

EXERCICE I : « Ô TEMPS ! SUSPENDS TON VOL » ... (12 POINTS)

Document 1 : Évènements et temps

« Il convient [...] de noter que tous nos jugements dans lesquels le temps joue un rôle sont toujours des jugements sur des **évènements instantanés**. Quand je dis, par exemple, « le train arrive ici à 7h », cela veut dire que « le passage de la petite aiguille de ma montre par l'endroit marqué 7 et l'arrivée du train sont des évènements simultanés ». [...] »

« Ce qui est essentiel, c'est de définir le temps au moyen d'horloges au repos dans un système au repos ; à cause de cette relation étroite avec le système au repos, nous appellerons le temps que nous venons de définir **temps du système au repos**. »

D'après : EINSTEIN, Albert. *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité.*
Coll. « Discours de la méthode », Gauthier-Villard, 1905. Partie 1, Chap. 1

Document 2 : Relativité du temps

« Nous constatons ainsi qu'il ne faut pas attribuer à la notion de simultanéité une signification absolue, mais que deux évènements, qui, vus d'un système de coordonnées, sont simultanés, ne le sont plus quand on les observe d'un système en mouvement par rapport au premier. »

Partie 1, Chap. 2

« Si aux points A et B [d'un référentiel] K se trouvent des horloges au repos [...] dont la marche est synchrone, et si l'on déplace l'horloge en A avec la vitesse v le long de la ligne qui la relie à B, on constate qu'après son arrivée en B, les deux horloges ne sont plus synchrones. »

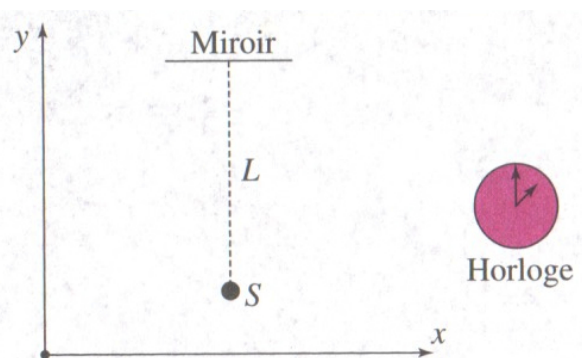
Partie 1, Chap. 4

D'après : EINSTEIN, Albert. *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité.*
Coll. « Discours de la méthode », Gauthier-Villard, 1905.

Document 3 : Expérience de pensée : dilatation du temps

On dispose d'une horloge, d'une source lumineuse S et d'un miroir M . Soit R le référentiel galiléen par rapport auquel l'horloge, la source lumineuse et le miroir sont fixes. Soit $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ un repère fixe par rapport à R . On a $\vec{SM} = L \cdot \vec{u}_y$. Soit R' un référentiel en translation uniforme par rapport à R à la vitesse $\vec{v} = v \cdot \vec{u}_x$.

Considérons deux évènements : émission d'un éclair (évènement A) et réception de l'éclair après réflexion sur le miroir M (évènement B). Un premier observateur lié au référentiel R mesure un intervalle de temps Δt entre ces deux évènements. Un second observateur lié au référentiel R' mesure sur un horloge liée à R' un intervalle de temps $\Delta t' \neq \Delta t$ entre ces deux évènements.



