

Cinématique relativiste

Expérience de Michelson & Morley

Niveau : Licence

Pré-requis :

- Référentiel et transformation de Galilée
- Equations de Maxwell
- Interféromètre de Michelson

Bibliographie :

- Introduction à la relativité, Langlois, Vuibert
- Relativité restreinte - Bases et applications, Semay et Sylvestre-Brac, Dunod
- Article : On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, Michelson et Morley (1887), American Journal of Science

Introduction

17^{ème} siècle : lumière corpusculaire

19^{ème} siècle : lumière onde -> va à la vitesse c

Est-ce que c change en fonction du référentiel ?

I. Limites de la mécanique classique

A. Non invariance des lois électromagnétiques

En partant des équations de Maxwell, on peut obtenir des équations de propagation de E et B . (Slide)

On veut mesurer la vitesse de la lumière dans deux référentiels (R et R') où R' est en translation à v par rapport à R . On pose $c' = c - v$.

Transformation de l'équation de propagation de E dans R à celle dans R' fait apparaître une équation différente à celle dans R -> non invariance des équations en fonction du référentiel. (Slide)

3 solutions possibles à ce problème :

- Les lois de l'électromagnétisme sont fausses -> rejetée car fonctionne expérimentalement
- Les postulats de la mécanique classique sont faux -> peu probable car la méca classique est utilisée depuis longtemps et fonctionne bien dans l'ensemble
- Utiliser le concept de l'éther, un référentiel privilégié des équations de Maxwell pour faire correspondre les deux théories. Le concept d'éther luminifère prédate de deux siècles l'énoncé des équations de Maxwell

B. Expérience de Michelson-Morley

- 1881 -> mesure de la vitesse de la Terre par rapport de l'éther [Pas exactement... tentative, infructueuse, de voir le décalage des franges lorsqu'on fait tourner l'interféromètre]

- 1887 -> expérience similaire mais plus précise [Allongement conséquent des bras de l'interféromètre par l'utilisation de miroirs]

Présentation de l'interféromètre de Michelson de l'expérience -> attaché à la Terre et en mouvement dans l'éther.

$$\Delta t_{//} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ et } \Delta t_{\perp} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ donc } \delta = c(\Delta t_{//} - \Delta t_{\perp}) \approx \frac{Lv^2}{c^2}$$

Michelson voulait voir le défilement des franges en coin d'air. Le Michelson est en rotation sur un bain de mercure afin de voir le défilement des franges avec la rotation. L'ordre

d'interférences s'écrit : $p = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$

AN : pour $L = 10\text{m}$, $p = 0.4$ -> on devrait voir un décalage de franges de presque $\frac{1}{2}$ ordre.

Pas vu de différence à 12h -> donc à essayer à 18h -> pas de décalage de franges observés non plus.

Les résultats de l'article montrent que les résultats sont très loin de la théorie et donc la théorie du mouvement de l'éther est remise en cause et cela conduira à la remise en cause de la mécanique classique. Einstein au 20^{ème} siècle remet en cause le postulat du temps absolu de la mécanique classique.

II. De la mécanique classique à la relativité restreinte

A. Postulats d'Einstein

1er postulat : Toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels

2ème postulat : La lumière a une vitesse (dans le vide) constante indépendante du mouvement de la source dans tous les référentiels inertiels

B. Transformations de Lorentz

Lorentz a trouvé des transformations vérifiant les postulats d'Einstein [Historiquement Lorentz formule la transformation qui porte désormais son nom avant qu'Einstein ne propose la théorie de la relativité...]

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\text{Où } \beta = \frac{v}{c} \text{ et } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

III. Conséquences

A. Simultanéité

Dans R, si deux événements se produisent au même instant ($t_1 = t_2$)

$$\text{Dans } R' : \Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{\beta}{c} \Delta x \right) = -\gamma \frac{\beta}{c} \Delta x$$

Donc si $\Delta x > 0$ alors $t'_1 > t'_2$ et les événements ne sont plus simultanés dans R'

B. Le temps

Dans R : $\Delta t \neq 0$ et $\Delta x = 0$ Dans R' : $\Delta t' = \gamma(\Delta t - \beta \Delta x) = \gamma \Delta t$

Or $\gamma > 1 \rightarrow \Delta t' > \Delta t \rightarrow$ dilatation du temps

Exemple de la gerbe atmosphérique : décomposition du muon : équation du pion
Temps de vie du muon = 2.2s

