HAL
open science

Recherche en didactique et relativité restreinte : difficultés conceptuelles et pistes pour l'enseignement

C. de Hosson, I. Kermen

To cite this version:

C. de Hosson, I. Kermen. Recherche en didactique et relativité restreinte : difficultés conceptuelles et pistes pour l'enseignement. Bulletin de l'Union des Physiciens (1907-2003), 2012. hal-01663318

HAL Id: hal-01663318

https://hal.science/hal-01663318v1

Submitted on 15 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recherche en didactique et relativité restreinte : difficultés conceptuelles et pistes pour l'enseignement

par **Cécile de HOSSON**
Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)
Université Paris Diderot-Paris 7 - 75013 Paris
cecile.dehosson@univ-paris-diderot.fr
et **Isabelle KERMEN**
Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)
Université d'Artois - 62300 Lens
isabelle.kermen@univ-artois.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une enquête visant à déterminer comment des étudiants, futurs enseignants pour la plupart, comprennent les concepts d'événement et de référentiel qui sont deux concepts clés pour appréhender la relativité restreinte. Le questionnaire proposé met en scène deux protagonistes en des lieux différents émettant un flash lumineux pour faire une photographie, et des observateurs, immobiles ou animés d'une vitesse relativiste par rapport aux photographes, recevant ces flashes lumineux. Les questions portent sur les dates de réception des flashes d'une part et sur les dates d'émission des flashes par les différents observateurs d'autre part, et font appel à la cinématique classique pour la plupart d'entre elles ou relativiste. Les analyses des réponses obtenues montrent que les concepts d'événement et de référentiel ne sont pas pleinement maîtrisés, ce qui a pour conséquence particulière que certains étudiants considèrent que l'ordre selon lequel deux événements sont perçus détermine l'ordre selon lequel ces événements sont produits. Nous proposons deux types de résolution, un raisonnement qualitatif et une méthode graphique pointant une caractéristique fondamentale de la relativité restreinte, l'invariance de la célérité de la lumière.

INTRODUCTION

On a vu apparaître dans les nouveaux programmes de physique de la classe de terminale S quelques aspects de la théorie dite de la Relativité restreinte (BO spécial n° 8 du 13 octobre 2011, p. 9). Située au sein d'une partie intitulée « Temps, mouvement et évolution », la relativité restreinte est abordée à travers l'étude des quelques conséquences du second postulat d'EINSTEIN énoncé comme suit « la vitesse de la lumière dans le vide est

la même dans tous les référentiels inertiels » [1]. Plus précisément, il s'agit pour les élèves de savoir que la valeur d'une durée est relative à un référentiel inertiel donné et de connaître les notions de durée propre et de durée mesurée. Derrière ces notions se cachent d'autres notions, non explicitées dans le programme, qui méritent toutefois la plus grande attention de la part des enseignants : celles de référentiel et d'événement. Dans cet article, nous proposons une revue des difficultés susceptibles de faire obstacle à l'enseignement des notions spécifiques du programme de terminale, notions auxquelles nous apportons un éclairage scientifique. Nous proposons également l'utilisation d'un outil de type « graphique » pour « donner à voir » les conséquences de l'invariance de c et la façon dont s'incarnent les définitions de *référentiel* et d'*événement*.

1. RÉFÉRENTIEL ET ÉVÉNEMENT, DEUX NOTIONS CLÉS DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Les lois de la cinématique classique s'appuient notamment sur les concepts de *référentiel* et d'*événement*. Un référentiel peut être défini comme un ensemble d'observateurs au repos les uns par rapport aux autres. Ces observateurs déterminent les mêmes distances et les mêmes durées entre n'importe quel ensemble d'événements puisqu'un événement est défini comme un fait qui arrive en un lieu donné de l'espace et à un instant donné du temps. Un changement de référentiel n'affecte pas le temps, deux événements qui se produisent en deux lieux différents et en même temps dans un référentiel donné sont simultanés dans un autre référentiel. Il n'en va plus de même en cinématique relativiste, ce qui suppose alors un changement conceptuel radical. En relativité restreinte c est une constante qui relie l'espace et le temps dans la structure unifiée de l'espace-temps. La vitesse de la lumière (dans le vide) est égale à cette constante et donc invariante par changement de référentiel inertiel (ou référentiel galiléen). Cela a pour importante conséquence que la simultanéité de deux événements n'est pas absolue : deux événements qui se produisent en deux lieux différents et en même temps dans un référentiel donné ne sont pas simultanés dans tous les autres référentiels ; de même, les durées mesurées entre deux évènements diffèrent selon les référentiels inertiels considérés.

