

Chambre à brouillard - Présentation finale

Pierre Gérard et Nicolas De Ro Miralles

30/04/2019

Abstract

Le Printemps des Sciences est une des plus grande manifestation temporaire scientifique de la Fédération Wallonie Bruxelles. Il s'agit d'une initiative non lucrative, aidée par les cinq unités de diffusion des sciences des universités de la Fédération Wallonie-Bruxelles, ouverte à tout public qui permet de découvrir le temps de quelques stands et démonstrations le monde fascinant qu'est celui de la science. Le Printemps des Sciences aura lieu cette année du 25 au 31 mars 2019 sous le thème *élémentaire* dans son sens tout aussi large que plurivoque. L'objectif étant, pour nous étudiant de deuxième année en physique, de présenter une expérience/manipulation sous ce thème le temps d'une semaine à un public tout aussi novice qu'expérimenté dans ce milieu.

Ce document fait donc suite au projet de construction d'une chambre à brouillard pour le Printemps des Sciences. Au-delà d'une simple présentation intéressante et ludique, il nous a été demandé d'utiliser notre dispositif afin de réaliser des mesures *physique*, de les travailler et de les exploiter pour en tirer des conclusions. Ce pourquoi ce projet est intégré au cours de laboratoire, physique expérimentale et statistique. Les aspects pratiques et scientifiques d'une chambre à brouillard seront également traités.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Motivation	3
1.2	Rapide historique	3
1.3	Chambre à brouillard et physique	3
1.4	Notre chambre à brouillard	4
2	Principe de fonctionnement - Mesures et discussion	6
2.1	Principe de fonctionnement	6
2.2	Mesures et discussion	7
3	conclusion et ouverture	15
3.1	Conclusion	15
3.2	Ouverture	15
3.3	Crédits photographique	17

1 Introduction

Il ne s'agit pas ici de développer en long et en large les conséquences et l'importance qu'ont eu les chambres à brouillard dans l'histoire de la physique mais d'en donner un rapide aperçu. Rappelons que l'on ne s'adresse pas à des étudiants mais bien à un jury de professeurs ayant des connaissances sur le sujet.

1.1 Motivation

Le Printemps des Sciences de cette année était axé autour du sujet, ou plutôt du terme, *élémentaire*. Bien qu'à la fois large et plurivoque, nous n'avons retenu que le sens propre du terme, c'est-à-dire ce qui constitue, ce qui est relatif à un élément, à un corps simple. Notre choix s'est donc naturellement orienté vers un dispositif incluant électrons et autres particules *élémentaires*. Or, observer des électrons n'est *a priori* pas difficile (décharge électrique par exemple). Il est nettement plus difficile de concevoir un dispositif permettant d'observer un ensemble de particules, et ce avec un coût réduit et un matériel limité. Il existe cependant un dispositif, appelé "chambre à brouillard", que nous avons exploité sous sa forme la plus simple, rendant possible l'observation simultanée de particules de nature différente. En l'occurrence, le dispositif tel que nous l'avons conçu nous a permis d'observer des particules bêta, des particules alpha (bien qu'étant une particule non élémentaire) et des muons - en soi toute particule chargée, mais nous reviendrons sur ceci plus tard. La conception d'une chambre à brouillard est en effet assez simple, du moins dans sa version basique, pour un résultat assez impressionnant. Il nous a effectivement paru important de concevoir un dispositif à la fois étonnant, convainquant mais aussi ludique et compréhensible afin d'être à la portée des plus petits comme des plus grands, avec ou sans bagage scientifique.

Au-delà de n'être qu'un simple dispositif d'observation de particules, nous avons étendu le domaine à la radioactivité. En effet, nous avons utilisé des sources radioactives (américium, radon et autres) dans le but de générer des rayonnements alpha et bêta. La radioactivité est un sujet connu du grand public, notamment par l'actualité, et qui provoque un certain engouement collectif. D'où le nom complet de notre manipulation tel qu'affiché sur les posters, "Chambre à brouillard et radioactivité".

1.2 Rapide historique

C'est le physicien écossais Charles Wilson qui émit l'idée de construire une chambre à brouillard. Son but premier n'était pas de pouvoir observer des particules mais plutôt de reproduire en laboratoire le phénomène des spectres de Brocken (phénomène météorologique) afin de pouvoir le comprendre et l'étudier, projet qu'il entreprit dès 1895. Il parvint à former du brouillard en réalisant des détentes du volume d'air constitué d'un peu d'eau liquide en phase gazeuse. C'est en 1910 qu'il observa pour la première fois des tracés de particules nucléaires (alpha et bêta) dans sa chambre à brouillard à expansion. En y insérant un échantillon radioactif, il vit se former des gouttelettes d'eau là où des ions avaient été produits par le passage de la particule émise par l'échantillon. Ceci lui valut le prix Nobel de 1927. La postérité de la chambre à brouillard fut grande : reprise et améliorée par Patrick Blackett (physicien expérimentateur britannique) en 1921 de façon à ce que les détentes se produisent de manière automatique, elle permit de fonder la physique nucléaire moderne car fut à l'origine de la découverte du rayonnement cosmique (Skobelzyn, 1927), du positron ou encore du muon (Anderson, 1936). C'est en 1939 que le physicien américain Langsdorf proposa une nouvelle technique afin d'éviter de devoir systématiquement détendre le gaz de la chambre. Il inventa la chambre à brouillard à diffusion qui permettait de voir les rayonnements de manière continue. C'est à partir de 1950 que la chambre à brouillard disparu petit à petit des laboratoires laissant place à de nouveaux dispositifs plus précis quant à la détection de particules comme la chambre à bulle de Glaser, chambres à fils et plus récemment les accélérateurs de particules.

1.3 Chambre à brouillard et physique

Comme l'évoque la section précédente, la chambre à brouillard fut de grande importance en physique. Avant tout parce qu'elle fut un des premiers dispositifs de détection de particule. C'est à partir de 1930 que la physique des particules semble être un domaine qui se dégage de celui de l'électromagnétisme. Dès 1937, on a déjà la connaissance de l'existence des particules et des phénomènes suivants,

- Radioactivité de l'uranium.

- L'électron.
- Le photon.
- Particules alpha.
- Le proton.
- Le boson.
- La désintégration bêta.
- Le neutron.
- Le neutrino.

A cette époque, on a déjà observé des électrons (par conductivité électrique des gaz au cours du 19^{ème} siècle), des particules alphas et des protons. Chaque particule ayant son propre moyen de détection. Mais *quid* du rayonnement émis par des matériaux radioactifs, des particules et de leurs anti-particules qui jusque là n'était qu'une idée théorique ou encore du rayonnement dit cosmique ? Plus précisément, on pourra retenir que la chambre à brouillard permit d'affiner et de parfaire les domaines suivants,

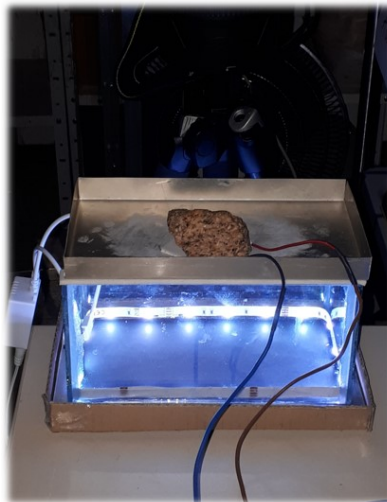
- L'étude des éléments radioactifs : alpha, bêta et gamma, bien que ce dernier rayonnement ne peut pas s'observer directement mais peut l'être implicitement à l'aide des électrons secondaires produits par effet photoélectrique lorsqu'il y a interaction avec la matière.
- L'étude des produits de réactions nucléaires.
- L'étude des interactions matière, rayonnement, gaz, vapeur ou encore des états métastables.