$L = v_{\mu\text{on}} * t_{\mu\text{on}} = 660 \text{ m}$ avant désintégration [Attention, il s'agit d'une durée de vie moyenne et d'un libre parcours moyen. Cf. Questions sur ce point]

Mais on a observé expérimentalement des muons au sol alors qu'ils se forment à environ 15 km au-dessus du sol. En fait, $t_{\mu\text{on}}$ est défini dans le référentiel du muon (« temps propre ») donc il faut prendre en compte un facteur gamma de dilatation du temps ce qui donne $L = \gamma * v_{\mu\text{on}} * t_{\mu\text{on}} = 14.4 \text{ km}$

C. Longueur

Règle immobile dans R et de longueur L pour tout t : $L = x_M - x_N$

Dans R' où O' se déplace à la vitesse v dans R , à t' , on a avec la transformée de Lorentz inverse :

$$x_M = \gamma(x'_M + \beta c t')$$

$$x_N = \gamma(x'_N + \beta c t')$$

Donc on obtient que : $L = x_M - x_N = \gamma$

Donc $L' < L \rightarrow$ contraction des longueurs [Le calcul présenté aboutissait, de manière erronée, à la conclusion inverse. Se rappeler que la **définition opérationnelle d'une mesure de longueur est le repérage simultané des abscisses des deux extrémités de l'objet, au même instant dans le référentiel où on effectue la mesure**]

Ces transformations sont-elles valables pour toutes les lois ?

Cas de la limite classique : $v \ll c$ et $\beta \ll 1 \rightarrow$ donc $\gamma \approx 1$

Application aux transformations de Lorentz \rightarrow on retrouve les transformations de Galilée \rightarrow cas particulier pour des vitesses faibles devant la vitesse de la lumière.

Si $v=c$ et $\beta=1 \rightarrow$ donc $\gamma \rightarrow \infty$

Vitesse dans R' est borné par c qui représente une limite infranchissable.

Conclusion :

Retour sur les équations de Maxwell et leurs invariances par transformations de Lorentz

