

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT PARIS VII

RAPPORT DE STAGE M1

**Le projet DarkSide 20K : étude d'un
prototype de détecteur de matière noire à
l'argon liquide**

Antoine MICHEL

Tuteurs : Pascal PRALAVORIO et
Francesco PIETROPAOLO

3 Juin 2019 — 3 Août 2019

Table des matières

Table des matières	1
1 Le travail réalisé sur le proto-0	1
1.1 Tests cryogéniques de l'acrylique	1
1.1.1 Premier test	1
1.1.2 Deuxième test	3
1.1.3 analyse de la variation de la température en fonction de la pression à l'aide de ROOT	4
1.2 Prochaines étapes dans la construction du proto-0	5
1.2.1 Soudage des sondes PT-1000 pour le prochain test	5
1.3 Les simulations sur le proto-0	6
2 Le travail réalisé sur ProtoDune	9
2.1 Le principe de l'expérience	10
2.2 Les problèmes rencontrés	11
3 Conclusion	12
Bibliographie	13

1 Le travail réalisé sur le proto-0

J'ai réalisé un travail de recherche sur le proto-0, un prototype du détecteur de matière noire DarkSide, pendant les premières semaines de mon stage. J'ai pu aider un post-doctorant, Yi Wang, dans son travail pour réaliser le proto-0, et ainsi pu mettre un pied dans la réalité de la physique expérimentale au CERN.

1.1 Tests cryogéniques de l'acrylique

Mon stage a commencé avec un test du methyl methacrylate (dérivé de l'acrylique) dans l'argon liquide, il est prévu que l'armature de la TPC (le détecteur de matière noire) soit faite de cette matière. Le but des tests étaient de s'assurer que l'argon liquide n'avait pas d'impact sur l'acrylique.

1.1.1 Premier test

Le premier test a eu lieu le 6 juin. Le montage est montré dans la figure 1 en haut à gauche. Quatre sondes PT-1000 étaient placées à différentes hauteurs dans le montage. Il s'agit de résistances dont la valeur varie linéairement en fonction de la température. On appelle ces sondes t_2 , t_1 , t_4 et t_3 respectivement de haut en bas (figure 1 en haut à gauche). La barre en fer que l'on peut voir dans les figures 1 était le capteur de pression. On a donc mesuré la température à différents niveaux et la pression dans le système. Nous avons ensuite placé le montage dans une cuve interne puis nous avons placé la cuve interne dans un cryostat (en bas à droite dans la figure 1).

Puis nous avons fait le vide dans la cuve interne. Ce n'était pas un vide très poussé mais suffisant pour les tests. Enfin, nous avons rempli le cryostat avec de l'Argon liquide afin de recréer les conditions de DarkSide 20K.

Nous avons ensuite injecté de l'Argon liquide par intervalles dans la TPC sans volumes précis. Cependant, au bout de quelques dizaines de minutes, nous avons cru voir des fissures dans la plaque d'acrylique et nous avons donc arrêté le test (figure 2).



FIGURE 1 – Le montage en haut à gauche, la cuve interne en haut à droite et la façon dont nous avons mis la cuve en bas à gauche dans le cryostat en bas à droite

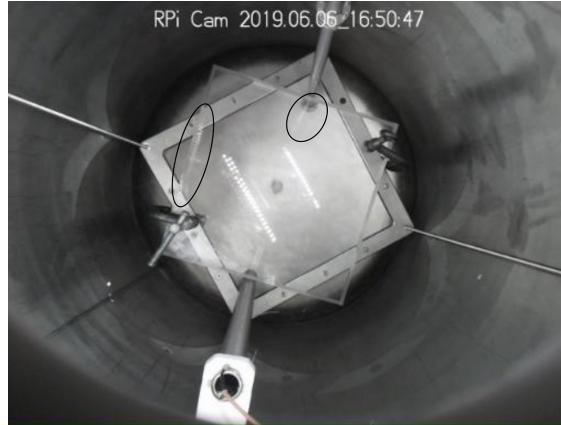


FIGURE 2 – Plaque d’acrylique avec les fissures potentielles après le premier test

1.1.2 Deuxième test

Nous avons recommencé le test quelques jours plus tard (le 11 juin) avec une plaque un peu plus grosse (6 cm d’épaisseur). Entre temps nous avons remarqué que ce qu’il semblait être des fissures sur la première plaque n’étaient en fait que des reflets de la caméra. Le second test a continué le matin du 12 juin et fut concluant. L’acrylique reste intact dans l’Argon liquide (figure 3). Le



FIGURE 3 – Plaque d’acrylique à la fin du deuxième test

montage était sensiblement le même que dans le premier test et nous avons récupéré les données de pression et de température au cours du temps. Sur la figure 4 à gauche, nous pouvons voir le schéma de l’intérieur de la cuve interne. Les carrés verts représentent les PT-1000 dont la valeur varie en fonction de la température. A droite, nous pouvons voir l’évolution de la température en fonction du temps. sur ce graphique, nous n’avons pris que les données où l’acrylique est plongée dans l’Argon liquide (c’est-à-dire $t_4 < 89K$ car la température de l’argon liquide est de 87K à pression atmosphérique).

