

La relativité restreinte dans les programmes de physique de TS

- Le nouveau programme de physique
- La relativité restreinte (RR) dans ce programme
- Contenu des ouvrages sur la RR
- Contenu dans les ressources académiques
- Le programme et la communauté éducative

Le nouveau programme de physique

Introduction du programme :

Les programmes de terminale de la série scientifique comme ceux de première s'articulent autour des grandes phases de la démarche scientifique : **observer**, **comprendre**, **agir** et s'appuient sur des **entrées porteuses** et **modernes** introduites à partir de questionnements.

Le nouveau programme de physique

Observer : ondes et matière

Ondes et particules

Caractéristiques et propriétés des ondes

Analyse spectrale

Comprendre : lois et modèles

Temps, mouvement et évolution

Structure et transformation de la matière

Énergie, matière et rayonnement

Le nouveau programme de physique

Temps et relativité restreinte

Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps.

Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.

Notion d'événement. Temps propre.

Dilatation des durées.

Preuves expérimentales.

Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.

Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.

Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

Seul le deuxième postulat est au programme

Le nouveau programme de physique

Commentaire tiré du programme

La définition du temps atomique et la réalisation des horloges associées font accéder à des échelles de précision telles qu'elles mettent directement en évidence le caractère relatif du temps en fonction de la vitesse relative de l'horloge et de l'observateur, qui est à la base de la relativité restreinte.

Le nouveau programme de physique

Premiers problèmes

□ Généralité

- Parmi les mots clé il manque « **expérimenter** »
- L'objectif principal est d'être « **attractif** » et « **séduisant** »

□ RR

- Introduction essentiellement « **pratique** » et « **opérationnelle** » (GPS)
- Étude uniquement de la dilatation du temps.
- Temps de cours prévu : une semaine et demie

Les nouveaux ouvrages de physique

Cinq éditeurs ont publié un ouvrage :

- Belin : 15 rédacteurs
- Bordas : 14 rédacteurs et 3 coordonnateurs
- Hachette : 14 rédacteurs et 2 coordonnateurs
- Hatier : 16 rédacteurs et 2 coordonnateurs
- Nathan : 20 rédacteurs et 2 coordonnateurs
- Volume moyen consacré à la RR :

N_T	N_{RR}	Cours	Documents	Exercices
569	17,5	4	4	9,5

La RR dans les ouvrages de physique

Exercices

Teste tes connaissances

1 Choisis la ou les bonnes réponses.

	A	B	C
1. L'air est...	un mélange homogène de plusieurs gaz.	formé d'un seul gaz.	un corps pur.
2. L'air contient...	environ 20 % de dioxygène et 80 % de diazote.	$\frac{1}{5}$ de dioxygène et $\frac{4}{5}$ de diazote.	environ 20 % de diazote et 80 % de dioxygène.
3. Au cours de la respiration, le pourcentage de dioxygène...	ne change pas.	diminue.	augmente.
4. Le gaz indispensable à la respiration est...	le dioxygène.	le diazote.	le dioxyde de carbone.
5. Un filtre traversé par une fumée...	retient les gaz.	ne retient pas les gaz.	retient les particules solides.
6. La fumée...	est un mélange hétérogène.	contient du gaz et des particules solides en suspension.	est un gaz.

→ Solutions page 218

2 Complète un camembert.

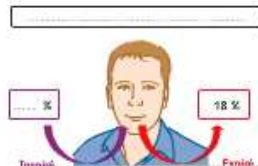
Recopie et complète ce diagramme représentant la composition approximative de l'air.



3 Complète un schéma.

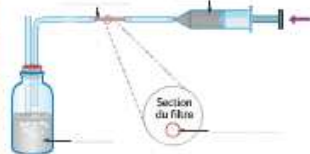
Recopie et complète le schéma suivant.

Constituant vital de l'air :



4 Trouve et corrige les erreurs.

- Quelles sont les trois erreurs présentes dans ce montage ?
- Dessine le montage correct en ajoutant les légendes.