De nos jours, les chambre à brouillard ne sont plus utilisées qu'à des fins expérimentales, voire de vulgarisation. Après la Seconde Guerre Mondiale, une grande variété de particules purent être découvertes non plus à l'aide de détecteurs de particule mais à l'aide d'accélérateurs de particules. En effet, on comprit rapidement le besoin de provoquer des collisions entre particules afin d'en détecter de nouvelles. Au plus l'énergie impliquée dans ces collisions est grande, au plus on peut sonder en détail les particules élémentaires tels que décrites par le modèle standard de la physique des particules. On comprend dès lors aisément que le temps des chambre à brouillard est révolu. Elles ne répondent plus aux demandes actuelles de la physique moderne et sont de loin surpassées par des accélérateurs de particules du type CERN ou FERMILAB.

Nous pourrions cependant dire que la chambre à brouillard semble avoir retrouvé une seconde vie avec l'expérience CLOUD (dirigée par le CERN - Organisation européenne pour la recherche nucléaire). Cette expérience utilise un nouveau type de chambre à brouillard afin d'étudier le climat et plus précisément de comprendre l'influence du rayonnement cosmique dans la formation de nuages.

Nous retiendrons donc que la chambre à brouillard eut une importance capitale tant sur la plan physique que sur le plan humain de part sa capacité à rendre visible l'invisible et d'ouvrir une porte sur le monde de l'infiniment petit.

1.4 Notre chambre à brouillard



[1]

Une image de notre chambre à brouillard.

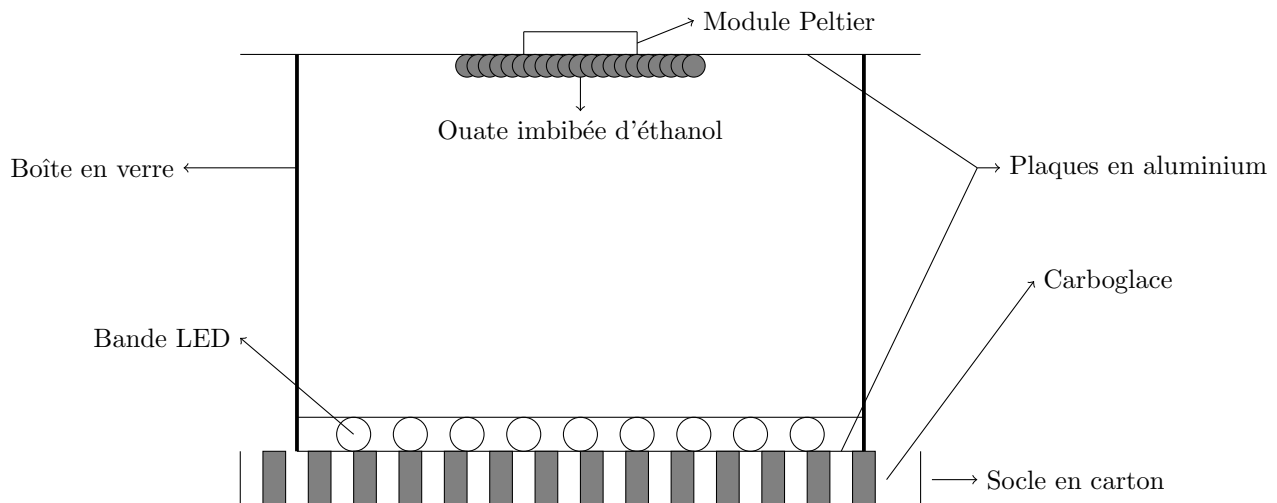
Nous allons ici décrire brièvement la structure de notre chambre à brouillard. Nous n'évoquerons son fonctionnement que dans la section suivante. Comme évoqué plus haut, la chambre à brouillard que nous avons construit est réduite à sa forme la plus élémentaire. Cette proposition implique qu'il existe différents moyens de construction d'une chambre à brouillard. Le principal enjeu technique est de refroidir la surface inférieure d'une boîte à une température d'au moins $-20^{\circ}/-30^{\circ}\text{C}$ et de maintenir cette température tout en restant dans des consommations d'énergie raisonnables. Deux choix s'offrent alors à nous : l'utilisation de modules Peltier ou l'utilisation de carboglace. Dès suite de l'échec de cette première méthode (*cf.* section conclusion), nous nous sommes orientés vers la seconde méthode. Chacune de ces méthodes possède des avantages et des désavantages que nous avons regroupés dans le tableau ci-dessous,

	Modules Peltier	Carboglace
Avantages	Un simple bouton ON/OFF permet d'allumer/éteindre la chambre. Le maintien d'une température stable et uniforme. Les modules permettent un contrôle de la température.	Très bon marché et se trouve aisément. Simplifie considérablement la construction de la chambre. Utilisation très simple.
Désavantages	Un grand nombre de modules est nécessaire pour un bon fonctionnement (disons minimum 4 par 25 cm^2). Le coût élevé de modules de qualité. La puissance électrique nécessaire est très grande, auquel s'ajoute le danger d'une telle installation électrique. Les modules sont difficiles à refroidir de manière efficace.	Température trop basse de l'ordre de -70°C . La carboglace se sublime assez rapidement, il faut donc s'assurer d'en avoir un stock suffisant.

La construction de la chambre à brouillard étant simplifiée par la méthode de la carboglace nous avons utilisé le matériel suivant,

- Une boîte en verre de $21 \times 11 \times 11$ ($l \times l \times h$ - cm).
- Deux plaques en aluminium de 21×11 ($l \times l$ - cm). La plaque inférieure doit avoir une des faces peintes en noir.
- De la carboglace (en moyenne 1.5 kg par jour seront nécessaires).
- Des sources radioactives.
- Un module Peltier ou une résistance chauffante.
- De l'éthanol ou de l'isopropanol (minimum 98% de pureté).
- De la ouate.
- Du carton.
- Des bandes LED.

Ci-joint une représentation de profil de notre chambre à brouillard.



