

LP n° 6 : Cinématique relativiste.

NIVEAU : LICENCE 3

PRÉREQUIS :

- Mécanique Classique/Newtonienne
- Interféromètre de Michelson
- Électromagnétisme & Équations de Maxwell.

PLAN :

1. Une évolution pour la mécanique newtonienne
2. Intervalle entre deux événements
3. Lois de composition en cinématique relativiste

BIBLIOGRAPHIE :

- [9] BFR, *Mécanique 1*. Il faut prendre l'édition de 1984 car celle de 1976 ne traite pas la relativité!
- [12] Article original de Bertozzi décrivant son expérience et les résultats.
- [43] J. Hladik, *Introduction à la relativité restreinte*.
- [59] J.-P. Perez, *Relativité. Fondements et applications*.
- [72] C. Semay, *Relativité restreinte, bases et applications*.
- Cours de relativité d'A. Comtet, notamment pour la démonstration de Lorentz.

IDÉES À FAIRE PASSER :

La mécanique classique ne suffit pas à expliquer certains événements. Elle est l'approximation à faible vitesse d'une théorie mécanique plus générale : la mécanique relativiste, qui implique de ne plus considérer le temps comme variable absolue.

Remarque : je pense que ça peut valoir le coup, dès le début de la leçon, de préciser qu'on a aucune prétention à démontrer rigoureusement les résultats de relativité, mais de faire sentir l'esprit de l'élargissement de la théorie de la mécanique newtonienne vers la relativité générale.

Introduction : Dans l'étude de la mécanique on a fait sans le dire une hypothèse systématique de vitesse faible, et c'est ce qui nous a permis d'appliquer systématiquement la mécanique newtonienne. Le but de cette leçon est de voir en quoi celle-ci donne des résultats aberrants à vitesses élevées, et comment passer outre ces aberrations. Comme son nom l'indique on va porter un intérêt majeur à la relativité du mouvement ce qui implique d'avoir défini au préalable les notions d'observateur (qui regarde), de référentiel (par rapport à quoi il décrit le mouvement), de repère (comment il exprime la position du point dans l'espace) et d'événement (analogue au point de la mécanique classique prolongé dans la dimension temporelle). Voir [slide](#).

1 Une évolution pour la mécanique classique

C'est une partie pédagogiquement cruciale pour faire sentir le besoin d'élaborer une théorie plus large!

1.1 Incompatibilité de l'électromagnétisme avec la transformation de Galilée

Rappeler la transformation de Galilée sur les positions puis les vitesses et exposer son incompatibilité avec l'électromagnétisme car la vitesse de la lumière est définie indépendamment du référentiel [9], p. 215. LES ÉQUATIONS DE MAXWELL SONT INCOMPATIBLES AVEC LA TRANSFORMATION DE GALILÉE.

Une question se pose : qui de l'électromagnétisme ou de la mécanique doit être corrigé?

1.2 Invariance de la vitesse de la lumière

L'invariance de la vitesse de la lumière a été testée à plusieurs reprises : on présente l'expérience de Michelson & Morley (+[72], p.10 et [59], p.10) qui aboutit à l'invariance de la vitesse de la lumière. D'autres expériences plus modernes ont testé cette invariance et ont toutes abouti à la validation de cette hypothèse. On présentera plus tard une d'elle, l'expérience de Bertozzi.

Transition : Les scientifiques du début du XX, Einstein en tête, ont imposé cette règle comme postulat et développé, à partir de là, une nouvelle théorie du mouvement.

1.3 Les postulats d'Einstein

[9], p.219 - Énoncé du principe de relativité restreinte (voir détails sur ce principe [9], p. 212-213, exclure la gravitation et préciser qu'on ne s'intéresse qu'à des référentiels en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres), et de l'invariance de la vitesse de la lumière (il faut à ce stade définir ce qu'on entend par invariance : [9] pp.211-212 - La vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel. On dit que c est invariante). Évoquer un troisième principe de validité de la mécanique classique pour $v \ll c$.

Remarque : la présentation du postulat n°2 a un intérêt historique et simplifie les démonstrations, mais n'est pas incontournable pour établir les résultats de la théorie (cf. [43] p. 28).

Transition : On a mis en défaut la transformation de Galilée et montrer que le temps ne peut plus être considéré comme absolu. Dès lors, comment faire le lien entre les coordonnées d'un même événement dans des référentiels différents : (t, x, y, z) et (t', x', y', z') ?