Avant 7H30, la température n’a pas d’évolution précise ce qui est normal puisque le remplissage de la cuve interne à repris à cette heure là. Nous pouvons cependant noter que t_1 et t_2 sont à la même température et subissent les mêmes variations alors que t_4 est plus haute. La plaque n’est donc pas plongée dans l’argon.

A partir de 7H30, les trois températures sont confondues : la plaque est maintenant dans l’argon liquide. Ensuite, le remplissage a été stoppé entre 8H40 et 8H55. Nous pouvons voir que les

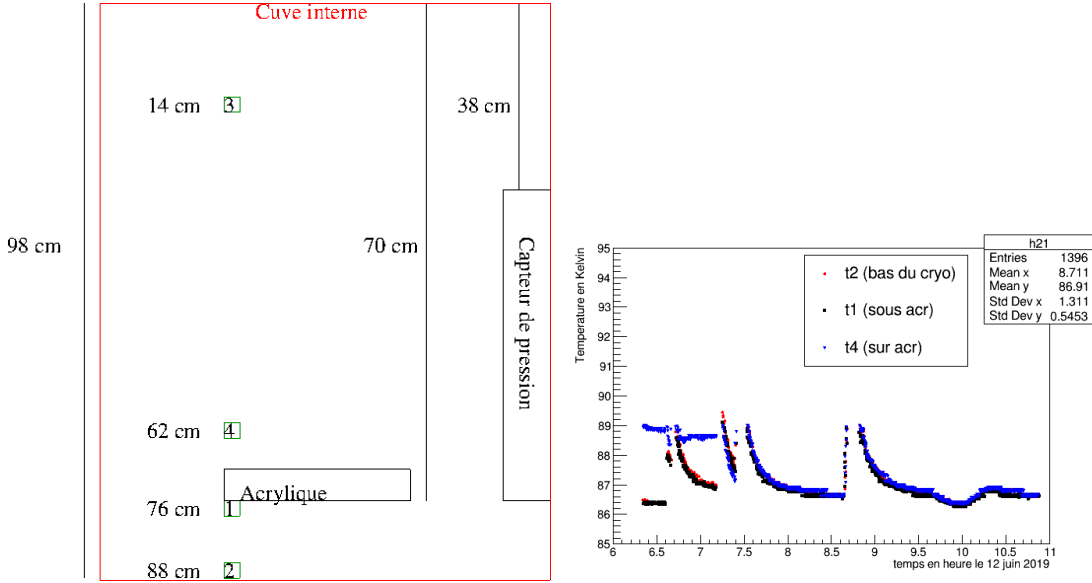


FIGURE 4 – schéma du montage (gauche) et température des trois premiers capteurs en fonction du temps (droite)

températures remontent à a ce moment là. Il y a un moment pendant cette période où il n'y a plus de température. C'est parce que les connexions ont été débranchés.

Le remplissage a repris un peu avant 9H et a continué jusqu'à 9H30 pour s'arrêter avant 10H. Il a repris entre 9H45 et 10H comme on peut le voir sur le graphique (la température diminue, toujours les trois capteurs en même temps). On en conclut que les données sont plutôt cohérentes avec le déroulement des événements

Cependant nous avons remarqué lors de ce test que lorsque l'on rajoute du liquide, la pression augmente et donc la température d'ébullition de l'argon liquide augmente. J'ai voulu alors analyser les effets de cette variation de pression sur la variation de température pour voir si il y avait un impact possible sur l'expérience.

1.1.3 analyse de la variation de la température en fonction de la pression à l'aide de ROOT

Mon superviseur Pascal Pralavorio m'a appris à prendre en main le logiciel ROOT. J'ai donc pu ajuster les données que j'avais pour les trois premières sondes de température pendant la période de remplissage entre 7H45 et 8H15. Nous pouvons remarquer sur la figure 5 que les pentes sont de 0.0117 K/mbar pour t2 et t4 à 10^{-3} K/mbar près. Cependant, la pente de t1 est un peu plus faible (les points de la sonde t1 sont également toujours en dessous des points des sondes t2 et t4). On peut également remarquer un regroupement de points autour de 86.6 K quand la pression est comprise entre 80 et 90 mbar. Cela peut s'expliquer par le fait que la sonde t1 a pu être écranté par la plaque d'acrylique, les deux étant côte-à-côte.

