
Chambre à brouillard refroidie par modules Peltier: De la conception à la détection de particules

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Raphaël Mosca et Rodolphe Valicon. Ils ont fait preuve d'une très grande ingéniosité et débrouillardise lors de la réalisation de la chambre à brouillard. Je les remercie également de leur participation à la réalisation de la vidéo de présentation du dispositif.

Table des matières

1.1	Introduction	3
1.2	Explications théoriques complètes	3
1.2.1	Particules ionisantes	4
1.2.2	Milieu d’interaction	
1.2.3	Détection	6
1.3	Liste du matériel	8
1.4	Montage de l’expérience	e
1.4.1	Générer des particules	e
1.4.2	Contenir le brouillard de manière étanche	e
1.4.3	Chauffer la face supérieure	10
1.4.4	Refroidir la face inférieure	11
1.4.5	Observer les traces à l’oeil nu	12
1.5	Mode opératoire	13
1.6	Résultats expérimentaux	13
1.6.1	Particules observées	13
1.7	Suggestions de questionnement pour les élèves	1
1.8	Conclusion	16

1.1 Introduction

Le physicien Charles Thomson Rees Wilson a utilisé un état de vapeur métastable pour détecter le passage de particules à l'oeil nu : il s'agissait de la première chambre à brouillard. Cette invention lui a valu le prix Nobel de Physique en 1927. Cette invention est d'une importance capitale historiquement car elle a permis de découvrir de nouvelles particules et de démontrer l'existence de certaines interactions. Par exemple, à elle seule, la chambre à brouillard a permis de démontrer l'existence de la diffusion Compton (avec qui Wilson a partagé le prix Nobel en 1927), la découverte du positron par Anderson (découverte qui lui a valu le prix Nobel en 1936), la démonstration visuelle du processus de création de paire et d'annihilation d'électrons et positrons par Blackett et Occhialini, ainsi que la transmutation de noyau atomique par Cockcroft et Walton. Il n'est donc pas étonnant qu'Ernest Rutherford, souvent considéré comme le père de la physique nucléaire, ait décrit la chambre à brouillard comme "l'instrument le plus original et merveilleux de l'histoire scientifique" [1].

Malgré ces grandes réussites, la chambre à brouillard n'est encore que trop peu utilisée dans les salles de classe. Les raisons sont diverses. Par exemple, la plupart des chambres à brouillard présentées en détail sur Internet utilisent de la carboglace. Cependant, la carboglace ne se conserve pas très longtemps et doit donc être commandée et rachetée à chaque fois, ce qui engendre des coûts élevés sur le long terme. Un premier but du projet réalisé est donc de présenter en détail la réalisation d'une chambre à brouillard économique dont l'utilisation ne nécessite pas de carboglace. Cela est rendu possible par l'utilisation alternative de modules Peltier pour refroidir la chambre à brouillard.

Ce rapport présente également des explications théoriques complètes sur la façon dont fonctionne une chambre à brouillard, ainsi que des suggestions sur la façon d'intégrer cette expérience lors de cours avec des étudiants. Ce faisant, un second but du projet réalisé est d'inciter les enseignants à recourir davantage à ce dispositif lors de leur cours sur la physique nucléaire et la physique des particules.

1.2. Explications théoriques complètes

Pour détecter des particules, nous allons créer un brouillard métastable dans lequel le passage des particules sera visible à l'oeil nu. Trois éléments sont essentiels à l'observation de ces traces : la présence de particules ionisantes, un milieu d'interaction métastable, et de bonnes conditions d'éclairage.

1.2.1. Particules ionisantes

Les particules qui seront détectables par notre dispositif sont les particules ionisantes qui sont incidentes sur la chambre et qui possèdent suffisamment d'énergie pour ioniser le milieu d'interaction lors de leur passage. Ces particules peuvent avoir plusieurs origines. Lorsqu'elles proviennent de l'espace, on dit qu'il s'agit d'un **rayonnement cosmique** comme illustré à la figure 1.1. Ce rayonnement a plusieurs interactions avec l'atmosphère et subit de nombreuses désintégrations avant d'arriver sur la surface de la Terre sous formes de muons, protons, neutrons, électrons ou encore positrons. Lorsqu'elles proviennent de la Terre, on dit qu'il s'agit d'un **rayonnement tellurique**. Ce rayonnement est dû à la désintégration d'éléments radioactifs comme le thorium-232, l'uranium-235 et l'uranium-238 présents dans les sols.