Résumé du cours

5 Recopie et complète.

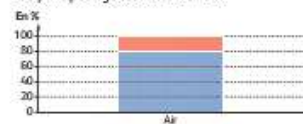
- L'air est un ... de gaz. Il contient environ 20 % de ... et 80 % de ...
- Le ... est indispensable à la vie.
- La fumée est un mélange essentiellement constitué de ... et de fines particules ... en suspension.

As-tu compris l'essentiel ?

Les deux principaux gaz constituant l'air

6 Exploitation d'un histogramme

L'histogramme ci-dessous représente les pourcentages des principaux gaz constituant l'air.



- Reproduis ce graphique.
- Indique pour chaque couleur le gaz correspondant.
- À quelle fraction correspond chaque pourcentage ?

7 Le contenu d'une bouteille de plongée

Dans le cas d'une profondeur inférieure à 60 m, on remplit les bouteilles de plongée avec de l'air.

- Quels sont les deux principaux gaz que contiennent ces bouteilles ?
- En quelles proportions ces gaz s'y trouvent-ils ?

Le constituant vital de l'air

8 La respiration humaine

Le pourcentage des gaz présents au cours de la respiration sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

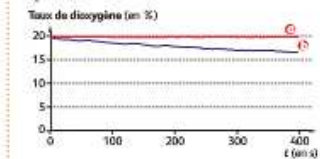
	Air inspiré	Air expiré
Diazote	78 %	78 %
Dioxygène	21 %	18 %
Autres gaz	1 %	1 %
Dioxyde de carbone	proche de 0 %	3 %

- Quel est le gaz, dont le pourcentage est très élevé, qui n'est pas consommé au cours de la respiration ?
- Quel est le gaz dont le pourcentage est plus élevé dans l'air expiré que dans l'air inspiré ?
- Quel est le gaz indispensable à la vie ?

9 Consommation du dioxygène

Une sonde oxygénométrique relève le pourcentage de dioxygène présent dans une enceinte en fonction du temps (t). On place des crickets dans cette enceinte et on relève à nouveau le pourcentage de dioxygène (t₂) au fur et à mesure que le temps s'écoule.

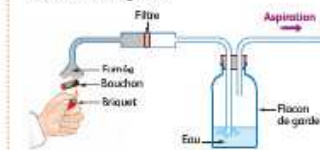
- Comment varie le pourcentage de dioxygène ?
- Pourquoi ce pourcentage varie-t-il ? Justifie ta réponse.



La différence entre un gaz et une fumée

10 Filtration d'une fumée

En plaçant un bouchon en liège dans la flamme d'un briquet, il se dégage une fumée noire. Cette fumée est aspirée par un dispositif approprié. Elle traverse le filtre qui noircit. On observe des bulles dans l'eau présente dans le flacon de garde.



- Quel est l'état physique de la substance qui traverse le filtre ?
- Quel est l'état physique de la substance retenue par le filtre ?
- De quoi est constituée la fumée noire ?

11 Rôle d'un masque



À Tokyo, il n'est pas rare de croiser des passants portant des masques.

- À quoi servent ces masques ?
- Pourquoi ces masques n'empêchent-ils pas de respirer ?

La RR dans les ouvrages de physique

Exercices

Compétence 2

➤ Prendre en compte l'invariance de la vitesse de la lumière et la relativité du temps

7 QCM

Choisir la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1 Si un vaisseau spatial pouvait se déplacer à une vitesse presque égale à celle de la lumière, son passager verrait la lumière :

- quasiment immobile ;
- se propager à la vitesse de la lumière ;
- se déplacer à une vitesse quasiment égale au double de celle de la lumière.

2 Pour un observateur en mouvement :

- la vitesse de la lumière dans le vide est égale à $3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- le temps se contracte ;
- le temps se dilate.

3 Une horloge en mouvement :

- se dilate ;
- ralentit ;
- se déplace à la vitesse de la lumière.

8 VRAI ou FAUX ?

Corriger, si nécessaire, les affirmations suivantes.

- La vitesse de la lumière dépend du mouvement de l'observateur.
- Le temps est absolu.
- La durée qui sépare deux événements dépend de l'observateur.
- La dilatation du temps est une théorie qui n'a jamais pu être observée expérimentalement.