Nous pouvons conclure que, dans les conditions de pression du proto-0, c'est-à-dire une variation de pression maximum de 100 mbar à l'équilibre, la température ne varie que d'un degré Kelvin. La variation de la température en fonction de la pression est donc négligeable et n'aura pas d'impact sur l'expérience proto-0.

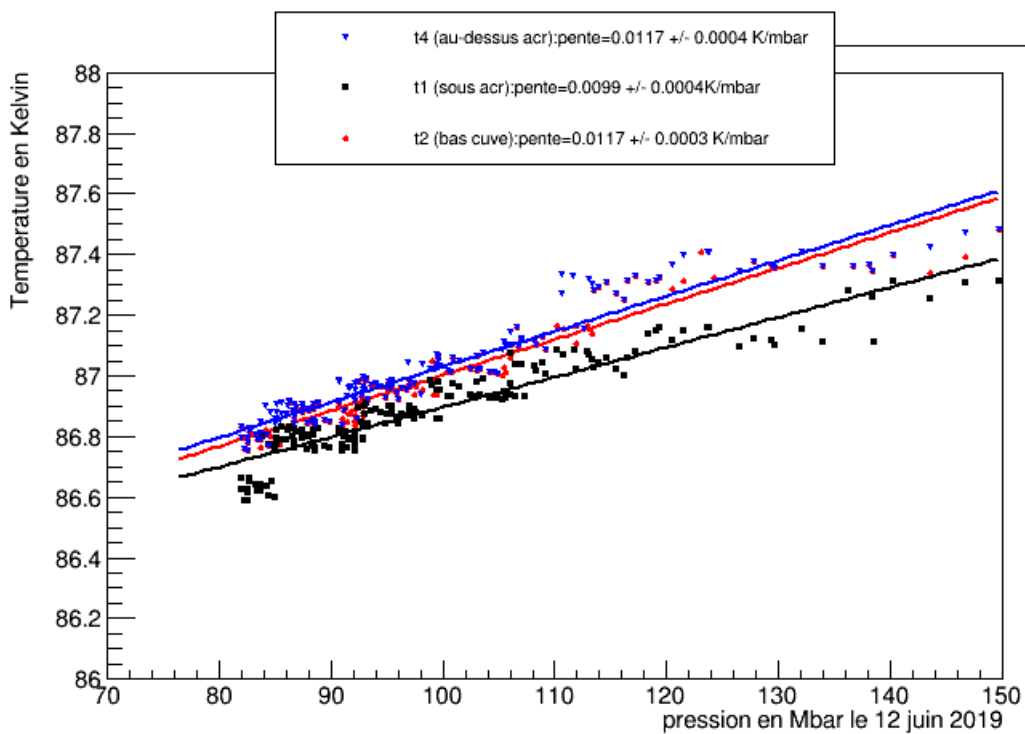


FIGURE 5 – Variation de la température des trois premières sondes en fonction de la pression

1.2 Prochaines étapes dans la construction du proto-0

1.2.1 Soudage des sondes PT-1000 pour le prochain test

Pour le proto-0, il a été décidé de refaire les sondes de température car les anciennes n'avaient pas les bonnes connectiques pour faire les tests dans des conditions optimales. J'ai donc assemblé ces sondes en soudant deux fils de 1,20 m de long à chacune des deux branches de quatre PT-1000 (figure 6). J'ai ensuite placé chaque fil dans un connecteur puis j'ai assemblé toutes les parties de

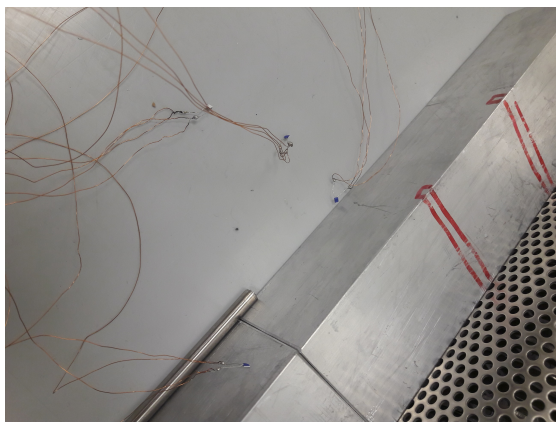


FIGURE 6 – Les quatre sondes de température (PT-1000) soudées aux fils de 1,20 m

ce connecteur.