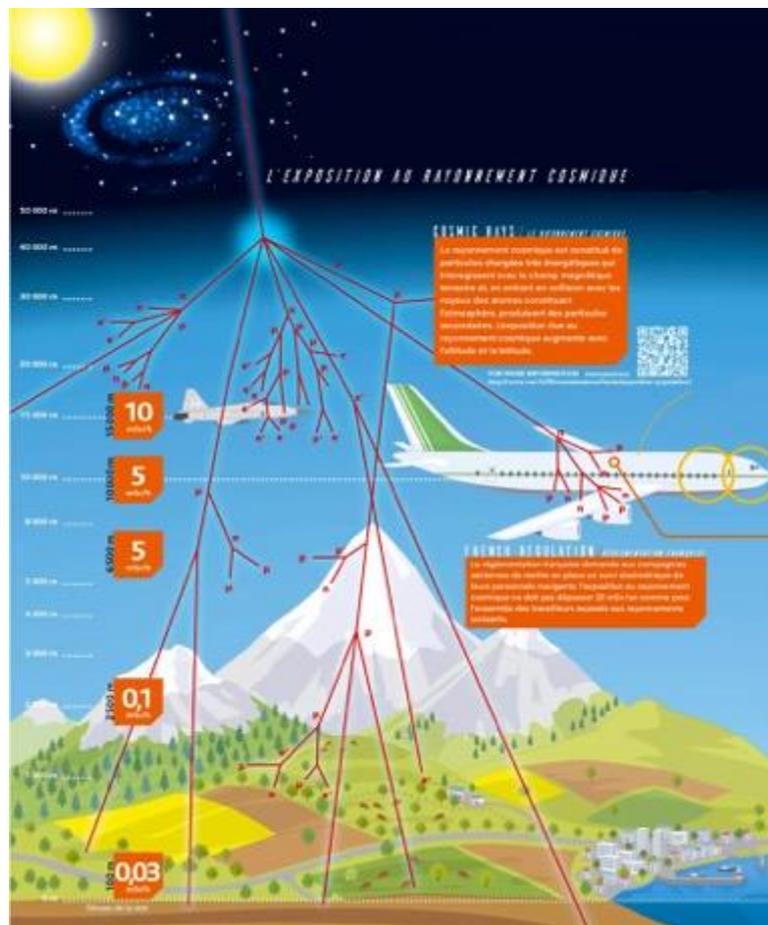


FIGURE 1.1 – Le rayonnement cosmique est un exemple de particules ionisantes que l'on peut détecter dans une chambre à brouillard [2].

Lors du passage d'une particule ionisante dans le milieu d'interaction, la particule ionisante transfère une partie de son énergie à la matière traversée qui sera alors ionisée : une **traînée d'ions** est alors formée, comme montré à la Figure 1.2.

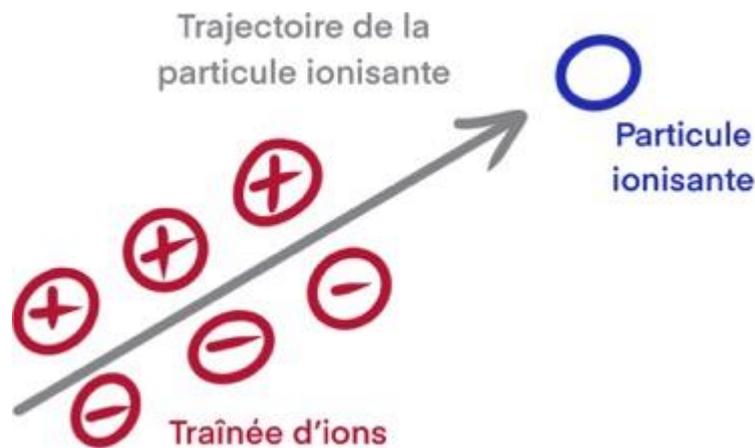


FIGURE 1.2 – Traînée d'ions formée par le passage d'une particule ionisante dans le milieu d'interaction.

1.2.2. Milieu d'interaction

De nos jours, les détecteurs de particules, comme ceux utilisés au CERN, mesurent avec grande précision les trajectoires de particules via des signaux électroniques provoqués par la capture de la traînée d'ions. Cependant, le projet présenté ici ayant un intérêt pédagogique, il est préférable que les traces soient visibles à l'oeil nu. Cette contrainte sera notamment atteinte si le milieu d'interaction est dans un état de vapeur métastable (on parle alors de chambre à brouillard) ou de liquide métastable (on parle alors de chambre à bulle). L'élément clé est l'état de métastabilité car cet état, lorsqu'il est perturbé par la présence de la traînée d'ions, va alors subir un changement d'état visible à l'oeil nu autour de la traînée d'ions : il y a donc apparition de traces visibles. Par exemple, dans une chambre à brouillard, la vapeur méta-stable va se condenser autour des particules qui ont été ionisées par le passage des particules ionisantes : il y a alors apparition de traînées de condensation. En effet, les ions de la traînée d'ions agissent comme des **noyaux de condensation** qui favorisent les molécules polaires du milieu d'interaction à se condenser, et l'état métastable permet d'avoir les conditions thermodynamiques requises (condition de sursaturation, pour en savoir plus consulter la référence [4]) pour que les gouttes alors formées croissent et atteignent une taille visible à l'oeil nu ce qui prend environ $3 \cdot 10^{-4}$ s. Malgré que ce temps semble court, les particules ionisantes voyagent à des vitesses proches de celle de la lumière et parcourt donc environ 10 km pendant ce laps de temps, les traces que l'on observe dans la chambre ne sont donc pas des "images en temps réel" des particules ionisantes.

Pour former une vapeur qui soit dans un état métastable, il existe plusieurs possibilités. Historiquement, Wilson utilisait une chambre à brouillard à expansion, mais le problème de ce genre de design est que les traces ne sont pas générées de manière continue. C'est pour

cela que l'on va plutôt adopter le design de Langsdorf, qui a inventé en 1939 la **chambre à brouillard à diffusion**. Le principe est assez simple : il suffit d'avoir une enceinte fermée dans laquelle règne un gradient de température important entre la face supérieure et la face inférieure, et dont un liquide volatile comme l'alcool est initialement présent dans l'enceinte comme montré à la Figure 1.4. Le gradient de température est par exemple atteint en chauffant la face supérieure et en refroidissant la face inférieure de la chambre à brouillard. En réalité, le plus important est de refroidir suffisamment la face inférieure, car même si la face supérieure est à température ambiante, les traces seront quand même visibles. L'alcool initialement présent du côté de la face supérieure qui est chaude, va se vaporiser et descendre dans la chambre où il sera refroidi rapidement. Dans une région de quelques centimètres au-dessus de la face inférieure qui est froide, l'alcool sera alors dans un état de vapeur métastable qui permettra l'apparition de traces visibles à l'œil nu comme expliqué au paragraphe précédent, cette région est appelée la **zone sensible** de la chambre à brouillard. En dehors de cette zone sensible, même si des traces d'ions sont formées lors du passage de particules ionisantes, les conditions ne sont pas réunies pour former des gouttes de taille visible autour des traces d'ions.