Document 4 : Le muon

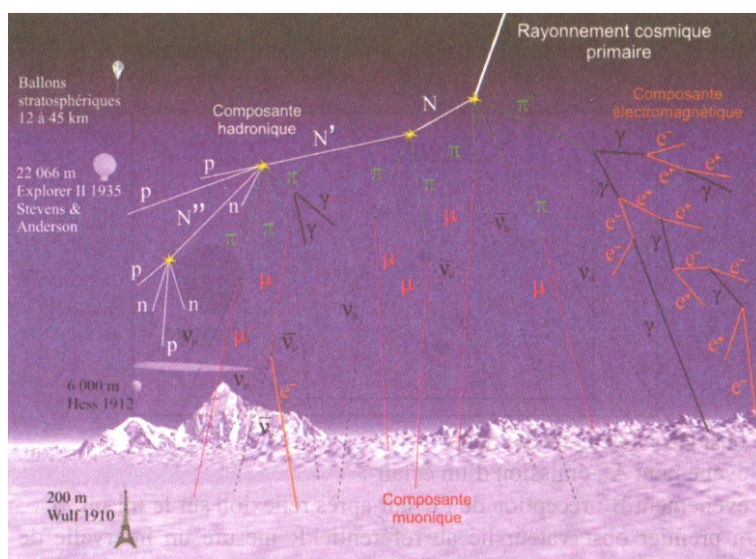
Le muon (ou μ) est une particule élémentaire qui appartient, comme l'électron, à la famille des leptons : il porte une charge élémentaire (il y a des μ^+ et des μ^-) et sa masse est 207 fois la masse de l'électron. C'est une particule instable : il se désintègre au bout d'un temps $\tau = 2,20 \cdot 10^{-6}$ s, appelé « durée de vie », selon le mode de désintégration suivant :

$$\mu^- = e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{et} \quad \mu^+ = e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Les muons, au repos, se désintègrent selon la loi : $N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$ avec N le nombre de muons à l'instant t , N_0 le nombre de muons à l'instant $t = 0$, τ la durée de vie d'un muon (lorsqu'il est au repos) et t le temps lu sur une horloge liée au référentiel dans lequel le muon est au repos.

D'après : SIMON, Yvan. *Relativité restreinte – Cours et applications*. Vuibert.

Document 5 : Une gerbe cosmique

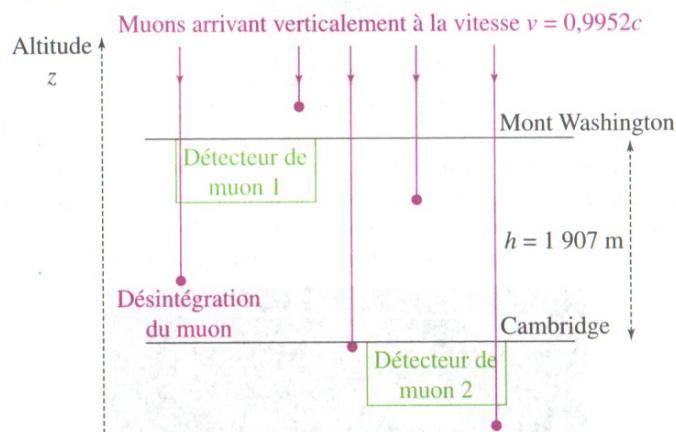


Les muons nous arrivent verticalement depuis la haute atmosphère avec des vitesses voisines de la vitesse de la lumière ($v = 0,9952 \cdot c$). Ils ont été formés dans des réactions nucléaires elles-mêmes provoquées par un rayonnement cosmique primaire.

D'après : LAGOUTE, Christophe. *Réalisation d'un détecteur de muons : une approche de physique du XX^e siècle au lycée*. B.U.P. n°911.

Document 6 : Expérience de D. Frisch et J. Smith (1963)

En 1963, David H. Frisch et James H. Smith ont étudié la durée de vie des muons du rayonnement cosmique. Pour cela, ils ont placé deux détecteurs de muons (scintillateurs) à deux altitudes différentes.



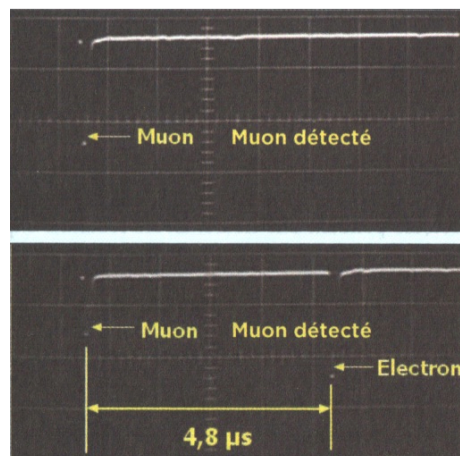
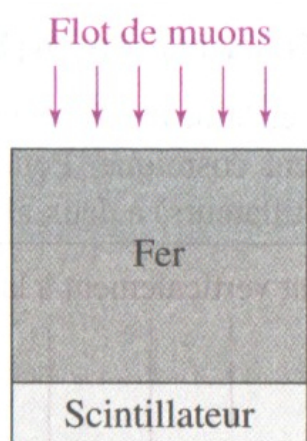
D. Frisch et J. Smith ont comptabilisé le nombre de muons entrant dans les deux détecteurs pendant une heure. Leurs résultats expérimentaux sont reportés dans le tableau suivant.

