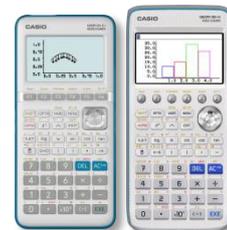


# DETECTION DE RAYONS COSMIQUES



## ENONCE : exercice 3 du BAC S 2018, Amérique du Nord

En 1911, le physicien Viktor Hess découvrait ce qui est appelé le rayonnement cosmique. On comprendra par la suite que ce rayonnement est constitué de particules, parmi elles se trouvent des muons.

### 1. Étude des muons

Lors de son émission de radio « La Conversation scientifique » du 31 décembre 2016 sur France-Culture, Étienne Klein a invité Sébastien Procureur physicien nucléaire, responsable scientifique à l'IRFU (Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers) du CEA. Au cours de cette conversation, Étienne Klein soulève un point qui pose problème : « En admettant même que ces particules aillent à la vitesse de la lumière, si leur durée de vie est de  $2,0 \mu\text{s}$ , elles parcourent 600 m dans l'atmosphère. Or on a dit qu'elles étaient produites à plusieurs dizaines de kilomètres au-dessus de la surface du sol. Comment on explique ce décalage ? »

La réponse de Sébastien Procureur est limpide : « C'est un simple effet de relativité restreinte. »

Sur le site [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com), on peut lire : Un muon de 1 GeV (1000 MeV) parcourt en moyenne 6,87 km dans l'atmosphère, un muon de 10 GeV près de 63 km. Cet allongement des parcours avec l'énergie est dû à la dilatation des durées prédite par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

Données :

- $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ;
- facteur de Lorentz :  $\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  où  $v$  est la vitesse de la particule dans le référentiel du laboratoire ;
- la durée de vie  $\Delta T$  d'une particule animée d'une vitesse  $v$ , mesurée dans le référentiel du laboratoire, est liée à sa durée de vie propre  $\Delta T_0$  par l'égalité :  $\Delta T = \gamma \Delta T_0$  .
- énergie d'une particule de masse  $m$  en mouvement :  $E = \gamma m c^2$  ;
- masse du muon :  $m_\mu = 1,88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ .

1.1. Retrouver l'ordre de grandeur de la valeur de la célérité  $c$  de la lumière à partir des valeurs évoquées par Étienne Klein.

1.2. La durée de vie des muons dans leur référentiel propre est  $\Delta T_0 = 2,2 \mu\text{s}$ . Pour des muons qui se déplacent à la vitesse  $v = 0,9997 c$ , déterminer la valeur de leur durée de vie mesurée dans le référentiel du laboratoire.

1.3. Quelle est la distance parcourue par ces muons dans le référentiel du laboratoire. Est-elle compatible avec les observations ?

1.4. Quelle est l'énergie d'un muon qui se déplace à la vitesse  $v = 0,9997 c$  ? La valeur trouvée est-elle cohérente avec les résultats précédents et les informations fournies ? Justifier.

## 2. Détection des muons au lycée

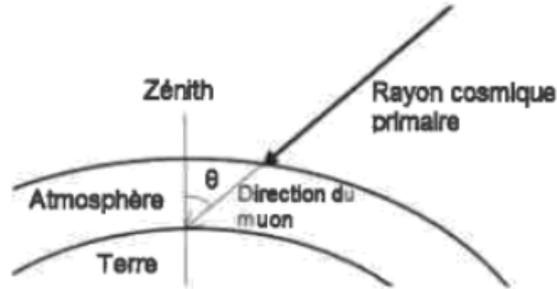
Le dispositif ministériel Sciences à l'École, dans le cadre du plan d'équipement COSMOS à l'École, met à disposition des établissements scolaires un cosmodétecteur. Cet appareillage permet de détecter des muons et de mesurer des durées de vie.