Diagramme de Loedel

temps propre
ou long. propre
= où on fait la
mesure (où R fixe)
∴ l'autre bouge

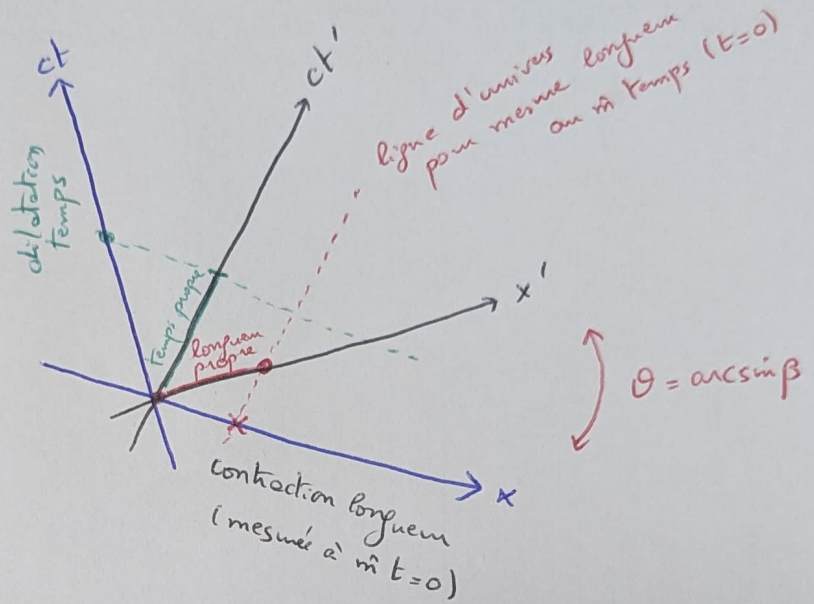
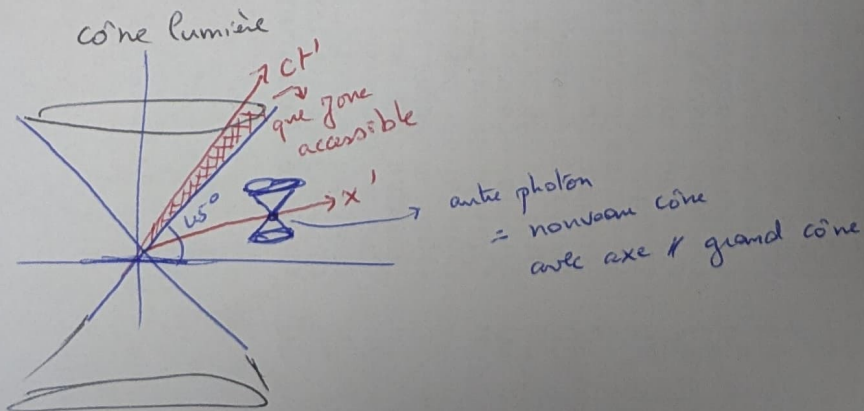
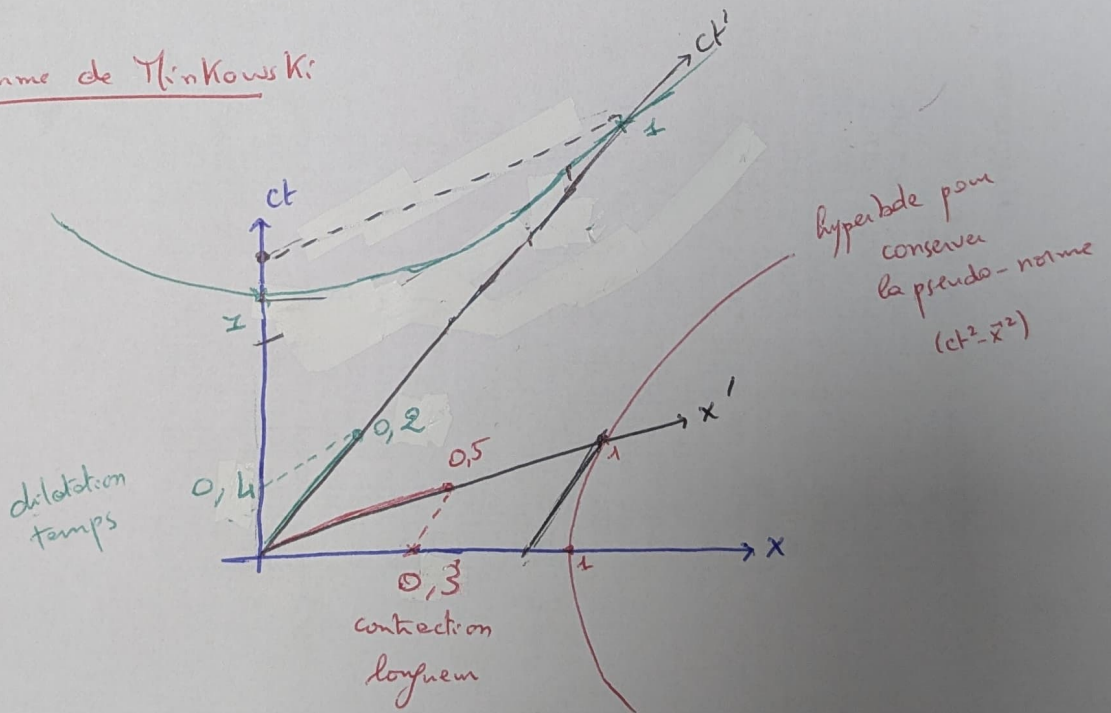


Diagramme de Tinkowski



plan de
les 2
diagrammes
de Loedel
l'axe cône
et la bissectrice

Questions

Éther, support des ondes lumineuses. Qui est le premier à avoir proposé cette notion ?

Christiaan Huygens au 17ème siècle, dans son « Traité de la Lumière » (écrit en français, pendant son séjour à Paris, en 1678 ; publié 12 ans plus tard aux Pays-Bas). L'« éther » est un concept qui revient sans cesse en physique au fil des siècles ; toutefois, dans le cadre d'une leçon sur la relativité restreinte, on peut se cantonner à parler de l'éther de Christiaan Huygens, support des ondes lumineuses (l'éther luminifère¹), sans nécessairement remonter aux origines antiques (quintessence, 5^e élément d'Aristote) du mot et du concept.

Propagation, le terme en c^2-v^2 ? Ça serait quoi comme solution ?

Lorsqu'on applique la transformation de Galilée aux équations de Maxwell, en particulier à l'équation de propagation des ondes EM dans le vide, on voit apparaître un terme de propagation à la vitesse $(c-v)$ et un autre à la vitesse $(c+v)$ [cohérent avec la composition classique des vitesses ; mais l'équation de propagation n'a plus la même forme].

Sources de lumière de Michelson-Morley ?

Lampe au sodium (en fait « flamme au Sodium ») d'abord puis en lumière blanche (lampe « Argand » i.e. lampe à huile, blanche).