Essai numéro	Mont Washington	Cambridge
1	568	412
2	554	403
3	582	436
4	527	395
5	588	393

D'après : FRISCH, David H. – SMITH, James H. *Mesurement of the relativistic time dilatation using μ Mesons*. Article original du 14 janvier 1963.

Document 7 : Principe des détecteurs de particules utilisés par Frisch et Smith

Considérons un flot de muons arrivant verticalement. Ces muons traversent un scintillateur recouvert d'une épaisseur de 75 cm de fer. L'arrivée d'un muon sur le scintillateur se traduit par un très court éclair lumineux qui génère un signal électrique (signal 1). Si l'épaisseur de fer est suffisante pour arrêter certains muons, ceux qui sont stoppés ont toutes les chances de se désintégrer dans les quelques microsecondes suivantes : il y a alors production d'un électron (ou positon) énergétique qui génère un deuxième signal électrique (signal 2).



D'après : FRISCH, David H. – SMITH, James H. *Mesurement of the relativistic time dilatation using μ Mesons*. Article original du 14 janvier 1963.

Document 8 : Valeur moyenne et écart-type

Soit une distribution équiprobable de valeurs $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. La valeur moyenne de cette distribution est donnée par la relation suivante :

$$\langle x \rangle = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n}$$

L'écart-type de cette distribution est donnée par la relation suivante :

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot [(x_1 - \langle x \rangle)^2 + (x_2 - \langle x \rangle)^2 + \dots + (x_n - \langle x \rangle)^2]}$$

Document 9 : Incertitudes, intervalle de confiance et niveau de confiance

On réalise une mesure de X avec un appareil de mesure. On réalise la mesure n fois de suite ($n > 3$) avec le même appareil.

Soit $\langle X \rangle$ la valeur moyenne des n mesures et E l'écart-type associé.

Alors, en choisissant l'intervalle de confiance $[\langle X \rangle - 2E, \langle X \rangle + 2E]$, le niveau de confiance vaut 95%. Autrement dit, la « vraie » valeur de X a 95% de chances d'être comprise entre $\langle X \rangle - 2E$ et $\langle X \rangle + 2E$.

En choisissant l'intervalle de confiance $[\langle X \rangle - 3E, \langle X \rangle + 3E]$, le niveau de confiance vaut 98%. Autrement dit, la « vraie » valeur de X a 98% de chances d'être comprise entre $\langle X \rangle - 3E$ et $\langle X \rangle + 3E$.

Cet exercice propose d'étudier le caractère relatif du temps, conséquence immédiate des deux postulats d'Einstein introduits dans sa théorie de la relativité restreinte en 1905. Après avoir défini et étudié le phénomène de dilatation des durées, on se propose d'en étudier une preuve expérimentale.

1. La notion de temps dans la théorie de la relativité restreinte

1.1. Définitions

1.1.1. Dans le **document 1**, qu'entend Einstein par le mot « événement » ? Donner une définition. Qu'entend-il par « événements simultanés » ?

1.1.2. Dans le **document 1**, qu'entend Einstein par « temps du système au repos » ? Quel autre nom porte ce « temps » ainsi défini ? Donner une définition claire.

1.2. Approche qualitative de la dilatation des durées

1.2.1. Expliquer qualitativement, en s'aidant du **document 2** et sans calcul ni relation mathématique, le phénomène de dilatation du temps. Pourquoi parle-t-on de « dilatation » ?

