

LA RELATIVITE RESTREINTE DANS LE PROGRAMME DE TS

Cherchez l'erreur !

1. Généralités

Pour débiter il est nécessaire de revenir sur le programme et ses directives, en particulier celles concernant cette partie. Rappelons quelques remarques générales énoncées dans ce programme :

• *Les programmes de première et de terminale de la série scientifique s'articulent autour des grandes phases de la démarche scientifique : **observer, comprendre, agir, et s'appuient sur des entrées porteuses et modernes.** (Souligné par moi)*

Remarquons que les mots « **manipuler** » et « **expérimenter** » n'appartiennent pas à cette liste des « *grandes phases de la démarche scientifique* », ce qui, pour un physicien, constitue une première inquiétude. Remarquons également que si l'observation convient bien à l'enseignement primaire et aux premières années du collège elle devrait être largement dépassée pour un élève de TS. Notons d'ailleurs l'ambiguïté portant sur l'utilisation de ce terme d'« **observer** » puisque, après en avoir fait une « *grandes phase de la démarche scientifique* », les rédacteurs le limite au « *recueil des informations* » à travers, essentiellement, le rayonnement électromagnétique, les ondes dans la matière et les particules. Rappelons qu'Aristote « observait » mais que Galilée « manipulait » ; le premier regardait passivement autour de lui alors que le second interrogeait la nature à travers des dispositifs expérimentaux pour essayer de limiter au mieux les réponses que cette dernière pouvait donner. Bien sûr des activités à caractère expérimental sont proposées aux élèves mais

Ensuite les rédacteurs insistent sur la nécessité d'illustrer les concepts étudiés en s'appuyant sur des entrées « *porteuses* » et « *modernes* ». La première des qualités exigées n'est pas très parlante – qu'est-ce qu'une entrée porteuse ? – et la seconde est la promesse de simplifications considérables qui ne peuvent que dénaturer la compréhension profonde des notions abordées.

Ces exigences, dans le cas de la relativité restreinte - même limitée à la seule dilatation des durées (ce qui est plus que discutable mais devrait l'objet d'un autre débat) - peuvent être assurées mais en faisant des choix « d'entrées » longuement mûris et qui ne sont pas toujours celles du programme et des ouvrages consultés.

- *En quoi le concept de temps joue-t-il un rôle essentiel dans la relativité ?*

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.
---	---

Le choix fait par le programme porte sur les conséquences de l'invariance de la vitesse de la lumière, maintes fois vérifiée entre le début du XVIII^e siècle et la fin du XIX^e siècle. En se limitant à ce second postulat et sachant que l'effet Doppler faisait partie du programme (voir ci dessous) il aurait été astucieux et particulièrement bénéfique d'associer les deux choses pour en déduire une des conséquences incontournables de la constance de la vitesse de la lumière. On peut signaler à ce propos qu'une méthode algébrique simple d'enseignement de la relativité restreinte a été développée par Hermann Bondi, physicien anglais d'origine autrichienne et spécialiste de la relativité générale, appelée méthode du facteur k. Elle s'appuie exclusivement sur le second postulat et les

conséquences de l'effet Doppler¹ qui est également au programme comme on peut le voir ci dessous.

Effet Doppler.	<i>Élaborer et mettre en œuvre un protocole de mesure d'une vitesse utilisant l'effet Doppler. Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.</i>
----------------	--

Mais, à y regarder de plus près, on a ici une introduction qui n'est pas celle de la relativité restreinte mais une approche purement phénoménologique d'un comportement particulier de l'écoulement du temps dans des référentiels en mouvement relatif, avec le grand danger de passer à côté de la compréhension d'une méta-théorie fondamentale en physique moderne et de ramener la dilatation du temps à un simple effet extrêmement petit mais mesurable aujourd'hui grâce à nos progrès technologiques. Ceci est confirmé par l'introduction 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.* »