J'ai ensuite pu tester mes sondes pour voir si elles envoient bien un signal d'augmentation de température quand on les chauffe (par exemple avec la main voir figure 7). La TPC du proto-0 a

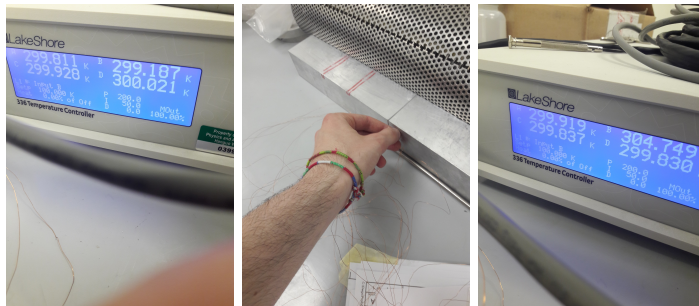


FIGURE 7 – température des quatre sondes à température ambiante (gauche), chauffage d'une des sondes (milieu), température des quatre sondes après chauffage (droite)

été montée fin juin sous le toit du cryostat (figure 9). Les sondes vont être intégrées à l'intérieur (figure 8). Le test de la TPC est prévu pour septembre.

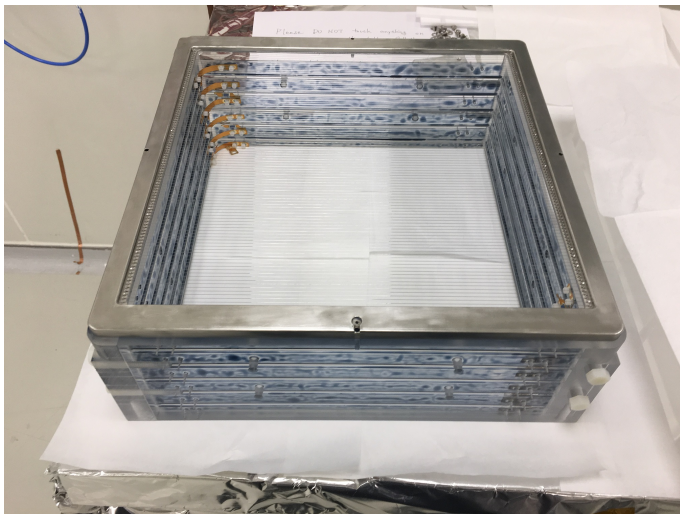


FIGURE 8 – La TPC du proto-0 avec la TPB en bleu (le wave shifter) et les fils qui représentent l'anode

1.3 Les simulations sur le proto-0

Après avoir suivi la construction du proto-0, j'ai pu réaliser plusieurs simulations sur une TPC de $12 \times 10 \times 10$ cm² entourée d'un cryostat. La source choisie pour les simulations envoyait des photons de 60 KeV aléatoirement autour d'elle, simulant ainsi les décroissances d'une source d'²⁴¹Am qui pourrait être utilisée pour calibrer la TPC du proto-0. La distance moyenne parcourue par un photon avant sa première interaction est de 1 cm. Les événements n'étaient comptabilisés que lorsqu'ils étaient détectés à l'intérieur de l'argon liquide de la TPC. L'objectif était de mesurer l'impact de la hauteur de la source sur l'efficacité de détection des événements. J'ai donc tracé les figures des événements en fonction de l'axe y et z de la TPC ainsi qu'en fonction des matériaux de celle-ci (figure 10). Sur la figure 10, l'argon liquide à l'intérieur de la TPC est égale à 8, l'acrylique est égale à 7 et l'argon du cryostat est égale à 10. On retrouve bien sur ces figures une épaisseur



FIGURE 9 – La TPC du proto-0 construite en dessous du "chapeau" du cryostat (sans les SiPM ni les capteurs)