9 The Nobel Prize in Physics 1907


Michelson invented his interferometer in order to discover the effect of the Earth's motion on the observed velocity of light. In cooperation with Morley, and using the interferometer, it was shown that light travels at a constant speed in all systems of reference. This experiment on light waves is one of the historically significant experiments in physics, and led to the development of Einstein's theory of relativity. Michelson received the Nobel Prize in 1907 for his work.

- What is the particularity of the velocity of light?
- Why was the Michelson-Morley experiment important in physics?

10 La simultanéité en question

Les résultats expérimentaux indiquaient que la lumière se propage, dans tout référentiel, toujours à la même vitesse c ; or cette circonstance est en contradiction avec la mécanique

11 Le paradoxe des jumeaux



Imaginons deux jumeaux, Arthur et Ben, vivant sur Terre. Arthur, qui est astronaute, est envoyé pour une mission dans un vaisseau spatial se déplaçant avec une vitesse proche de celle de la lumière. À son retour sur Terre, après une période qui aura duré pour lui 5 ans, il constate que 37 années se sont écoulées depuis son départ : Ben est donc plus âgé que lui de 32 années. Cette expérience théorique n'a jamais pu être réalisée. En revanche, il est actuellement possible de montrer, dans un accélérateur de particules, qu'en accélérant des particules de durée de vie très faible à de très grandes vitesses, celles-ci ont une durée de vie d'autant plus importante que leur vitesse se rapproche de celle de la lumière.

- Pourquoi parle-t-on de « paradoxe » des jumeaux ?
- Quelle conséquence de la théorie d'Einstein est validée par l'expérience réalisée dans les accélérateurs de particules ?
- De quoi semble dépendre la dilatation du temps ?

rationnelle galiléenne, puisqu'elle viole de manière flagrante l'une des lois essentielles de cette mécanique, la loi de composition des vitesses, qui interdit à toute vitesse d'être un invariant. [...] Einstein prend acte de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, qu'il interprète désormais comme la constante universelle [...] [II] fait valoir en effet que si l'on tient compte du temps que met la lumière à se propager, il est impossible de décider de manière absolue de la simultanéité de deux événements spatialement séparés, alors que la simultanéité était une notion absolue en mécanique rationnelle galiléenne et newtonienne. [...] Le temps lui-même perd le caractère absolu qu'il avait dans l'ancienne mécanique rationnelle.

Gilles Cohen-Tannoudji, « Le réel, à l'horizon de la dialectique » dans *Sciences et dialectiques de la nature*, La Dispute, 1998.


- Donner un exemple de résultat expérimental qui indique que la lumière se propage, dans tout référentiel, toujours à la même vitesse c .
 - En quoi ce résultat est-il en contradiction avec la mécanique rationnelle galiléenne ?
- Qu'est-ce que « deux événements spatialement séparés » ?
 - Pourquoi deux événements, en apparence simultanés, ne le sont-ils pas nécessairement ?
 - Quelle est la conséquence importante pour le temps ?

2 Dilatation des durées

2.1 Caractère relatif du temps

Les postulats de la relativité restreinte d'Einstein imposent d'abandonner la conception newtonienne selon laquelle le temps est une réalité absolue : la mesure du temps dépend du référentiel de mesure.

En relativité, un événement est un fait se produisant en un point de l'espace à un instant donné. En relativité restreinte, deux événements se produisant à des endroits séparés, s'ils sont simultanés dans un référentiel, ne le sont en général pas dans un autre (figure 8). La durée entre deux événements dépend du référentiel dans lequel est effectuée la mesure.



8 En relativité restreinte, la simultanéité d'un événement est relative au référentiel dans lequel la mesure est effectuée.

2.2 Durée propre et durée mesurée

Le référentiel propre d'un objet est le référentiel dans lequel cet objet est immobile, c'est-à-dire le référentiel lié à l'objet.

Une durée propre concernant un objet est une durée mesurée par une horloge immobile dans le référentiel propre de cet objet.