A partir de là les élèves retiendront simplement qu'un système « en mouvement » voit son temps s'écouler plus lentement que celui qui est « immobile ». Ça risque tout simplement de les renforcer dans une conclusion qui est celle que tirent ceux qui ont une idée superficielle de la relativité restreinte. Alors pourquoi les concepteurs du programme ont-ils pris ce risque ? Après réflexion je pense qu'aujourd'hui les responsables de l'élaboration des programmes sont persuadés qu'on ne peut plus intéresser les élèves avec la physique fondamentale et qu'il faut privilégier avant tout les applications modernes, attractives, branchées ...etc. Dans le cas présent ils ont en ligne de mire le GPS. Tout le monde sait ce que c'est, tout le monde en a un dans sa voiture, dans son téléphone portable et, pour le bonheur du professeur de physique, son fonctionnement est obligé de tenir compte de corrections relativistes. Les élèves ne pourront plus poser cette question qui terrorise maintenant tous les enseignants « A quoi sert la relativité restreinte ? ». On pourra alors répondre : « la relativité est utile puisqu'elle sert dans un GPS ». Bien sûr il n'est pas question de rentrer dans les détails du système GPS et on se contentera donc de faire quelques calculs de dilatation du temps avec la formule bien connue entre le temps propre et le temps impropre. Cette impression est renforcée par quelques phrases de l'introduction : « *En ce sens, le programme se présente selon un ordre qui ne saurait être prescriptif, selon l'esprit général qui l'anime. Il en va de même du caractère relatif du temps, entre ses notions afférentes (événement, temps propre, temps mesuré, dilatation des durées) et ses confirmations expérimentales ou situations concrètes (désintégration des muons dans l'atmosphère, particules instables dans les accélérateurs, horloges atomiques embarquées, GPS, etc.)* » On a ici une remarque qui peut expliquer pourquoi on propose dans l'introduction d'observer et non pas de manipuler : que ce soit pour un GPS ou un accélérateur de particules il est impensable de se lancer dans une manipulation et il faudra bien se contenter d'observer, c'est à dire de regarder quelques points, d'exploiter quelques documents, sans pouvoir à aucun moment intervenir et mettre en œuvre un protocole expérimental.

L'esprit dans lequel a été pensé le programme - et c'était déjà le cas pour celui de 1^o - semble avant tout d'être attractif. Je ne sais pas si ce sera vraiment le cas mais le risque que les élèves (tout même en Terminale S) sachent encore moins de physique en arrivant à l'université est réel. Les collègues universitaires qui suivent un peu cette évolution et avec lesquels j'ai pu discuter sont vraiment inquiets.

¹ Sur cette méthode et sur celle, géométrique, des diagrammes d'espace-temps, vous pouvez trouver des compléments sur le site du CLEA. On peut y trouver également d'autres textes présentant les bases de la relativité restreinte dans l'esprit du programme de TS : <http://accs.enslyon.fr/clea/lunap/Relativite/relativite-restreinte-principes-et-applications/>

2. La relativité restreinte dans les ouvrages

Abordons maintenant l'étude de la manière dont cette partie du programme est traitée dans les ouvrages disponibles – il y en a cinq – en gardant à l'esprit les éléments imposés du programme.

La plupart des ouvrages débutent par une description de l'expérience de Michelson et Morley plus ou moins « romancée » avec, quelques fois, la présentation de quelques résultats numériques (Hatier, Nathan). Seul Belin prend comme point de départ l'expérience d'Arago qui est plus facilement exploitable avec des élèves. On aurait pu espérer y voir la présentation d'expériences plus récentes comme celle d'Alväger (1964 : désintégration des pions neutres π^0)

Au sujet de la relativité, les ouvrages sont essentiellement descriptifs et les concepts fondamentaux à partir desquels on peut développer un ensemble consistant ne sont pas posés. Ceci est essentiellement dû au nombre de pages extrêmement réduites (quatre pour la plupart) consacrées à la partie cours. L'essentiel des exercices qui peuvent permettre dans certains des ouvrages d'approfondir différentes notions consiste, pour la plupart, à jongler avec les relations entre temps propre et temps impropre (appelé – saura t'on un jour pourquoi ? – temps mesuré). On peut regretter que les questions de synchronisation des horloges et de simultanéité des événements ne soient pratiquement pas abordées alors qu'elles sont fondamentales pour une bonne compréhension de cette partie de la relativité restreinte.

Comme on l'a vu ci dessus que quatre ouvrages sur cinq emploient systématiquement le terme de « temps mesuré » pour « temps impropre ». Ce vocabulaire vient du programme mais cette dénomination n'existe dans aucun ouvrage français ou étranger d'un niveau plus élevé, ce qui peut être « déstabilisant » pour les enseignants, peu à l'aise avec la relativité restreinte. De plus ils n'en ont souvent que quelques rares souvenirs dont celui de temps impropre. Cela peut être également déroutant pour les élèves qui auront tendance à penser que le temps propre est un temps à part et ayant un statut « supérieur » au temps impropre, à l'image du temps absolu de Newton ou des théories relativistes du type Lorentz et Poincaré. Il est vrai qu'il constitue un invariant et s'il est attaché à un système – par exemple pour définir la durée de vie moyenne d'une particule radioactive – il permet de préciser une caractéristique intrinsèque de ce dernier. A contrario un temps impropre peut prendre n'importe quelle valeur supérieure au temps propre.