Pourquoi la lampe au sodium ? Quel est l'intérêt ?

Doublet jaune, quasi-monochromatique. Permet le réglage de l'interféromètre. Notamment pour l'alignement des miroirs et pour obtenir les franges, et rechercher le contact optique.

Question: Qu'est-ce qui se passe en lumière blanche? A quoi ressemble la figure d'interférences ?

Réponse: Superposition des interférences pour chaque λ . En lumière blanche, Michelson obtient une frange sombre centrale, quelques franges blanches, puis des franges colorées qui se brouillent rapidement de part et d'autre de la frange sombre centrale.

Utilité du bain de mercure ?

Grande densité donc le marbre flotte dessus. Permet de faire lentement tourner le marbre, en limitant les vibrations qui rendraient difficilement observable l'évolution attendue du motif d'interférences pendant la rotation.

Quelle est l'utilité de la lame compensatrice ?

Pour compenser la différence de chemin optique dans le verre (de la lame semi-transparente) entre les deux bras.

Pourquoi 6 mois plus tard pour la manip ?

Pour vérifier le mouvement de l'éther par rapport à la Terre lorsque celle-ci se déplace (à 30 km/s) dans la direction opposée.

Connais-tu d'autres expériences ayant pour objectif la mise en évidence du vent d'éther ?

Expérience de Fizeau (question de l'entraînement (ou non, ou partiel) de l'éther par les milieux transparents en mouvement). Autre expérience conçue afin de mettre en évidence le « vent d'éther » : l'expérience de Trouton et Noble (un condensateur plan chargé, suspendu à un fil de torsion, est sensé pivoter de telle sorte que les plaques s'orientent perpendiculairement au « vent d'éther »).

Est-ce que tu peux préciser ce que Michelson veut mesurer en faisant tourner le marbre ?

Inversion du signe de la différence de chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre lorsqu'il pivote de 90° , qui doit induire un décalage du motif des franges.

En quoi les postulats d'Einstein résolvent les résultats de l'expérience de Michelson et de Morley ? Et si l'éther au voisinage de la Terre était entraîné par la Terre dans son mouvement ?

Si la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels inertiels, on n'attend aucune différence de marche du fait du mouvement de la Terre entre les bras de l'interféromètre, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux.

Si une couche d'éther se déplaçait avec la Terre dans son mouvement autour du soleil, cela rendrait compte du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley, mais ce serait incohérent avec l'interprétation classique de l'aberration des étoiles, interprétée alors comme la composition (addition classique des vecteurs vitesses) du mouvement de la lumière (dans l'éther) avec le mouvement de la Terre (dans l'éther).

Expliciter les coordonnées dans les transformations de Lorentz ?

Est-ce que tu saurais préciser sous quelles hypothèses la transformation de Lorentz (telle que formulée) est valable ? Idem, hypothèses lorsque tu as écrit la transformation de Galilée ?

[Le manque de précision lors de l'écriture de la transformation de Lorentz au tableau a suscité ces questions]. Sous la forme utilisée, on suppose que les origines O et O' des deux référentiels R et R' se confondent à $t=t'=0$ (synchronisation des origines des temps lors de l'événement particulier $O=O'$), sans quoi il est nécessaire d'ajouter des termes constants dans les équations de Lorentz. Il est important d'être précis et de bien prendre le temps de dessiner les deux référentiels, les axes, de poser les hypothèses, de préciser que O et O' se confondent à $t=t'=0$, etc.

Est-ce que ce n'est pas restrictif de ne considérer pour le mouvement de référentiel qu'une translation sur l'axe des x ? N'y a-t-il pas là perte de généralité ?

L'ensemble des transformations qui laissent invariantes les équations de Maxwell forment le « groupe de Poincaré » ; sa base canonique est constituée des translations dans l'espace et dans le temps, des rotations, du renversement du temps et de la parité, et des « boost » de Lorentz sur les 3 axes. Lorsqu'on écrit la transformation de Lorentz en supposant le mouvement relatif entre les référentiels selon Ox et $O'x'$, il n'y a pas nécessairement perte de généralité : dans les référentiels inertiels R et R' considérés, on peut toujours choisir les axes de telle sorte que l'axe Ox (et l'axe $O'x'$) soient orientés selon le mouvement relatif entre les 2 référentiels.

Qu'est-ce que le « temps propre », définition ? Si on prend un mobile pour lequel deux événements ont lieu successivement pour lui dans son référentiel propre, quelle sera la durée qui sépare ces deux événements dans un autre référentiel ?