Considérons un référentiel R et le référentiel propre R_p d'un objet, en mouvement l'un par rapport à l'autre.

• Si R et R_p sont galiléens, la durée Δt_m d'un phénomène mesurée dans R , et sa durée propre Δt_p mesurée dans R_p sont liées par l'expression :


$$\Delta t_m = \gamma \Delta t_p \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

v : vitesse de R_p par rapport à R
 γ : coefficient de dilatation des durées

• Comme $\gamma > 1$, la durée mesurée Δt_m dans R est toujours supérieure à la durée propre Δt_p . On dit qu'il y a une **dilatation des durées** pour un objet en mouvement du point de vue d'un observateur « fixe » (figure 9).



9 Durée propre et durée mesurée.



10 Réciprocité de la dilatation du temps. La même situation décrite par rapport au vaisseau I (a) et par rapport au vaisseau II (b).

Exemples

- Une particule instable (un noyau radioactif par exemple) a une durée d'existence limitée. Si la mesure de cette durée se fait dans un référentiel où elle est immobile, cette durée Δt_p est une durée propre. Dans un laboratoire où cette particule est en mouvement, un expérimentateur mesurera une durée d'existence Δt_m plus grande.
- Une horloge en « mouvement » retarde par rapport à une horloge dite « fixe ». En effet, imaginons deux horloges identiques, l'une dans une fusée (liée au référentiel R_p) et l'autre sur la Terre (liée au référentiel R). Pour un observateur terrestre, une oscillation de l'oscillateur de l'horloge de la fusée dure plus longtemps (Δt_m) qu'une oscillation de l'horloge terrestre (Δt_p), comme si son mécanisme était ralenti. Cette propriété est réciproque : par rapport à R_p , c'est R qui se déplace. Pour un observateur de R_p , c'est l'horloge de R qui retarde (figure 10).

La RR dans les ouvrages de physique

Florilèges d'approximations et d'erreurs

Le mouvement provoque un ralentissement du temps. ... Une horloge en mouvement fonctionne plus lentement qu'une horloge stationnaire.

Pour un observateur en mouvement uniforme de translation, la durée mesurée Δt_m entre deux événements peut être reliée à la durée propre Δt_p par la relation $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$

La RR dans les ouvrages de physique

Florilèges d'approximations et d'erreurs

Après un voyage d'un an à une vitesse proche de celle de la lumière, les passagers d'un vaisseau spatial n'auraient vieilli que d'un an, alors que des personnes restées sur Terre seraient plus âgées de 20 ans.

La RR dans les ouvrages de physique

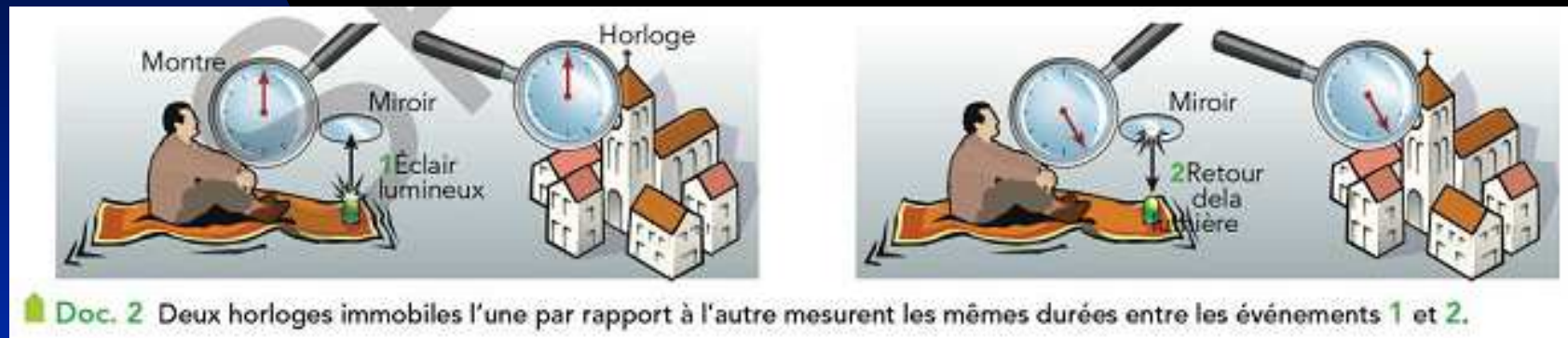
Florilèges d'approximations et d'erreurs