2 Principe de fonctionnement - Mesures et discussion

2.1 Principe de fonctionnement

Avant d'utiliser la chambre à brouillard afin de réaliser des mesures, attardons-nous un peu sur son fonctionnement. On peut distinguer deux étapes indépendantes permettant le fonctionnement d'une chambre à brouillard dite à diffusion,

1. Création d'un état de sursaturation au niveau de la plaque froide.
2. Conséquence du passage d'une particule chargée.

Intéressons-nous à la première étape : **création d'un état de sursaturation au niveau de la plaque froide**. Rappelons le contexte. On imbibes la ouate d'éthanol ou d'isopropanol de pureté supérieure à 98%, que l'on place en-dessous de la plaque supérieure. Faisons maintenant l'hypothèse que la boîte est hermétique (le système peut alors être considéré comme fermé - on dénotera par "système" la boîte dans son entièreté). Ceci n'étant pas rigoureusement le cas au cours de notre expérience, bien que négligeable. L'alcool est soumis à deux phénomènes. D'une part, par effet de gravité, la substance liquide d'alcool déposée sur la ouate tombe vers le bas, c'est-à-dire en direction de la plaque inférieure (ce phénomène étant clairement visible au cours de l'expérience par de petites gouttes qui tombent vers la plaque inférieure). D'autre part, par équilibre thermodynamique, une partie de l'alcool liquide va spontanément s'évaporer de sorte à ce que la pression soit homogène au sein du système. C'est ce que l'on appelle la pression de vapeur. Rappelons également que le système est en soi soumis à un gradient de température assez important et de l'ordre de $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. En cause, la plaque refroidie à une température de -70°C . Lorsque ces vapeurs d'alcool vont entrer en contact avec la plaque inférieure, une partie va se condenser sous forme de petites gouttelettes créant un brouillard, d'une hauteur caractéristique de quelques millimètres. Toutefois, une partie des vapeurs d'alcool ne se condensent pas et demeurent au-dessus de la surface froide formant un certain volume de vapeur dit à l'état métastable. On peut tout à fait comparer ce phénomène au cas de l'eau. L'eau est dit à l'état métastable lorsqu'elle est en surfusion, ce qui est le cas du brouillard givrant. C'est-à-dire que des gouttelettes d'eau demeurent à l'état liquide jusqu'à une température de -38°C . Cet état métastable cesse brutalement lorsque la gouttelette d'eau entre en contact avec tout corps étranger. Dans notre cas, les particules chargées feront office du corps étranger.

Quelle est donc maintenant la **conséquence du passage d'une particule chargée** au travers du système? Arrêtons-nous maintenant au concept de particule chargée. Par particule, on désigne les constituants élémentaires de la matière tels que repris dans le modèle standard de la physique des particules. Par particule chargée, nous désignons simplement une particule possédant une charge électrique non-nulle. Or, d'après ce dernier modèle, il n'existe que 4 particules ayant la propriété d'avoir une charge électrique (entière) non-nulle,

- Les électrons (e).
- Les muons (μ).
- Les taus (τ).
- Les bosons (W^\pm).

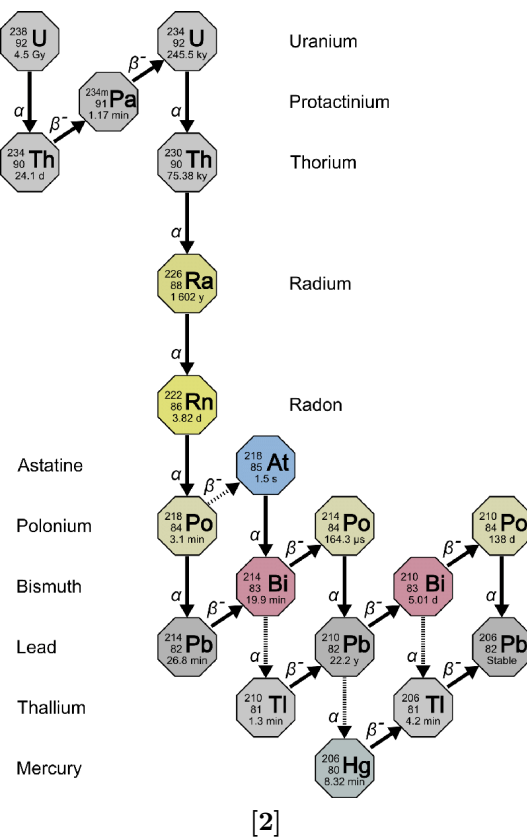
A ceci s'ajoute également les anti-particules associées mais nous ne rentreront pas dans ces détails. Ces trois premières particules font partie de la famille des Leptons (particule élémentaire de spin 1/2 et uniquement sensible à l'interaction forte) et la dernière fait partie de la famille des bosons de jauge. Pour des raisons que nous évoqueront ci-dessous une chambre à brouillard à diffusion ne permet d'observer que des électrons, des protons, des muons et des particules alpha, bien que les particules alphas ne soient pas considérées comme des particules élémentaires. Revenons-en à notre chambre à brouillard. L'état métastable est un état instable : il suffira donc d'une infime perturbation pour que la vapeur d'alcool se condense en gouttelettes, l'état liquide étant un état plus stable. Afin de comprendre comment est-ce qu'une particule chargée peut interagir avec la vapeur d'alcool métastable, il faut comprendre que la transition d'un état physique vers un autre (par exemple ici la condensation de l'alcool gazeux) peut dans certains cas être facilité lorsque le milieu en question contient des impuretés. C'est en l'occurrence le cas de la formation du brouillard tel que nous pouvons l'observer certains jours. Dans la plupart des cas, les impuretés sont des poussières. Sauf que dans le cas de notre chambre à brouillard, c'est justement les particules chargées qui font office de poussière. C'est-à-dire que les particules chargées qui traversent la vapeur métastable perdent de l'énergie en ionisant la matière. Ces ions résultant deviennent donc des impuretés permettant donc la condensation des vapeurs d'alcool, ceci étant visible sous forme de traces opaques retraçant la trajectoire de la particule. On comprend donc pourquoi la chambre à brouillard se limite aux particules chargées. La réelle difficulté réside dans la reconnaissance des divers particules. Pour ce faire, on pourra utiliser la présence d'un champ magnétique qui

avec une intensité donnée courbera la trajectoire des particules avec un certain rayon donné. Ou encore, on pourra invoquer le fait qu'au plus une particule se déplace lentement, au plus elle forme d'ions dans son passage et au plus la traînée sera opaque.

2.2 Mesures et discussion

Il s'agit maintenant d'utiliser à proprement dit notre chambre à brouillard afin d'effectuer des mesures. Comme précédemment évoqué, il est difficile de convertir l'aspect surprenant de ce dispositif en un aspect pratique. En effet, la chambre à brouillard est davantage, de nos jours, un outil d'observation que de mesure.

Nous nous sommes donc proposer de réaliser l'étude suivante, **calcul de l'énergie moyenne des électrons émis par un échantillon de torbernite**. Pour ce faire, nous nous sommes donc procurer un échantillon de torbernite, étant un minéral contenant entre autre de l'uranium dont la formule chimique est donnée par : $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. La majorité de l'uranium naturellement présent sur terre, du moins 99.2742%, est de l'uranium-238. On peut donc s'intéresser à la chaîne de désintégration de celui-ci.



[2] Chaîne de désintégration de l'uranium-238.