2. RÉFÉRENTIEL ET ÉVÉNEMENT, DIFFICULTÉS D'ÉTUDIANTS

Entre 2009 et 2010, nous avons cherché à identifier les types de raisonnement mis en œuvre par des étudiants (dont nous pensions qu'ils avaient reçu un enseignement de relativité restreinte) confrontés à des situations relativistes. Il s'agissait de préciser la nature des difficultés pouvant faire obstacle à la construction des concepts de *référentiel* et d'*événement*, et par là même, à la compréhension d'éléments de la théorie de la relativité restreinte elle-même. Cette étude s'inscrivait dans le contexte d'un projet de recherche pluridisciplinaire de grande ampleur, le projet EVEILS (Environnement virtuel pour l'enseignement et l'illustration scientifique) dont l'objectif est d'utiliser une plateforme immersive à trois dimensions pour « donner à voir » les effets du caractère « fini » de la vitesse

de la lumière et de l'invariance de cette vitesse par changement de référentiel inertiel [1]. L'utilisation de cette plateforme est rendue possible par la création de scénarios d'usage conçus en fonction d'objectifs d'apprentissage précis et de difficultés repérées à faire dépasser. Notre enquête constituait donc un travail préalable à l'élaboration de ces scénarios, mais également une base permettant un meilleur contrôle des effets de l'immersion d'un utilisateur donné sur sa compréhension des effets constatés.

Les étudiants interrogés sont de futurs enseignants de physique-chimie (N = 94) issus de première et deuxième années de cinq Instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM) différents. Tous ces étudiants sont titulaires d'une licence de physique ou de chimie ou de physique-chimie. Quarante-quatre étudiants parmi les quatre-vingt-quatorze interrogés ont étudié la Relativité restreinte pendant leurs études universitaires académiques. Ils ont été soumis à un questionnaire papier-crayon comportant neuf questions à choix multiple avec demande de justification. Les neuf questions se rapportent à deux situations distinctes, l'une dite « du train », l'autre dite « du pont ». Le questionnaire est présenté en annexe de cet article.

3. PRÉSENTATION DU QUESTIONNAIRE ET DES RÉPONSES ATTENDUES

La première situation met en scène un laser allumé sur le quai d'une gare, qui envoie des impulsions de lumière se déplaçant par rapport au quai à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) dans le sens d'un train relativiste passant devant le quai à la vitesse de 100 000 km/s. On demande la vitesse des photons émis par le laser pour un observateur au repos situé dans le train. La réponse correcte (300 000 km/s) doit mentionner que la vitesse des photons est celle de la lumière et qu'elle est indépendante du référentiel d'étude.

La situation « du pont » (*cf.* figure 1) est structurée en deux groupes de quatre questions qui portent sur les instants d'émission et de perception de deux événements pour des observateurs appartenant à deux référentiels inertiels distincts. Dans les quatre premières questions, la situation décrite concerne quatre protagonistes immobiles sur un pont. A et B sont immobiles face à face chacun à une extrémité du pont et disposent d'un appareil photo avec flash. C se tient immobile au milieu du pont, et D est également immobile sur le pont, mais se trouve à égale distance entre A et C. À un instant donné, C émet un signal en direction de A et B afin que ceux-ci déclenchent leur appareil photo (on considère que les temps de réaction d'A et B sont identiques). On demande aux étudiants de se prononcer sur l'ordre selon lequel les flashes émis par A et B sont perçus par C et D, ainsi que sur l'ordre selon lequel ces mêmes flashes ont été émis (pour C et

(1) EVEILS est un projet de recherche financé par l'ANR (08-BLAN-2015) pour une durée de trois ans (date de début du projet : mai 2009). EVEILS est placé sous la responsabilité d'Étienne PARIZOT, professeur au laboratoire Astroparticules et cosmologie (APC) de l'Université Paris Diderot et regroupe trois laboratoires aux spécificités complémentaires : le laboratoire APC (Université Paris Diderot), le Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR, Université Paris Diderot) et le Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (LIMSI, CNRS-Université Paris Sud).

D). Dans les quatre dernières questions, deux autres protagonistes E et F sont en mouvement relativiste par rapport au référentiel du pont. E traverse le pont sur un scooter cosmique à la vitesse constante $v = 0{,}8$ c par rapport au sol. Il se dirige de A vers B et arrive à la hauteur de C à l'instant même où celui-ci reçoit la lumière émise par les deux flashes. F, qui suit E à une vitesse semblable à celle de E dans le référentiel du pont, arrive à la hauteur de D au moment où celui-ci reçoit la lumière du flash produit par A. Là encore, on demande aux étudiants de se prononcer sur l'ordre selon lequel les flashes émis par A et B sont perçus par E et F, ainsi que sur l'ordre selon lequel ces mêmes flashes ont été émis (pour E et F). Nous avons intentionnellement distingué l'instant d'émission d'un flash de celui de sa réception pour pouvoir déterminer dans l'analyse des réponses si les étudiants confondent les deux événements, ce que d'autres études tendent à montrer [6].