A partir de ce constat - le programme, comme on l'a vu ci dessus, étant très peu directif - on va trouver dans les ouvrages des choix très discutables et des définitions peu précises voire fausses. Pour illustrer ceci, regardons quelques exemples prélevés dans les différents livres disponibles. Les citations seront données en gras italique.

Une durée propre concernant un objet est une durée mesurée par une horloge immobile dans le référentiel propre de cet objet. (Nathan – page 249)

Tout d'abord il n'est pas correct d'attacher une durée à un objet ; ensuite cette définition n'est pas satisfaisante car on ne parle pas de la durée – intervalle entre deux instants - propre d'un objet mais plutôt du temps propre d'un événement qui se rapporte à la lecture que l'on peut faire sur une horloge placée à proximité immédiate du lieu où il se déroule et au repos par rapport à ce dernier. On pourra alors parler de la durée propre entre deux événements qui est une différence de deux temps propres. Ceci est d'autant mieux adapté ici que la notion d'événement a été définie dans le livre juste avant. On pourrait dire : « On appelle durée propre entre deux événements survenant en un même point, la différence de lecture faites sur une même horloge attachée à ce point du référentiel dans lequel les événements sont étudiés. » Même si la définition initiale semble voisine il est important de faire référence à deux événements et de rappeler qu'une durée est une différence de lecture d'horloge.

Le mouvement provoque un ralentissement du temps. ... Une horloge en mouvement fonctionne plus lentement qu'une horloge stationnaire. (Bordas – page 221)

Une telle formulation est hasardeuse car elle peut laisser croire que le mouvement – perçu ici d'une manière absolue sans faire référence à un référentiel – a une influence sur le mécanisme de l'horloge. Ceci est contraire au premier postulat de la relativité. Les deux référentiels, « *en mouvement* » et « *stationnaire* », sont en relation de mouvement inertiel réciproque et toutes les lois de la physique y sont identiques.

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 $\Delta t_m = \gamma \Delta t_p$ (Bordas – page 223)

On est dans la continuité de la remarque précédente : le mouvement est relatif, çà n'a pas de sens de parler d'un mouvement uniforme de translation sans donner le référentiel dans lequel on se place et sans insister sur la réciprocity du phénomène. Là encore le raccourci de la formulation est susceptible d'induire en erreur un lecteur néophyte et de lui inculquer des idées fausses.

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. (Bordas - page 222)

Si on n'a pas au préalable montré que la situation des voyageurs et des terriens n'est pas symétrique, le lecteur est encore plus enclin à croire que le phénomène de dilatation du temps pour celui qui est en mouvement est une réalité absolue et non relative. De plus on ne précise pas clairement les repères dans lesquels sont mesurées les durées. Cette malencontreuse formulation est suivie d'une affirmation qui, elle, est fautive : « [...] *c'est seulement quand un système est en mouvement rectiligne uniforme que son horloge ralentit.* » Bien entendu le phénomène de dilatation du temps est vrai pour tout référentiel en mouvement par rapport au référentiel propre de n'importe quel dispositif, même si la ligne d'univers de ce dernier n'est pas une ligne droite. De plus le traitement de ce cas reste du ressort de la relativité restreinte mais il est alors nécessaire d'utiliser la notion de référentiel propre instantané dans lequel, à l'instant t , la vitesse du dispositif est nulle. Alors, pour des phénomènes de courtes durées, le référentiel ($R_{(t)}$) est bien le référentiel propre (R). On trouvera un exemple d'un traitement de ce type appliqué au voyageur de Langevin. sur le site sur CLEA².