1.2.3 Détection

Pour que les traces soient visibles à l'œil nu, il faut idéalement se trouver dans une pièce sombre où seul le brouillard est éclairé. Lorsqu'un rayon lumineux est incident sur une des gouttes en suspension qui constituent le brouillard, les diverses transmissions et diffusions propagent l'énergie du rayon dans toutes les directions ce qui rend la trace visible peu importe l'angle d'observation mais avec une intensité faible. Il est donc préférable d'observer plutôt les rayons réfléchis, dont l'intensité sera plus importante surtout si le brouillard est éclairé de manière rasante car le coefficient de Fresnel de réflectance est plus important pour les angles rasants comme illustré à la Figure 1.3. Vu que les traces sont blanchâtres, il vaut mieux que la face inférieure de la chambre à brouillard soit de couleur noire de sorte à avoir un contraste suffisant. En résumé, il faut idéalement une **pièce sombre** où le **brouillard est éclairé de manière rasante** dans une chambre à brouillard dont la **face inférieure est noire**. Ces diverses conditions permettent d'avoir une visibilité maximale des traces formées dans le brouillard.

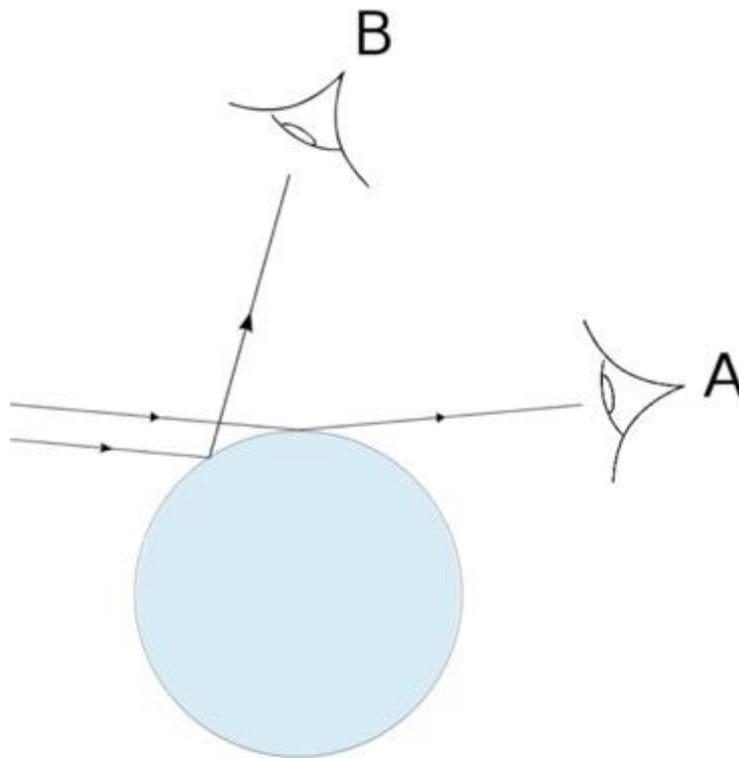


FIGURE 1.3 – Bien que les deux observateurs A et B voient les traces formées par le passage des particules, l’observateur A les verra de manière plus claire dû à l’incidence rasante des rayons sur les gouttes en suspension, ce qui favorise la réflectance [4].

Maintenant que les principes physiques fondamentaux ont été expliqués en détail, il est désormais aisé de comprendre le rôle des différents éléments présents ainsi que leur emplacement dans une chambre à brouillard à diffusion classique comme représenté à la Figure 1.4.

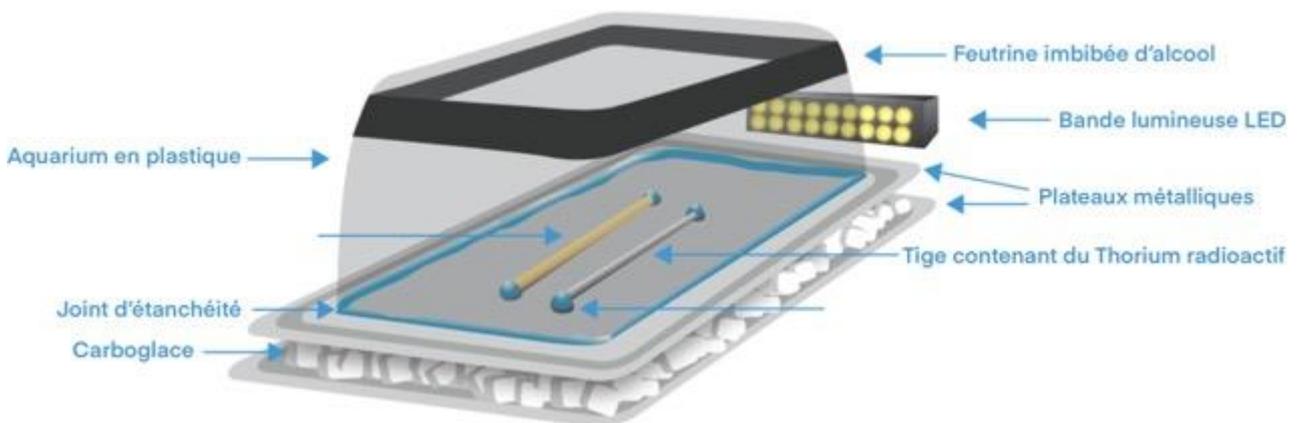


FIGURE 1.4 – Exemple de design de chambre à brouillard à diffusion dont l’usage nécessite de la carboglace pour refroidir la face inférieure. La face supérieure est quant à elle à température ambiante [3].

1.3 Liste du matériel

La chambre à brouillard présentée dans ce rapport et dans la vidéo a été conçue en utilisant le matériel de la table 1.2, pour un budget total de 113€. Cependant, il ne s'agit que d'un design particulier de chambre à brouillard et les coûts pourraient être réduits davantage. En effet, certains composants ne sont pas essentiels au fonctionnement de la chambre à brouillard. Il est tout à fait facultatif de générer des particules ou de chauffer la face supérieure, car les particules cosmiques et telluriques sont toujours présentes et un nombre important de traces restent visibles même si la face supérieure est à température ambiante. Il est aussi possible de réduire les coûts en remplaçant certains composants par d'autres ayant une efficacité similaire et un coût moindre. Enfin, des économies pourraient être réalisées en utilisant du matériel de récupération, par exemple provenant d'un vieil ordinateur.