Source : Sciences à l'École

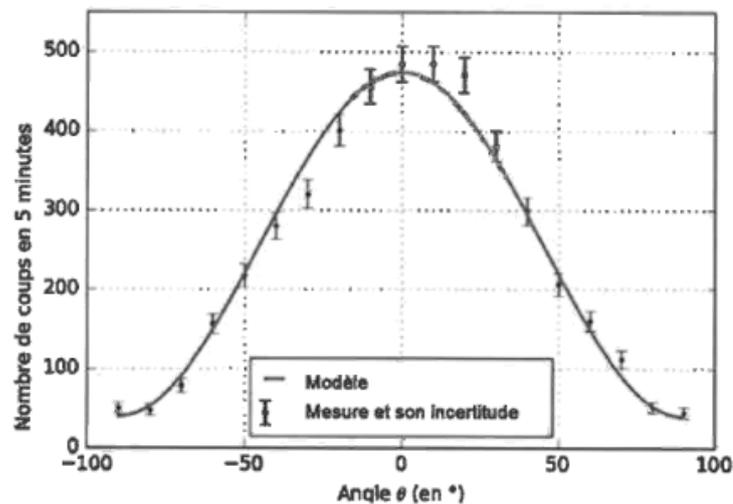


### Distribution angulaire de la direction d'arrivée des muons

Afin de pouvoir comparer les données de mesures, certains paramètres doivent être réglés sur le cosmodétecteur. Parmi ces paramètres figure l'orientation de l'appareil. Le nombre de muons détectés à la surface de la Terre diffère suivant la direction d'observation.



En mesurant le nombre d'impacts en cinq minutes sur le détecteur en fonction de l'angle d'orientation de ce détecteur par rapport au zénith, on trace le graphe suivant :



D'après Cahier pédagogique - Plan d'équipement COSMOS à l'École

### Mesures collaboratives

À l'occasion de la « Fête de la Science » le vendredi 13 octobre 2017, des mesures ont été effectuées par différents lycées de France. On s'intéresse aux mesures effectuées au lycée de Lunel. Lunel est une ville qui se situe à une altitude de 8 m au-dessus du niveau de la mer (dans le département de l'Hérault). Les mesures ont été effectuées en extérieur de 8 h à 12 h.

Température (en °C arrondi au dixième)	Pression (en hPa arrondi au dixième)	Humidité (%)	Numéro de la mesure	Heure métropole (début de la mesure)	Nombre de muons comptés au zénith pendant une durée de 10min
11,4	1026,2	84	0	8:00:00	
			1	8:00:00	1009
			2	8:10:00	1030
12	1026		3	8:20:00	992
			4	8:30:00	994
			5	8:40:00	1019
15	1026	83	6	8:50:00	984
			7	9:00:00	922
			8	9:10:00	1008
15	1026		9	9:20:00	1001
			10	9:30:00	1016
			11	9:40:00	971
16,1	1027	70	12	9:50:00	940
			13	10:10:00	963
			14	10:20:00	990
18	1027		15	10:30:00	906
			16	10:40:00	936
			17	10:50:00	944
18,1	1027,6	68	18	11:00:00	927
			19	11:10:00	919
			20	11:20:00	965
18	1027		21	11:30:00	918
			22	11:40:00	912
			23	11:50:00	976
17	1027	76	24	12:00:00	950

Données :

- Le flux de muons au niveau de la mer est de 1 muon par cm<sup>2</sup> par minute ;
- Exploitation d'une série de mesures d'une grandeur X :

Pour une série de mesures pour lesquelles on suppose les conditions de répétabilité vérifiées, on considère que la meilleure estimation de l'incertitude de mesure de la grandeur X, avec un niveau de confiance de 95%.

$$U_X = 2 \frac{s_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

n : nombre de valeurs disponibles

$s_{n-1}$  : écart-type expérimental tel que  $s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$

2.1. Dans quelle direction faut-il orienter le détecteur pour avoir un nombre d'impacts maximal ? Ce positionnement doit-il être effectué avec précision ?

2.2. On souhaite évaluer le nombre d'impacts à Lunel en 10 minutes en faisant apparaître la valeur de l'incertitude avec un niveau de confiance de 95 %.

2.2.1. Quelle est la meilleure estimation de ce nombre d'impacts ? Calculer ce nombre.

2.2.2. Écrire le résultat en faisant apparaître la valeur de l'incertitude sur la mesure.

2.3. Évaluer la surface effective de détection du cosmodétecteur. Commenter le résultat.

Nous résoudrons cet exercice à l'aide de la calculatrice **CASIO Graph 90+E**.

### 1. Etude des muons

1.1. Lors de son émission radio, Etienne Klein nous précise que “si la durée de vie des particules est de  $2,0 \mu\text{s}$ , elles parcourent 600 m dans l'atmosphère”.