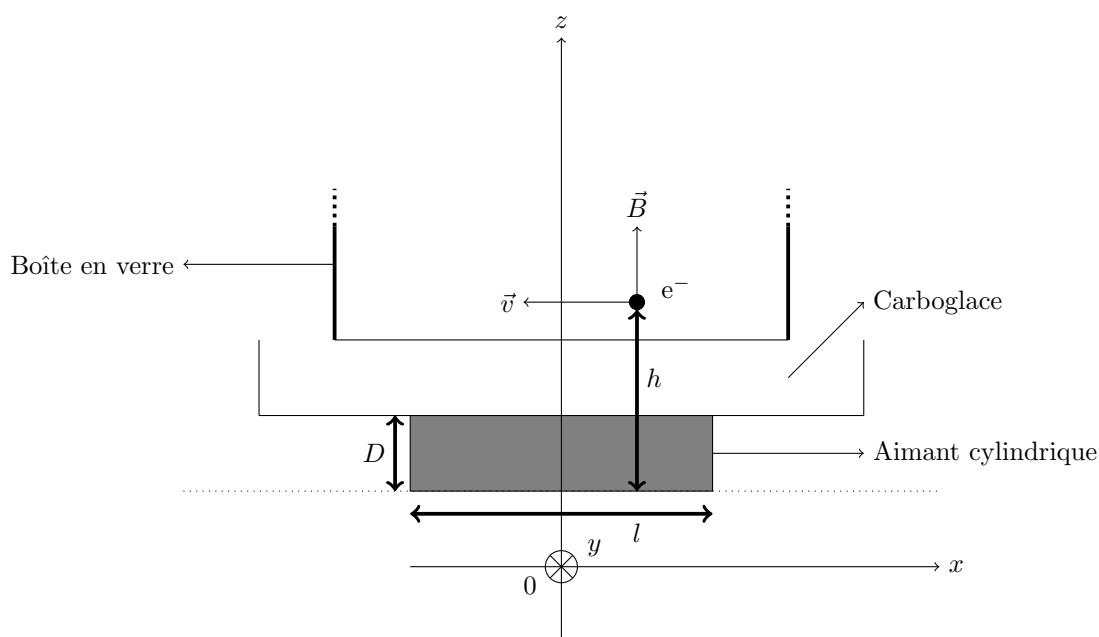
La chaîne débute par un noyau d'uranium-238 et s'arrête jusqu'à devenir un noyau de plomb-206, lui-même étant stable. La chaîne de désintégration de l'uranium-238 présente donc 14 transmutations. Parmi ces 14 transmutations, 8 particules alpha seront émises pour 6 électrons. Le but de notre étude étant de calculer l'énergie moyenne de ces électrons. Mais comment peut-on différencier particules alpha et électron simplement à l'aide de la chambre à brouillard? Simplement en terme de masse. La masse d'un électron est de l'ordre 1000 fois plus petite que celle d'une particule alpha. Nous verrons, d'après les équations que nous établirons plus loin, qu'au plus la masse d'une particule est grande, au plus le rayon de courbure de sa trajectoire dans un champ magnétique constant est grande. Autrement dit, il est impossible d'observer un rayon de courbure notable pour les particules alpha. Autre facteur : la masse des particules alpha est synonyme d'une faible vitesse et donc de davantage d'interactions avec la matière. On notera au préalable que dans l'optique de cette étude, on munis notre chambre à brouillard d'un aimant de géométrie cylindrique que l'on place en-dessous de la plaque inférieure.

Notions théoriques

Il s'agit donc d'étudier en toute généralité le mouvement d'une particule chargée, en l'occurrence un électron, dans un champ magnétique uniforme. Pour ce faire, on se doit d'émettre deux hypothèses, fortes mais nécessaire que l'on tâchera par la suite de reproduire expérimentalement.

1. Le champ magnétique qui règne à proximité de l'aimant est uniforme.
2. Le mouvement des électrons se fait de manière plane, c'est-à-dire dans un plan parallèle à la plaque inférieure.

On illustre ces deux hypothèses comme suit,



A partir de ce schéma, on peut exprimer à nouveau les hypothèses comme suit,

1. $h < l$
2. $\vec{v} \parallel (0, Ox, Oy)$

Dérivons à présent l'expression de l'énergie d'un électron en fonction (notamment) de son rayon de courbure.

La première étape consiste à montrer que la trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique constant est un cercle. On part de l'équation suivante,

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

$$\vec{p} = m\gamma\vec{v} \quad (2)$$

où \vec{p} est l'impulsion de la particule, m sa masse, q sa charge électrique, \vec{v} sa vitesse et \vec{B} l'intensité du champ magnétique. Pour rappel, la facteur γ est tel que,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (3)$$

$$|\vec{v}| = v \quad (4)$$

Étant donné qu'il n'y a pas de champ électrique dans le système étudié, l'équation (1) prend la forme,

$$\frac{d}{dt}(m\gamma\vec{v}) = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

Or, le travail de la force de Lorentz sur la particule est nul (car $\frac{d\vec{p}}{dt} \perp \vec{v}$) de sorte que la vitesse de la particule est constante.

L'équation (6) prend alors la forme suivante,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m\gamma} \vec{v} \times \vec{B} \quad (6)$$

ou encore,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \times \vec{\omega}_b \quad (7)$$

où $\vec{\omega}_b = \frac{q\vec{B}}{m\gamma}$ est la fréquence gyromagnétique.

En invoquant notre seconde hypothèse de départ, on peut écrire que,

$$\vec{v} = v_x \vec{u}_x + v_y \vec{u}_y \quad (8)$$

En terme des composantes, l'équation (8) peut alors s'écrire comme un système d'équations différentielles,

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_x = v_y \omega_b \\ \frac{d}{dt} v_y = -v_x \omega_b \end{cases} \quad (9)$$

La résolution d'un tel système fournissant les solutions suivantes,

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{v}{\omega_b} \sin(\omega_b t) \\ y(t) = y_0 + \frac{v}{\omega_b} \cos(\omega_b t) \end{cases} \quad (10)$$

où x_0, y_0 sont des constantes d'intégration.

On observe donc clairement (par passage en coordonnées polaire par exemple) que la particule suit bien la trajectoire d'un cercle de rayon $R = \frac{v}{\omega_b}$ et de centre (x_0, y_0) .

La seconde étape consiste à utiliser le fait que la particule suit bien une trajectoire circulaire. On peut alors écrire que,

$$\frac{d}{dt} \vec{v} = \frac{v^2}{R} \vec{u}_r \quad (11)$$

où \vec{u}_r est un vecteur unitaire qui pointe vers le centre du cercle.

Par l'équation (6), on obtient donc que,

$$m\gamma \frac{v^2}{R} = qvB \quad (12)$$

(car par hypothèse $\vec{B} \perp \vec{v}$) ou encore,

$$R = \frac{m\gamma v}{qB} \quad (13)$$

Or, rappelons que l'énergie d'une particule relativiste est donnée par,

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 |\vec{p}|^2} \quad (14)$$

où $m_0 = m$ est la masse au repos de la particule.

Or, $|\vec{p}| = p = m\gamma v = RqB$. On pourra donc fondamentalement écrire que,

$$\boxed{E = \sqrt{m^2 c^4 + (ceRB)^2} \quad [\text{J}]} \quad (15)$$

où $q = -e$ est la charge électrique d'un électron.

Mesures

En vertu de l'équation (15), deux paramètres nous sont *a priori* inconnus, mais nous pouvons toutefois les mesurer. Il s'agit du rayon de courbure R et de l'intensité du champ magnétique B .