Le temps mesuré ou durée mesurée $\Delta T'$ est la durée séparant deux événements mesurée par une horloge fixe dans un référentiel galiléen (R') en mouvement par rapport au référentiel galiléen (R) dans lequel on mesure le temps propre.

Tout référentiel doit donc être associé à une horloge qui lui est propre.

La RR dans les ouvrages de physique

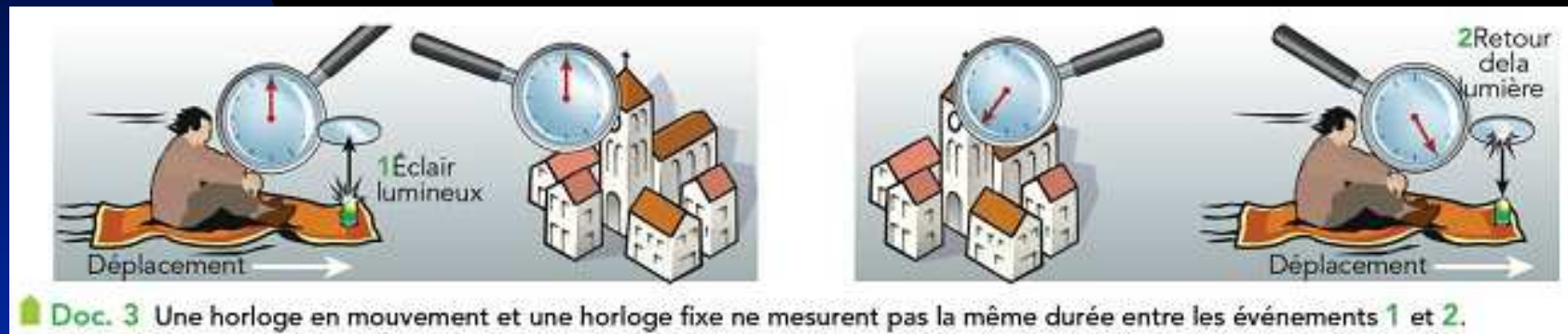
Schéma approximatif



Doc.2 – *La durée séparant l'émission de la lumière (événement 1) et sa réception après réflexion sur un miroir (événement 2) est mesurée par deux horloges proches de ces deux événements et immobiles l'une par rapport à l'autre. Ces deux horloges indiquent la même durée : c'est la durée propre ΔT_0*