1.2.2. Lire attentivement le deuxième extrait du **document 2**. À l'aide de la question précédente, compléter par les mots « avance » ou « retarde » la phrase qui suit cet extrait dans l'article d'Albert Einstein : « L'horloge qui a été déplacée de A vers B sur celle qui a gardé sa position invariable en B. »

1.3. Approche quantitative de la dilatation des durées

On réalise l'expérience de pensée détaillée dans le **document 3**.

1.3.1. Donner l'expression de Δt . S'agit-il d'un temps propre ? Justifier.

1.3.2. Établir l'expression de $\Delta t'$. Montrer que l'on peut écrire $\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t$. On donnera l'expression de γ en fonction de v et de la vitesse de la lumière dans le vide notée c .

1.3.3. γ est-il plus petit ou plus grand que 1 ? Justifier. Comparer alors $\Delta t'$ et Δt . Conclure sur le phénomène de dilatation du temps.

1.3.4. En utilisant la valeur numérique donnée dans le **document 5**, calculer numériquement γ pour un muon provenant de la haute atmosphère.

2. Preuve expérimentale : l'expérience de Frisch et Smith (1963)

2.1. Résultats expérimentaux

On appelle N_1 le nombre moyen de muons détectés au niveau du Mont Washington en une heure et N_2 le nombre moyen de muons détectés au niveau de Cambridge en une heure.

- 2.1.1. En exploitant les 5 essais du **document 3**, donner la valeur de N_1 . Estimer et justifier l'incertitude sur cette valeur pour avoir un intervalle de confiance de 95%. On pourra utiliser les **documents 8 et 9**.
- 2.1.2. Déterminer de même la valeur de N_2 . Estimer de même l'incertitude sur cette valeur pour avoir un intervalle de confiance de 95%.
- 2.1.3. *Dans leur expérience, Frisch et Smith n'ont pas pris en compte les erreurs systématiques. Qu'entendent-ils par « erreurs systématiques » ? Donner un exemple d'erreur systématique dans une expérience de votre choix.*

2.2. Interprétation des résultats expérimentaux

- 2.2.1. À l'aide du **document 4**, exprimer N_2 en fonction de N_1 , τ , h et v sans prendre en compte le phénomène de dilatation du temps.
- 2.2.2. Faire l'application numérique pour N_2 connaissant N_1 , τ , h et v (on prendra comme valeur pour la vitesse de la lumière dans le vide $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Comparer à la valeur expérimentale réelle.
Au regard des incertitudes évaluées en **2.1.2.**, l'écart entre la valeur théorique et la valeur expérimentale peut-il raisonnablement provenir de l'expérience ?
- 2.2.3. En prenant en compte cette fois le phénomène de dilatation du temps, exprimer de nouveau N_2 en fonction de N_1 , τ , h , v et c . On pourra introduire le facteur γ de la question **1.3.2**.
- 2.2.4. Faire de nouveau l'application numérique. Conclure.

2.3. Mesure du temps propre de désintégration d'un muon

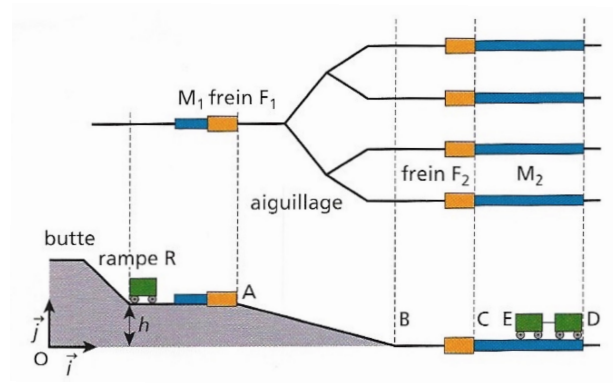
On souhaite exploiter le **document 7** pour retrouver le temps de vie propre τ d'un muon.

- 2.3.1. Laquelle des deux figures sur fond noir du **document 7** peut permettre de déterminer τ ? Justifier et donner sa valeur.
- 2.3.2. Comparer à la valeur précise de τ donnée dans le **document 3**. La valeur déterminée dans la question précédente vous semble-t-elle convenable ? Proposer un protocole expérimental pour améliorer la précision de la mesure.