Intéressons-nous dans un premier temps à la mesure de B . Comme évoqué dans la section **notions théoriques**, nous avons fait l'approximation que $h < l$. Toutefois, cette approximation ne permet pas de garantir que la valeur du champ B en h est la même qu'à proximité immédiate de l'aimant. Pour ce faire, nous avons la relation suivante qui permet, pour un aimant de géométrie cylindrique, de calculer la valeur du champ en fonction de la hauteur z où $(0, \vec{u}_z)$ est l'axe passant par le centre de l'aimant.

$$|\overrightarrow{B}(z)| = \frac{B_r}{2} \left(\frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (16)$$

où D est tel qu'indiquée dans le schéma plus haut et $R = l/2$.

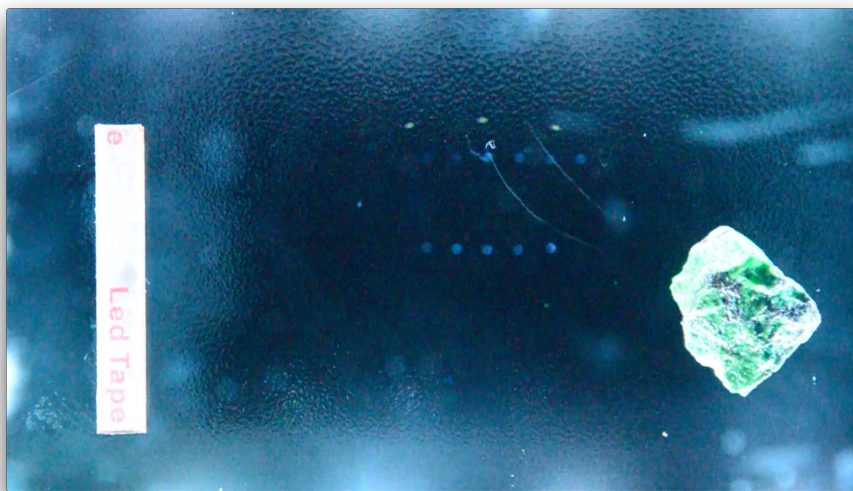
On ne justifiera pas cette formule. Le lecteur soucieux de plus amples justifications pourra faire appel à la loi de Biot-Savart ou bien à tout ouvrage d'électromagnétisme de référence.

L'application de cette relation aux caractéristiques de notre aimant fournit un champ magnétique estimé à,

$$B = (0.063 \pm 0.004) \text{ T}$$

On insiste sur le fait que cette valeur demeure approximative, ceci sera discuté en plus de détails plus tard.

Il ne nous reste plus qu'à mesurer le rayon de courbure des électrons observés dans la chambre à brouillard. Pour ce faire, nous avons opté pour la méthode suivante. On filme la chambre du dessus, en essayant que l'objectif soit le plus parallèle possible à la plaque inférieure de la chambre et de sorte qu'il soit placé dans l'axe $(0, \vec{u}_z)$ passant par le centre de l'aimant. On règle ensuite l'appareil de sorte à ce qu'il filme avec le plus haut fps (de l'anglais, *frames per second*) disponible. On analyse ensuite les fps à l'aide d'un logiciel de type *Tracker*. En guise d'illustration, voici typiquement ce que l'on peut observer à l'aide de l'appareil photo :



[3]

Image de ce que l'on peut observer sur l'appareil photo.

On prendra comme incertitude caractéristique celle de l'étalon, soit de 1 mm. Nous avons analysé un total de 38 rayons de courbure. Voici les valeurs obtenues.

R [cm]	ΔR [cm]	R [cm]	ΔR [cm]
0.8	0.1	4.6	0.1
2.5	0.1	2.6	0.1
4.7	0.1	4.1	0.1
2.0	0.1	5.9	0.1
1.5	0.1	6.6	0.1
2.1	0.1	8.8	0.1
1.1	0.1	3.4	0.1
3.2	0.1	1.3	0.1
1.8	0.1	1.9	0.1
6.3	0.1	2.2	0.1
1.7	0.1	6.2	0.1
1.5	0.1	3.7	0.1
2.2	0.1	3.5	0.1
4.9	0.1	2.9	0.1
2.0	0.1	4.9	0.1
2.8	0.1	1.3	0.1
4.0	0.1	2.7	0.1
2.6	0.1	1.2	0.1
7.4	0.1	4.2	0.1

Ces résultats nous permettent donc d'évaluer l'impulsion, donnée par $p = RqB$, de chacun des électrons dont le rayon de courbure a été mesuré. On obtient les résultats suivants.

R [cm]	ΔR [cm]	p [MeV/c]	Δp [MeV/c]	R [cm]	ΔR [cm]	p [MeV/c]	Δp [MeV/c]
0.8	0.1	0.15	0.01	4.6	0.1	0.87	0.06
2.5	0.1	0.47	0.03	2.6	0.1	0.50	0.04
4.7	0.1	0.88	0.06	4.1	0.1	0.78	0.05
2.0	0.1	0.38	0.03	5.9	0.1	1.12	0.07
1.5	0.1	0.28	0.02	6.6	0.1	1.24	0.08
2.1	0.1	0.40	0.03	8.8	0.1	1.66	0.11
1.1	0.1	0.22	0.02	3.4	0.1	0.65	0.05
3.2	0.1	0.61	0.04	1.3	0.1	0.24	0.02
1.8	0.1	0.34	0.03	1.9	0.1	0.37	0.03
6.3	0.1	1.19	0.08	2.2	0.1	0.41	0.03
1.7	0.1	0.31	0.02	6.2	0.1	0.12	0.01
1.5	0.1	0.27	0.02	3.7	0.1	0.70	0.05
2.2	0.1	0.41	0.03	3.5	0.1	0.66	0.05
4.9	0.1	0.92	0.06	2.9	0.1	0.56	0.04
2.0	0.1	0.38	0.03	4.9	0.1	0.92	0.06
2.8	0.1	0.53	0.04	1.3	0.1	0.24	0.02
4.0	0.1	0.75	0.05	2.7	0.1	0.50	0.04
2.6	0.1	0.49	0.03	1.2	0.1	0.23	0.02
7.4	0.1	1.40	0.09	4.2	0.1	0.79	0.05

On peut dès lors directement calculer l'énergie des électrons à l'aide de la relation (15) en rappelant que l'énergie de l'électron au repos est $m_e c^2 = mc^2 = 0.5109989461(31)$ MeV. On obtient les résultats suivants.