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. (Hachette- page 215)

Rappelons tout d'abord que ce qui est nommé ici « temps mesuré » vient du programme et est appelé « temps impropre » dans tous les ouvrages français ou étrangers qu'on pourra consulter. Ensuite cette définition n'est pas claire et contient au moins une erreur. Pour être compréhensible et rigoureux il faut la rédiger de la façon suivante : deux événements se produisant au même endroit dans un référentiel (R) sont séparés par une durée propre mesurée par l'horloge unique présente en ce lieu. Dans un référentiel (R') en mouvement par rapport à (R) la durée séparant les deux événements est appelée « durée impropre » et est mesurée par DEUX horloges puisque les événements ne se produisent plus au même endroit. En effet pour comparer ici le rythme des horloges dans les référentiels (R) et (R') en mouvement relatif, il est obligatoire de comparer les indications d'une SEULE horloge dans un référentiel avec celles de PLUSIEURS horloges dans l'autre, puisque deux horloges appartenant à des référentiels distincts ne peuvent se trouver en un même lieu qu'à un seul instant parfaitement déterminé³. L'un des référentiels doit donc posséder au moins DEUX horloges que l'on suppose synchronisées.

Tout référentiel doit donc être associé à une horloge qui lui est propre. (Hatier – page)

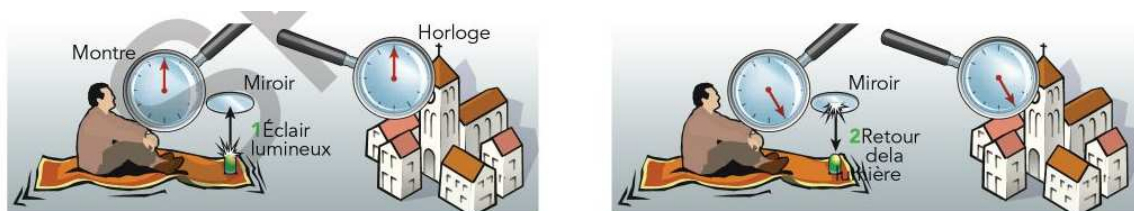
² Le texte qui s'intitule « Les jumeaux de Langevin : voyage accéléré » est accessible à partir du site du CLEA (même lien que précédemment)

³ Cet événement est souvent utilisé pour définir l'origine des espaces (même lieu pour $x = x' = 0$) et des temps (même instant pour $t = t' = 0$)

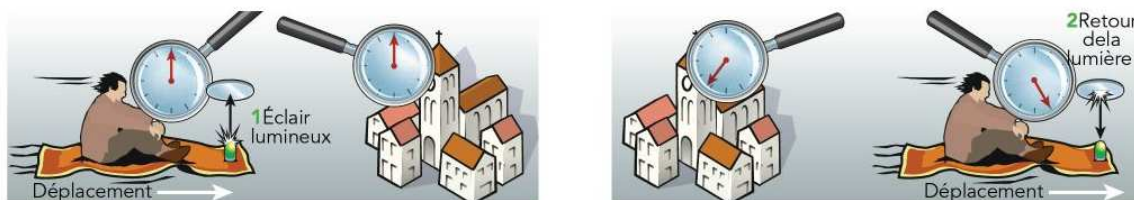
Le choix d'une seule horloge n'est pas satisfaisant. Pour repérer un événement, il faut imaginer un réseau tridimensionnel de règles à travers tout l'espace et placer dans chaque cellule ainsi constituée une horloge. La phase suivante consiste à synchroniser toutes les horloges à l'aide d'une procédure clairement établie. On peut alors affecter à n'importe quel événement des coordonnées spatio-temporelles constituant ses coordonnées d'espace-temps.

Dans certains ouvrages, les auteurs, encouragés par les directives du programme, on trouve des exemples s'appuyant sur des manipulations modernes et « spectaculaires » afin d'illustrer le phénomène de dilatation des durées. La difficulté réside alors dans le choix des simplifications indispensables pour que l'exercice soit accessible à un élève de terminal. Une telle obligation aboutit alors à des aberrations. Par exemple, dans le Belin, un exercice est proposé à propos de l'expérience de Hafele et Keating. Pour ne pas sortir du cadre du programme les auteurs ont choisi une solution simplifiée pour laquelle ils écrivent : « *Considérons trois référentiel R_G (géocentrique), R_T (terrestre) et R_A (lié à l'avion) considérés comme galiléens.* » Quand on sait qu'au cours de cette expérience - test des relativités restreinte et générale (1971) quatre horloges atomiques synchronisées furent embarquées dans deux avions de lignes commerciales qui firent le tour du monde au niveau de l'équateur, l'un vers l'est et l'autre vers l'ouest, on n'a du mal à admettre qu'on peut lui attacher des référentiels galiléens⁴ !