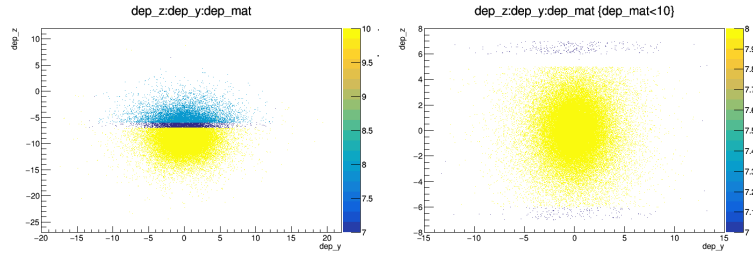


FIGURE 10 – Graphiques des dépôts d'énergie en fonction de Z,Y et des matériaux dans lequel s'effectue les depots d'énergie (le centre de la TPC est a $Z=0$ et $Y=0$) pour différentes hauteurs de source avec : $Z=-8.9$ cm en haut à gauche, $Z=-7.5$ cm en haut à droite, $Z=-6.9$ cm (juste en-dessous l'acrylique) au milieu à gauche, $Z=-5.9$ cm (juste au-dessus de l'acrylique) au milieu à droite, $Z=-3.0$ cm en bas à gauche et $Z=0$ cm en bas à droite. Toutes les sources sont à $Y=0$ cm

de 1 cm pour l'acrylique dont est composé la TPC. La plaque se situe entre -6.9 cm et -5.9 cm. De plus, nous pouvons remarquer que lorsque $Z=-3$ cm ou 0 cm (centre de la TPC), les évènements ne sont plus dans l'argon du cryostat mais uniquement dans l'argon de la TPC et le cryostat.

Les deux signaux S1 et S2 étaient reconstruits dans la simulation. J'ai donc tracé les histogrammes pour la somme de S1 et S2. J'ai ensuite pu superposer ce graphique avec une fonction gaussienne dont la moyenne devrait être de 60 keV si tous les évènements se produisent dans l'argon de la TPC. On remarque sur la figure 11 que l'énergie moyenne des évènements mesurés est de 59.74 KeV pour la source en dessous de l'acrylique. Cela signifie qu'une grande partie des évènements se sont déroulés à l'extérieur de la TPC. Alors que lorsque la source est placée au milieu, la moyenne des évènements est bien à 60 KeV.

J'ai ensuite calculé pour les six simulations le nombre d'évènements mesurés dans la gaussienne autour de 60 KeV et j'ai tracé ce nombre divisé par le nombre total d'évènements (100000) en fonction de la hauteur de la source (figure 12). On remarque que l'évolution de l'efficacité en

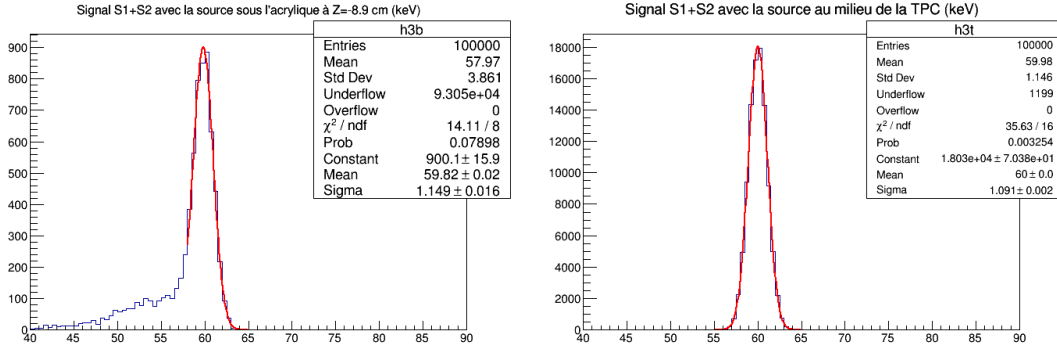


FIGURE 11 – Histogrammes de la somme des évènements S1 et S2 pour la source à Z=-8.9 cm (à gauche) et Z=0 cm (à droite).

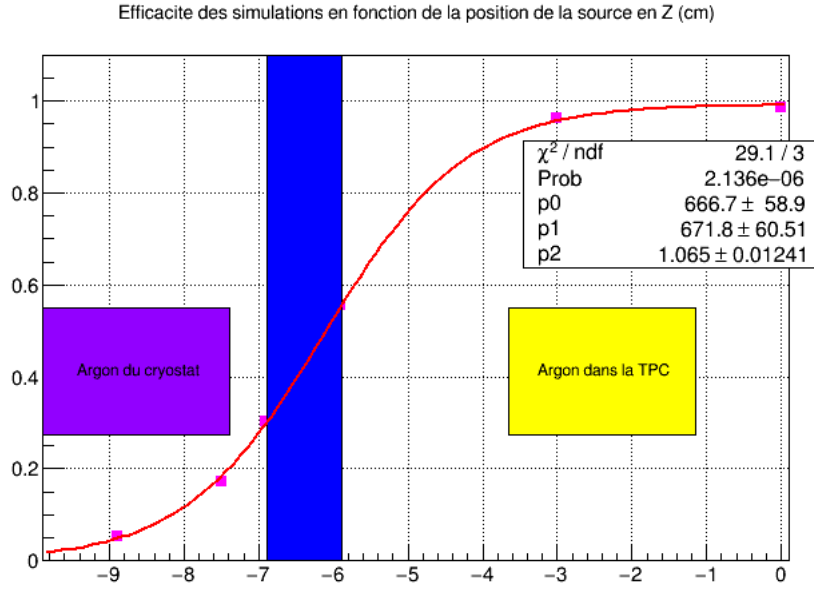


FIGURE 12 – Efficacité de détection en fonction de la hauteur de la source en cm. La barre bleue représente l'acrylique