Temps/durée mesurée entre des événements ayant lieu au même point dans le référentiel où le mobile est au repos. Dans tout autre référentiel, on trouvera entre les mêmes événements une durée plus longue : c'est la « dilatation du temps ».

Dans la célèbre expérience sur les muons atmosphériques : à quoi correspond le temps de vie du muon de 2.2 microsecondes ? Si jamais j'avais une population de muons « dans une boîte », comment cette population évoluerait-elle ?

Temps de vie moyenne. Loi exponentielle décroissante. En physique des particules, on donne en général le temps de vie moyen d'une particule, noté tau. Il s'agit bien sûr du temps de vie moyen mesuré « au repos », i.e. dans le référentiel propre de la particule (temps propre). Pour une population de particules semblables, la population de ces particules évoluera selon : $N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$.

Retour sur les effets de la transformation de Lorentz sur les longueurs, validité de l'équation obtenue pour la longueur de la règle dans l'autre référentiel ?

*La longueur d'un objet (selon la direction du mouvement relatif entre les 2 référentiels considérés) mesurée dans le référentiel où il est au repos est sa « longueur propre ». Dans tout autre référentiel, on trouvera une longueur plus courte : c'est la « contraction des longueurs ». Lors du calcul, il est essentiel de bien définir les événements considérés, et de se souvenir que du point de vue opérationnel, **on définit une mesure de longueur comme la détermination simultanée des abscisses des deux extrémités de l'objet, au même instant dans le référentiel où on effectue la mesure.** Sans ces précautions, surtout en raisonnant sur des intervalles de temps et d'espace mal définis, on aboutit parfois au résultat inverse de ce que la relativité prédit [La question est venue **car le calcul présenté au tableau était erroné et aboutissait au résultat inverse de ce que prédit la théorie de la relativité.** Une telle erreur lors de l'épreuve devant le jury de l'agrégation serait très certainement « fatale » pour la/le candidat(e)].*

Tu as évoqué la vitesse c comme une limite infranchissable ; as-tu déjà entendu parler des tachyons ? c.à.d. des particules hypothétiques, qui, par définition, se déplaceraient à une vitesse supérieure à c ? A quoi ressembleraient leurs lignes d'univers dans un diagramme d'espace-temps ? Quelles seraient les conséquences pour un tachyon ? Peux-tu rappeler ce qu'est le cône de lumière d'un événement, le dessiner, et rappeler à quoi correspondent les différentes régions que délimite le cône de lumière ?

Le tachyon est, par définition, une particule (hypothétique) qui se déplacerait plus vite que la lumière. On peut montrer qu'un tachyon doit nécessairement se déplacer plus vite que la lumière dans tous les référentiels inertiels. La pente de sa ligne d'univers est telle que pour n'importe quel point-événement de sa ligne d'univers, son futur et son passé sont hors de son cône de lumière, ce qui pose de sévères questions concernant le principe de causalité pour le tachyon. On peut aussi montrer qu'il est toujours possible de trouver un référentiel inertiel tel que émission et réception d'un tachyon voient leur ordre temporel inversé. Pour le cône de lumière d'un événement, la partition de l'espace-temps associée, et la discussion sur le signe de l'intervalle d'espace-temps pour une paire d'événements, se référer à l'abrégé de cours par exemple.

Est-ce que tu saurais retrouver la nouvelle loi de composition des vitesses par les transformations de Lorentz ? Quelle différence avec la loi galiléenne ? Imaginons un rayon lumineux allant à c selon $+x$ dans R , à quelle vitesse se propage-t-il dans R' ?

L'objectif de la question était de retrouver la loi relativiste de composition des vitesses (au moins pour la composante selon x/x'), de l'appliquer au cas particulier d'un rayon lumineux se propageant selon $+x$ ou $-x$, et de vérifier qu'on obtient bien un résultat cohérent avec les postulats d'Einstein, à savoir que la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels galiléens/inertiels.

Titre : Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley.

Présentée par : Mathis Demouchy

Rapport écrit par : Théo Meier

Correcteur : Laurent Le Guillou

Date : 17/10/2023

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Relativité restreinte – Bases et applications	Claude Semay et Bernard Silvestre-Brac	Dunod
Introduction à la relativité – Principes fondamentaux et conséquences physiques	David Langlois	Vuibert
Cours de relativité restreinte	Laurent le Guillou	

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis : Cinématique classique, équation de d'Alembert, notion d'interférences

Introduction : besoin de référentiels, objectif : lier les référentiels galiléens par une relation de passage

1) Naissance de la relativité restreinte

1) Transformation de Galilée

Composition des vitesses classique, transformations de Galilée
Vitesse de la lumière définie sans référentiel, existence de l'éther ?