Les schémas posent aussi des problèmes comme on peut le voir sur un exemple :



Doc. 2 Deux horloges immobiles l'une par rapport à l'autre mesurent les mêmes durées entre les événements 1 et 2.



Doc. 3 Une horloge en mouvement et une horloge fixe ne mesurent pas la même durée entre les événements 1 et 2.

© Physique chimie TS - Hachette

Les légendes sont peu rigoureuses, voire fausses pour la seconde, et on doit préciser avant tout que :

- Doc.2 représente le tapis volant au repos par rapport au bâtiment (un seul référentiel commun pour décrire les deux événements E_1 (départ du photon) et E_2 (retour du photon))
- Doc.3 représente le tapis volant en mouvement par rapport au bâtiment (deux référentiels distincts pour décrire les deux événements)

Quelles idées peuvent induire ces schémas dans un esprit imprégné de présupposés pré-relativistes inconscients ? Probablement : une horloge « en mouvement » tourne moins vite qu'une horloge « immobile ».

Dans l'activité associée à ces schémas on peut lire :

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 .*

⁴ D'une manière plus détaillée, seul le référentiel R_G , dont l'origine est placée au centre de la Terre, peut être qualifiée d'inertiel car il ne tourne pas avec cette dernière. Ses axes ne sont donc soumis qu'à une rotation au cours de la révolution terrestre autour du Soleil.

Comme indiqué plus haut insistons sur le fait que la seule définition valable de la notion de durée propre est celle qui est relative à deux événements se produisant au même endroit du référentiel. Ceci est évident pour l'horloge qui est à côté des événements étudiés, au départ et à l'arrivée du photon. L'horloge proche du bâtiment est également au repos dans le même référentiel que le tapis volant. Pour elle les deux événements ont bien lieu au même endroit et, si l'horloge du tapis et celle du bâtiment sont synchronisées, elles donneront le même intervalle de temps.

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 $\Delta T'$.

Si ce qui est dit à propos de l'horloge qui accompagne le tapis volant est vrai, il n'en est pas de même de la phrase relative à ce qui est « vu » depuis le clocher. Dans référentiel de ce dernier il faut deux horloges : l'une qui coïncide avec l'horloge de lumière à l'émission du photon et l'autre qui coïncide avec l'horloge de lumière à la réception du photon.

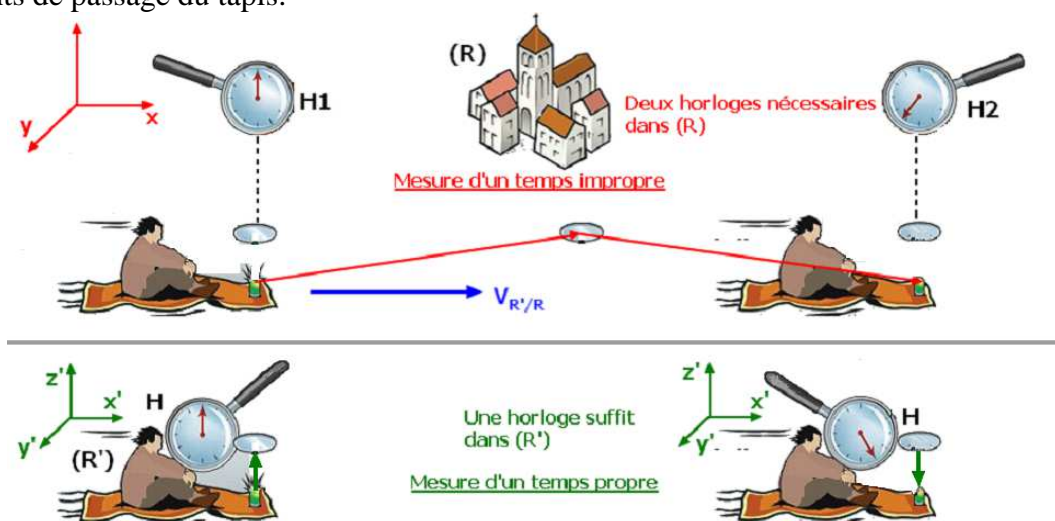
Mais il faut insister aussi sur d'autres points des schémas qui sont à rejeter avec fermeté :

- La trajectoire du rayon lumineux de l'horloge de lumière reste la même dans les deux référentiels sur Doc.3
- Les repères ne sont pas dessinés
- Sur Doc.3, comme indiqué dans le commentaire précédent, dans le référentiel du tapis il suffit bien d'une seule horloge pour mesurer la durée d'un aller / retour de la lumière (durée propre) mais dans celui du bâtiment il en faudrait deux. En effet, pour le référentiel attaché au bâtiment, l'événement E_1 « émission du photon » n'a pas lieu dans le même lieu que l'événement E_2 « réception du photon ».