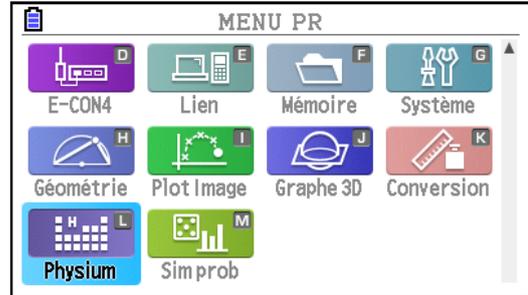
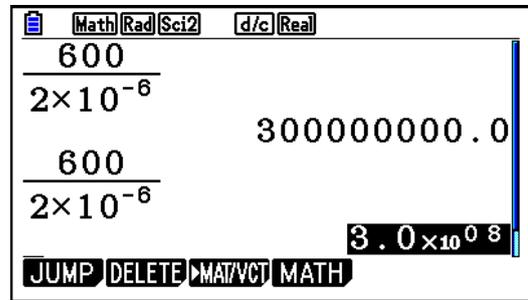
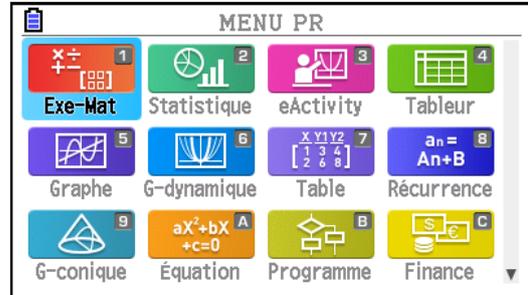
$$\text{D'où } c = \frac{d}{\Delta t} = \frac{600}{2 \times 10^{-6}}$$

A l'aide du menu “Exe-Mat” de la calculatrice, réalisons ce calcul.

Ainsi  $c = 3,8 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

La célérité  $c$  de la lumière est  $3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

Dans le menu “Physium” de la calculatrice, il est possible d'accéder au tableau périodique ainsi qu'aux constantes physiques fondamentales.



Ouvrir l'onglet "Constantes physiques fondamentales" en appuyant sur la touche [EXE] puis saisir [1] ("Universelles").

La célérité  $c$  de la lumière est égale à  $3,0 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

Nous obtenons un résultat similaire à celui obtenu précédemment par le calcul.

Remarque : dans tout l'exercice, nous utiliserons les touches [1] [0] [∧] pour écrire 10<sup>...</sup>.

1.2. La durée de vie  $\Delta T$  d'une particule se calcule via la formule suivante :

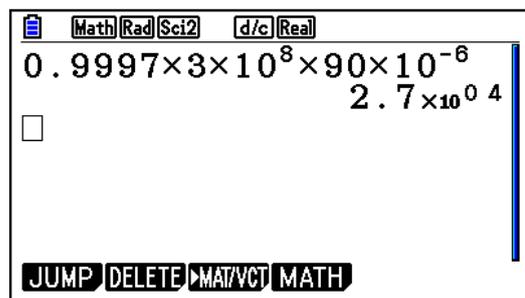
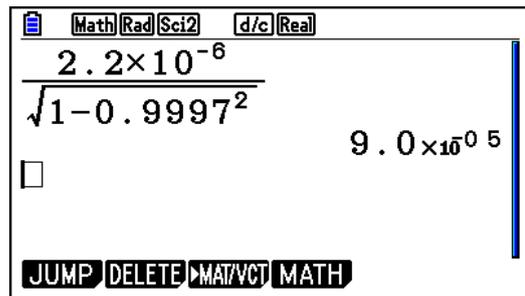
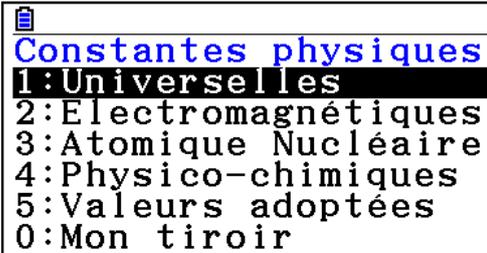
$$\Delta T = \gamma \Delta T_0 = \frac{\Delta T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{2,2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,9997c}{c}\right)^2}}$$

$$\Delta T = \frac{2,2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - 0,9997^2}} = 90 \times 10^{-6} \text{ s ou } 90 \mu\text{s}$$

1.3. Dans le référentiel du laboratoire, la distance parcourue par les muons est :

$$\begin{aligned} d &= v \Delta t = 0,9997c \Delta t \\ &= 0,9997 \times 3 \times 10^8 \times 90 \times 10^{-6} \\ &= 2,7 \times 10^4 \text{ m} = 27 \text{ km} \end{aligned}$$

Cette valeur est compatible avec les observations. Pour des muons d'énergies compris entre 1 et 10 GeV, la distance parcourue varie de 6,87 à 63 km.