fonction de la hauteur est une sigmoïde de la forme :

$$\frac{p_0}{p_1 + e^{-p_2 z}} \quad (1)$$

On trouve une longueur caractéristique de environ $p_2=1$ cm et $p_0 \simeq p_1 \simeq 671$, ce qui veut dire que l'efficacité est environ à 50% lorsque $e^{-z} \simeq 671$, c'est-à-dire lorsque $z \simeq -6.11$ cm. Ainsi, lorsque la source est sur l'acrylique ($z=-5.9$ cm), l'efficacité est légèrement supérieure à 50%. Pour calibrer le détecteur, faire tenir la source à $z=0$ demanderait trop d'efforts techniques. C'est pourquoi il vaut mieux effectuer la calibration en posant la source au fond de la TPC sur l'acrylique :

- L'efficacité est d'environ 50%, ce qui est tout à fait convenable lorsqu'on a plusieurs centaines de milliers d'évènements.
- Ce n'est pas difficile à mettre en place techniquement.

Il s'agit donc du meilleur rapport qualité/prix pour calibrer les photomultiplicateurs.

2 Le travail réalisé sur ProtoDune

La deuxième partie de mon travail au CERN concernait ProtoDune (figure ??). Ce sont des prototypes pour de futurs détecteurs de neutrinos et de rayons cosmique, DUNE. Mais ProtoDune est aussi le futur cryostat de DarkSide 20K. Les prototypes actuellement au CERN sont des single phase TPC (uniquement de l'argon liquide) et des dual phase TPC (avec une couche de gaz comme dans DarkSide) pour détecter les rayons cosmiques. Le cryostat de DarkSide ne sera composé que d'argon liquide. Pour l'expérience Dune, il est nécessaire de mesurer le signal S1 et la charge des électrons de ionisations. Par conséquent, S2 n'est pas mesuré.

Ainsi, si les PMTs qui mesurent le signal S1 sont sensibles aux longueurs d'onde des photons

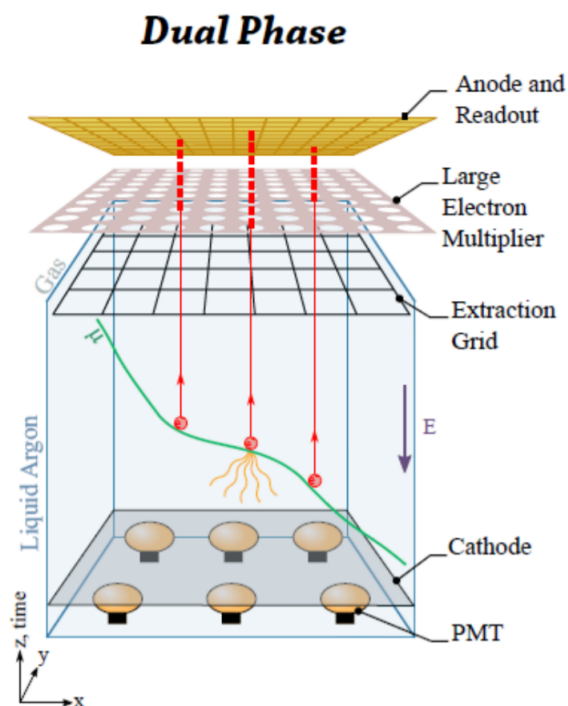


FIGURE 13 – schéma du passage d'un muon cosmique dans la dual phase TPC [1]

de ionisation créés dans la phase gazeuse ($\lambda = 127$ nm : même longueur d'onde que pour la scintillation), lors du passage d'un muon cosmique par exemple, un bruit de fond continu perturbera les mesures de ces photons (voir figure 13). Ainsi, les chercheurs travaillant sur DUNE ont eu l'idée de dopper l'argon liquide au xénon liquide car l'énergie d'excitation de l'argon pourra être transmise à un atome de xénon dans le liquide. Dans la phase gazeuse, la densité étant bien plus faible, la probabilité qu'un atome d'argon transmette son énergie d'excitation à un atome de xénon est bien plus faible [2]. Ainsi, dans la phase liquide, la scintillation n'aura qu'une partie "rapide" (4.3 ns, temps de désexcitation du xénon) et les photons émis auront une longueur d'onde de 175 nm (longueur d'onde de désexcitation du xénon) mais la lumière provenant des électrons accélérés dans la phase gazeuse seront toujours à 127 nm. Par conséquent, si les PMTs utilisés sont sensibles à la longueur d'onde de désexcitation du Xénon mais pas à celle de de l'argon, on peut éliminer énormément de bruit tout en collectant les photons de scintillation et la charge des électrons provenant de la ionisation.

