

# Le ciel fait sa valise



# L'équipe

---

Nous sommes quatres élèves de Terminale:

- Rachel Petersen (Communication)
- Caïro Sosso-Nammathao (programme Python et montage vidéo)
- Léticia Sveboelle (contact chercheurs et compte rendu)
- Elliott Bardonnnet (programme Python et montage vidéo)

Et six élèves de Première:

- Flore Grangé (Blog et communication)
- Alexander Inizan (mesures et mallette COSMIX)
- Marco Morand (mesures et efficacité géométrique)
- Rozenn Gesret (Blog et communication)
- Antoine Mugnier-Pollet (efficacité géométrique)
- Yann Van-Cauter (mesures et malette COSMIX)

Nous sommes accompagnés par:

- Marie-Anne Déjoan (professeure de physique-chimie)
- Antoine Manier (professeur de mathématiques)



# Notre blog trilingue

## En français, danois et anglais

Afin de faire part de notre projet, nos démarches, nos expériences, notre voyage scientifiques, à nos proches, aux élèves du lycée et d'autres intéressés par la science, nous avons créé un blog:

<https://rayonscosmiqueslfph.wixsite.com/les-rayons-cosmiques/s-projects-side-by-side>

Ce dernier contient notamment un tableau de bord, des articles rédigés par les membres de l'équipe et des actualités scientifiques au niveau de la Scandinavie (voire mondiales), en lien avec notre projet.

### Article

#### L'Incroyable Danse des Aurores Boréales et des Rayons Gamma : Une Connexion Cosmique

Les aurores boréales, ces spectacles célestes éblouissants, continuent de fasciner et de mystifier les observateurs du ciel à travers le monde. Ces phénomènes lumineux éphémères se produisent lorsque le champ magnétique terrestre entre en collision avec le vent solaire, un flux de particules chargées, principalement des électrons et des protons, émis par le Soleil.

Situées principalement dans une zone de 70 degrés de latitude, au nord de la Scandinavie, de la Sibérie, du Canada et de l'Alaska, les aurores boréales offrent un spectacle multicolore impressionnant. Cette variation de couleurs du vert au rouge en passant par le violet est influencée par divers facteurs, notamment les degrés de latitude et les différents protons et neutrons du Soleil.

Un rayon gamma, quant à lui, est une forme de lumière extrêmement puissante, mais invisible à l'œil nu. Composé de particules de lumière appelées photons, les rayons gamma sont dotés d'une énergie incroyablement élevée. Ces photons sont neutres et voyagent à une vitesse impressionnante, dévoilant ainsi leur nature unique.

Le Soleil et les rayons gamma sont liés par une relation cosmique intrigante. Les éruptions solaires, des phénomènes tumultueux sur la surface du Soleil, peuvent générer des rayonnements énergétiques, y compris des rayons gamma. Cependant, il convient de noter que les rayons gamma solaires ne sont généralement pas directement liés aux aurores terrestres. Au lieu de cela, ils sont principalement émis dans l'espace et peuvent être détectés par le biais d'observatoires spatiaux.

En somme, les aurores boréales et les rayons gamma nous rappellent l'incroyable interconnexion qui règne dans notre système solaire. Alors que les aurores boréales rayonnent dans le ciel arctique, elles nous rappellent l'influence du Soleil sur notre planète. Pendant ce temps, les rayons gamma, bien que lointains et invisibles, continuent de nous intriguer par leur puissance incommensurable. Chacun de ces phénomènes célestes offre un aperçu captivant de la complexité et de la beauté de l'univers qui nous entoure.

• • •

Alexander Inizan

### Actualités scientifiques



#### Une nouvelle étude dévoile un rayon cosmique d'ultra-haute énergie échappé de l'Univers extrême

Un télescope spécial situé dans le désert de l'Utah a récemment découvert un rayon cosmique exceptionnel qui a atteint la Terre le 27 mai 2021, selon une publication dans la revue Science. Contrairement aux rayonnements cosmiques habituels, celui-ci présente une énergie inédite, et il est probablement porté par un proton, concentré dans un volume extrêmement petit. Cette



#### Des aurores boréales au dessus de Copenhague

Des aurores boréales on était observées proche de Struer au Jutland ce 25 novembre, avec des couleurs allant du vert au rose, ce spectacle a eu lieu à partir de 21h30 au « Griseta Odde Fyr ».

D'autres aurores boréales ont été observées en Scandinavie durant ces derniers jours, donnant des spectacles envoûtant dans le ciel des nuits froides nordiques.

Ce phénomène est étonnamment bien observable dans les grandes villes scandinaves (Oslo, Copenhague...), villes dans lesquelles les aurores boréales sont normalement invisibles du à la pollution atmosphérique et lumineuse. Une chance pour certains de nos chercheurs en herbe qui ont pu en observer.

### Tableau de bord

10/10/23

#### Premières mesures

Aujourd'hui, nous avons eu le plaisir de commencer à prendre des mesures à l'aide de la malette Cosmix notamment en extérieur afin de constater de potentiels variations du nombre de muons en fonction de la température



21/11/23

#### Visio-conférence avec un lycée français à Madrid à l'occasion du Cosmic Day

Ce mardi 21 novembre, nous avons eu le plaisir de participer à une visio-conférence avec des lycéens du lycée français Molière de





# Contextualisation

---

**L'opportunité de compter des muons à l'aide**

- ◆ **du détecteur COSMIX et de collaborer avec deux chercheurs de l'IN2P3 de Bordeaux**
- 

**Dans la littérature, peu de mesures ont**

- ◆ **été réalisées entre 55° et 68° de latitude Nord**
- 

Notre groupe s'est intéressé aux particules cosmiques et plus précisément à la détection de muons à la surface de la Terre. Grâce à nos professeurs, nous avons mis en place une collaboration avec deux chercheurs de l'IN2P3/CNRS de l'Université de Bordeaux : Benoît Lott et Denis Dumora. Ceux-ci nous ont prêté un détecteur portable de muons atmosphériques : la mallette COSMIX.

Cette mallette, nous permet notamment d'étudier les effets systématiques qui influencent nos mesures, telle que la température, de manière à avoir un contrôle fin sur la qualité du comptage.

Lors d'échanges avec les chercheurs de l'IN2P3, ceux-ci ont souligné l'absence de données précises sur le comptage de muons pour les latitudes entre 55° et 68° Nord. De ce constat s'est dessiné notre projet de voyage scientifique et l'envie de réaliser un comptage des coïncidences à des latitudes élevées.

# Problématique

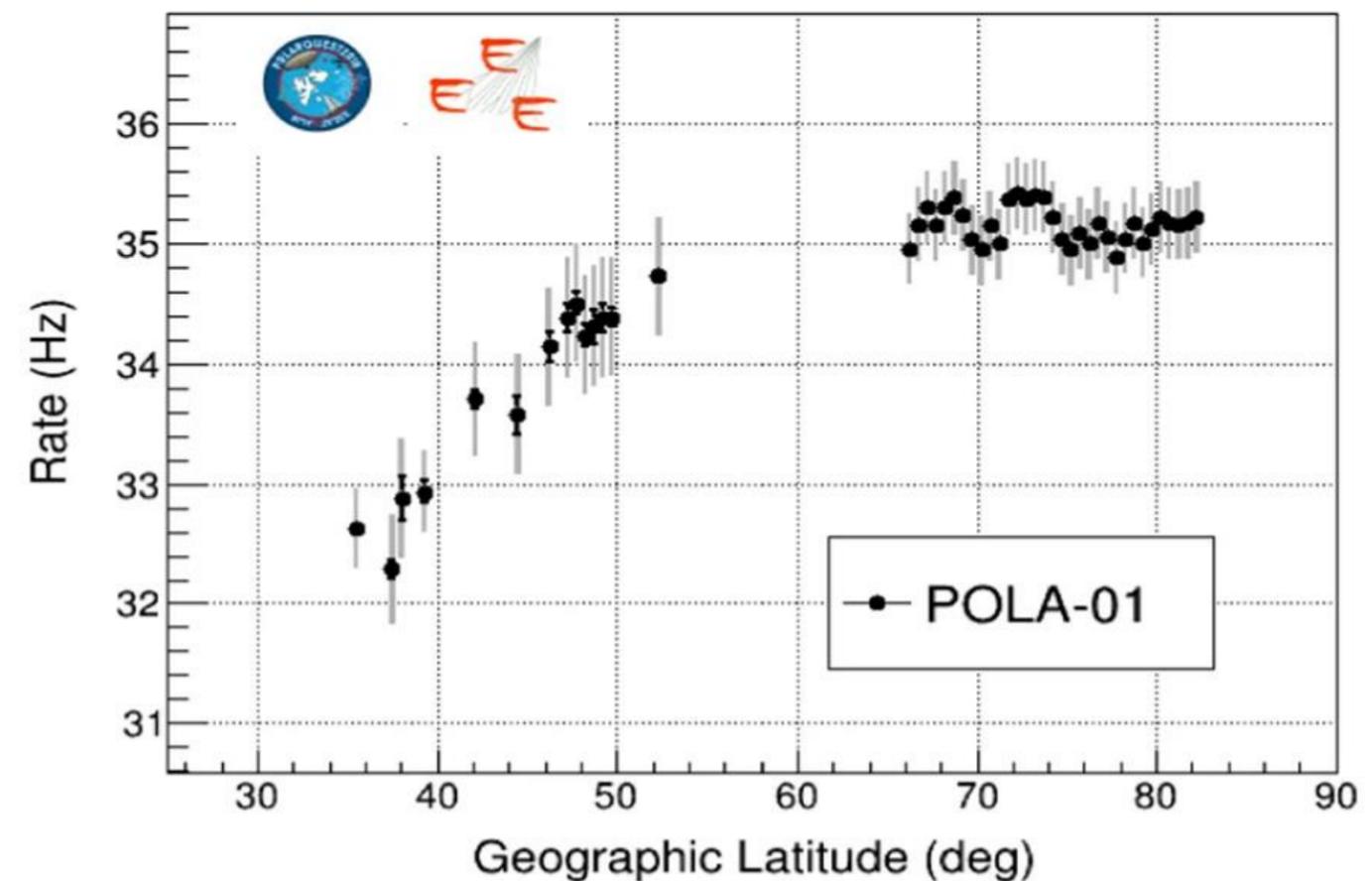
## De quelle manière la latitude influence-t-elle le nombre de muons?