E [MeV]	ΔE [MeV]	E [MeV]	ΔE [MeV]
0.53	0.01	1.01	0.06
0.69	0.02	0.71	0.04
1.02	0.05	0.93	0.05
0.64	0.02	1.23	0.07
0.58	0.01	1.34	0.08
0.65	0.02	1.73	0.11
0.55	0.01	0.83	0.05
0.79	0.03	0.56	0.02
0.62	0.01	0.63	0.03
1.29	0.07	0.65	0.03
0.60	0.01	0.52	0.01
0.58	0.01	0.87	0.05
0.65	0.02	0.83	0.05
1.05	0.05	0.75	0.04
0.64	0.02	1.06	0.06
0.74	0.03	0.57	0.02
0.91	0.04	0.72	0.04
0.70	0.02	0.56	0.02
1.49	0.09	0.94	0.05

Notons de plus que toutes ces valeurs nous permettent de calculer explicitement le facteur β (sans unité) défini comme $\beta = \frac{v}{c}$. En effet, il suffit pour ce faire d'écrire l'équation (13) comme,

$$\gamma v = \frac{RqB}{m}$$

où $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, de sorte que l'on peut ensuite montrer que

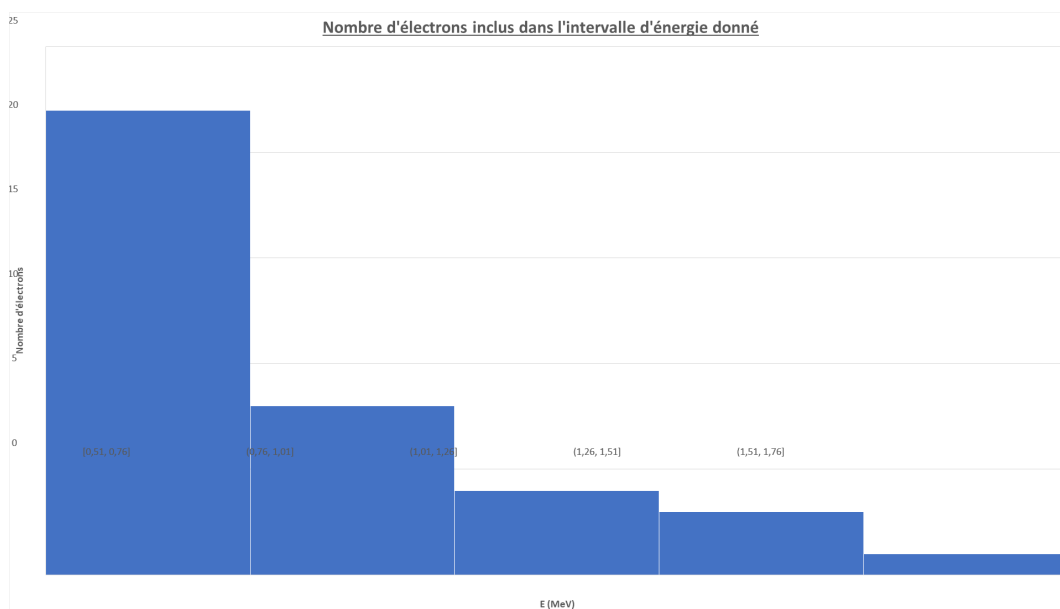
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{RqB}{m\sqrt{c^2 + \left(\frac{RqB}{m}\right)^2}}$$

On ne donnera pas les incertitudes sur β . On obtient alors les valeurs suivantes.

R [cm]	ΔR [cm]	β	R [cm]	ΔR [cm]	β
0.8	0.1	0.29	4.6	0.1	0.86
2.5	0.1	0.68	2.6	0.1	0.70
4.7	0.1	0.87	4.1	0.1	0.84
2.0	0.1	0.59	5.9	0.1	0.91
1.5	0.1	0.48	6.6	0.1	0.92
2.1	0.1	0.61	8.8	0.1	0.96
1.1	0.1	0.39	3.4	0.1	0.79
3.2	0.1	0.76	1.3	0.1	0.42
1.8	0.1	0.56	1.9	0.1	0.58
6.3	0.1	0.92	2.2	0.1	0.62
1.7	0.1	0.52	6.2	0.1	0.22
1.5	0.1	0.47	3.7	0.1	0.81
2.2	0.1	0.62	3.5	0.1	0.79
4.9	0.1	0.87	2.9	0.1	0.74
2.0	0.1	0.60	4.9	0.1	0.88
2.8	0.1	0.72	1.3	0.1	0.43
4.0	0.1	0.83	2.7	0.1	0.70
2.6	0.1	0.69	1.2	0.1	0.41
7.4	0.1	0.94	4.2	0.1	0.84

Discussion

Avant d'entamer une quelconque discussion, observons l'histogramme de la répartition d'énergie des électrons émis par le minéral de torbernite.



[3]

Histogramme de la répartition d'énergie des électrons.

Bien que ce test statistique n'ait été réalisé que sur 38 électrons émis, 78% de ces électrons sont situés dans un intervalle d'énergie de 0.51 à 1.01 MeV, ceci suggérant que la probabilité d'intercepter un électron dont l'énergie est dans cet intervalle est plus importante que dans des intervalles d'énergie supérieure. Par ailleurs, on observe également une rapide décroissance de l'histogramme ; celui-ci ne comportant déjà plus qu'un seul électron dans l'intervalle [1.51,1.76]. Cette décroissance n'est pas surprenante. On peut effectivement montrer que les désintégration d'un certain noyau suivent une distribution discrète de Poisson. Celle-ci est définie par,

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

Cette loi nous donne la probabilité d'observer un certain nombre de désintégration k en une seconde. Or, notre intérêt ne porte pas sur le nombre d'électron émis mais bien sur le nombre d'électron ayant une certaine énergie donnée. Ceci suggère donc une certaine corrélation entre une loi de probabilité (probablement de Poisson) et l'énergie des électrons émis.

Revenons-en à nos mesures. Maintenant que nous avons observé que l'énergie des électrons émis semble se situer autour d'un certain intervalle d'énergie, il est justifié de calculer la moyenne des énergies obtenues à partir de nos résultats. Un rapide calcul fournit donc le résultat suivant,

$$E = (0.81 \pm 0.03) \text{ MeV}$$

Cette valeur est-elle plausible? Cohérente? Possible? Une désintégration bêta possède, en toute généralité, une énergie voisine de 1 MeV. Pour être plus précis, on peut comparer nos résultats à l'aide de tables de données reprenant l'énergie de chacune des particules β émises au cours de la chaîne de désintégration de l'uranium-238 (en choisissant le mode de désintégration le plus probable, comme illustré par des flèche en gras sur l'image [2]). On se base sur l'image [2] et on donne l'énergie de la $n^{\text{ième}}$ particule β émise.

$n^{\text{ième}}$ particule β	Transmutation associée	E [MeV]
1	${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa}$	0.27
2	${}_{91}^{234}\text{Pa} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{U}$	2.19
3	${}_{82}^{214}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{214}\text{Bi}$	1.01
4	${}_{83}^{214}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{214}\text{Po}$	3.27
5	${}_{82}^{210}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{210}\text{Bi}$	0.06
6	${}_{83}^{210}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{210}\text{Po}$	5.41

L'énergie moyenne des électrons émis est donc de 2.03 MeV. On constate également que les énergies se situent dans un intervalle entre 0.06 et 5.41 MeV. Par la présente, on a donc montré la plausibilité et la possibilité de notre valeur obtenue. Insistons toutefois sur le fait qu'il n'est rigoureusement pas légitime de prendre la moyenne des énergies des électrons émis. En effet, la valeur moyenne n'est exposée qu'à titre indicatif. Nous n'avons aucune idée, et par ailleurs aucun moyen de vérifier, de quelle transmutation provient chaque électron dont on a calculé le rayon de courbure. On dira plutôt que l'énergie moyenne des électrons émis est une très bonne comparaison concernant l'ordre de grandeur de notre valeur obtenu.