La RR dans les ouvrages de physique

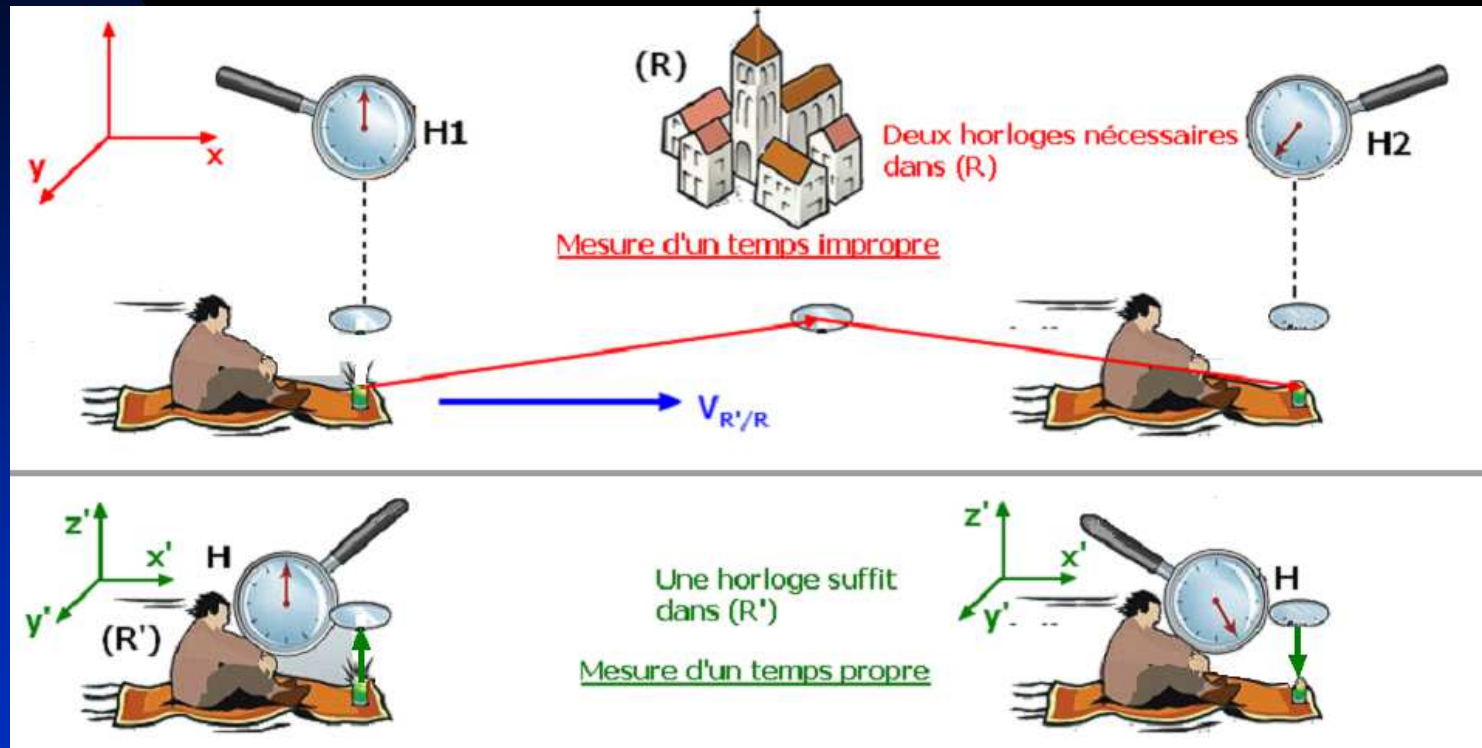
Schéma approximatif



Doc.3 – Dans le référentiel lié au tapis, les événements ont lieu au même endroit. L'horloge liée au tapis est proche des deux événements. Elle indique la durée propre ΔT_0 . Les événements n'ont pas lieu au même endroit dans le référentiel lié au clocher. L'horloge liée au clocher n'est pas proche des deux événements. Elle indique une durée mesurée $\Delta T'$.

La RR dans les ouvrages de physique

Schéma plus approprié



- le référentiel (R') du tapis, attaché à l'horloge de lumière et mesurant, sur H, une durée propre
- le référentiel (R) avec deux horloges H_1 et H_2 pour mesurer l'intervalle de temps impropre d'aller/retour du faisceau lumineux.

La RR dans les ouvrages de physique

les insuffisances et les faiblesses

- Positionnement préalable du problème absent ou posé d'une manière trop floue (notion de simultanéité et de synchronisation des horloges par exemple)
- Définitions trop approximatives
- Schémas n'apportant pas d'éclairage supplémentaire
- Réciprocité des effets le plus souvent ignorée
- La question sur le statut de la causalité dans cette nouvelle approche de la notion de temps est absente
- Souvent les exercices se ramènent à de simples calculs sans intérêt et s'appuyant sur la relation entre temps propre et temps impropre. De plus, et c'est souvent le cas, leur rédaction est trop vague pour être rigoureuse

La RR dans les ouvrages de physique

les insuffisances et les faiblesses

- On parle souvent de référentiels mais on les visualise rarement sur les schémas.
- Tendance implicite à donner au phénomène de mouvement un statut « absolu » au lieu d'insister sur l'aspect de « perspective dynamique » du phénomène. Les effets relativistes sont bien des conséquences réels du mouvement mais ce sont des effets réels de perspective.
- Choix des « entrées porteuses et modernes » trop complexes et nécessitant donc des approximations trahissant le travail des expérimentateurs
- Aucune bibliographie

La RR dans les ressources académiques

Méconnaissance de la théorie

Il est nécessaire pour effectuer les calculs demandés de connaître la transformée de Lorentz concernant le temps :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Le calcul rigoureux de la différence d'âge entre les deux jumeaux nécessite de tenir compte des accélérations subies par Arthur, ce qui relève de la relativité générale et non restreinte.