Comme on peut le constater sur ce graphique, il y a un manque des mesures entre les latitudes 55° et 68° Nord.

Nous avons tenté de répondre à cette problématique à l'aide d'une étude menée entre Copenhague, située à 55,4°N en passant par Oslo à 59,9°N par un trajet en ferry, suivi par un vol jusqu'à la ville universitaire norvégienne de Tromsø située à 69,4°N, afin de réaliser des mesures à une latitude plus élevée.

Fig. 9

From: Measurement of the cosmic charged particle rate at sea level in the latitude range 35° ÷ 82° N with the PolarquEEEst experiment





# Qu'est-ce qu'un muon ?

---

## ◆ Des voyageurs cosmiques qui parviennent à traverser notre planète

---

Les muons sont des particules chargées, similaires aux électrons, mais beaucoup plus massives. Leur capacité à pénétrer profondément dans la Terre sans se désintégrer rapidement, les différencie d'autres particules.

Les muons sont produits lorsqu'une particule cosmique, émise par exemple par une étoile, interagit avec l'atmosphère terrestre, créant ainsi une cascade de particules. Les muons sont l'un des résultats de cette cascade et ils descendent vers la surface de la Terre.

## ◆ Un peu d'histoire...

---

Ces muons ont été découverts il y a plus d'un siècle, et ils sont encore étudiés aujourd'hui. Ils sont importants pour la recherche scientifique car ils nous permettent d'en savoir plus sur les rayons cosmiques, l'Univers, et même la structure interne de la Terre. Les muons sont également utilisés pour tester et calibrer des détecteurs de particules dans les laboratoires de recherche (comme la mallette Cosmix).

# Le matériel

## La mallette Cosmix

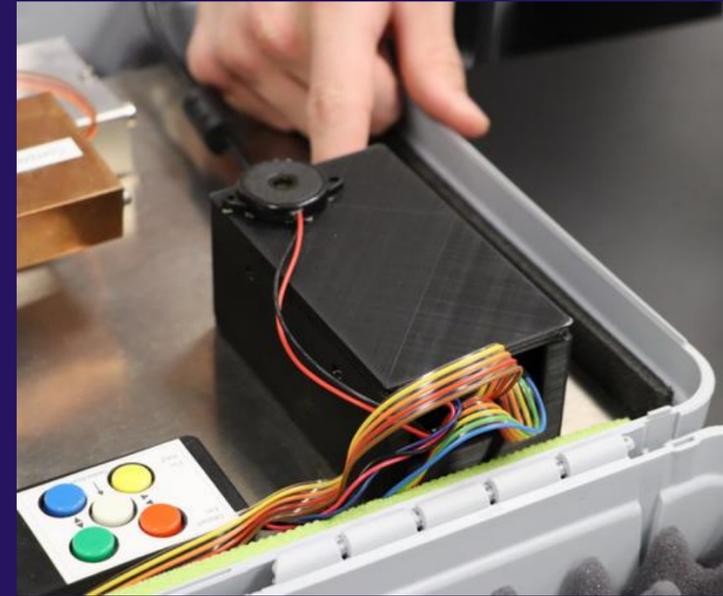
Le détecteur pédagogique COSMIX est conçu et fabriqué au Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG).

La mallette COSMIX, équipée d'une simple connexion USB, permet d'explorer les rayons cosmiques, des particules chargées en provenance de l'espace qui atteignent la Terre en permanence. Elle détecte notamment les muons, des particules énergétiques produites en haute altitude. Ces particules parviennent jusqu'au sol en raison de leur faible interaction avec la matière atmosphérique.

Les barreaux utilisés pour détecter les muons sont constitués d'iodure de césium dopé au thallium. Ce matériau est un scintillateur inorganique : il émet des photons (donc de la lumière) après absorption d'un rayonnement ionisant, c'est-à-dire un rayonnement suffisamment énergétique pour ioniser les atomes du cristal.

D'où vient ce rayonnement ?

L'énergie  $\Delta E$  est perdue par le muon lorsqu'il traverse la barre COSMIX. Ensuite, lorsque les photons sont émis par les barres, une partie des photons produits dans un scintillateur COSMIX arrive sur une photodiode en silicium qui convertit la lumière reçue en courant électrique. Le signal électrique sortant du photodétecteur est amplifié et mis en forme dans un circuit électronique dédié, pour finalement donner le signal analogique affiché sur l'écran de l'oscilloscope. Chaque fois que le passage d'un muon est détecté dans un barreau, le compteur correspondant ("C1" ou "C2") est incrémenté. Une coïncidence ("C1 $\cap$ C2") est définie lorsque les deux scintillateurs détectent un muon simultanément, c'est-à-dire lorsque les temps de détection sont séparés de moins de  $100 \mu s$ .



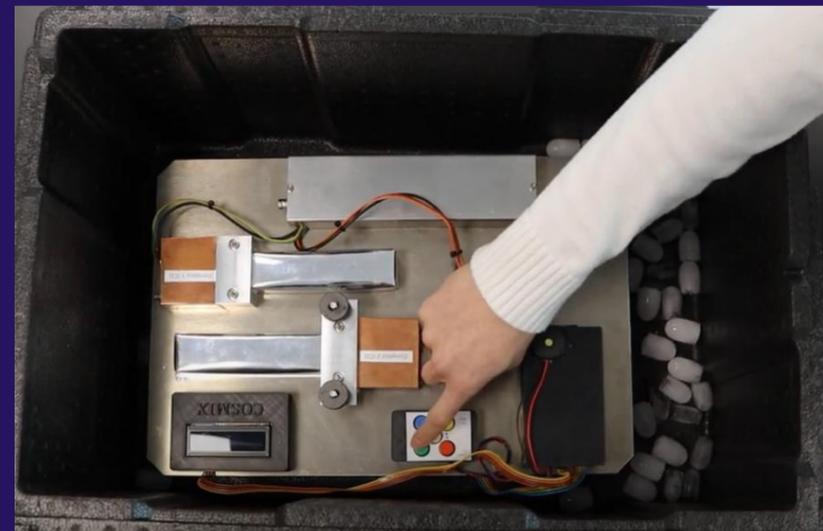
# La mallette Cosmix est-elle sensible à la température ?

Le flux de muon n'est pas *a priori* impacté par la température, seulement la mallette pourrait l'être de part la sensibilité des scintillateurs ou de l'électronique embarquée. Étant donné que nous pouvions faire face à des températures extrêmes à Tromsø, craignant ainsi que nos mesures soient faussées, nous avons réalisé plusieurs mesures à Copenhague, à des températures différentes. Cette étude nous permet de déterminer si il est nécessaire de prendre en compte la température lors de l'étude de l'influence de la latitude. Nous avons constaté que le flux de muons à 22,0 degrés Celsius était supérieur de 19,5% à celui à des températures négatives.

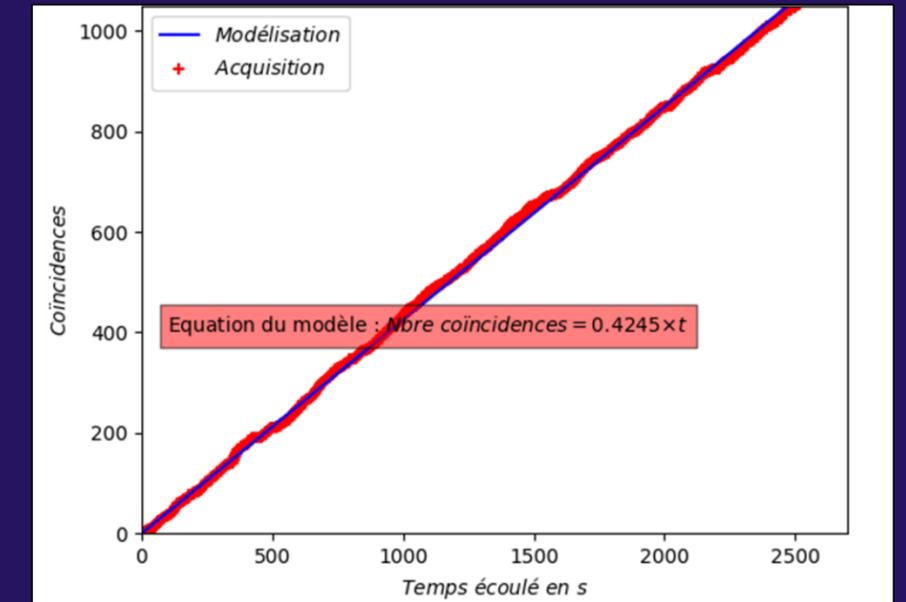
À partir de ces mesures nous sommes parvenus à l'hypothèse que la température a en effet un impact sur la mesure du flux de muons avec la mallette Cosmix et que la mallette détecte mieux les muons à des températures plus élevées (ambiantes). Nous n'avons pas exposé la mallette à des températures très chaudes, de peur d'abimer le matériel, il est pour cela impossible pour nous de savoir si le nombre de muons détectés par la mallette ne fait qu'augmenter avec la température, ou si, à partir d'une certaine température, la détection commence à devenir moins efficace.