On pourrait proposer un schéma n°3 remplaçant Doc.3 qui pourrait ressembler au suivant.

On a cherché à représenter :

- le référentiel (R') du tapis, avec son observateur fixe par rapport à l'horloge de lumière et mesurant, sur H, une durée propre
- le référentiel terrestre (R) nécessitant deux horloges H_1 et H_2 pour mesurer l'intervalle de temps impropre d'aller/retour du faisceau lumineux. H_1 et H_2 sont les horloges de (R) présentes aux points de passage du tapis.



3. La relativité restreinte les ressources de l'Education Nationale

On trouve sur les sites académiques quelques ressources en lien avec cette partie du nouveau programme de TS. Cependant, comme pour les ouvrages, leur qualité est souvent médiocre et de nombreuses imprécisions et erreurs émaillent ces documents.

Dans un texte disponible sur le site de l'académie de Clermont-Ferrand on peut lire : « *Il est nécessaire pour effectuer les calculs demandés de connaître la transformée de Lorentz concernant le temps* :

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

Bien entendu le facteur γ n'est pas l'expression de la transformation de Lorentz pour le temps mais représente une écriture condensée d'un facteur omniprésent en relativité restreinte.

L'académie de Lyon propose sur son site Physique- Chimie plusieurs documents parmi lesquels on en a sélectionné trois.

Travail sur M. Tomkins

Le livre de G. Gamow, intitulé « M. Tomkins aux pays des merveilles », paraît en 1941. Il raconte les aventures d'un employé de banque qui, à la suite d'une conférence sur la relativité, 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 ! A partir de là le texte proposé pose plusieurs questions :

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.

Ce qui pose problème c'est la dernière phrase. Alors que le texte de Gamow est correct – il définit la durée impropre comme la différence entre la lecture de DEUX horloges, le rédacteur de celui figurant ci dessus ne l'attache qu'à une seule, celle de la Poste. On arrive donc à trouver des documents dans lesquels ce qui est correct dans le texte emprunté est retravaillé de telle façon que ce qui est proposé aux élèves ne l'est plus du tout ! C'est le signe probable d'une maîtrise très insuffisante des principes de base de la relativité restreinte. Bien sûr on pourrait dire qu'il s'agit simplement d'une mauvaise formulation et qu'il n'y a pas de quoi « fouetter un chat ». Malheureusement, en relativité comme en mécanique quantique qui sont des théories extrêmement contre-intuitives, il est très important d'utiliser une formulation claire et non ambiguë pour être sûr de ne pas induire des idées fausses.

Travail sur le voyageur de Langevin

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.

On lit souvent – y compris dans les ouvrages présentés ci-dessus - que la relativité restreinte ne peut pas étudier les mouvements dans les référentiels qui ne sont pas inertiels et qu'il est alors nécessaire de passer à la relativité générale. Il faut affirmer avec force que ceci est injustifié. La relativité restreinte est tout à fait habilitée pour traiter ces cas là. La relativité générale est une théorie de la gravitation et n'est sollicitée obligatoirement que dans les situations où cette dernière est à prendre en compte.

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] ?

Réponse : Comme le référentiel lié à Arthur [le voyageur] n'est pas galiléen, c'est Arthur qui mesure la durée propre de son voyage (on dit qu'il est un observateur propre de l'expérience). Donc la durée mesurée par Eugène est dilatée. C'est Eugène, resté sur Terre, qui vieillit plus vite. Arthur a donc raison.

Ici la question et la réponse sont incompréhensibles au regard des concepts de la relativité restreinte. Il est évident que chacun des jumeaux dispose d'un référentiel propre dans lequel il peut lire son temps propre en regardant sa montre. Il ne peut donc pas y avoir UN référentiel propre. De plus, affirmer que « *la relativité restreinte ne s'applique que* » dans « *le référentiel non galiléen* » est un non sens. De toute façon l'application de la relativité restreinte n'a une signification qu'en considérant DEUX référentiels en mouvement relatif. Dans le cas où l'un d'entre eux est accéléré il faut alors introduire la notion de référentiel propre instantané. Enfin on peut montrer que lorsque deux observateurs appartenant à des référentiels en mouvement relatif se rencontrent deux fois c'est que l'un des référentiels est accéléré. Dans ce cas on peut démontrer également que c'est l'observateur attaché au référentiel accéléré qui mesure la durée la plus faible entre les deux rencontres. C'est bien ce qu'observe le voyageur de Langevin.

