-P. Poli, A. Ravet, V. Schoepff et R. Woo, «Development of a Drone Equipped with Optimized Sensors for Nuclear and Radiological Risk Characterization», *2nd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, 2011. <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2011.6172936>
- [8] Saint-Gobain Ceramics & Plastics Inc., 2007-2016. [En ligne]. Available: https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet_69771.pdf.
- [9] Baumer: Passion for sensors, [En ligne]. Available: <https://www.baumer.com/fr/fr/service-assistance/savoir-faire/fonctionnement/mode-de-fonctionnement-et-caracteristiques-des-capteurs-cmos/a/EMVA1288>.
- [10] Canon-europe, 2017. [En ligne]. Available: https://cpn.canon-europe.com/content/education/infobank/capturing_the_image/ccd_and_cmos_sensors.do.
- [11] Joshua J. Cogliati, Kurt W. Derr et Jayson Wharton, «Using CMOS Sensors in a Cellphone for Gamma Detection and Classification», *physics.ins-det*, 7 Jan 2014, [arXiv:1401.0766](https://arxiv.org/abs/1401.0766).
- [12] Olivier Van Hoey, Alexia Salavrakos, Antonio Marques, Alexandre Nagao, Ruben Willems, Filip Vanhavere, Vanessa Cauwels et Luana F Nascimento, «Radiation dosimetry properties of smartphone CMOS sensors», 09/05/2015 <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv352>.
- [13] ©Icohup, 2018. [En ligne]. Available: <https://www.icohup.com/pro/>. Documentation capteur RIUM : <https://www.icohup.com/wp-content/uploads/2018/10/Icohup-B2B-FR.pdf>
- [14] Gate Collaboration. [En ligne]. Available: <http://www.opengatecollaboration.org/home>.
- [15] Geant4 Collaboration. [En ligne]. Available: <https://geant4.web.cern.ch/>.
- [16] C. Colle, C. Adam, J. Garnier-Laplace et S. Roussel-Debet, «IRSN : FICHE RADIONUCLÉIDE Césium 137 et environnement», 30/07/2005. [En ligne]. Available: https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/Documents/environnement/Cesium_Cs137_V4.pdf.
- [17] Inrs, Ap-HP, CEA, CH de Poissy-St-Germain, CNRS, INSERM et la DGT, 06/2014. [En ligne]. Available: https://www.irsn.fr/FR/professionnels_sante/documentation/Documents/IRSN-fiche_cesium137.pdf.
- [18] G. F. Knoll, «Radiation Detection and Measurement», third edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [19] John D. Valentine, William W. Moses, Stephen E. Derenzo, David K. Wehe and Glenn F. Knoll, «Temperature dependence of CsI(Tl) gamma-ray excited», vol. 325, n°1-2, pp.147-157, 01/02/1993 [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)91015-F](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)91015-F).
- [20] J. Waller, «Complete Guide To Image Sensor Pixel Size», 02/08/2016. [En ligne]. Available: <https://www.ephotozine.com/article/complete-guide-to-image-sensor-pixel-size-29652>.
- [21] A. Pluquet, «Interactions rayonnement-matière», [En ligne]. Available: http://www.nucleide.org/Gamma_spectro/interactions.htm.
- [22] L. Patrice, *Cours M2 Pridi: interaction rayonnement matière*, 2019/2020 .

Abstract

Nuclear power plant park especially in France are aging. To prevent any problem a need to dismantling is being discussing by the authorities. Accounting the Fukushima power plant incident the process is accelerating. As an example Fessenheim nuclear power plant is closing, it is the oldest one in France (42 years old). An ultra low weigh gamma spectrometry drone system may help this process mainly to find radioactive contamination area. This kind of system can also be useful in case of nuclear accidents. The goal is to develop a low cost system that everyone could use without any forming or any law infringement (in France a license is necessary to pilot drone with a weigh higher than 800 grams).

The main problem with an ultra-light system is the detection efficiency. To assess the performance of detectors compatible with the payload of light drones available on the market, we have made a computer simulation² study of two detectors: a scintillator in cesium iodine (50*6*6mm) doped with thulium and a CMOS sensor (2*2*0.01mm / 1*1*.0.01cm). We have made a comparative study of NaI(Tl) (3'3'3') (which is the reference detector) with the CsI(Tl) and the CMOS detector. The study is about absolute efficiency difference as a function of the distance and the energy of the radioactive source. For a cesium-137 source at 1 meter from the ground, we got an absolute efficiency of $1.921 \cdot 10^{-4} \pm 7.10^{-7}$, $1.19 \cdot 10^{-6} \pm 5.10^{-8}$, $1.79 \cdot 10^{-8} \pm 6.10^{-9}$, for NaI(Tl), CsI(Tl) and CMOS detectors respectively. We state that a 1 meter distance of the drone from the ground is an acceptable option. With a mean time flight of 15 minutes, the CsI(Tl) detector should be able to detect nuclear sources with low activity or help doing a map of radioisotopes in case of high activity. The CMOS detector will only be use to detect dangerous zones for the operators.

² Because of the COVID-19 pandemic the practical study was impossible.