A Tromsø nous avons réalisé des mesures en intérieur et en extérieur, où nous avons observé la même tendance. Une moyenne de 0,437 coïncidences par secondes à 22 degrés Celsius contre 0,412 à 1,5 degrés.

Suite à l'observation de ces résultats, nous nous sommes demandés si l'écart entre le nombre de coïncidences était en partie dû à une incertitude de mesure. Nous avons pour cela décidé d'étudier les incertitudes de mesure.

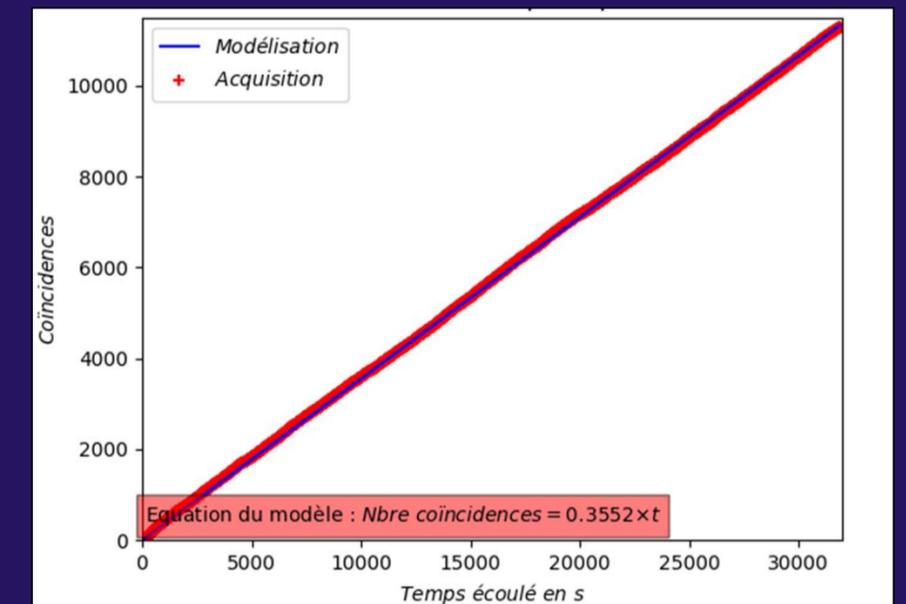


À 22,0 degrés Celsius :



0,425 coïncidences par seconde

À entre -1,8 et -0,5 degrés Celsius :



0,355 coïncidences par seconde

# Exploitation des données à partir de la programmation en langage Python

Nous avons jusqu'à présent écrit deux scripts Python pour traiter les données, qui sont extraites au format .csv.

Le premier programme importe les bibliothèques nécessaires telles que NumPy, Matplotlib et SciPy.

Ensuite, il lit les données à partir d'un fichier CSV spécifié, extrayant les informations de temps et de coïncidences.

Une fonction linéaire est définie pour modéliser les données, puis cette fonction est ajustée aux données à l'aide de la méthode des moindres carrés via `curve\_fit` de SciPy. Les valeurs du modèle sont calculées à partir des paramètres optimaux obtenus.

Ensuite, le programme trace les données originales ainsi que le modèle ajusté sur un graphique, en ajoutant des étiquettes pour les axes x et y, un titre, une annotation avec l'équation du modèle, et une légende pour différencier les deux ensembles de données.

Enfin, le graphique est affiché à l'écran pour visualisation. L'équation de la modélisation est affichée sur la fenêtre graphique, ce qui nous permet de visualiser le flux de coïncidences par seconde.

```
from scipy import * # Importer la bibliothèque scipy, module qui concerne le calcul scientifique
from pylab import * # Importer la bibliothèque pylab, qui permet d'utiliser de manière aisée les bibliothèques NumPy
# (calcul scientifique) et matplotlib (représentation graphique à 2D)
from scipy.optimize import curve_fit

import csv # Importation du module

source = open('29022024 - Exp7 - Int - Tromso - 22°C.csv','r')
lecteur = csv.reader(source,delimiter=";") # On créer un lecteur de csv. On précise le délimiteur utilisé.
temps = [] # On créer 1 listes vide pour accueillir les données de temps (string) en millisecondes écoulées depuis l'alimentation du détecteur
coincidences = [] # On créer 1 listes vide pour accueillir les données du nombre de coïncidences comptabilisées depuis l'alimentation du détecteur

for row in lecteur: # On parcourt le lecteur
    temps.append(round(float(row[7])/1000,0)) # 8 ème colonne du fichier
    coincidences.append(float(row[18])) # 19 ème colonne du fichier

def lineaire(x,k):
    return k*x

params, covar = curve_fit(lineaire,temps,coincidences)

coef = params[0] # Coefficient directeur de la droite modélisée

# On stocke les valeurs issues du modèle dans la liste cumul_mod
cumul_mod = [lineaire(valeur_temps,coef) for valeur_temps in temps] # Cette méthode de construction de liste est appelée liste en compréhension

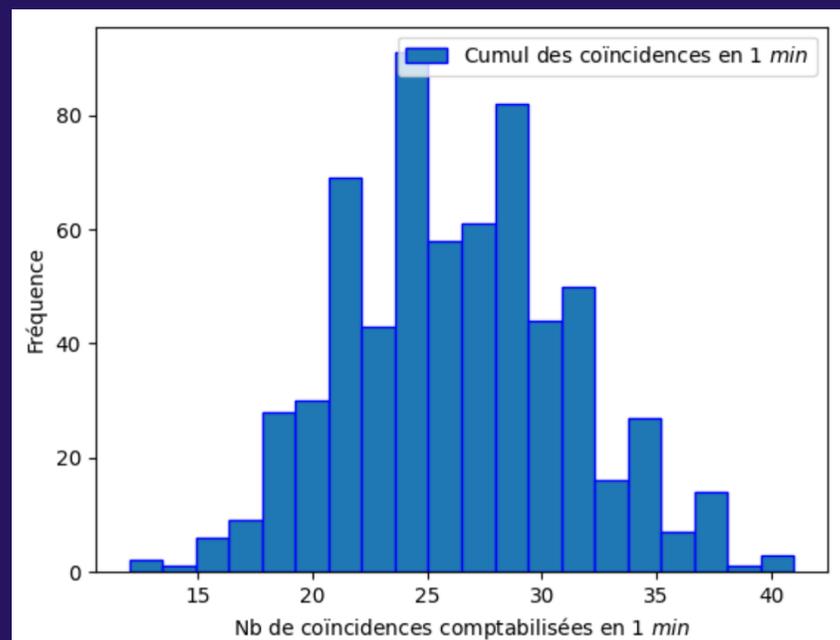
#Tracé de l'évolution du nombre de coïncidences comptabilisées en fonction du temps
scatter(x=temps,y=coincidences,marker= '+',color = 'r',label='$Acquisition$')
#Tracé du résultat de la modélisation
plot(temps,cumul_mod,'b-',label='$Modélisation$')
xlabel('$Temps\ écoulé\ en\ s$')
ylabel('$Coïncidences$')
title('Cumul des coïncidences détectées au cours du temps (depuis la mise sous tension du détecteur)')
axis([0,32000,0,11500])
text(4000,500,"Equation du modèle :"+r'$\ Nbre\ coïncidences =$'+str(round(params[0],4))+r'$\times t$',bbox=dict(facecolor='red', alpha=0.5))
legend()
show()
```

Le second programme commence également par importer les bibliothèques nécessaires. Il lit les données à partir d'un fichier CSV (contenant les valeurs extraites de la mallette) spécifié, extrayant les informations de temps et de coïncidences.

Les données de coïncidences sont ensuite traitées pour calculer le nombre de coïncidences par minute et stockées dans une liste `N`.

Le programme calcule la valeur moyenne (prise comme résultat de la mesure), l'écart-type et l'incertitude-type du nombre de coïncidences par minute. Ces résultats s'affichent dans la console Python.