Objectif	Matériel	Prix [€]
Générer des particules	Manchon au thorium	
Contenir le brouillard de manière étanche	Tube (PMMA)	25
	Plaque d'aluminium	
	Pièces en PLA	3
Chauffer la face supérieure	Fil de nichrome	5
	Plaque de mica	1
Refroidir la face inférieure	Peltier (TEC1 ≠ 12706)	16
	Pâte thermique	12
	Waterblocks	15
	Tubes flexibles	3
	Pompe-Réservoir	22
	Mousse de polyuréthane	2
Observer les traces à l'oeil nu	Bande LED	7
	Film Vinyle	2

TABLE 1.1 – Liste du matériel utilisé pour concevoir la chambre à brouillard présentée.

Étant donné les coûts sont essentiellement liés au refroidissement de la face inférieure, il serait tentant d'utiliser de la carboglace à la place pour réaliser des économies. C'est cette option qui est d'ailleurs utilisée dans la plupart des dispositifs présentés sur Internet. Cependant, comme déjà mentionné dans l'introduction, la carboglace ne se conserve pas très longtemps et doit donc être commandée et rachetée à chaque fois. C'est pour cela que le dispositif présenté ici, en plus d'être plus pratique vu qu'il ne nécessite qu'une prise de courant pour démarrer, est moins coûteux sur la durée.

1.4 Montage de l'expérience

1.4.1 Générer des particules

Bien que cela soit facultatif, un manchon au thorium comme montré à la Figure 1. a été inséré dans la chambre dans l'espoir d'observer plus de traces étant donné que le Thorium contenu dans le manchon est radioactif. Cependant, il n'était plus possible d'observer de traces car le manchon était trop grand et irrégulier, le brouillard se condensait dès lors sur le manchon plutôt que sur les traces d'ions des particules ionisantes. C'est pour cela qu'au final, le manchon n'a pas été utilisé et que les traces des sections suivantes ont été réalisées en l'absence de cet élément.

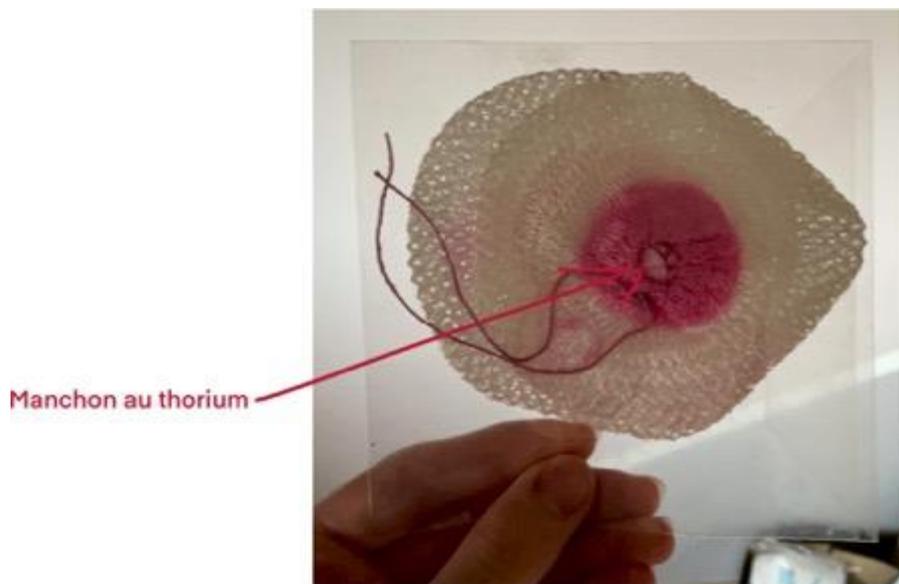


FIGURE 1. – Manchon au thorium.

1.4.2 Contenir le brouillard de manière étanche

Pour contenir le brouillard, une enceinte cylindrique a été fabriquée, comme montré à la Figure 1.6. La portion latérale est un tube en PMMA car en plus d'être transparent, ce matériau est résistant aux plages de températures de la chambre à brouillard. Aussi, son coefficient de conduction thermique est faible ce qui permet de minimiser les échanges de chaleur avec l'extérieur. Ce cylindre est refermé par une face supérieure qui sera chauffée, et une face inférieure qui sera refroidie par des modules Peltier.