2) Ether, expérience de Michelson et Morley

éter, référentiel privilégié pour c ?
Présentation de la manip' historique
Détail du calcul de différence de marche fait en cours dans le référentiel de l'éther, application numérique
Résultat négatif de la manip

3) Postulats d'Einstein

énoncé des 2 postulats

reprise du calcul de la différence de marche pour le bras orthogonal au mouvement de la Terre par rapport à l'éther mais avec les postulats de la relativité restreinte, fait apparaître le facteur gamma → dilatation du temps

Besoin de définir d'autres transformations

II) Transformations de Lorentz

1) Définitions

Expressions de passage pour les coordonnées entre référentiels galiléens, paramètres gamma et bêta

Limite classique : on retrouve Galilée

On retrouve la dilatation du temps

Démo de la contraction des longueurs avec l'exemple d'une craie lancée à une vitesse relativiste

2) Muons voyageurs

Explication du phénomène : surplus de muons par rapport à un cas sans relativité restreinte

Détail du calcul en introduisant des événements

Applications numériques pour trouver la vitesse des muons et leur temps de vie dans notre référentiel

Explication qualitative

Conclusion :

Application à la dynamique, composition des vitesses

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

- Q :** Différence inertiel/galiléen ? Définition ? Référentiel non-galiléen ? Exemple ? **R :** Même chose. Référentiel dans lequel un objet soumis à aucune force a une trajectoire rectiligne et uniforme. Un objet au repos n'aura pas de translation rectiligne uniforme, comme les nuages (précession) Dans un référentiel galiléen, le principe d'inertie est vérifié ; dans un référentiel non-galiléen, des (pseudo-)forces inertielles apparaissent (forces d'entraînement, de Coriolis). Quand on souhaite illustrer la force de Coriolis, parler des masses d'air et des nuages est un peu risqué face à un jury : les phénomènes en jeu

- sont complexes et la seule force de Coriolis ne permet pas d'expliquer tous les mouvements des masses d'air : il vaut mieux parler de ce qui se passe dans un ascenseur ou dans un manège en rotation pour illustrer simplement les effets des forces inertielles.
2. **Q :** Les étoiles bougent ? **R :** En fait référentiel héliocentrique Attention à être précis : évoquer le « référentiel des étoiles », est un peu dangereux car très imprécis, et évocateur de la sphère des fixes. Par exemple, dans les référentiels géocentrique et héliocentrique, on définit les **axes** en pointant des étoiles lointaines (en pratique, on utilise aujourd'hui un système de coordonnées (ICRS) dont les axes sont définis par un ensemble d'objets très lointains, dont des quasars).
 3. **Q :** Historique de l'éther ? **R :** Introduit par Huygens (19ème siècle en fait 17ème : « Traité de la Lumière » de Huygens, 1678), avant Maxwell. L'« éther » est un concept qui revient sans cesse en physique au fil des siècles ; toutefois, dans le cadre d'une leçon sur la relativité restreinte, on peut se cantonner à parler de l'éther de Christiaan Huygens, support des ondes lumineuses (*l'éther luminifère*¹), sans nécessairement remonter aux origines antiques (quintessence, 5^e élément d'Aristote) du mot et du concept.
 4. **Q :** Vitesse de la lumière dans un matériau transparent ? Vitesse limite dans ce milieu ? **R :** c/n , où n est l'indice optique, La vitesse de la lumière dans un milieu transparent vaut c/n (n indice optique du milieu) et n'est pas une vitesse limite dans le milieu. Cette vitesse ne joue pas de rôle particulier.
 5. **Q :** Expérience pour mettre en évidence le mouvement de l'éther ? **R :** Expérience de Fizeau : lumière dans un fluide en mouvement : entraînement (« partiel ») de l'éther par le fluide : résultat positif, mais mauvaise interprétation ; résultat expliqué par la relativité restreinte a posteriori.
 6. **Q :** lame de plus dans le Michelson ? **R :** La compensatrice, pour avoir le même chemin optique sur les deux trajets.
 7. **Q :** Frange centrale noire en lumière blanche, alors que les deux chemins sont parfaitement identiques ? **R :** Déphasage π due à la réflexion ? Même nombre de réflexions... La question était incomplète. En pratique, en lumière blanche, la frange centrale est blanche sur certains interféromètres de Michelson et noire sur d'autres : cela dépend du montage et du type de lame semi-réfléchissante utilisée (certaines induisent un déphasage supplémentaire de π). *Mea Culpa*.
 8. **Q :** Calcul de différence de marche : comment faire le calcul dans le référentiel de la Terre, en classique ? **R :** Transformation de Galilée, $c'=c-v(\text{Terre}/\text{éther})$
 9. **Q :** Pourquoi des franges ? **R :** Coin d'air, angle entre les 2 miroirs
 10. **Q :** Pour avoir des anneaux ? **R :** Miroirs parallèles
 11. **Q :** On s'attend à observer quoi sur l'écran ? Comment faire tourner l'interféromètre ? **R :** Un décalage, on place la machine sur un bain de mercure Dans l'expérience historique (cf papier de 1887), Michelson et Morley impriment au marbre qui flotte sur le bain de mercure un mouvement de rotation régulier, et observent à intervalles angulaires réguliers la position des franges. La vitesse de rotation est d'environ un tour en 6 minutes.
 12. **Q :** Pourquoi l'hypothèse d'une couche limite d'éther ne marche pas en 1887 ? Fait expérimental ? **R :** L'éther doit traverser les objets ? Si la Terre se déplaçait avec une couche limite d'Ether, on ne devrait pas observer l'aberration des étoiles, qu'on explique classiquement par le mouvement de la Terre (autour du soleil) dans l'éther, et la composition des vitesses (composition classique du mouvement terrestre et de la vitesse de la lumière dans l'éther).