Un histogramme est tracé pour visualiser la distribution des nombres de coïncidences comptabilisées en une minute, avec des étiquettes appropriées pour les axes et une légende.



```

from scipy import * # Importer la bibliothèque scipy, module qui concerne le calcul scientifique
from pylab import * # Importer la bibliothèque pylab, qui permet d'utiliser de manière aisée les bibliothèques NumPy
                        # (calcul scientifique) et matplotlib (représentation graphique à 2D)

import csv # Importation du module

source = open('29022024 - Exp7 - Int - Tromso - 22°C.csv','r')
lecteur = csv.reader(source,delimiter=";") # On créer un lecteur de csv. On précise le délimiteur utilisé
temps = [] # On créer 1 listes vide pour accueillir les données de temps (string) en millisecondes écoulées depuis l'alimentation du detecteur
coïncidences = [] # On créer 1 listes pour accueillir les données (nombre de coïncidences comptabilisées en 1 min)

for row in lecteur: # On parcourt le lecteur
    temps.append(round(float(row[7]),0)) # 8 ème colonne du fichier
    coïncidences.append(float(row[18])) # 19 ème colonne du fichier

max = len(temps)

N0 = 0 # Nombre de coïncidences sur la période
C = 0 # Compteur de périodes

N = [] # Liste du nombre de coïncidences pour chaque période

for k in range(max):
    if temps[k]-C*60000 > 60000 :
        N.append(coïncidences[k-1]-N0)
        C = C+1
        N0 = coïncidences[k-1]

## CALCUL DE LA MOYENNE + ECART TYPE + INCERTITUDE TYPE
n=len(N) # Compte le nombre d'éléments présents dans le tableau à 1 dimension et l'affecte à la variable n
print('Nombre de mesures :', n)
print('Moyenne du nombre de coïncidences comptabilisées en 1 min :',round(mean(N),4))
s=std(N, ddof = 1) # Calcul l'écart-type à n-1 (ou déviation standard au sens statistique) et l'affecte à la variable s
print('Ecart-type non biaisé :',round(s,4)) # Affiche l'écart-type non biaisé
U=s/sqrt(n) # Calcul de l'incertitude-type
print('Incrtitude-type sur le nombre de coïncidences :',round(U,4)) # Affiche l'incrtitude-type

## TRACE DES HISTOGRAMMES
figure("Nombres de coïncidences comptabilisées en $1\ min$ et fréquence") # Définit le nom de la figure
hist([N],bins=20,edgecolor = 'blue') # la fonction bins est associée
# au nombre d'intervalles pour l'axe des abscisses
xlabel('Nb de coïncidences comptabilisées en $1\ min$') # Définit le nom des ordonnées
ylabel('Fréquence') # Définit le nom des ordonnées
legend(["Cumul des coïncidences en $1\ min$"]) # Définit la légende
show() # Affiche l'histogramme

```

Console Python

```

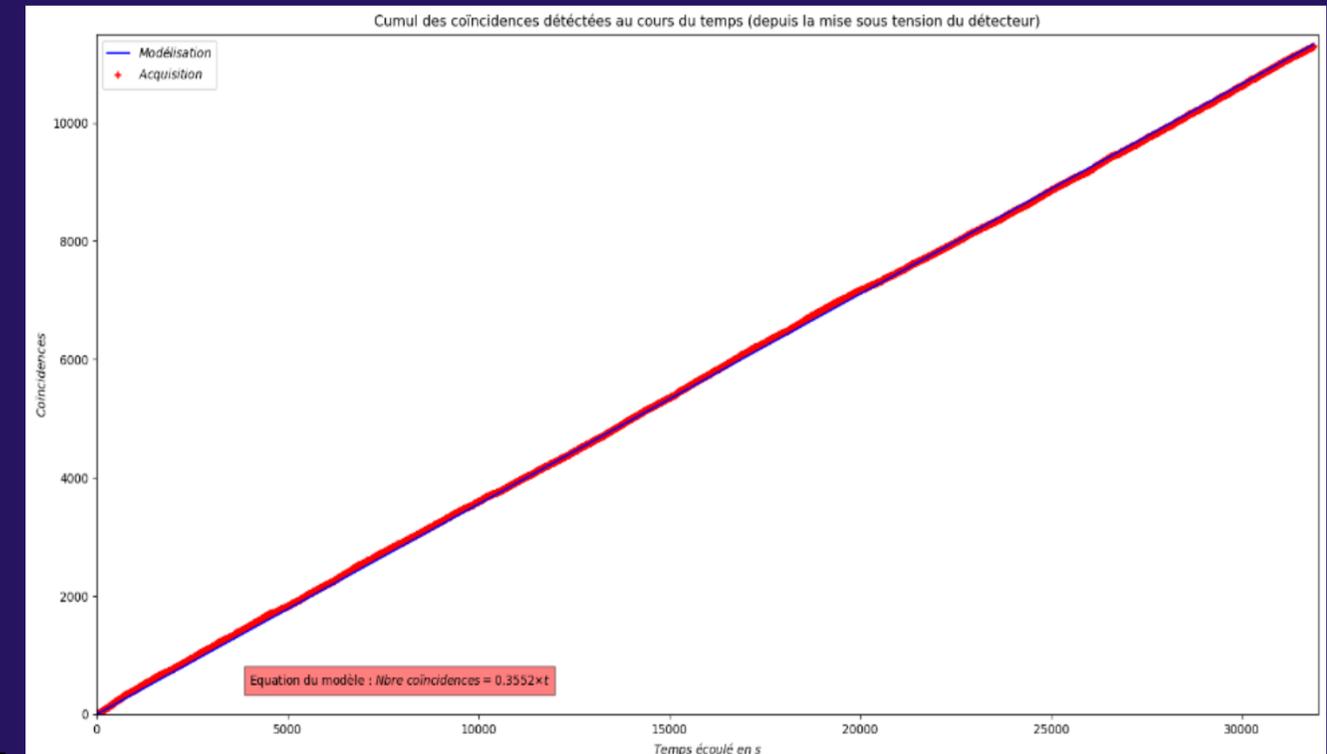
*** Distant Python engine is active ***
>>>
*** Remote Interpreter Reinitialized ***
Nombre de mesures : 642
Moyenne du nombre de coïncidences comptabilisées en 1 min : 26.2913
Ecart-type non biaisé : 4.9032
Incrtitude-type sur le nombre de coïncidences : 0.1935
>>>

```

# Mesures à Copenhague

Exemple de résultats obtenus à partir des différentes expériences et des deux programmes distincts - Cas de l'expérience 5 :

Dans cette expérience, nous avons effectué des mesures pendant 9 heures consécutives avec la même température, la même altitude et la même latitude. Nous avons observé (cf. graphique) que le nombre de coïncidences était proportionnel et augmentait constamment avec le temps. Nous pouvons utiliser ce graphique pour le comparer à nos autres mesures, ce sont des valeurs témoins. Nous avons donc pu exclure la possibilité de l'influence de la rotation de la Terre sur elle-même, et donc de notre position sur Terre par rapport au soleil.



## Mardi 9 Janvier

Température (17:22) : -0,9°C  
(17:26) : -0,5°C

## 17:10-17:55

Je suis sorti sur la terrasse avec la mallette pour réaliser des mesures en superposition. Tout en enregistrant sur la carte SD.

## Expérience glace et bac

### Jeudi 18 Janvier

3eme étage. Mallette entourée de glace dans un bac.

08:33 : nous avons commencé à enregistrer avec la glace.

08:57 : -1,8°C

09:30 : -0,8°C

09:52 : 0,2°C

10:34 : 0,5°C

11:24 : 0,3°C

13:03 : 0,5°C

Nous utilisons un carnet de bord afin de pouvoir avoir un suivi des expériences que nous avons effectuées.

Chaque fois que nous effectuons une mesure à Copenhague nous prenons des notes dans ce carnet d'expérience. Nous avons effectué un grand nombre de mesures où nous avons modifié certaines variables : à l'extérieur, à l'intérieur, à différents moments de la journée, en mouvement, à différents étages, à différentes latitudes et même dans un bac de glace afin de voir les effets d'une baisse de la température sur la mallette.

Nous mettons plusieurs informations sur le carnet de bord : durée, date, température, le lieu et comment est mise en place la mallette.

# Efficacité géométrique de la mallette

Nous avons voulu tester l'efficacité géométrique de la mallette Cosmix grâce à une simulation Python par une méthode de Monte-Carlo.

Nous avons décidé de ne compter que les muons qui passent par les deux détecteurs. Même si nous perdons quelques muons en utilisant la coïncidence, cela nous permet d'éviter de détecter des *bruits parasites*.

En effet, selon l'angle que prend le muon lorsqu'il traverse le premier détecteur et l'endroit où il le traverse, il n'est pas acquis qu'il traverse le second détecteur. Nous avons donc décidé de mesurer la différence entre le nombre de muons qui traversent les deux scintillateurs et ceux qui ne traversent que le premier.

Nous avons décidé de créer une simulation dans laquelle les muons proviennent de toutes les directions (même si, dans la réalité, la probabilité est plus élevée qu'ils proviennent d'une direction plutôt que d'une autre). Un prolongement de notre travail va consister à prendre en compte la distribution angulaire correspondante à notre latitude. Nous pensons réaliser cela expérimentalement, en faisant varier l'angle des capteurs.

Nous avons également dû décider à quel moment les muons sont pris en compte. Nous avons admis qu'ils sont détectés lorsqu'ils passent les surfaces supérieures des scintillateurs.

Cela a permis de représenter les deux scintillateurs comme deux plaques à deux dimensions (axe x et y).

Nous pouvons cependant faire varier la distance qui sépare les deux scintillateurs.