Mais alors, en quoi notre valeur serait-elle cohérente? Premièrement, et de manière triviale, la valeur de l'énergie que l'on trouve est supérieure à l'énergie au repos de l'électron. Supposons maintenant que l'électron se déplace à une vitesse $v = 0.96c$, ce qui correspond à la valeur maximale du facteur β trouvé. Alors, $p = m\gamma v \approx 3.6mc$. On trouve alors que $E = 1.9$ MeV. Nous avons donc bien vérifié la cohérence de notre valeur obtenue en la comparant entre une valeur théorique minimale et maximale.

Discutons finalement les facteurs ayant pu fausser notre valeur. Il y a en premier lieu, comme évoqué précédemment, l'incertitude liée à l'aimant. Le champ magnétique produit au voisinage de l'électron traversant la zone au-dessus de l'aimant n'est pas uniforme. A la limite, il le serait si l'électron passe à proximité même de l'aimant, chose qui est impossible au vu de la conception de notre chambre à brouillard (en raison de la hauteur h). De plus, nous n'avons aucun moyen de vérifier la hauteur à laquelle passe l'électron par rapport à l'aimant. Certain se déplacent peut-être plus proche de l'aimant que d'autre et peuvent donc être sujets à un champ magnétique plus ou moins intense. A ceci s'ajoute que l'aimant peut perdre de ses propriétés magnétiques en raison de la température extrêmement basse qui lui est imposée. Rappelons que l'aimant n'est au contact que du carton dans laquelle la carboglace est placée. En particulier, la température de Curie du néodyme (principal matériau qui constitue l'aimant) est de 320°C, mais l'aimant n'est pas uniquement constitué de néodyme. Il faudrait donc vérifier la température de Curie des autres matériaux constituant l'aimant.

Deuxièmement, nos mesures sont également affaiblies par la géométrie des rayons de courbures observés qui ont du, à certaines reprises, être approximatifs. C'est-à-dire que de temps à autre, la trajectoire de l'électron était faiblement marquée ou partiellement marquée, nous obligeant donc à approximer la trajectoire de l'électron. A ceci ajoutons que notre chambre n'étant pas parfaitement hermétique est sujette à un courant d'air permanent qui entraîne le brouillard, et donc les trajectoires laissées par les particules, dans une certaine direction. Conséquence : les trajectoires sont modifiées par ce courant d'air. Rappelons aussi qu'énoncer qu'une chambre à brouillard permet de "voir l'invisible" est à proprement dit faux étant donné que l'on n'observe pas la particule elle-même mais plutôt la conséquence de son passage au travers du brouillard. Les trajectoires étudiées ne seraient donc rigoureusement pas celles des électrons.

Un autre facteur possible d'erreur concerne la deuxième hypothèse émise au début de la section **notions théoriques**. Il est en effet assez illusoire de supposer que tous les électrons émis par le minerai se propagent dans une direction parallèle à la plaque inférieure de la chambre. La négligence de ce phénomène ne conduit pas à d'erreurs de calcul, notamment au niveau de la vitesse de l'électron, mais peut induire des erreurs lors de la mesure du rayon de la trajectoire de l'électron étant donné que l'arc de cercle formé n'est pas rigoureusement parallèle à l'objectif de l'appareil photo. De plus, nous ne pouvons également garantir avec certitude que les particules observées sont des électrons. En effet, il pourrait également s'agir de particules alpha, étant également chargées, voire des protons ou des positrons. Cette incertitude est particulièrement marquée pour les particules ayant un facteur γ assez petit, disons de l'ordre de 0.20.

3 Conclusion et ouverture

3.1 Conclusion

En guise de conclusion, nous allons retracer l'histoire que fut la construction de cette chambre à brouillard, depuis l'idée de la construction jusqu'à aujourd'hui. Dans un premier temps, l'idée, après réflexion, fut excellente car étant en parfaite symbiose avec le thème imposé tout en demeurant intéressante sur le plan physique et ludique. Néanmoins, la construction d'une chambre parut au premier abord une entreprise longue et compliquée. La restriction de matériel et de budget n'aidant guère. Effectivement, nous avions initialement prévu de construire une chambre brouillard *autonome* dans le sens où seul un bouton ON/OFF suffit afin de l'allumer et de l'éteindre. Cette version étant inspirée du site internet "<http://www.cloudylabs.fr/wp/>" dont l'auteur nous a partagé un mode d'emploi de construction. L'automatisation de la chambre demande une grande quantité de matériel électronique et de connaissance dépassant le cadre du projet et du temps limité nous ayant été imposé. Après réflexion, mais surtout après compréhension du principe de fonctionnement d'une chambre à brouillard, nous avons décidé d'abandonner la construction de cette chambre automatique. A la place, nous avons décidé de reprendre l'idée d'utilisation de modules Peltier afin de refroidir la plaque inférieure aux températures demandées, mais à notre manière. Nous nous sommes donc procurés 4 modules Peltiers et avons entrepris la construction du dispositif. Problème : nous ne possédions pas de moyen de refroidissement suffisant de sorte qu'il s'est avéré impossible de maintenir les Peltiers à une température constante de -30°C . Finalement, et ce presque en dernière minute, nous avons opté pour notre plan de *secours* : la carboglace. Bien qu'un peu découragé que de voir notre projet réduit à l'utilisation de carboglace, nous ne fûmes pas moins surpris par le résultat obtenu. Notre chambre à brouillard est née.

En toute généralité, la réalisation de ce projet fut ambitieuse. Chacun de nos essais, qu'ils aient été probants ou non, soulevèrent de nouvelles questions et de nouvelles remises en question. Ce schéma nous ayant donc demandé de nous informer, d'apprendre et de communiquer avec les personnes et membre universitaires autour de nous. Le bilan personnel retenu de ce projet est univoquement positif.

Sur un plan plus objectif, nous savions que la construction d'une chambre à brouillard allait avoir beaucoup de succès auprès du public visiteur du Printemps des Sciences, ce qui fut effectivement le cas. Que ce soit les visiteurs sans bagage scientifique quelconque ou les scientifiques eux-mêmes, l'étonnement et l'admiration furent habituellement les premières réactions. En revanche, nous savions aussi qu'il serait difficile d'entreprendre un quelconque travail physique *sérieux* à l'aide d'une chambre à brouillard. C'est pourquoi les résultats obtenus dans l'étude précédente nous ont quelque peu surpris par leur adéquation avec la *réalité*.

3.2 Ouverture

Nous nous proposons d'étendre ce document en discutant de ce que nous aurions pu améliorer, tant sur le plan technique que sur le plan pratique, et d'un problème dont nous avons été confronté qui a remis en question la faisabilité du projet. Enfin, nous discuterons brièvement d'un phénomène que nous avons pu (ou cru) observer au cours de l'analyse des vidéos enregistrées par l'appareil photo.