Travail sur le GPS

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

Cette phrase est une reprise à peine modifiée de la précédente et n'est pas plus compréhensible à la lumière des principes de base de la relativité restreinte.

Un dernier exemple pris parmi de nombreux autres et provenant d'un document de l'académie de la Martinique.

[...] il y a dilatation des durées dans un référentiel galiléen en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel galiléen fixe.

Ce qui pose problème ici, c'est le dernier mot de la phrase, « fixe ». Cela semble insignifiant mais en réalité il est fondamental de ne pas l'employer dans le cadre de la relativité restreinte. Un référentiel ne peut être fixe que par rapport à un observateur. Le lecteur d'une telle phrase, s'il n'est pas familier de la relativité restreinte, est évidemment tenté de donner un sens absolu au mouvement et on en revient à l'erreur habituelle dont on a déjà discuté plus avant : « ***un système en mouvement rectiligne uniforme voit ses horloges ralentir*** », ce qui empêche toute idée de réciprocité.

4. Conclusion

Les analyses précédentes montrent que, du point de vue de la rigueur et de la clarté, peu de documents s'en tire sans dommage. L'enseignant, quelque soit son choix, devra donc être vigilant dans l'utilisation qu'il fera du contenu de cette partie et, éventuellement, apporter des corrections ou, pour le moins, des compléments. On peut relever, d'une manière générale, les faiblesses majeures suivantes qui ne sont pas liées à d'éventuelles insuffisances du programme mais uniquement à une mauvaise approche des principes de la relativité restreinte :

- Positionnement préalable des questions absent ou posé d'une manière trop floue (notion de simultanéité et de synchronisation des horloges par exemple)
- Définitions des termes de base trop approximatives
- Schémas n'apportant pas d'éclairage complémentaire au texte et souvent incompréhensibles
- Réciprocité des effets le plus souvent ignorée
- Absence d'interrogation sur le statut de la causalité dans cette nouvelle approche de la notion de temps

- Souvent les exercices se ramènent à de simples calculs s'appuyant sur la relation entre temps propre et temps impropre sans intérêt. Leur rédaction est souvent trop vague pour être rigoureuse
- On parle souvent de référentiels mais on ne les visualise que rarement sur les schémas.
- Tendance implicite à donner au phénomène un statut « absolu » au lieu d'insister sur l'aspect de « perspective dynamique »⁵ du phénomène. Les effets relativistes sont bien des conséquences réels du mouvement mais ce sont des effets réciproques de perspective.
- Choix des « entrées porteuses et modernes » trop complexes et nécessitant donc des approximations trahissant le travail des expérimentateurs.
 - Il vaut mieux choisir de développer l'expérience des muons (Frisch et Smith) illustré par un film remarquable, très pédagogique et permettant des calculs « propres » et simples de dilatation des temps tout en rappelant quelques éléments importants de la désintégration des particules instables. Remarquons qu'aucun des ouvrages ne donnent les références du film⁶ et de l'article des deux physiciens !
 - On a également la possibilité de développer un travail rigoureux de TD sur l'expérience d'Alväger qui, là aussi, rentre complétement dans le cadre des exigences de la relativité restreinte. Ceci n'est pas le cas de plusieurs exemples utilisés dans les différents livres comme celui du GPS qui pose problème au vue de sa complexité.
 - Le phénomène optique, en astronomie, où des objets semblent avoir des vitesses supérieures à celle de la lumière dans le vide – on appelle cela « vitesse supralumique » - peut constituer un exemple simple et spectaculaire de mise en œuvre de la théorie de la relativité restreinte. On a ici un bel exemple d'application du postulat sur la constance de la vitesse de la lumière.
- Quelques livres utilisent l'actualité pour parler des « neutrinos qui iraient plus vite que la lumière ». Le Belin a pu, au dernier moment, introduire l'infirmité de cette « découverte » mais, pour un autre (Hachette), espérons qu'une modification ou, au moins, un additif sera introduit dans l'édition de l'an prochain.