2.1 Le principe de l'expérience



FIGURE 14 – Les trois PMTs en haut à gauche, la TPC avec les PMTs en haut à droite et la TPC avec les connexions pour le champ électrique en bas

Nous pouvons voir sur la figure 14 le montage utilisé. La TPC sera placé dans le même cryostat que pour l'expérience sur le proto-0 avec DarkSide. Il y aura trois PMTs utilisés :

- Un sensible à la lumière visible recouvert de TPB.
- Un sensible à la lumière visible sans TPB
- Un sensible à la lumière visible et à la lumière du xénon.

Au début, quand la TPC ne contiendrait que de l'argon, la longueur d'onde des photons de scintillation sera de 128 nm. Par conséquent, lorsqu'ils atteindront la TPB, les photons verront leur longueur d'onde se décaler vers environ 400 nm et l'émission de ces photons sera aléatoire. 50% des photons iront alors dans le PMT en dessous de la TPB et 50% seront émis dans la TPC. Les parois étant réfléchissantes, les deux autres PMTs (celui sensible au visible et celui sensible au xénon et au visible) auront chacun 25% du total de photons émis au départ. En rajoutant du xénon, on devrait voir un pic apparaître pour le signal du PMT sensible au visible et au xénon alors que le rapport entre le signal du PMT avec la TPB et celui sensible au visible devrait être constant. L'objectif final est de mettre la TPC dans l'argon liquide et de créer une poche de gaz entre la grille est l'anode (exactement comme dans DarkSide). Une tension de 6 kV est imposée entre la cathode et l'anode. Un fois cela mis en place, l'équilibre sera gardé en pompant le gaz au dessus qui sera intégré dans un liquefacteur puis, l'argon sous forme liquide sera réinjecté en bas de la cuve contenant la TPC. Nous pouvons voir sur la figure 15 le haut de la TPC avec toutes les connexions. Nous avons quatre sondes de température (des PT-1000), une sonde de pression et un capteur de niveau de l'argon liquide. Une fois la TPC plongée dans l'argon liquide en équilibre avec une poche de gaz en haut, le principe est d'injecter par très petites doses le Xénon car ainsi



FIGURE 15 – Haut de la TPC dans le cryostat

les atomes de xénon ne se "voient" pas et il n'y a pas de formation de solide (à la température de l'argon liquide, le xénon devient solide). il est inséré sous forme de gaz dans le liquéfacteur où passe l'argon gazeux pour qu'il arrive sous forme liquide dans la cuve.

J'ai pu participer activement à ce projet en réalisant par exemple le connecteur pour mesurer le niveau d'argon liquide dans la cuve (voir figure 16). Ou en aidant au montage de la TPC et en



FIGURE 16 – Photo du connecteur pendant sa construction

participant à la compréhension des dysfonctionnements.

2.2 Les problèmes rencontrés

Malheureusement, nous avons rencontré un certain nombre de problèmes qui ont empêchés d'avoir des mesures avant que je ne parte. La grande majorité de ces problèmes provenaient des connexions permettant l'application de la haute tension. Nous avons donc décidé d'enlever tous les connecteurs apportant la haute tension au-dessus de la TPC pour finalement mettre directement les câbles connectés au générateur (voir figure 17). De plus, nous avons remarqué qu'au-delà de 3.5 kV, l'argon gazeux ne retenait plus le courant et une étincelle apparaît. Donc si des connecteurs transportant la haute tension de 6 kV se trouvent dans la phase gazeuse, l'expérience ne peut pas marcher.