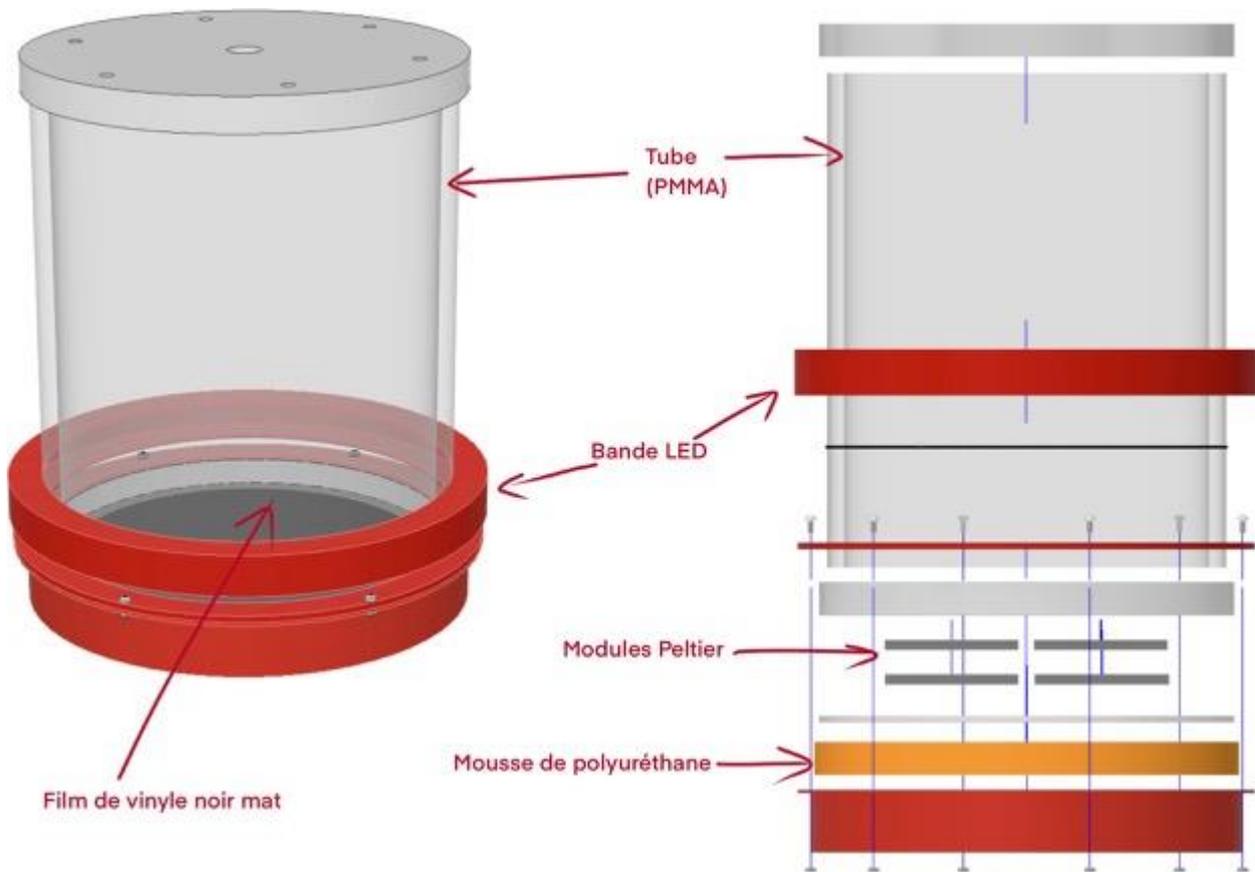


FIGURE 1.6 – Vue assemblée et vue éclatée de la chambre à brouillard réalisée.

1.4.3 Chauffer la face supérieure

Bien que cela soit facultatif, la face supérieure de la chambre réalisée est un couvercle amovible qui est chauffée via un système de résistance chauffante comme montré sur la figure 1.y. En effet, le fil de nichrome plaqué sur la face supérieure est parcouru par un courant et il chauffe alors par effet Joule. Pour atteindre et maintenir une température d'environ 60°C , la résistance du fil de nichrome a été dimensionnée pour que la puissance dissipée par effet Joule compense les pertes par convection naturelle. Des fils de branchements ont été soudés sur le fil de nichrome pour pouvoir connecter la résistance à une source d'alimentation. Pour éviter des court-circuits et conduire la chaleur efficacement sur la plaque supérieure, un disque de mica a été utilisé car il s'agit d'un matériau qui est un isolant électrique mais aussi un conducteur de chaleur. Les vis de fixation servent à la fois à fixer des lamelles de mica qui permettent de plaquer le fil de nichrome sur le disque de mica et donc permettre un meilleur échange de chaleur, mais aussi à accrocher une éponge du côté intérieure de la face supérieure. Cette éponge sera imbibée d'alcool lors de l'utilisation de la chambre à brouillard. En termes d'alcool, le méthanol, l'éthanol et l'isopropanol sont trois choix qui peuvent convenir mais le méthanol est toxique et doit être manipulé avec précaution. C'est finalement l'isopropanol qui a été choisie car il est bon marché

et sa faible énergie d'ionisation permet de générer plus de traînées d'ions.

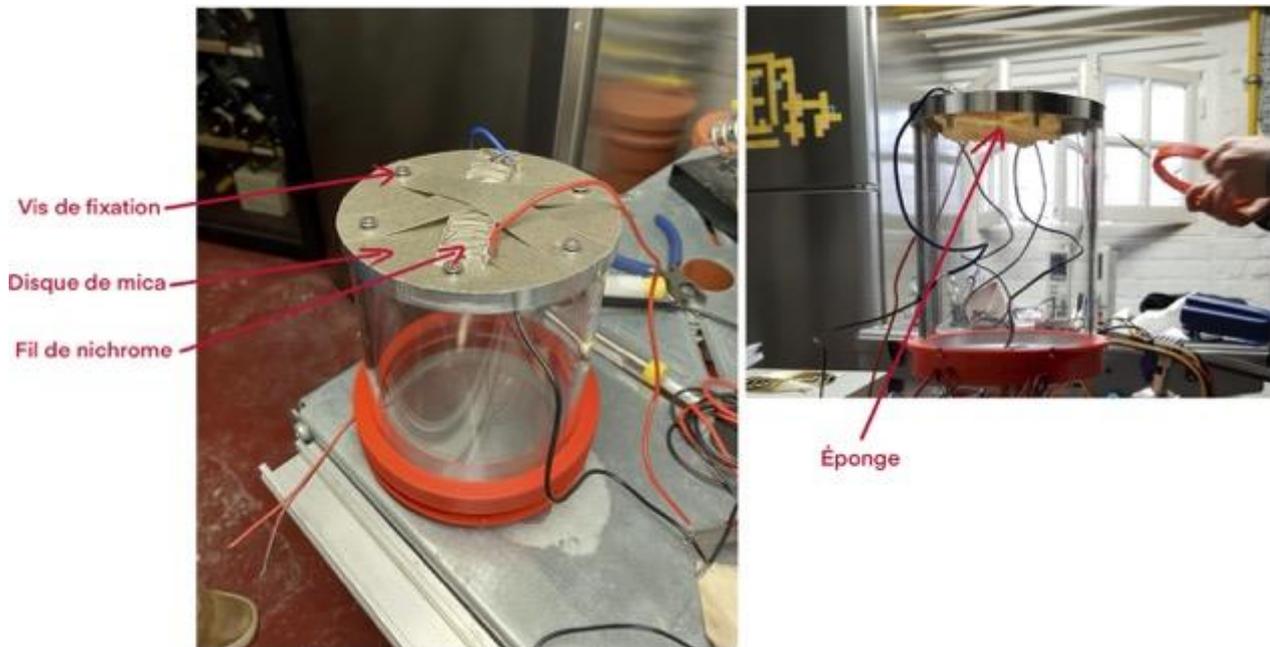


FIGURE 1.y – Face supérieure de la chambre réalisée.