1 « Luminifère », i.e. « porteur de lumière ». A rapprocher de « Lucifer » (désignation latine de la planète Vénus, le « porteur de Lumière », annonceur de l'aurore) pour l'étymologie...

13. **Q** : Est-ce que choisir la vitesse selon un axe est problématique ? **R** : Non pas dans cette leçon, car on choisit les axes comme on veut pour 2 référentiels, mais attention pour la composition des vitesses si on a plus de 2 référentiels.
14. **Q** : Les transformations de Lorentz font partie d'un groupe, qui laissent Maxwell invariant, son nom ? Qu'y a-t-il en plus ? **R** : Poincaré, qui contient les boosts (introduits pendant la leçon) et les rotations.
15. **Q** : Les propriétés sont symétriques entre 2 référentiels, pourquoi on a pas le facteur gamma partout ? **R** : Il existe un temps propre défini dans le référentiel de l'objet en mouvement, il est un invariant et c'est le temps le plus petit possible mesurable.
16. **Q** : Pourquoi le temps propre est invariant ? **R** : On se place dans le référentiel de l'objet, on mesure ce temps ? ...
17. **Q** : Même question pour la contraction des longueurs ? **R** : On a similairement une longueur propre.
18. **Q** : Photo ? Temps de propagation des photons ? **R** : Pas vraiment, on arrête le temps. Eviter de parler de « photographies ». Certains ouvrages consacrent des chapitres entiers à l'aspect visuel que des objets présenteraient pour un observateur si la vitesse de ces objets était très grande (fraction de c). Il faut tenir compte à la fois de la contraction des distances, mais aussi des temps de propagation des photons, et de l'effet Doppler relativiste. Les résultats sont contre-intuitifs : distorsions géométriques surprenantes, possibilité de voir à la fois l'avant et l'arrière des objets, etc. C'est délicat à traiter, ça n'a objectivement pas un grand intérêt pratique (mais c'est amusant), et évoquer le fait de faire « une photo » dans une situation relativiste peut vous entraîner dans ce genre de considérations assez délicates à traiter proprement dans le cadre d'une leçon d'agrégation.
19. **Q** : Simultanéité ? **R** : Démo rapide avec les transformations de Lorentz
20. **Q** : Exemple concret des muons, pourquoi 48 km ? Epaisseur de l'atmosphère ? **R** : Grandeur caractéristique pour l'exercice, épaisseur de ~ 100 km.
Les muons qu'on détecte au niveau de la mer se sont formés dans les gerbes atmosphériques à une altitude moyenne de 15 km environ. Attention à ne pas balancer des chiffres sortis de nulle part, comme ce « 48 km », que vous aurez bien du mal à justifier devant le jury.
21. **Q** : Vraiment aucun muon ? **R** : Non, décroissance exponentielle.
22. **Q** : Interprétation dans le référentiel du muon, atmosphère qu'il traverse ? **R** : Il voit la Terre qui vient vers lui, l'atmosphère se contracte.
23. **Q** : Dans l'expérience, on mesure quoi ? En pratique on fait comment ? **R** : La trace du muon, et de l'électron issu de sa désintégration. On se place à 2 altitudes différentes, et on observe un surplus de muons par rapport à la prévision sans relativité restreinte.
24. **Q** : Autre manip' historique ? **R** : Expérience de Hafele et Keating, décalage de 2 horloges atomiques qui sort du cadre de la relativité restreinte à cause de la gravité. Attention, l'interprétation est difficile, car il faut tenir compte à la fois des effets cinématiques et des effets gravitationnels sur l'écoulement du temps : un traitement complet de Hafele-Keating nécessite de travailler dans le cadre de la Relativité Générale.
25. **Q** : En fait ils font la manip en faisant 2 fois le tour de la Terre, dans les 2 sens, pourquoi ? **R** : Pour négliger la rotation de la Terre ? Non, il faut prendre en compte la composition des vitesses dans les deux sens, donc ça ne se compense pas, mais ça annule les effets gravitationnels.
26. **Q** : Tu sais démontre la compo des vitesses ? **R** : Oui. (fait au tableau en différenciant les transformations de Lorentz)