EXERCICE II : GARE DE TRIAGE (8 POINTS)



Document 1 : gare de triage



Document 2 : vue du dessus et en coupe des voies et de la séparation des wagons

Dans une gare de triage, les wagons sont séparés au sommet d'une butte (document 1). Ils descendent un à un la rampe R et ils sont ensuite aiguillés vers une voie de garage où ils devront arriver au contact d'autres wagons pour former un nouveau train. Cette opération, appelée le « tir au but » par les professionnels, utilise des freins de voie, notés F_1 et F_2 et des capteurs, notés M_1 et M_2 sur le document 2.

Lors de son déplacement, un wagon est soumis à une force de frottements \vec{f} , de valeur $f = m \times r$, opposée au déplacement, où m est la masse du wagon et r un coefficient de résistance à l'avancement supposé constant sur tout le trajet.

Le capteur M_1 permet de déterminer le coefficient r du wagon. M_2 détermine la longueur de rail restant à parcourir : il commande le frein F_2 de sorte que le wagon qui descend arrive jusqu'au bon endroit.

L'ensemble de ces dispositifs permet la régulation de la vitesse de chaque wagon.

Dans tout l'exercice, les wagons sont assimilés à des points matériels en translation, leurs mouvements seront étudiés dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Les forces de frottements liées aux changements de pente des voies sont négligées. L'intensité du champ de pesanteur vaut $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

1. Rôle du frein primaire F_1

Dans cette première partie, on considère un wagon seul sur la voie, le train n'étant pas encore constitué.

Situé derrière le capteur M_1 , le frein primaire F_1 doit laisser au wagon une vitesse de valeur v_A suffisante, à sa sortie en A, pour qu'il puisse atteindre l'extrémité D des voies de garage avec une vitesse nulle en D : $v_D = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

On ne tiendra pas compte dans cette partie du frein secondaire F_2 . Pour le wagon considéré dans cette partie, le coefficient r vaut $r = 0,32 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- 1.1. D'après l'énoncé, montrer que la valeur f de la force de frottements \vec{f} est constante au cours du mouvement.
- 1.2. À l'aide d'une analyse dimensionnelle, montrer que le coefficient r a la dimension d'une accélération.
- 1.3. On note h la dénivellation entre les points A et B et on pose $L = AB + BD$. Exprimer le travail de chacune des forces appliquées à un wagon pour le trajet AD.
- 1.4. Parmi les forces inventoriées, lesquelles sont conservatives ?
- 1.5. En analysant les transferts énergétiques au cours du mouvement du wagon, montrer que la vitesse v_A à la sortie du frein primaire (en A) vérifie l'expression $v_A^2 = 2 \times (r \times L - g \times h)$.
- 1.6. Calculer la valeur v_A de la vitesse à la sortie du frein primaire pour qu'il s'arrête en D lorsque $L = 80 \text{ m}$ et $h = 1,0 \text{ m}$.

2. Rôle du frein secondaire F_2 et précision du tir au but

Du fait du remplissage des voies de garage, la distance qui reste à parcourir est variable suivant le nombre de wagons déjà présents.

La position du dernier wagon sur la voie est fournie par le capteur M_2 . Le frein secondaire F_2 prend en compte ce paramètre pour réaliser le tir au but.

Pour assurer un accrochage automatique des wagons, il faut que la vitesse v_E au moment du choc ne dépasse pas une certaine vitesse pour rester dans les normes de sécurité pour la marchandise en évitant des chocs trop violents.

- 2.1. Donner la relation entre la valeur v_C de la vitesse à la sortie du frein secondaire F_2 et la valeur v_E de la vitesse en E si la distance qui reste à parcourir est $L' = CE$.
- 2.2. La valeur v_E de la vitesse en E doit être comprise entre $0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. En déduire un encadrement pour la valeur v_C de la vitesse à la sortie du frein secondaire pour le wagon dans le cas où $L' = 40 \text{ m}$.