Finalement, des résultats seront obtenus le dernier jour de mon stage. On peut voir sur la figure 18 la partie "rapide" de la scintillation avec le cercle rouge, la partie "lente" de scintillation avec le cercle vert et le signal S2 avec le cercle bleue sur le PMT avec la TPB. Les deux autres PMTs ont



FIGURE 17 – les deux cables imposant la haute tension à l'anode et à la cathode

aussi des signaux mais d'intensité beaucoup plus faible ce qui est normal puisque 50% du signal va dans le PMT avec la TPB et le reste se partage avec les deux autres PMTs. Le temps de signal S2 (le cercle bleu) correspond au temps de drift des électrons pour remonter les long de la TPC dans l'argon liquide. L'intensité du signal est directement proportionnel à la tension placée entre la grille d'extraction et l'anode. Si le signal est plat, cela signifie que l'argon est plutôt pur. Autrement, le signal est "penché" et cela signifie que des électrons sont captés par les impuretés lors du drift. Ici on ne peut pas conclure car le temps de drift n'est pas assez long pour confirmer que l'argon est pur.

Les résultats ici ne sont que des préliminaires avant les résultats avec le dopage au xénon.

3 Conclusion

Ce stage m'a énormément appris que ce soit sur la physique expérimentale en elle-même que sur le fonctionnement du milieu de la recherche en physique des particules au CERN. Ce fut une immense opportunité de côtoyer de très grands chercheurs dans ce milieu très stimulant. J'ai également eu la chance de participer à des projets de pointe pour la recherche expérimentale au-delà du modèle standard avec les réalités physiques qu'impliquent ce genre de projet. J'ai également eu la chance de pouvoir échanger et me lier d'amitié avec d'autres étudiants en physique (ou non) du monde entier et ainsi comparer les façons de penser et percevoir différemment la physique et les études dans ce domaine. J'ai appris énormément de chose et la physique expérimentale me semble beaucoup plus intéressante et stimulante que je ne pouvais le penser avant ce stage.

Je voudrais remercier toute l'équipe des Summer Student du CERN pour l'organisation. Je voudrais remercier Burak Bilki ainsi que Yi Wang pour leur gentillesse et leur patience quant à mes nombreuses questions et pour avoir accepté de me superviser sur respectivement ProtoDune et DarkSide. Je voudrais aussi remercier mes superviseurs, messieurs Francesco Pietropaolo et Pascal Pralavorio, pour leur bienveillance et leur disponibilité ainsi que pour leur aide et leur motivation sans faille pour transmettre leur passion de la recherche en physique fondamentale.

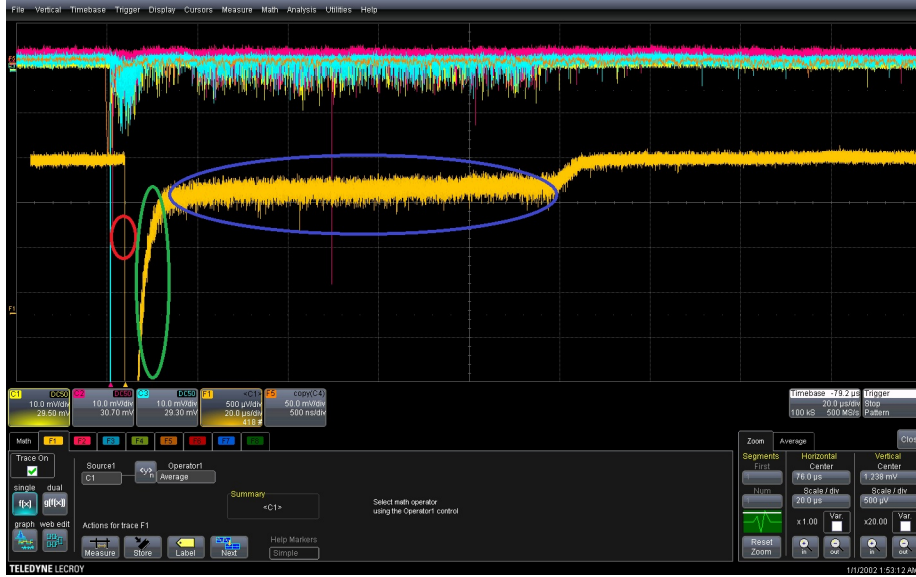


FIGURE 18 – Signal moyen mesuré sur le PMT avec la TPB (en jaune) sur le PMT sans TPB (violet) et sur le PMT sensible au xénon (en bleu) avec le champ électrique et sans xénon dans la cuve.

Bibliographie

- [1] B. Abi et al. The DUNE Far Detector Interim Design Report, Volume 3 : Dual-Phase Module. 2018.
- [2] C G Wahl, E P Bernard, W H Lippincott, J A Nikkel, Y Shin, and D N McKinsey. Pulse-shape discrimination and energy resolution of a liquid-argon scintillator with xenon doping. *Journal of Instrumentation*, 9(06) :P06013–P06013, jun 2014.