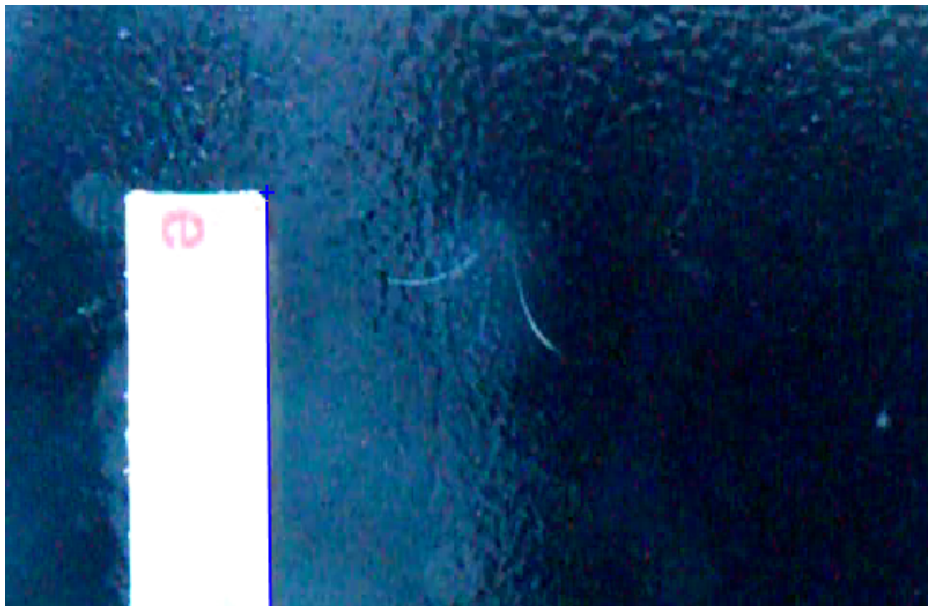
Débutons par discuter d'un des plus gros problèmes dont nous avons été confronté. Il s'agit de l'échec de l'utilisation des modules Peltiers, comme évoqué précédemment. Mais alors, pourquoi ne pas avoir directement misé sur la carboglace ? Car d'après nos sources, il s'avère que la température de la carboglace est bien trop faible que pour pouvoir garantir une utilisation optimale de la chambre. Nous avons d'abord entrepris une étude théorique sur les modules Peltier afin de comprendre quel était leur mode de fonctionnement, leur mode d'utilisation et leur puissance de refroidissement. Notre étude démontrait la faisabilité de l'utilisation de modules. La pratique en décida autrement. Dans un premier temps, nous avons disposé les 4 modules dont nous disposions (chacun de 200 W - puissance maximale) sur les dissipateurs thermiques à l'aide de pâte thermique. Afin de refroidir le système, nous avons disposé une multitude de ventilateurs produisant un flux d'air afin de refroidir les dissipateurs thermiques. On connut ici notre premier échec car chaque module ne diminuait pas en-dessous d'une température de $-10/-15^{\circ}\text{C}$. Diminuer en-dessous d'une telle température paraissait impossible : dès que l'on augmentait l'intensité des dissipateurs ne parvenaient plus à refroidir les modules de sorte que les Peltiers devenaient de réels chauffages ! Après réflexion, nous avons envisagé de placer un Peltier sur l'autre (face chaude contre face froide) de sorte que chaque Peltier puisse mutuellement se refroidir. Cette technique fut un succès étant donné que nous sommes enfin parvenus à atteindre des températures entre -25 et -30°C . Afin d'atteindre une telle efficacité de refroidissement, nous avons eu l'idée de placer les dissipateurs thermiques dans un bac d'eau. Mais un nouveau problème survint :

la température de l'eau monta rapidement et les dissipateurs thermiques n'étaient plus en mesure de refroidir les modules Peltier. Une autre idée eut été de placer des glaçons dans la cuve d'eau, mais cette opération aurait à long terme fait déborder l'eau de la cuve, ce qui aurait présenté un réel danger car un courant de 9 A pour 40 V est nécessaire pour alimenter le circuit électrique constitué des 4 Peltiers. Une dernière tentative fut entreprise en utilisant seulement 2 Peltier, placés l'un sur l'autre, et en construisant un circuit à eau dans la cuve afin de faire circuler l'eau et donc d'homogénéiser la température de cette dernière. Cette méthode permit de maintenir les Peltier entre -26 et -30°C pendant 30 minutes. Mais malgré ceci aucun brouillard n'était visible dans la chambre. C'est donc une semaine avant le premier jour du Printemps des Sciences que l'on abandonna les modules Peltiers pour la carboglace.

Qu'aurions-nous pu, avec du recul, améliorer lors de la conception de la chambre à brouillard ? Voici les points que nous avons retenu.

- Au lieu d'entreprendre initialement la construction d'une chambre à brouillard automatisée, et donc complexe, nous aurions pu plutôt partir d'une forme plus élémentaire de chambre à brouillard que nous aurions petit à petit modifiée et complexifiée en fonction de nos besoins.
- Davantage de discussion avec des personnes ayant déjà eu l'expérience d'une chambre à brouillard aurait été profitable. De plus que le laboratoire de physique des particules IIHE possède plusieurs exemples de chambres à brouillard.
- La taille de la chambre à brouillard aurait pu également être améliorée. En effet, l'idée de base des modules de Peltier nous a restreint sur les dimensions qui devaient être les plus petites afin de minimiser la surface à refroidir. L'utilisation de carboglace nous aurait permis d'augmenter cette taille. Il s'est avéré que certains visiteurs ont eu du mal à percevoir les traces laissées dans la chambre à brouillard de sorte qu'une retransmission en directe aurait été pratique.

Finalement, nous souhaiterions discuter en quelques mots du phénomène que nous avons remarqué lors de l'analyse d'une des vidéos. Le phénomène peut explicitement s'apercevoir sur l'image ci-dessous.



[3]

Éventuelle création de paires à partir d'un photon de haute énergie.

On imagine clairement sur l'image qu'une particule incidente s'est désintégrée en deux autres. La trace de la particule incidente n'est pas visible, seules les deux particules émises sont visibles. Au vu des rayons de courbure visibles, les deux particules seraient des électrons. Plus précisément, il s'agirait d'un électron et de son antiparticule, un positron, car se dirigeant en sens opposé. L'unique particule incidente pouvant entraîner ce type de phénomène est un photon de haute énergie (ou en toute généralité tout boson neutre de haute énergie). On insiste toutefois sur l'incertitude de nos propos. Toutefois, d'après des sources extérieures, ce phénomène n'est pas si rare et il est donc

hautement probable qu'il s'agisse bien de la création d'une paire électron-positron. Ce type de collision est permis lorsque il y a suffisamment d'énergie disponible pour créer la paire, c'est-à-dire au moins deux fois la masse au repos de l'électron. Ainsi, si on désigne par E l'énergie du photon, on a que,

$$E = 2E_{e^-} + E_c + E_k + E_{k'} \quad (17)$$

où E_{e^-} est l'énergie de masse de l'électron (l'électron et le positron ont la même énergie de masse), E_c est l'énergie de collision et où E_k et $E_{k'}$ sont les énergies cinétiques respectives de l'électron et du positron. Après analyse des rayons de courbures de ces deux particules, et comme il n'y a que E_c comme inconnue, nous sommes en mesure de dire que $E \geq 1.04 + E_c$ [Mev].

3.3 Crédits photographique

- [1] : Pierre Gérard & Nicolas De Ro Miralles.
- [2] : From J. Joutsenvaara, Univeristy of Oulu in Research Gate.
- [3] : Pierre Gérard & Nicolas De Ro Miralles.
- [4] : Pierre Gérard & Nicolas De Ro Miralles.