

LP06 - Cinématique relativiste

Correcteurs : A. Louvet et S. Lacroix

Leçon présentée le mardi 31 janvier 2017

Benjamin Crinquand et Eric Brillaux

1 Commentaires du jury

2016 : Les notions d'événement et d'invariant sont incontournables dans cette leçon.

2015 : Le jury rappelle qu'il n'est pas forcément nécessaire de mettre en œuvre des vitesses relativistes pour être capable de détecter et de mesurer des effets relativistes.

Jusqu'en 2013, le titre était : *Principes de la cinématique relativiste. Conséquences.*

2014 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les candidats à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair des notions d'invariant relativiste est attendu.

2013 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les candidats à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair des notions d'invariant relativiste et de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon. La réciprocité des effets de dilatation des durées et de contraction des longueurs doit être soulignée.

2012 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les étudiants à faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair de la notion de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon. Les notions de dilatation du temps et contraction des longueurs doivent être discutées.

2011 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les étudiants à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair de la notion de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon.

2010 : Il n'entre pas dans le cadre de cette leçon de démontrer la transformation de Lorentz-Poincaré. La notion d'événement est un outil central.

2009 : Il n'entre pas dans le cadre de cette leçon de démontrer la transformation de Lorentz-Poincaré.

2 Plan proposé

I Les fondements de la relativité restreinte

- I.1 Limite de la physique classique
- I.2 Les postulats d'Einstein
- I.3 Définitions et notations
- I.4 Invariant et transformations relativistes

II Conséquences cinématiques

- II.1 Perte de simultanéité
- II.2 Dilatation des durées
- II.3 Composition des vitesses
- II.4 Effet Doppler relativiste

3 Commentaires généraux sur la leçon

L'exposé de la leçon était dans l'ensemble clair et facile à suivre. Concernant le plan (corrigé plus en détail dans la section suivante), l'élève a suivi une approche assez classique : exhiber les limites de la mécanique classique, introduire la relativité restreinte et enfin étudier ses conséquences.

La relativité restreinte regorge d'expériences, de conséquences étonnantes et d'effets contre intuitifs qui peuvent rentrer dans cette leçon. Ceux-ci doivent être par contre traités avec rigueur et pédagogie, ce qui rend impossible de tous les inclure dans une leçon de 50 minutes : il faut donc faire des choix. La perte de simultanéité, la dilatation des temps / contraction des longueurs et la composition des vitesses semblent des classiques incontournables de cette leçon. L'élève a choisi ici de traiter aussi une conséquence qui est moins souvent abordée à l'agrégation (et qui permet donc un plan un peu plus original) : l'effet Doppler relativiste.

L'élève a par contre choisi de ne pas présenter l'expérience de Michelson et Morley. Ce choix peut se justifier s'il permet de traiter des sujets plus originaux. Cette expérience reste en revanche un grand classique de cette leçon et a joué un rôle primordial dans l'histoire de la relativité restreinte. Il faut donc s'attendre à des questions sur le sujet, même si l'on n'en parle pas dans le plan.

Pour terminer cette discussion, rappelons et insistons sur le fait que cette leçon demande un traitement particulièrement rigoureux des référentiels mis en jeu. On ne saurait discuter correctement les effets et les subtilités de la relativité restreinte sans correctement poser les problèmes et les référentiels utilisés (ce que l'élève a dans l'ensemble bien fait lors de cette présentation).

4 Les fondements de la relativité restreinte

4.1 Limite de la physique classique

Cette partie sert à discuter l'incompatibilité de la mécanique newtonienne avec l'électromagnétisme. Il peut être bien ici de rappeler l'expression des transformations de Galilée. Bien que la non invariance des équations de Maxwell sous ces transformations n'a pas à être explicitée

ici, il faut savoir comment l'établir (se pose notamment la question de comment le champ électromagnétique se transforme lors d'un changement de référentiel galiléen).

La discussion sur la vitesse de la lumière, sa constance ou non et l'existence d'un éther s'illustre bien par l'expérience de Michelson et Morley. Si l'on choisit de ne pas parler de cette expérience, on peut citer ici celle de Fizeau (comme l'a fait l'élève) qui met en défaut la loi classique de composition des vitesses.

4.1.1 Les postulats d'Einstein

On présente ici les deux postulats de base de la relativité restreinte. L'énoncé du second peut varier selon les références (dans une course à "l'axiome minimal") : certains supposent l'existence d'une vitesse limite, d'autres l'invariance de la vitesse de la lumière. L'élève a ici choisi l'invariance des lois de Maxwell, qui en particulier implique l'invariance de la vitesse de la lumière grâce à l'équation d'onde.

4.1.2 Définitions et notions

Notions de référentiels, d'observateurs, d'événements, ... Pas de remarques particulières.

4.1.3 Invariant et transformations relativistes

La notion d'invariant relativiste est indispensable dans cette leçon (cf. commentaire du jury de 2016). Celle-ci peut-être discutée à divers moments dans la leçon. Ici, l'élève l'a introduite très tôt et a basé la construction des transformations de Lorentz sur cette notion. Une première approche de cette invariant est proposée en étudiant la propagation d'une onde lumineuse radiale dans divers référentiels : cet exemple permet de bien illustrer l'interprétation (pas toujours évidente) de l'intervalle d'espace-temps et permet plus tard d'amener la discussion sur la causalité.