1.4.4 Refroidir la face inférieure

Refroidir la face inférieure est sans doute la partie la plus complexe du dispositif. La face inférieure est en contact avec 8 modules Peltier, comme montré sur la Figure 1.8. On y aperçoit deux étages contenant chacun 4 modules Peltier, de la pâte thermique a été utilisée entre modules Peltier d'étage différent pour permettre un échange de chaleur entre les deux étages. Les modules Peltiers sont recouverts de mousse de polyuréthane pour qu'ils n'échangent pas de chaleur avec les parois extérieures et qu'ils restent froids. Cependant, vu que ces modules servent à refroidir la plaque inférieure, il faut malgré tout que la chaleur extraite soit évacuée en dehors de la chambre à brouillard sinon elle y retournera et le refroidissement ne sera pas efficace. C'est là qu'intervient le système d'évacuation de la chaleur. En effet, les waterblocks, en contact avec les modules Peltier, vont absorber la chaleur qui sera alors transportée par un liquide qui circule dans les tubes flexibles grâce à une pompe jusqu'à un radiateur ce qui permet d'évacuer la chaleur en dehors de la chambre à brouillard et donc d'avoir un refroidissement efficace.

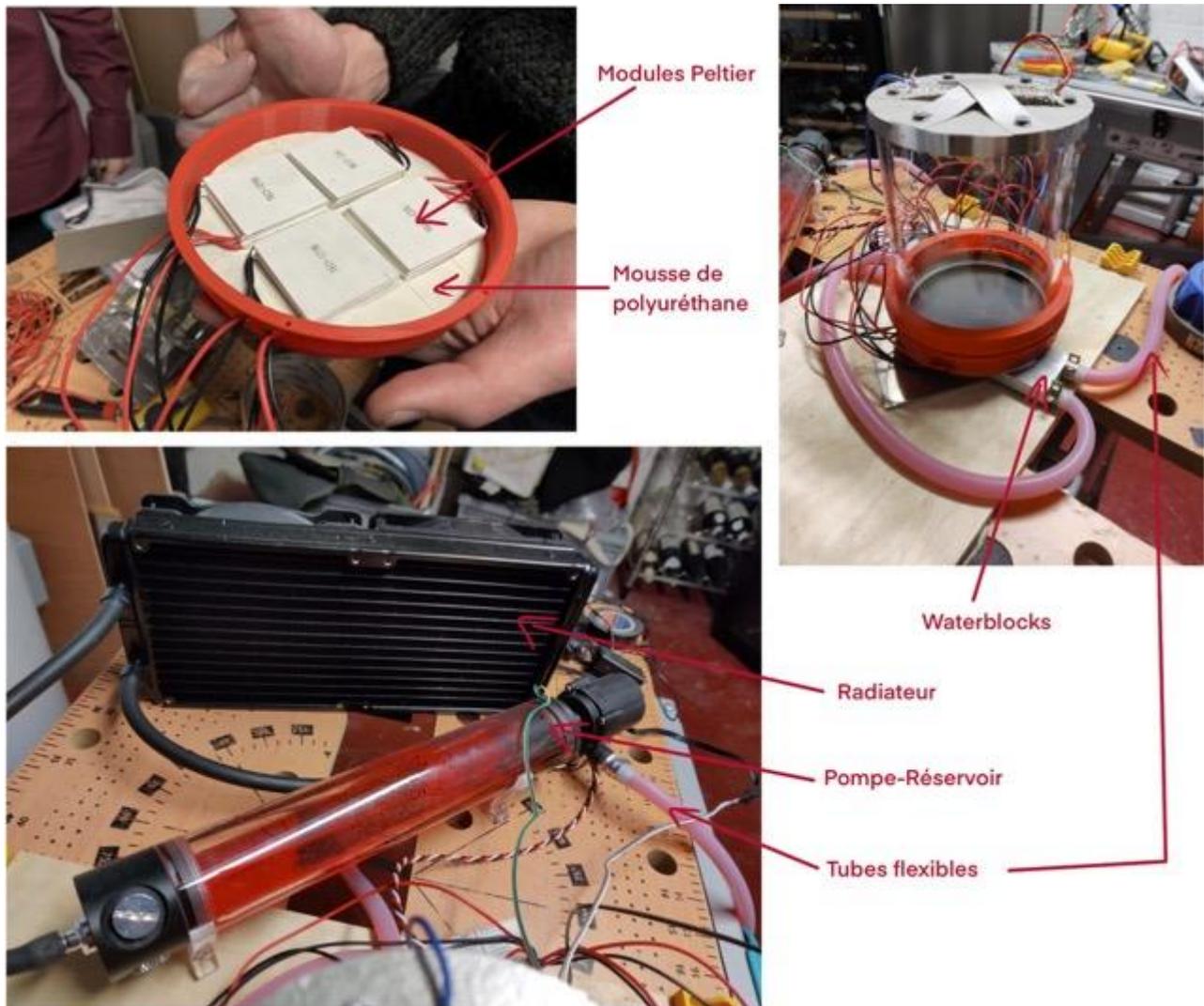


FIGURE 1.8 – Face inférieure de la chambre réalisée ainsi que le système d'évacuation de la chaleur.

1.4.5 Observer les traces à l'oeil nu

Comme montré à la Figure 1.e, une bande LED a été placée sur tout le contour du tube de PMMA, et la hauteur de ces bandes LED est ajustable pour éclairer la zone sensible de la chambre à brouillard avec un angle rasant. De plus, un film de vinyle noir mat a été fixé sur la face inférieure ce qui permet d'avoir un contraste suffisant pour observer les traces.