Nous avons décidé d'utiliser un programme Python pour pouvoir simuler un grand nombre de trajectoires de muons. (différents angles et points d'impact)

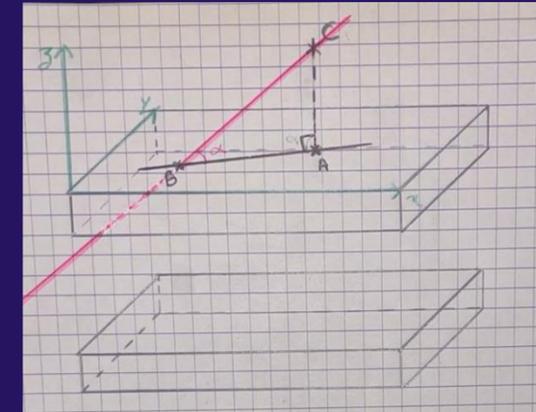
La simulation nous permet de voir si le muon touche ou non le détecteur inférieur.

Comme vous pouvez le voir sur cette représentation 3D sur feuille et Geogebra (où nous avons la possibilité de faire varier l'écart des plaques, leur taille et l'angle entre (AB) et (BC)) nous utilisons notre première plaque pour tracer notre repère dont l'axe x coïncide avec la longueur du scintillateur et l'axe y avec sa largeur.

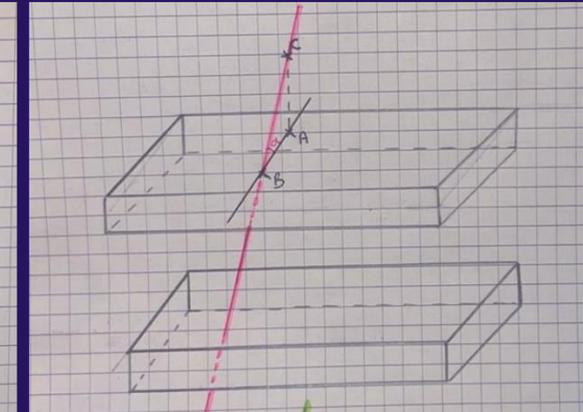
Dans ce plan, nous avons choisi deux points aléatoires. Ces deux points permettent de tracer une droite appartenant au plan. Nous traçons ensuite une droite perpendiculaire à (AB) qui passe par A et C, C ayant les mêmes coordonnées x et y que A, mais une coordonnée z différente. Nous prenons ensuite un angle aléatoire entre (AB) et (CB) et nous obtenons la direction du muon. Nous déterminons ensuite l'équation paramétrique de (CB) en utilisant les coordonnées de A, à la place de celles de C, et B, étant donné que nous les connaissons et que A a les mêmes coordonnées x et y que C. Nous devons ensuite déterminer si (BC) passe à travers le second détecteur.

Les prochaines étapes sont de déterminer quelles trajectoires sont les plus probables afin de pouvoir faire une représentation plus représentative de la réalité. Après discussions avec Benoît Lott du Laboratoire de Physique des 2 infinis nous devrions prendre en compte dans notre simulation le seuil énergétique des détecteurs. L'objectif est de comparer nos résultats de coïncidences avec notre modèle.

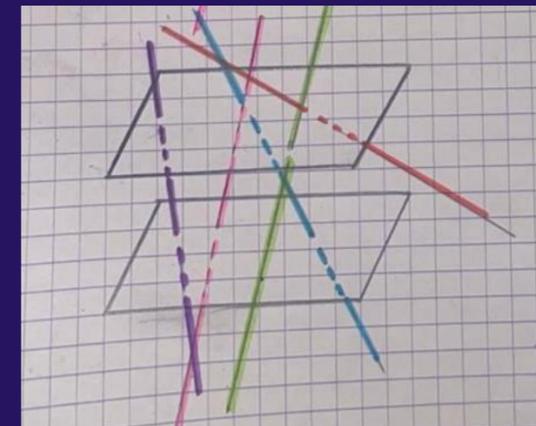
Le muon ne passe pas par la 2e plaque



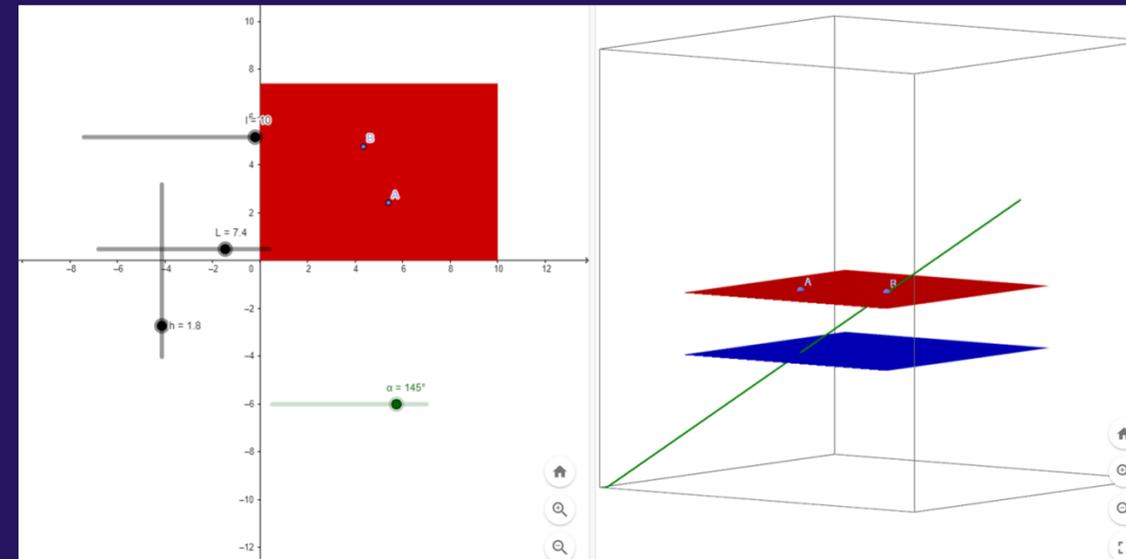
Le muon passe pas par la 2e plaque (coïncidence)



Trajectoires aléatoires de muons



Modélisation avec GeoGebra



Nos premières lignes de script pour cette simulation:

```
import random
import numpy as np
import math

# Définissez les bornes inférieure et supérieure
borne_inferieure = 0 # Remplacez par la valeur souhaitée
L = 20.0 # Remplacez par la valeur souhaitée
l = 10.0
anglemax = np.pi
h = 10.0
nb_coincidences = 0

for loop in range(int(input())):
    # Génère 4 nombres réels aléatoires entre les bornes spécifiées
    abcisses = [random.uniform(borne_inferieure, L) for _ in range(2)]
    ordonnées = [random.uniform(borne_inferieure, l) for _ in range(2)]
    angle = random.uniform(borne_inferieure, anglemax)
    if angle == np.pi/2:
        nb_coincidences = nb_coincidences + 1

    # Affiche les nombres générés
    print("Nombres réels aléatoires entre", borne_inferieure, "et", L, ":", abcisses)
    print("Nombres réels aléatoires entre", borne_inferieure, "et", l, ":", ordonnées)
    print("Nombres réels aléatoires entre", borne_inferieure, "et", anglemax, ":", angle)

    # Coordonnées des deux points (remplacez ces valeurs par celles de vos points)
    pointA = np.array([abcisses[0], ordonnées[0], 0])
    pointB = np.array([abcisses[1], ordonnées[1], 0])
    # Calcul de la distance euclidienne entre les deux points
    distanceAB = np.linalg.norm(pointA - pointB)
    pointC = np.array([abcisses[0], ordonnées[0], math.tan(angle)*distanceAB])
    coord_vectBC = np.array([pointC[0]-pointB[0], pointC[1]-pointB[1], pointC[2]-pointB[2]])
    k = 1 + h/pointC[2]
    x_plaque2 = pointC[0] - coord_vectBC[0] * k
    y_plaque2 = pointC[1] - coord_vectBC[1] * k
    if x_plaque2 <= L:
        if y_plaque2 <= l:
            nb_coincidences = nb_coincidences + 1
            # Affichage du résultat
            print("le paramètre de l'équation de la droite BC est :", k)
            print(f"La distance entre les points P1 et P2 est : {distanceAB:.2f} unités.")

print("On a :", nb_coincidences, "coincidences")
```

Exemple de sortie pour 1000 répétitions:

Console Python

```
Nombres réels aléatoires entre 0 et 3.141592653589793 : 2.9647732548215067
le paramètre de l'équation de la droite BC est : -10.387398019239754
La distance entre les points P1 et P2 est : 4.91 unités.
Nombres réels aléatoires entre 0 et 20.0 : [8.00820902273612, 14.084645539489852]
Nombres réels aléatoires entre 0 et 10.0 : [8.481728842784298, 5.684026729948865]
Nombres réels aléatoires entre 0 et 3.141592653589793 : 2.9644376456172594
On a : 631 coincidences
>>>
```

Parmi les 1000 muons qui ont traversé la première plaque, seuls 631 traversent la deuxième.

En répétant le programme une deuxième fois, nous obtenons de nouvelles valeurs:

Console Python

```
La distance entre les points P1 et P2 est : 5.49 unités.
Nombres réels aléatoires entre 0 et 20.0 : [1.2563410516067974, 13.952849045744998]
Nombres réels aléatoires entre 0 et 10.0 : [9.906355616665634, 4.4329111795291105]
Nombres réels aléatoires entre 0 et 3.141592653589793 : 2.320565547144492
le paramètre de l'équation de la droite BC est : 0.32651417051056064
La distance entre les points P1 et P2 est : 13.83 unités.
On a : 602 coincidences
>>>
```

Cette fois ci, le nombre de coïncidences ne s'élève qu'à 602.