La RR dans les ressources académiques

On admet que, lorsque l'un des référentiels considérés subit des accélérations, la relativité restreinte ne s'applique qu'à condition de choisir le référentiel non galiléen comme référentiel propre. Lequel des deux jumeaux a donc [le plus vieilli] ?

Le mouvement du satellite n'étant pas rectiligne, on admettra que le temps propre est défini par l'horloge embarquée à bord du satellite.

La RR dans les ressources académiques

Texte de Gamov dans M. Tomkins

*A la suite d'une conférence sur la relativité, M. Tomkins rêve qu'il voyage dans un monde où la vitesse de la lumière est d'environ 30 km/h. Il observe un cycliste qui passe devant lui à **midi**, heure donnée par **la montre de M. Tomkins** et par une **horloge d'édifice** au repos dans son référentiel. Pour suivre le cycliste, il emprunte une bicyclette, le rattrape et s'arrête avec son nouveau compagnon devant **la Poste dont l'horloge** marque alors midi et demi. En regardant **sa montre**, M. Tomkins constate avec surprise qu'elle marque midi cinq !*

La RR dans les ressources académiques

Texte du document académique

On considère deux événements :

- *départ de M. Tomkins*
- *passage de M. Tomkins devant l'horloge de la poste*

*La durée propre qui s'écoule entre ces deux événements est celle, notée Δt_p , mesurée par l'horloge liée à M. Tomkins, autrement dit **sa montre**.*

*La durée mesurée depuis le sol terrestre est celle, notée Δt_m , affichée par **l'horloge de la poste**. On a bien $\Delta t_m > \Delta t_p$, comme l'indique la relation de dilatation des durées.*

Le programme et la communauté éducative

Aucune réaction sur l'esprit de la part des enseignants

Peu de réaction sur le fond de la part des enseignants

Aucune réaction de la part de « l'élite intellectuelle »

Problèmes de formation initiale sur la RR

Problèmes de formation continue sur la RR

Les mêmes problèmes vont se poser avec la MQ

Les ressources proposées pour la RR



Les ressources proposées pour la RR



Les ressources proposées pour la RR



Les ressources proposées pour la RR

THE ULTIMATE SPEED

**AN EXPLORATION
WITH HIGH ENERGY ELECTRONS**

William Bertozzi

**The Department of Physics and
The Laboratory for Nuclear Science
Massachusetts Institute of Technology**

**© Copyright 1993. All rights reserved.
Educational Services Incorporated**

Les ressources proposées pour la RR

<http://aces.ens-lyon.fr/clea/lunap/Relativite/relativite-restreinte-principes-et-applications>

- **Mini-Conférence "La relativité" par Jean-Marie Vigoureux**
- **Désintégration du muon: une horloge relativiste**
- **Le film « Time dilatation : an experiment with mu-mesons »**
- **Traduction du document détaillant la manipulation de Frisch et Smith sur la désintégration des muons**
- **La relativité restreinte avec le facteur k**
- **Les diagrammes Espace-Temps en relativité restreinte**

Les ressources proposées pour la RR

- Transformation des vitesses et des accélérations en RR
- Les Jumeaux de Langevin
 - ◆ Les jumeaux de Langevin : Au rythme des cœurs
 - ◆ Les jumeaux de Langevin : voyage accéléré
 - ◆ Les jumeaux de Langevin dans un diagramme de Minkowski
- Vidéo « A qui la faute ? »
- Bibliographie commentée sur Einstein et la relativité