Les transformations de Lorentz étaient ici présentées comme les transformations qui préservent l'intervalle d'espace-temps (dont l'invariance en général était admise). Attention ici à bien poser la définition de la transformation. En particulier, il existe toute une famille de transformation qui possèdent cette propriété d'invariance. Il faut donc une hypothèse supplémentaire pour fixer de manière unique la forme du boost de Lorentz : on doit notamment revenir à son interprétation physique en temps que changement de référentiels galiléens. De plus, il ne paraît pas évident comment prouver l'invariance de l'intervalle d'espace-temps (admise ici) sans avoir au préalable établi la forme de la transformation de Lorentz.

Une autre possibilité est d'introduire d'abord les boosts de Lorentz, dont la forme peut se prouver de manière assez élémentaire en étudiant la propagation de divers rayons lumineux dans les deux référentiels. La notion d'invariant relativiste peut alors être introduite plus tard dans la leçon, par exemple après avoir discuter la perte de simultanéité et la dilatation du temps : bien que l'on perd la notion de temps absolu, il existe toujours un invariant en relativité et celui-ci permet de discuter la notion de causalité.

L'idée de faire le parallèle entre l'invariant relativiste et le d'Alembertien est intéressante. En particulier, l'invariance des équations de Maxwell en relativité n'est pas directe à établir (en tout cas dans le formalisme utilisé à l'agrégation) mais celle de l'équation des ondes est plus simple à discuter grâce à ce parallèle (attention par contre à ne pas oublier que les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ se mélangent lors d'un changement de référentiel).

4.2 Conséquences cinématiques

4.2.1 Perte de simultanéité absolue

Peu de commentaires sur cette partie. Il est bien d'enchaîner la discussion sur la perte de simultanéité avec celle sur la préservation de la causalité. Il est important pour discuter la causalité d'utiliser l'invariant relativiste et des diagrammes d'espace-temps avec des cônes de lumière.

4.2.2 Dilatation des durées

De même, peu de commentaires pour cette section. Il est bien de remarquer que la dilatation des durées et la contraction des longueurs sont des effets réciproques l'un par rapport à l'autre, ce qui reflète le traitement uniformisé de l'espace et du temps en relativité restreinte. Il faut parler ici de vérification expérimentale : l'effet de contraction des longueurs est dur à mettre en évidence (et a principalement été observé de manière indirecte) mais il existe plusieurs expériences qui vérifient le phénomène de dilatation des durées (l'élève a ici présenté la désintégration des muons ; on peut également citer l'expérience des horloges embarquées de Hafele et Keating, qui confirme le paradoxe des jumeaux).

4.2.3 Composition des vitesses

On établit ici la loi relativiste de composition des vitesses. Il faut notamment discuter les différences avec la loi classique. Un des grands succès de cette loi de composition (et donc de la relativité) a été d'expliquer l'expérience de Fizeau : il est important de discuter cette vérification expérimentale (ce qui demande un traitement rigoureux des référentiels mis en jeu).

On peut remarquer ici que la composition d'une vitesse quelconque avec la vitesse de la lumière redonne la vitesse de la lumière, en accord avec le second postulat d'Einstein. Une vérification expérimentale de cet effet a été réalisée au CERN en 1964, en mesurant la vitesse de photons émis par la désintégration d'un pion se déplaçant lui-même à une vitesse très élevée.

4.2.4 Effet Doppler relativiste

L'effet Doppler relativiste est un exemple intéressant et assez original de conséquences de la relativité restreinte. Comme il existe un effet Doppler classique, il est important de comparer ces deux phénomènes et d'analyser les corrections relativistes. Qualitativement, la principale différence est l'existence d'un effet Doppler transverse (qui n'existe pas dans le cas classique). Quantitativement, les corrections relativistes sont du second ordre en β : il s'agit donc d'un effet difficile à détecter. Il a cependant été mis en évidence par Ives et Stillwell entre 1938 et 1941, en étudiant le spectre de la lumière émise par des atomes d'hydrogènes se déplaçant à grande vitesse.

4.3 Conclusion

Peu de choses à dire sur la conclusion. On peut citer quelques phénomènes ou expériences que l'on a pas eu le temps de traiter et sur lesquels on se sent à l'aise. Il est aussi possible (mais potentiellement dangereux) de mentionner la relativité générale. Enfin, il est classique de terminer par une ouverture sur la dynamique relativiste.

5 Questions posées

- Qu'est-ce que l'expérience de Michelson et Morley ? Que voulaient-ils observer ? Quelle a été leur conclusion ?
- Est-ce qu'il y a seulement les transformations de Lorentz qui conservent l'intervalle d'espace-temps ?
- Comment retrouve-t-on les transformations de Galilée comme limite non relativiste des transformations de Lorentz ? (il ne suffit pas d'avoir β petit)
- Qu'est-ce que le paradoxe des jumeaux ? Comment se résout-il ?
- Est-il théoriquement possible de traverser la galaxie en une vie humaine ? Et dans la pratique ?
- En quoi est-ce que l'effet Doppler relativiste est un effet du second ordre ?
- La norme de la vitesse de la lumière est identique dans tous les référentiels galiléens, qu'en est-il de sa direction de propagation ?
- Quelle est la conséquence de cet effet sur l'observation d'une étoile (aberrations de la lumière) ?
- Dans l'expérience du temps de désintégration des muons, d'où viennent les muons ? Comment sont-ils détectés ?