1.4. L'énergie d'un muon se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$E = \gamma m_{\mu} v^2 = \frac{m_{\mu} (0,9997c)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$= \frac{1,88 \times 10^{-28} \times (0,9997 \times 3 \times 10^8)^2}{\sqrt{1 - 0,9997^2}}$$

$$= 6,9 \times 10^{-10} \text{ J}$$

En divisant le résultat obtenu par  $1,6 \times 10^{-19}$ , nous obtenons l'énergie en électron-volt :

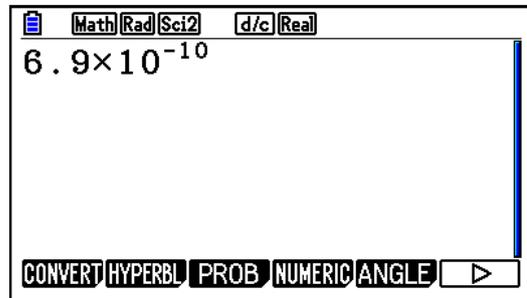
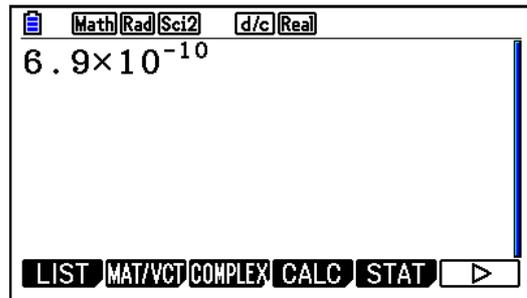
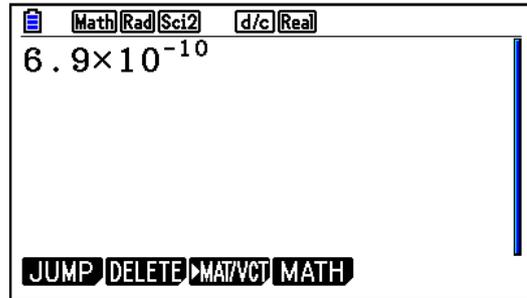
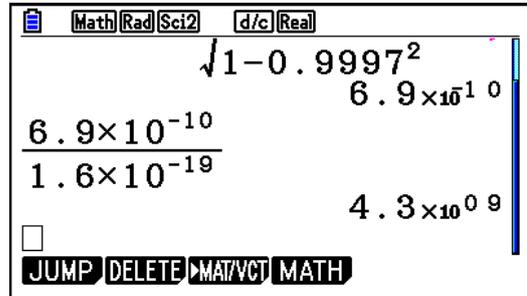
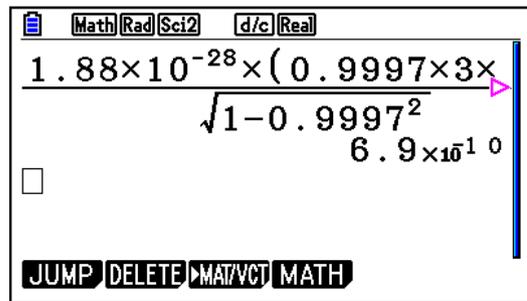
$$E = \frac{6,9 \times 10^{-10}}{1,6 \times 10^{-19}} = 4,3 \times 10^9 \text{ eV} = 4,3 \text{ GeV}$$

Astuce : avec la calculatrice, il est possible de convertir directement l'énergie en eV.

Dans le menu "Exe-Mat", saisir la valeur de l'énergie (ici en J).