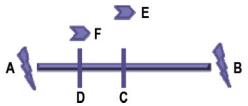

Figure 1 : Schéma représentant la situation « pont ».

Lorsque C fait signe, la lumière diffusée à cet instant dans toutes les directions parcourt la même distance (AC = CB) et à la même vitesse pour atteindre A et B, qui perçoivent donc son signe au même instant. Ils déclenchent alors leur flash au même instant, la lumière des flashes parcourt des distances égales pour arriver à C, qui perçoit donc les flashes simultanément. D définissant le même référentiel que C, A et B (ils sont immobiles les uns par rapport aux autres), pour lui aussi les flashes ont été émis simultanément alors qu'il reçoit le flash de A avant celui de B, puisque la lumière du flash de A parcourt une distance plus petite que celle du flash de B (AD < AB), à la même vitesse. Nous présentons un diagramme d'espace-temps qui illustre les réponses attendues aux quatre premières questions (*cf.* figure 2, page ci-contre). Les diagrammes d'espace-temps (des graphiques à deux dimensions, une coordonnée de temps, une coordonnée d'espace) présentent l'avantage de regrouper les informations disponibles sur différents événements et offrent une forme de visualisation des conséquences de l'invariance de c par changement de référentiel inertiel. Ici, les lignes d'univers regroupent l'ensemble des positions d'une entité dans l'espace-temps. En choisissant ct à la place de t en ordonnée, et des unités identiques pour chacun des axes, la ligne d'univers d'un photon est figurée comme une ligne droite inclinée de 45° par rapport à l'axe des abscisses. Les lignes d'univers des photons (de la lumière) sont en couleur dans le diagramme.

E et C étant au même point de l'espace-temps à l'instant où la lumière des flashes y arrive, ils perçoivent tous les deux les flashes au même instant. De la même façon F étant au même point de l'espace temps que D lorsque la lumière issue du flash de A y arrive, F reçoit la lumière de ce flash d'abord. E et F définissant un référentiel puisqu'ils ont la même vitesse par rapport au pont, l'ordre des événements « émission du flash de A » et « émission du flash de B » et la durée séparant ces deux événements sont iden-

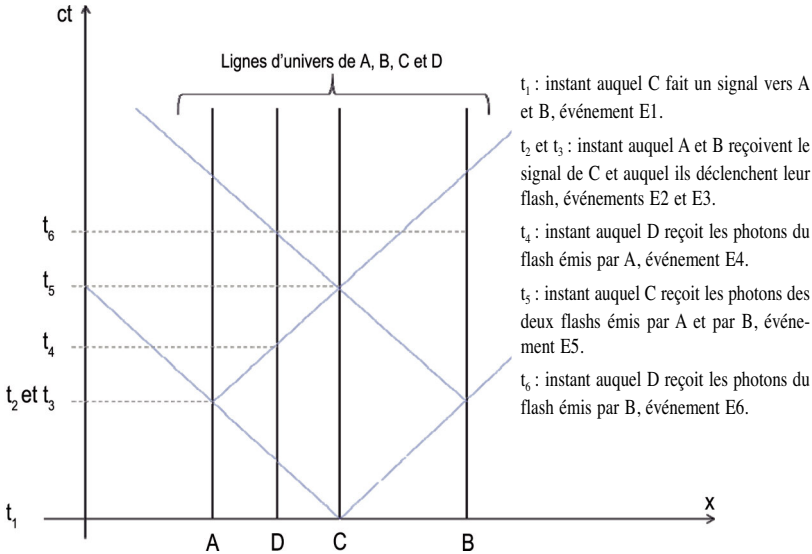

Figure 2 : Diagramme d'espace-temps représentant la situation dans le référentiel du pont.

tiques pour E et pour F. Lorsque E est à la hauteur de C, il est à égale distance de A et B et reçoit la lumière des deux flashes. Avant cet événement, il était plus près de A que de B. Donc on peut dire que lorsque A a déclenché son flash, E était plus proche de A qu'il ne l'est lors de la réception de la lumière. De la même façon lorsque B a déclenché son flash il était plus éloigné de E qu'il ne l'est au moment de la réception. Donc par rapport à E, la lumière du flash de B avait une distance plus grande à parcourir que celle du flash de A, et la vitesse de la lumière de chaque flash est la même. Puisqu'ils parviennent au même instant au point de rencontre C, cela signifie que le flash de B a été émis plus tôt dans le référentiel du scooter cosmique. Ce raisonnement se traduit de façon visuelle sur un diagramme d'espace-temps qui illustre les réponses attendues à ces quatre dernières questions (*cf.* figure 3, page ci-après).