Afin de pouvoir traiter les valeurs obtenues qui varient à chaque simulation, nous allons devoir faire une étude statistique sur un très grand nombre de répétitions de l'exécution du programme.

# Collaborations/Partenariats



## IN2P3/CNRS

Laboratoire de l'Université de  
Bordeaux

La mallette Cosmix que nous utilisons (détecteur de muons atmosphériques portable) a été prêtée à notre école pour une année scolaire par le laboratoire IN2P3/CNRS de l'Université de Bordeaux, et plus particulièrement par les chercheurs M. Benoît Lott et M. Denis Dumora. Ils sont toujours disponibles pour nous renseigner et nous aider en cas de besoin. Leurs conseils sont précieux ! Les deux détecteurs (barreaux de scintillateurs, dont l'un est mobile pour permettre de compter les détections coïncidentes entre les deux tiges superposées) sont les mêmes que ceux embarqués à bord du télescope spatial Fermi Lat, qui étudie les rayons gamma.

## UIT

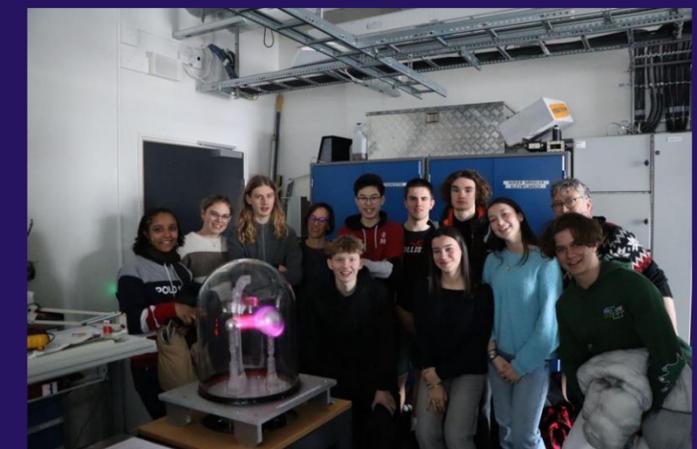
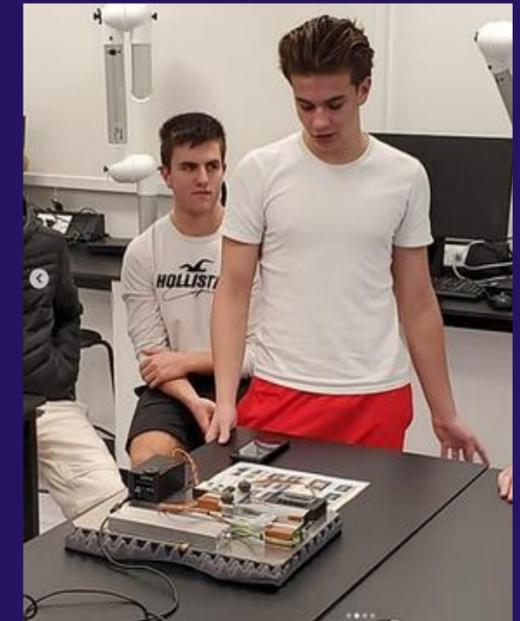
Université Arctique de  
Norvège

Lors de notre voyage à Tromsø, nous avons eu la chance de rencontrer les chercheurs de l'UIT et de leur présenter notre projet ainsi que le fonctionnement de la mallette Cosmix en détail en anglais. Cette rencontre très enrichissante nous a permis de discuter avec les chercheurs et de répondre aux questions posées sur le fonctionnement de la mallette. Ils nous ont partagé en retour de précieux conseils ainsi que de nouvelles pistes à exploiter dans nos futures recherches.

## Lycee Francais de Madrid

Cosmic Day

Dans le cadre de la 12ème édition de « International Cosmic Day », nous avons eu le plaisir de participer à une visioconférence avec des lycéens du lycée français Molière de Madrid, qui étudient également les particules cosmiques, mais avec un autre dispositif de détection que le nôtre. Une expérience enrichissante qui donne de nouvelles idées de manipulations à notre groupe.



# Voyage scientifique à Tromsø, Norvège

---

Afin de pouvoir confirmer ou non notre théorie sur l'influence de la latitude dans l'hémisphère Nord sur la quantité de muons, nous avons effectué un voyage scientifique en Norvège.

Notre destination finale, Tromsø, de part sa latitude très élevée ( $69,4^{\circ}$  N) nous a permis d'élargir notre champ d'étude et de nous permettre d'étudier également la réaction entre les vents solaires et la magnétosphère à l'origine des aurores boréales extrêmement lumineuses en 2024.



---

## Université arctique de Tromsø (UiT)

---

Présentation de notre projet au groupe "Space Physics"



---

## Observatoire d'aurores boréales

---

Visite d'un centre géophysique



---

## EISCAT

---

Visite d'un centre de radars

# Mesures de Copenhague à Oslo en ferry

Pour déterminer si la latitude a un effet sur le nombre de muons, nous avons pris un ferry qui nous a amené de Copenhague, situé à  $55,7^{\circ}\text{N}$ , à Oslo qui se trouve à  $59,9^{\circ}\text{N}$ . Le trajet en Ferry nous permet de couvrir un plus grand nombre de latitudes. De plus, par sa faible vitesse (environ 30 km/h) il nous permet de mener des mesures ininterrompues.

## Où poser la mallette ?

Sur un ferry de 42 000 tonnes nous craignons que des mesures en intérieur seraient faussées à cause de l'épaisse couche de métal (cage de Faraday). Faire des mesures en extérieur nous faisait également peur, car de la pluie était prévue et le taux d'humidité était très élevé en mer, nous ne voulions pas abimer la mallette. Nous avons pour cela mené deux courtes mesures de 10 min (pour éviter qu'il y ait une trop forte influence de la latitude) et avons constaté que nous obtenions le même nombre de coïncidences lors d'une prise de mesures proche d'une fenêtre en intérieur, que lors d'un relevé de coïncidences en extérieur.

*Il est tout de même important de noter que nous n'avons pas pris en compte la différence de température lors de ces deux prises de mesures. Il est pour cela probable que le flux de muons était plus élevé en extérieur, mais de par sa sensibilité à la température, la mallette en a capté moins. De plus, lors de la prise en extérieur, nous n'étions pas à l'air libre complet, le ferry pouvait toujours potentiellement obstruer la venue de muons d'un côté.*

Une fois la mallette installée nous avons fait une prise de mesures pendant 14 heures. Copenhague se situe à  $55^{\circ}\text{N}$ , cependant nous avons seulement pris en compte les mesures à partir de  $57,0^{\circ}\text{N}$  parce que nous avons été contraint de déplacer notre mallette suite à une requête du personnel, ce qui a eu un impact notable sur nos mesures. Alors que jusqu'à ce moment là, comme attendu, le nombre de coïncidences était croissant à mesure que l'on montait en latitude, les valeurs se sont mises à décroître avant de se stabiliser dans l'heure suivante.

Afin de pouvoir comparer le nombre de coïncidences selon la latitude nous avons identifié 6 latitudes comprises entre  $57,0^{\circ}\text{N}$  et  $59,4^{\circ}\text{N}$  que nous avons pu exploiter à partir des 2 scripts Python.



Latitude en degrés Nord	Flux des coïncidences par seconde	Valeur moyenne du nombre de coïncidences par minute	Incertitude-type sur le nombre de coïncidences par minutes (type A)
57,0°N	0,3677	22,01	0,27
57,6°N	0,3676	21,86	0,26
58,0°N	0,3677	21,94	0,31
58,4°N	0,3678	22,03	0,34
59,0°N	0,3680	22,39	0,32
59,4°N	0,3688	22,78	0,29

Nous avons en effet effectué une série de mesures entre les latitudes 57,0°N et 59,4°N degrés nord répertoriées dans le tableau ci-contre. Ces mesures ont été prises sur une période de 14 heures et nous avons choisi d'isoler deux données qui nous ont semblé les plus pertinentes pour illustrer nos hypothèses. Dans un premier temps nous avons utilisé le flux de muons par seconde détecté par la mallette. Puis dans un second temps nous avons sélectionné la moyenne de coïncidences par minute qui nous semblait plus visuelle et simple à interpréter. Enfin, nous avons calculé les incertitudes-types de nos mesures (elles se rapportent dans le tableau à la moyenne de muons captés par minute) afin d'étayer notre démarche et d'obtenir les valeurs les plus objectives possibles.

Malgré une régression très faible entre les degrés 57,0°N et 57,6°N Nord, nous avons observé à l'aide de ces éléments une augmentation du nombre de muons captés par la mallette par intervalles réguliers, passant notamment de 0,3676 coïncidences par seconde à la latitude 57,6°N à 0,3688 à la latitude 59,4°N. Cela nous a rassuré car ces mesures sont cohérentes avec celles qui nous ont été envoyées par nos scientifiques partenaires et avec celles que nous avons étudiées issues de rapports précédents.