Remarquons que la crainte de voir beaucoup d'exercices hors programme ne s'est pas confirmée : il y en a quelques-uns dans chaque ouvrage qui sortent du cadre strict du programme (effet Doppler relativiste dans le Hatier et le Nathan, contraction des longueurs dans le Bordas et le Hachette, transformation de Lorentz dans le Belin) mais ceci est très limité. Ils permettent, quelquefois, d'ouvrir des pistes intéressantes sur la mise en œuvre de la relativité.

Cette manière d'aborder la question me rappelle une histoire qui illustre, avec humour, ces difficultés. Il s'agit d'un texte de Ernesto Sabato qui, après avoir débuté une carrière de physicien⁷, a été, à partir de 1943, un écrivain argentin reconnu. Dans son recueil « Uno y El Universo », écrit en 1948, on peut lire l'anecdote suivante⁸ :

« Quelqu'un me demande de lui expliquer la théorie de la relativité d'Einstein. Plein d'enthousiasme, je lui parle de tenseurs et de géodésiques quadridimensionnelles.

- Je n'ai rien compris, me dit-il abasourdi

Je réfléchis quelques instants, puis, avec un entrain réduit, je lui fournis une explication moins théorique, avec encore quelques géodésiques, mais en faisant intervenir des aviateurs et des coups de revolver.

⁵ On consultera avec beaucoup de profit sur ce point – et sur beaucoup d'autres - le livre de M. Jean-Marie Vigoureux « L'univers en perspective : relativité restreinte » paru chez Ellipses - ISBN : 2729831134

⁶ Le film peut être vu sur le site <http://www.scivee.tv/node/2415>. J'en ai réalisé le sous-titrage en français qui peut être envoyé, sous forme de fichier srt, sur demande à l'adresse mail pmagnien@9online.fr

⁷ Il avait étudié, à la fin des années 30, à Paris où il avait été accueilli à l'Institut Curie dans le laboratoire d'Irène et Frédéric Joliot – Curie.

⁸ Elle est citée dans le numéro 68 (mai 2011) de la revue Alliage.

- *Je comprends beaucoup mieux, dit mon ami, assez content. Mais il y a encore quelque chose que je ne comprend pas : ces géodésiques, ces coordonnées ?*

Déprimé, je me plonge dans une longue concentration mentale et je finis par abandonner définitivement les géodésiques et les coordonnées ; saisi d'une véritable frénésie, j'en appelle exclusivement à des aviateurs qui fument pendant qu'ils voyagent à la vitesse de la lumière, à des chefs de gare qui tirent au revolver de la main droite tandis que, de la main gauche, ils tiennent un chronomètre pour vérifier les temps, à des trains et à des cloches.

- *Là, c'est bon. Je comprend maintenant la relativité, s'exclame mon ami tout joyeux.*
- *Oui, réponds-je amèrement, mais maintenant ce n'est plus la relativité ! »*

Il semble bien que, dans l'esprit actuel des documents disponibles, nous soyons proche de ce dernier stade d'explication !

Aucun rédacteur ne semble avoir connaissance des différents travaux – la plupart disponible en langue anglaise – relatifs à la transposition didactique et la pédagogie de la relativité restreinte. Ils auraient pu identifier plusieurs types d'obstacles à surmonter pour les élèves : difficulté à utiliser correctement les cadres de référence, à changer de référentiel, à admettre le caractère indépassable de la vitesse de la lumière et risque, en permanence, de rechercher un observateur objectif, absolu et de le trouver dans celui qui est « fixe », ou présenté comme tel, auquel on s'identifie le plus facilement.

Pour en revenir aux différents ouvrages, un classement, même en se limitant à cette partie de la relativité restreinte, n'est pas possible à partir des seuls éléments étudiés ici. D'une part, une partie des critiques est liée aux contraintes et limitations du programme qui, de mon point de vue, ne permettent pas d'appréhender convenablement l'esprit de la relativité restreinte et, d'autre part, la forme et la mise en page des ouvrages, qui ont une importance non négligeable dans le choix final, n'ont pas été prises en compte dans mon analyse. De toute façon aucun d'entre eux ne donne une idée correcte et satisfaisante de ce que signifie profondément la dilatation du temps et encore moins de la portée scientifique considérable de la relativité restreinte. C'est dommage, bien sûr, mais plus grave, on risque, avec une approche aussi approximative, d'inculquer à nos élèves une conception fautive de la nature du temps.

Pierre MAGNIEN
Professeur agrégé honoraire de sciences physiques