27. **Q** : Exemple d'un rayon lumineux qui va à c ? **R** : On retrouve le postulat d'Einstein, il va toujours à c .
28. **Q** : Et si il va à $-c$ dans R' ? **R** : Il va à $-c$ dans R .

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Leçon bien menée. La structure du plan est classique, et les notions sont bien présentées. La présentation de l'expérience de Michelson, et le calcul de la différence de marche et du décalage maximal attendu du motif des franges lorsqu'on fait tourner le dispositif ont été bien menés. On pourrait imaginer, pour une leçon docteur, présenter un interféromètre de Michelson, en configuration « coin d'air », en lumière blanche (comme Michelson), afin de visualiser les franges et d'illustrer le propos (on ne peut évidemment pas reproduire l'expérience de Michelson, avec des bras d'une dizaine de cm, et dans les conditions d'une salle de classe).

La présentation de l'expérience de pensée classique du rayon rebondissant entre deux miroirs parallèles afin de montrer les effets temporels était une bonne idée. Attention à être rigoureux sur la définition des référentiels, et dans les raisonnements sur la dilatation du temps, la contraction des longueurs, la simultanéité. Pour ne pas risquer de faire un contre-sens, Il est souvent préférable de définir précisément les *événements* que l'on considère, et de déterminer leurs coordonnées dans les référentiels d'intérêt à l'aide de la transformation de Lorentz, de manière pédestre ; puis d'en déduire les effets (dilatation du temps, contraction des longueurs, relativité de la simultanéité, éventuellement, inversion de l'ordre de certains événements). Attention aussi à utiliser le jargon consacré par l'usage : temps *propre*, longueur *propre*, etc. L'illustration avec l'expérience célèbre du temps de vie des muons atmosphériques était bienvenue et bien amenée.

Le thème de la leçon, en particulier le changement de paradigme que représente le passage de la mécanique classique (Galilée, Newton) à la mécanique relativiste amène naturellement à faire un peu d'histoire des sciences, en particulier à évoquer l'histoire de la physique. Attention toutefois à ne pas faire de contre-sens historiques ou de la pseudo-histoire des sciences : par exemple, présenter les équations de la transformation de Galilée en disant quelque chose comme « Galilée nous dit que : $x' = x - vt$, etc. » : si Galilée est le premier à discerner le concept de référentiel inertiel et à énoncer le principe de relativité, dans ses écrits Galilée n'emploie jamais d'écriture algébrique (le formalisme n'existe pas encore) : ses raisonnements sont essentiellement de nature géométrique, et sont présentés sous forme « littéraire ».

Il était difficile de traiter complètement la question de la composition relativiste des vitesses dans le temps imparti : on peut toutefois s'attendre à ce qu'on en dise un mot dans une leçon de cinématique relativiste, au moins pour signaler les différences fondamentales avec la composition classique des vitesses (et vérifier rapidement que la loi de composition obtenue est compatible avec le postulat d'Einstein : « la lumière se déplace à la vitesse c dans tous les référentiels galiléens »).

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

On pourrait par exemple imposer que soit traitée et rapidement démontrée la loi relativiste de composition des vitesses ; ou encore, demander d'illustrer les effets de cinématique relativiste (dilatation du temps, contraction des longueurs, relativité du concept de simultanéité) au moyen de cas très simples, qu'on pourrait éventuellement représenter dans des diagrammes d'espace-temps.