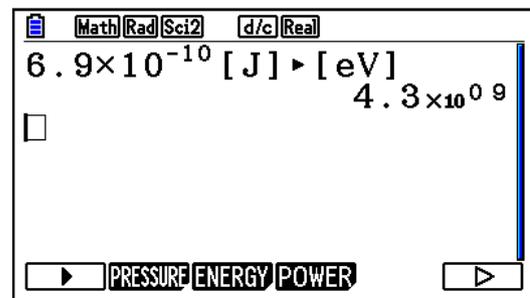
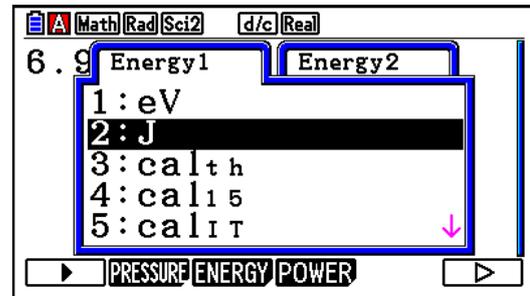
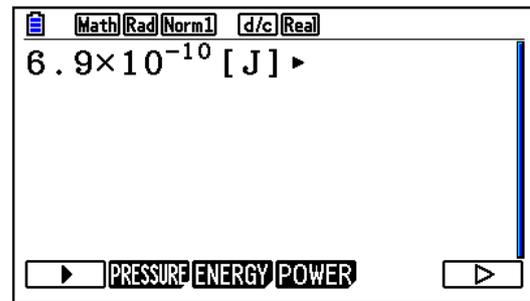
Appuyer sur les touches **OPTN**, **F6** (" $\rightarrow$ ") et **F1** ("CONVERT"). Presser deux fois la touche **F6** (" $\rightarrow$ ") puis **F3** ("ENERGY"). Choisir "2 : J".

Appuyer sur **F1** (" $\rightarrow$ ") et sur **F3** ("ENERGY").



Choisir "1 : eV".

Nous obtenons ainsi l'énergie en eV.

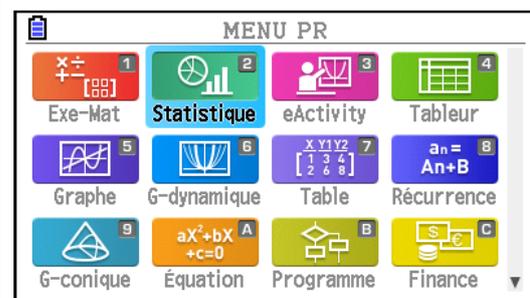


## 2. Détection des muons au lycée

2.1. Pour avoir un nombre d'impacts maximal, il faut orienter le détecteur vers le zénith ( $\theta = 0^\circ$ ). Autour de l'angle  $0^\circ$ , dû à l'écart-type élevé sur les mesures, l'impact reste maximal. Afin d'effectuer la mesure avec une erreur minimale, il faut mieux être précis.

2.2.1. Afin d'obtenir la meilleure estimation du nombre d'impacts, il est nécessaire de calculer la moyenne de toutes les mesures enregistrées.

A l'aide du menu "Statistique" de la calculatrice, calculons cette moyenne.



Entrons, dans la première colonne, le numéro de la mesure, dans la deuxième, le nombre de muons comptés au zénith pendant une durée de 10 minutes.

Appuyer sur la touche **F2** ("CALC").

Presser ensuite **F6** ("SET").

Choisir : - 1Var XList : List 2  
 - 1Var Freq : 1  
 Revenir à l'écran précédent (tableau statistique) en appuyant sur **EXIT**, puis appuyer sur **F1** ("**1-VAR**").

Ainsi, la moyenne de tous les éléments enregistrés en 10 minutes est de 966 muons.

		Rad	Norm1	d/c	Real
		List 1	List 2	List 3	List 4
SUB					
1	1		1009		
2	2		1030		
3	3		992		
4	4		994		

1

**GRAPH** **CALC** **TEST** **INTR** **DIST** **▶**

		Rad	Norm1	d/c	Real
		List 1	List 2	List 3	List 4
SUB					
21	21		918		
22	22		912		
23	23		976		
24	24		950		

950

**GRAPH** **CALC** **TEST** **INTR** **DIST** **▶**

		Rad	Norm1	d/c	Real
		List 1	List 2	List 3	List 4
SUB					
21	21		918		
22	22		912		
23	23		976		
24	24		950		

950

**1-VAR** **2-VAR** **REG** **SET**

		Rad	Norm1	d/c	Real
<b>1Var XList : List2</b>					
<b>1Var Freq : 1</b>					
<b>2Var XList : List1</b>					
<b>2Var YList : List2</b>					
<b>2Var Freq : 1</b>					
<b>LIST</b>					

		Rad	Norm1	d/c	Real
<b>1 variable</b>					
$\bar{x}$	=	966.333333			
$\Sigma x$	=	23192			
$\Sigma x^2$	=	$2.2444 \times 10^7$			
$\sigma x$	=	37.3816651			
$sx$	=	38.1856639			
$n$	=	24			

↓