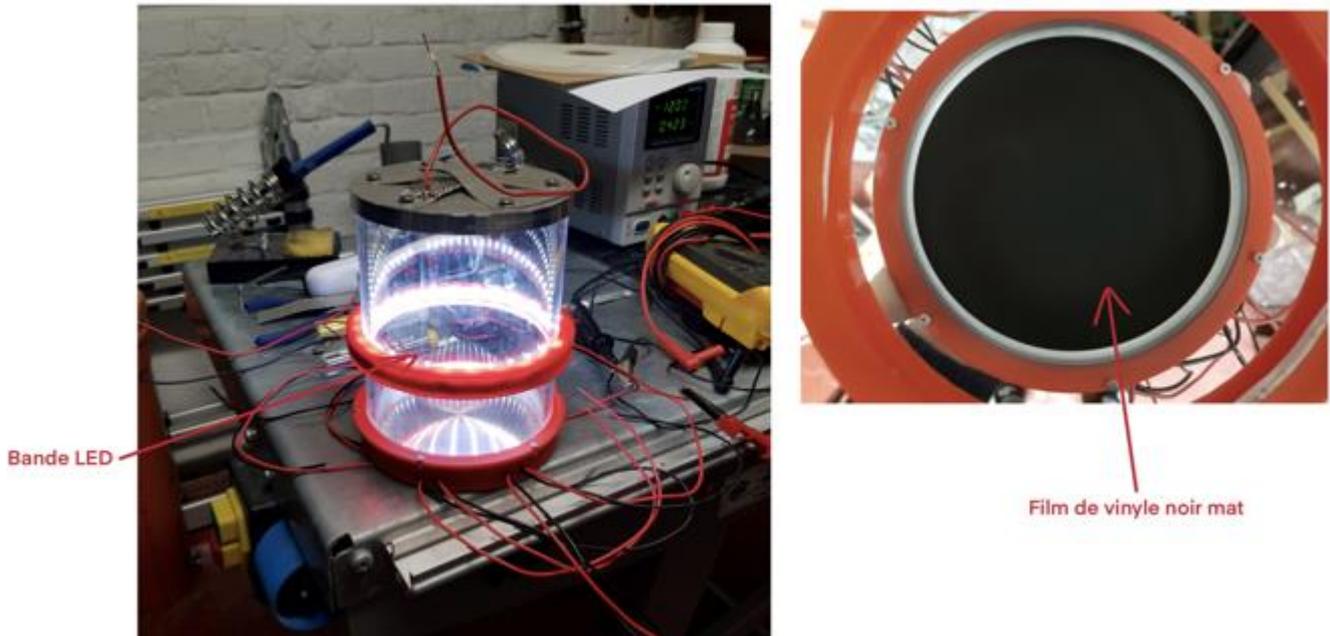


FIGURE 1.e – Bande LED et film de vinyle noir mat permettant des conditions d’observation optimales.

1.5 Mode opératoire

Une fois construite, la chambre à brouillard est très facile à démarrer. En effet, il suffit de soulever le couvercle pour imbiber l’éponge d’alcool avant de refermer la chambre à brouillard, puis d’allumer l’alimentation du système de refroidissement (et de manière facultative du système de chauffage). Il faut attendre environ cinq minutes, le temps que le brouillard métastable se forme pour observer les premières traces. Dès lors, les traces restent visibles jusqu’à ce qu’il n’y ait plus suffisamment d’alcool dans la chambre à brouillard. L’étanchéité de la chambre à brouillard présentée était suffisante pour observer des traces pendant environ 45 minutes.

Il est aussi possible, pour observer plus de traces, d’insérer dans la chambre à brouillard une source radioactive avant de la démarrer. Néanmoins, cela n’est pas nécessaire car les rayonnements cosmiques et telluriques sont suffisants pour une démonstration devant des étudiants.

1.6 Résultats expérimentaux

1.6.1 Particules observées

En fonction de la particule qui traverse la chambre, la trace aura une allure différente. Les figures 1.10 et 1.11 montrent respectivement les traces lors du passage d'une particule alpha ou d'un électron.

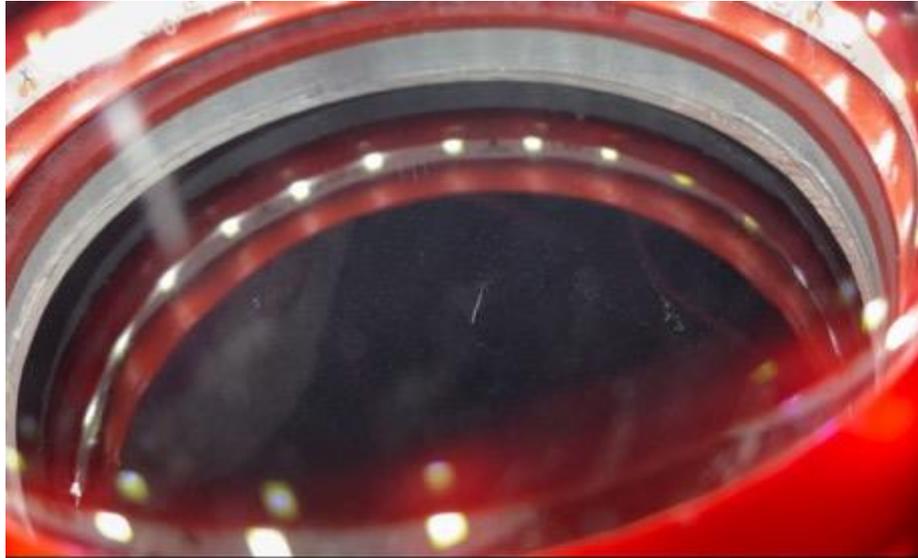


FIGURE 1.10 – Trace très épaisse, très courte et droite : caractéristique d'une particule alpha.