2 Changement de référentiel en relativité

2.1 L'importance nouvelle du temps

Pour le voir simplement, c'est l'invariance de c qui rend le temps relatif. Pour le comprendre on peut traiter un premier exemple : l'horloge à photons ([72], p.16 & [59], p. 39-40) - Si on fait bien le schéma et qu'on expose clairement ce qui se passe, le calcul se résume à Pythagore et tout va bien. Il faut préciser :

- que si $v = 0$, on retrouve $\Delta t = \Delta t'$;
- que le battement dans le référentiel (R) dans lequel l'horloge est en mouvement est plus long que celui dans le référentiel de l'horloge.
- l'importance du rapport numérique trouvé, appelé γ et dont l'importance apparaît nettement plus tard dans la leçon.

2.2 Invariance de l'intervalle

L'invariance de l'intervalle est déduite du second postulat d'Einstein, faire le calcul en exprimant la vitesse d'un signal lumineux dans un référentiel puis dans l'autre :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = c = c' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

On est alors ramené à chercher les changement de référentiel qui laissent cet intervalle invariant.

2.3 Transformation de Lorentz spéciale

Définition générale d'une transformation de Lorentz ([72] p.22). Sous quelques hypothèses sur l'espace-temps (cf [72] pp.27-33) on démontre la forme que doit prendre cette transformation restreinte à des référentiels en translation rectiligne uniforme (leurs axes restent alignés) ; on parle alors de transformation de Lorentz spéciale. Reconnaître le facteur γ que l'on a déjà rencontré dans l'horloge à photon et le tracer en fonction de β ([slide](#) ou [programme Python](#)), quantifier un ordre de grandeur de la vitesse telle qu'il y ait un écart d'un certain pourcentage par rapport à Galilée. Remarquer que la transformation réciproque est simplement obtenue en inversant le sens de la vitesse $v \rightarrow -v$.

Transition : Comme toujours en physique, l'apparition d'une nouvelle théorie implique un certain nombre de conséquences dont la validité doit être testée expérimentalement.

3 Conséquences sur les lois de la cinématique

3.1 Durée et longueur entre deux événements

On a déjà vu l'impact de cette nouvelle théorie sur les durée lorsqu'on a étudié l'exemple de l'horloge à photon. Redonner la formule entre les durées dans chaque référentiel et insister sur le fait qu'il y a DILATATION DES TEMPS. Définir la notion cruciale de **temps propre**.

Faire de même sur les longueurs, traiter l'exemple usuel de la règle (cf. [59], p. 43) et montrer que les longueurs se contractent. Définir la notion de longueur propre.

La dernière question qui se pose légitimement est celle de la transformation des vitesse par changement de référentiel en relativité restreinte.

3.2 Lois de composition des vitesses

Selon le temps qui reste, démontrer ou simplement donner les lois de composition des composantes longitudinales et transversales de la vitesse (démonstration rapide dans [72] p.82). Retrouver galilée lorsque $v \rightarrow 0$ et insister sur le fait que ces transformations ne sont valides que lorsque la vitesse relative des deux référentiels est **CONSTANTE** (c'est ce qui fera la différence avec la relativité générale). Montrer que la vitesse est limitée par la vitesse de la lumière et traiter l'expérience de Bertozzi (voir [slide](#) et article).

Conclusion : Après avoir établi le besoin de prolonger la mécanique newtonienne par une théorie relativiste lors de l'étude de mouvements à une vitesse proche de celle de la lumière, on a étudié les conséquences de cette nouvelle vision des choses sur la description du mouvement et l'importance nouvelle de bien définir référentiel, repère, temps etc... Maintenant une question se pose : comment est modifiée la dynamique? Le pfd est-il toujours valable?

BONUS :

- On peut aussi faire remarquer que l'avènement de la relativité ne signe pas l'arrêt de mort de la mécanique newtonienne : celle-ci reste tout à fait à propos pour la description des mouvements pour lesquels $v \ll c$ (c'est notamment justifié par la courbe de $\gamma = f(\beta)$ qui n'est notablement différent de 1 que pour des vitesses très élevées!)
- Un des aboutissement rapide de la relativité a été de faire apparaître, combinée à la mécanique quantique, la notion de spin (cf. Dirac, 1927). De la même manière que la relativité est née d'une incompatibilité avec l'électromagnétisme, la théorie quantique des champs, née de l'incompatibilité électromagnétisme/quantique a donné lieu aux interactions faibles et fortes.
- Comme toujours dans l'enseignement de la physique on aborde chaque sujet en faisant d'abord un maximum d'hypothèses simplificatrices pour que le problème puisse être traité à un niveau élémentaire, puis au cours du parcours scolaire on lève petit à petit un certains nombres de simplification pour découvrir la théorie plus générale qui sous-tend chaque sujet. Ça n'est pas pour autant que ce qu'on faisait précédemment était faux mais cela ne s'appliquait que dans certains cas précis comme dans le cas de l'optique géométrique devenu ondulatoire pour palier le problème de la diffraction.
- On peut se servir du programme associé à cette leçon pour tracer γ mais ça n'apporte pas grand chose... Sauf si on veut zoomer sur une partie de la courbe en particulier.