Ces données ont été assimilées par la mallette dans des conditions de température et d'éclairage constantes (22,0°C). De plus, pour s'assurer du bon fonctionnement de la mallette et de la cohérence des mesures, nous avons effectué des tours de ronde de deux heures, par binôme, de 19h30 jusqu'à 9h30 le lendemain matin.

# Mesures à Tromsø

Pour confirmer l'influence de la latitude dans l'hémisphère nord sur la quantité de muons, nous avons voyagé en Norvège, plus précisément à Tromsø. Comme évoqué précédemment, nous avons choisi cette destination en raison de sa très haute latitude (69,4 degrés nord), ce qui nous a permis d'élargir notre champ d'étude. Nous avons mené des mesures en extérieur et en intérieur.

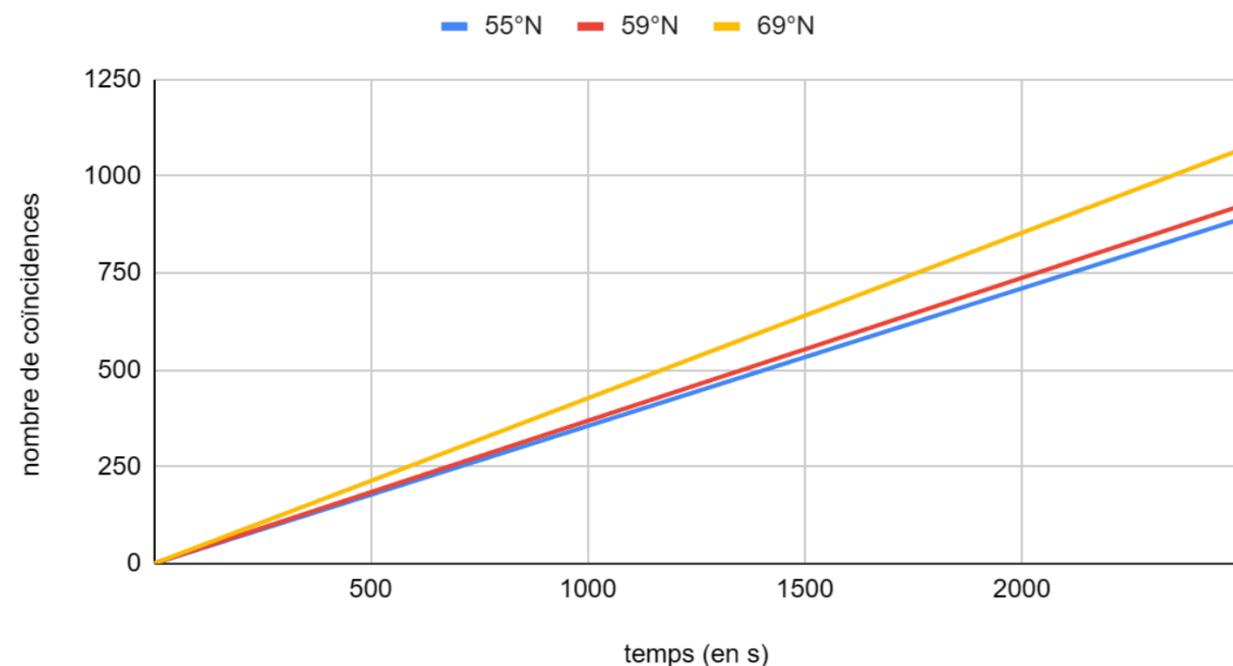
Traitement des données :

Latitude	Température	Flux du nombre de coïncidences par seconde	Moyenne du nombre de coïncidences par minute	Incertitude-type sur le nombre de coïncidences par minute
69,4°N	22,0°C (Intérieur)	0,4382	26,29	0,19
69,4°N	22,0°C (Intérieur)	0,4393	26,36	0,20
69,4°N	1,5°C (Extérieur)	0,4020	24,12	0,25
69,4°N	21,5°C (Intérieur)	0,4310	25,86	0,26

# Comparaison des différentes mesures :

Localisation (latitude)	Flux du nombre de coïncidences par seconde	Moyenne du nombre de coïncidences par minute	Incertitude-type sur le nombre de coïncidences par minute	Température en degrés Celsius
Copenhague (55,7°N)	0,3552	21,31	0,21	22,0
Oslo (59,9°N)	0,3689	22,78	0,23	21,0
Tromsø (69,4°N)	0,4393	26,36	0,20	22,0

Flux de muons à 3 différentes latitudes



On constate une présence plus importante de muons à Tromsø qu'à Copenhague et Oslo : taux de variation de 23,68% pour une variation de 13,7° de latitude. Ce qui s'explique par la différence de latitude (plus on s'approche des pôles, plus le nombre de muons détectés sur Terre est important).

Le directeur de recherche Benoit Lott, avec qui nous travaillons, nous a en effet expliqué que cette variation était liée à la forme de la magnétosphère (de la même façon, celle-ci interagit avec les particules de vent solaire et permet la formation d'aurores polaires aux latitudes élevées).

Nos résultats sont donc en accord avec la littérature sur le sujet.

# Les valeurs aberrantes du scintillateur C2 sont-elles dues à la lumière ?

Lors de notre voyage scientifique à Tromsø, nous avons eu la chance de présenter notre projet et nos pistes en anglais au "Space physics group" de l'UiT, Université Arctique de Norvège.

Après notre présentation, les thésards nous ont posé des questions, notamment une, qui nous a ouvert une nouvelle piste d'étude. Après leur avoir dit que nous avons parfois constaté que le nombre de muons détectés par un des deux scintillateurs augmentait dix fois plus vite que l'autre, et bien plus qu'il ne devrait, un chercheur a remis en question notre hypothèse, qui jusqu'à présent avait été un problème technique de la mallette, en mentionnant que ça pourrait être la lumière qui errone nos mesures, entraînant la détection de particules qui ne sont pas des muons. Il a pour cela proposé que l'on place la mallette dans une pièce dépourvue de toutes sources de lumière.

Lors d'une prise de mesures ultérieure à notre visite, le nombre de muons détecté en C2 avait atteint plusieurs milliers de muons en très peu de temps et le nombre de coïncidences était beaucoup trop bas. Un élève a pour cela placé sa main à quelques cm du scintillateur pour obstruer la venue de la lumière. Le nombre de détection en C2 s'est immédiatement stabilisé, avant d'exploser à nouveau, une fois la main retirée. Nous avons placé un pull au-dessus des scintillateurs et avons observé le même phénomène. Nous avons remarqué que nous étions placés directement en dessous d'une lampe au plafond, et avons pour cela émis l'hypothèse que certaines particules émises par la lampe étaient détectées par la mallette Cosmix.

Seulement, les deux scintillateurs sont emballés dans un papier métallique qui devrait, selon nous, réfléchir la lumière.

Pour vérifier cette hypothèse nous allons contacter les deux chercheurs du laboratoire IN2P3/CNRS de l'Université de Bordeaux qui ont créé la mallette pour avoir plus de détail sur la constitution des scintillateurs et la plage de longueurs d'onde qu'ils détectent. Par la suite, si cela est pertinent, nous mènerons des mesures dans une pièce entièrement dépourvu de lumière, et sous différentes sources de lumières.



# Activité aurorale et flux de muons

Nous avons eu la chance d'assister à une conférence donnée par le physicien et universitaire français Alain Aspect, surtout renommé pour avoir mené certains des premiers tests concluants de l'un des paradoxes fondamentaux de la mécanique quantique, le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen.

En 2022, il a reçu le prix Nobel de physique aux côtés de John Clauser et Anton Zeilinger "pour des expériences avec des photons intriqués, établissant des violations des inégalités de Bell et ouvrant la voie à l'informatique quantique".

Il a donc donné une conférence expliquant les bases de la physique quantique dans notre lycée, le Lycée Français Prins Henrik à Copenhague. Nous avons également pu parler avec lui de son travail et lui faire part de notre projet d'étude des rayons cosmiques et il nous a dit qu'il serait peut-être intéressant de voir si l'activité aurorale a un impact sur la quantité de muons.

Étant donné que dans la littérature, la réponse à cette question penche plutôt vers un non, nous avons profiter de notre séjour à Tromsø, et de la présence d'aurores boréales, pour effectuer des mesures pour voir si la présence d'aurores boréales impacte le flux de muon.