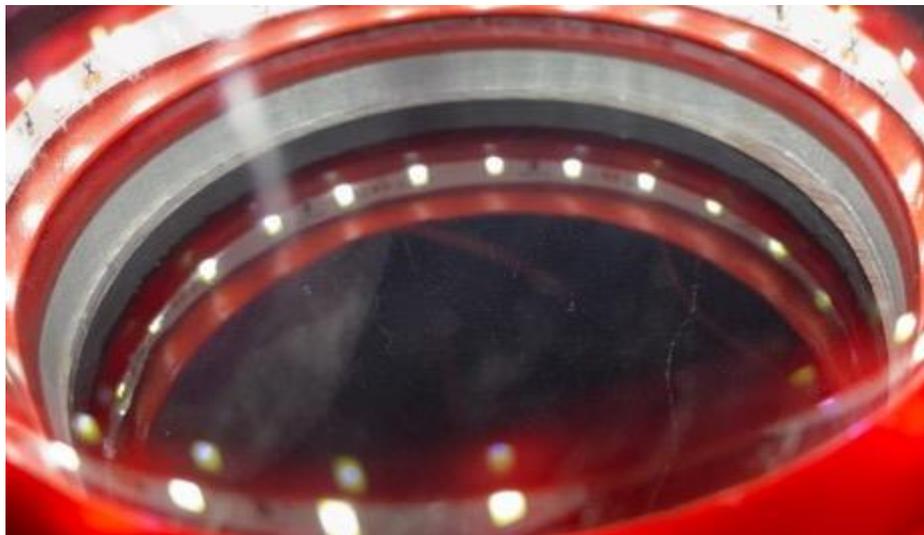


FIGURE 1.11 – Trace très fine, courte et en zigzag : caractéristique d'un électron.

Le tableau suivant permet d'identifier le type de particules observées en fonction de l'allure de la trace.

Particule	Epaisseur de la trajectoire	Longueur de la trajectoire	Forme de la trajectoire
Alpha	Très épaisse	Très courte	Droite
Proton	Epaisse	Longue	Droite
Muon	Fine	Longue	Droite

Electron	Très Fine	Courte	Zigzag
----------	-----------	--------	--------

TABLE 1.2 – Type de trajectoire observable dans la chambre à brouillard en fonction de la particule qui traverse la chambre à brouillard.

L'épaisseur de la trajectoire dépend du pouvoir ionisant de la particule, ce pouvoir ionisant étant d'autant plus grand que la masse et la charge de la particule ionisante est grande. La particule alpha a la plus grande charge et la plus grande masse parmi les particules évoquées dans le tableau précédent, son pouvoir ionisant est donc plus élevé ce qui explique l'épaisseur des traces formées par son passage.

Pour ce qui est de la longueur de la trajectoire, cela dépend de l'énergie avec laquelle la particule ionisante est entrée dans la chambre. Les protons et muons observés sont d'origine cosmique et ont des énergies très élevées, ils traversent donc complètement la chambre et les trajectoires observées sont donc au moins aussi longues que l'épaisseur de la zone sensible de la chambre. Par contre, les particules alpha et les électrons observés ne sont pas d'origine cosmique mais proviennent d'éléments radioactifs présents dans la chambre. Leur énergie est donc plus faible et ils se font stopper en parcourant des distances assez courtes. En effet, les particules alpha ne pourraient pas pénétrer dans la chambre à brouillard si elles étaient créées à l'extérieur étant donné qu'elles sont stoppées par une feuille de papier et seraient donc aussi stoppées par le tube en PMMA. Les particules alpha proviennent en réalité de la désintégration du Radon à l'intérieur de la chambre, la concentration de ce gaz radioactif dans l'air dépend notamment du lieu géographique.

Enfin, la forme de la trajectoire dépend essentiellement de la masse et de l'énergie de la particule ionisante. Les électrons observés sont très légers et de faible énergie, leur trajectoire a donc une forme en zigzag.

1.7 Suggestions de questionnement pour les élèves

Lors de la présentation de l'expérience, il serait intéressant de demander aux élèves de noter les caractéristiques des différentes traces qu'ils observent. Ils devraient constater que certaines traces sont fines, longues et parfois en zigzag, tandis que d'autres sont plus épaisses, droites et parfois courtes. Il faudrait alors leur demander d'expliquer l'origine de cette différence. Ils devraient arriver, avec l'aide du professeur si nécessaire, à déduire une partie des explications données à la section précédente et comprendre le lien entre type de particule ionisante et trace engendré dans la chambre. Le professeur pourrait aussi demander aux élèves de réfléchir à ce qu'on observerait si l'on faisait l'expérience dans

des zones géographiques avec des concentrations plus élevées en Radon, ou si l'on faisait l'expérience en altitude.

1.8 Conclusion

La chambre à brouillard a permis historiquement de mieux comprendre l'univers qui nous entoure en permettant la découverte de nombreuses particules et d'interactions entre celles-ci, ce qui en fait un dispositif incontournable dans l'étude de la physique. De plus, le fonctionnement d'une chambre à brouillard fait intervenir une multitude de disciplines : thermodynamique, mécanique des fluides, physique nucléaire et physique des particules. Aussi, il est plus mémorable et ludique de visualiser les trajectoires de particules plutôt que d'étudier ces phénomènes de manière théorique. Ces trois facteurs permettent de se convaincre de l'intérêt pédagogique d'un tel dispositif. Enfin, ce projet a montré qu'une chambre à brouillard n'est pas forcément compliquée ou coûteuse à réaliser ce qui pourrait inciter des professeurs à réaliser et présenter ce dispositif devant leur classe d'étudiants.

Bibliographie

- [1] C.T.R. Wilson *Biographical*. 1936 . URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1937/wilson/biographical/> (visité le 17/04/2021).
- [2] *Cosmic radiation under world-wide surveillance*. 2018. URL : <https://www.observatoiredeparis.psl.eu/le-rayonnement-cosmique-sous.html?lang=en> (visité le 17/04/2021).
- [3] ESA. *Cloud Chamber*. 2016. URL : https://esamultimedia.esa.int/docs/edu/Po3b_Cloud_chamber_student_activities.pdf (visité le 17/04/2021).
- [4] Iván Esteban MUÑOZ. *Detection of particles with a cloud chamber*. 2011 . URL : https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/11990/Colour_blind.pdf?sequence=4 (visité le 17/04/2021).