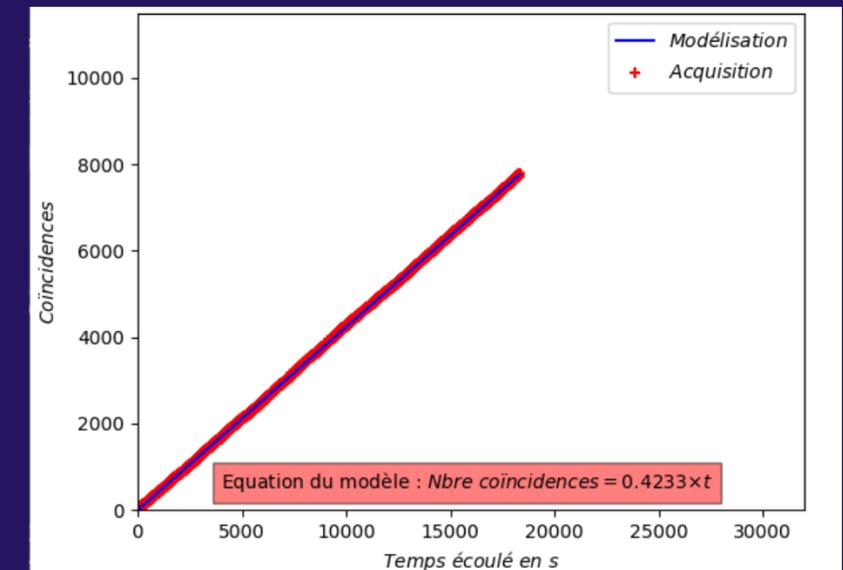
Seul petit problème, ce n'est pas parce que l'on ne voit pas les aurores boréales, qu'il n'y en a pas pour autant. Une couverture nuageuse, la lumière de la ville ou une faible intensité de lumière des aurores pourraient en être la cause. Heureusement, suite à notre visite de l'observatoire géophysique de Tromsø, nous avons obtenus des liens nous donnant accès à une plateforme qui mesure l'activité aurorale. À partir de ces informations et sachant que la mallette nous indique le flux de muons en fonction du temps (on est en mesure de déterminer l'heure d'une potentielle variation de courbe) nous avons pu nous pencher sur la question de la potentielle conséquence de l'activité aurorale sur le flux de muons.

Le 1er mars, à Tromsø nous avons observé des aurores boréales. En même temps nous avons mené des mesures avec la mallette. Le nombre de coïncidences est resté constant malgré l'activité aurorale. Nous ne pensons pour cela pas que les vents solaires affectent le flux de muons.

## Visite d'Alain Aspect



## Mesures le 1.03.24 (en extérieur)



## Aurores boréales le 01.03.24



# Résultats

---

## Influence de la température

---

Certes, le flux de muons n'est à priori pas influencé par la température, mais le détecteur COSMIX, y est sensible. Cependant les écarts de flux observés selon les températures restent les mêmes aux différentes latitudes, n'ayant pour cela pas un réel impact sur nos conclusions tirées sur l'influence de la latitude sur le flux de muons.

En revanche, nous n'avons pour le moment, pas encore identifié le coefficient de correction à apporter, pour une température donnée. Cela constitue un des aspects de notre travail de recherche à approfondir.

---

## Influence de la latitude

---

En comparant les mesures réalisées de Copenhague à Oslo ainsi que celles réalisés à Tromsø, nous avons observé une corrélation frappante : les taux de coïncidences de muons semblent augmenter en fonction de la latitude à laquelle nous nous situons. Cette observation suggère un lien entre la latitude géographique et la fréquence des muons détectés, en effet les scientifiques expliquent que l'augmentation du flux de muons détecté sur Terre est lié à la forme de la magnétosphère, de la même façon que celle-ci interagit avec les particules de vent solaire et permet la formation d'aurore polaires aux latitudes élevées.

---

## Aurores

---

Lors de notre voyage à Trømso, l'activité aurorale était importante chaque soir. Les aurores ne furent cependant pas visible à l'oeil nu tous les soirs, la couverture nuageuse étant importante. Nous avons cependant profité de ces phénomènes pour réaliser le comptage des muons en présence d'aurores (expérience qui nous avait été suggérée par Alain Aspect lors de sa visite au lycée) et étudier l'influence des phénomènes auroraux sur le flux de muons. L'exploitation des résultats ne permet pas pour le moment de nous prononcer sur une éventuelle corrélation entre les deux événements. Cet aspect est cependant à approfondir dans les semaines à venir.

# Conclusion

---

Nous avons vérifié que la latitude est corrélée aux flux de muons détectés sur Terre. Nous observons en effet une augmentation du taux de coïncidences lorsque nous effectuons des mesures à une latitude plus élevée (par exemple, à  $69,4^{\circ}\text{N}$ ) par rapport à celles réalisées à Copenhague (à  $55,7^{\circ}\text{N}$ ).

Entre Copenhague ( $55,7^{\circ}\text{N}$ ) et Oslo ( $59,9^{\circ}\text{N}$ ), le taux d'augmentation est de 3,6% pour une variation de 4,2 degrés de latitude (une moyenne de 0,86% par degré). Entre Oslo et Tromsø, le flux croît de 19,1% pour 9,5 degrés de latitude (une moyenne de 2,01% par degré).

Certes, nous avons obtenu des résultats intéressants, mais il subsiste une certaine incertitude dans nos données. En effet, un voyage scientifique sur une période limitée ne nous permet pas d'effectuer un grand nombre de mesures exploitables, nous n'avons par exemple effectué qu'un seul trajet en ferry, n'ayant à notre disposition qu'une mesure pour les latitudes comprises entre  $57,0$  et  $59,4$  degrés Nord.

Entre 2020 et 2021, le Lycée Roland Garros, également en possession d'une mallette Cosmix, l'ont confiée à la marine nationale qui a navigué pendant 6 mois avec la mallette dans l'hémisphère Sud. Le navire s'est arrêté dans 4 ports, le plus au Sud étant celui de Dumont d'Urville ( $66,6^{\circ}\text{S}$ ). Lors de cet arrêt, la mallette comptait en moyenne 0,5117 muon par seconde. À  $69,9^{\circ}\text{N}$  nous avons obtenu un flux maximum de 0,4393 muons par seconde. Seulement il devrait y avoir un effet miroir entre les flux de muons aux différentes latitudes dans l'hémisphère Sud et dans celle du Nord. Comme nous avons pu le voir précédemment, la détection de flux est impactée par la température, et le rapport réalisé par le Lycée Roland Garros n'indique aucune température, ne nous permettant pas de prendre cette variable en compte. De plus, il n'est pas non plus précisé si, comme nous, ils mesurent le nombre de coïncidences. Il est pour cela possible que leur taux soit uniquement le nombre de muons mesuré par un des scintillateur. Si c'est le cas, il est également probable que le scintillateur ait détecté des bruits parasites.

# Les problèmes auxquels nous avons fait face

---

Nous avons pensé voyager en train jusqu'à Kiruna, mais le train allait trop vite pour que la mallette puisse détecter correctement les muons. De plus, un train est une boîte en métal, ce qui gêne également le comptage de muons. Pour palier à ce problème nous avons effectué une partie du trajet en ferry (qui navigue à environ 30km/h).

Nous avons des doutes sur le détecteur de muons qui nous donnait des mesures incohérentes. Alors que le nombre de muons que détectait l'un des scintillateurs était cohérent, le nombre que le deuxième nous donnait explosait. Suite à notre échange avec les chercheurs à l'Université de Tromsø, nous avons envisagé d'essayer de déterminer si la lumière est à l'origine de ce problème.

Sur le ferry entre Copenhague et Oslo, nous avons été priés de déplacer notre détecteur, ce qui a eu un impact sur le nombre de coïncidences, qui a alors commencé à diminuer, alors que nous nous attendions à une augmentation. Après environ une heure, le nombre de coïncidences a recommencé à croître. Nous pensons que le nombre de muons détectés a été modifié par le fait que la mallette se trouvait, après avoir été déplacée, sous une couche de métal plus épaisse. Nous n'avons pour cela pas pu traiter les mesures pour les 2 premiers degrés de latitude.

# Les perspectives du projet

---

- Contacter les deux chercheurs du laboratoire IN2P3/CNRS de l'Université de Bordeaux qui ont créé la mallette pour avoir plus de détails sur la constitution du détecteur et le fonctionnement des scintillateurs (afin de comprendre le comptage parfois incohérent de l'un des deux scintillateurs). Par la suite, si cela est pertinent, nous mènerons des mesures dans une pièce entièrement dépourvue de lumière, et/ou sous différents éclairages.
- Approfondir l'exploitation des données réalisées à Tromsø pour étudier l'influence des phénomènes auroraux sur la détection des muons atmosphériques sur Terre.
- Quantifier l'influence de la température sur le comptage des coïncidences par notre détecteur et calibrer ce dernier à partir d'un coefficient « correctif » que nous aurions identifié.
- Réaliser une étude plus approfondie portant sur l'évaluation des incertitudes de mesures (en lien avec notre 2<sup>nd</sup> programme Python).
- Rendre notre simulation Geogebra/Python plus réaliste, en prenant en compte la différence de flux lorsqu'un muon provient de telle ou telle direction (influence de l'angle par rapport à une droite normale à la surface de la Terre).

# Remerciements

Nous tenons à remercier nos deux professeurs pour leur encadrement tout au long du projet, nous offrant ainsi la possibilité de découvrir une dimension très expérimentale des sciences, la mise en œuvre d'un mini-projet de recherche et de développer notre esprit critique.

Nous remercions également Benoît Lott et Denis Dumora du laboratoire IN2P3/CNRS de l'Université de Bordeaux pour leur confiance et le prêt de la mallette Cosmix, leur disponibilité pour répondre à nos questions et leur aiguillage vers les différentes pistes de recherche.

Nous sommes également reconnaissant du temps que les scientifiques et chercheurs des différents organismes à Tromsø nous ont consacré, qu'il s'agisse de l'observatoire géophysique, de l'EISCAT ou de l'Université Arctique de Norvège (UiT), où nous avons également eu l'opportunité de présenter notre projet et d'échanger avec des membres du "space physics group".

Nous vous remercions pour votre temps et votre attention,



*Les élèves du LFPH*