4. ANALYSE DES RÉPONSES ET RÉSULTATS

4.1. La situation « train »

Moins de la moitié des étudiants (46 %) répond correctement à la question de la situation du « train » (*cf.* tableau 1, page ci-après), en cochant la case a) : 300 000 km/s. Parmi eux, 31 % justifient correctement en invoquant l'invariance de la vitesse de la lumière. Parmi les 28 % ayant choisi la réponse b) : 200 000 km/s, 20 % d'entre eux (dont 7 % ont suivi un cours sur la relativité) justifient leur choix et tous soustraient la vitesse du train à celle de la lumière. Nous désignons ce type de justification par l'expression « composition additive des vitesses ». Le fait que certains des étudiants interrogés aient

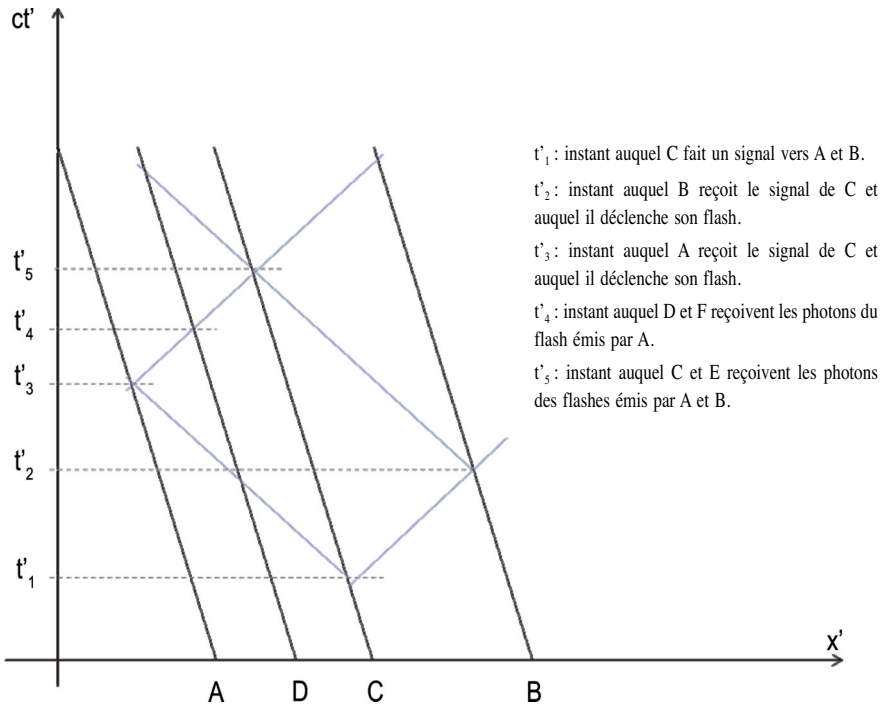

Figure 3 : Diagramme d'espace-temps représentant la situation dans le référentiel du scooter. À noter : les distances entre A, B, C et D ne sont pas les mêmes que dans le graphe précédent du fait du changement de référentiel.

	Réponses des étudiants (N = 94)	Ayant suivi un cours sur la relativité restreinte		
		Oui	Non	Non précisé
a) 300 000 km/s	46 %	23 %	21 %	1 %
b) 200 000 km/s	28 %	11 %	14 %	3 %
c) On ne peut pas répondre	5 %	3 %	2 %	0 %
d) Autre réponse	4 %	2 %	2 %	0 %
e) Je ne sais pas	17 %	7 %	9 %	1 %

Tableau 1 : Répartition des réponses à la situation « train »
(les pourcentages sont calculés par rapport à la population totale d'étudiants).

suivi un cours de relativité restreinte ne leur permet pas de mieux répondre de manière significative à cette question, mais de mieux justifier la réponse correcte (parmi les 30 % qui justifient correctement leur choix, 19 % ont suivi un cours de relativité et 11 % n'en ont pas suivi). Si nous considérons deux populations d'étudiants, ceux ayant suivi un cours de relativité restreinte et ceux n'en ayant pas suivi, les pourcentages de réponses incorrectes dans chaque population sont similaires (*cf.* tableau 2). En effet un test du chi-deux montre que les différences ne sont pas significatives ($p = 0{,}79$ et $\chi^2 = 0{,}47$). On peut donc dire qu'avoir suivi un cours de relativité restreinte n'est pas discriminant pour répondre à la question de la situation « train ».

	Ayant suivi un cours sur la relativité restreinte	
	Oui (N = 44)	Non (N = 45)
a) 300 000 km/s	50 %	45 %
b) 200 000 km/s	23 %	29 %
c) on ne peut pas répondre	7 %	4 %
d) autre réponse	4 %	4 %
e) je ne sais pas	16 %	18 %

Tableau 2 : Répartition des réponses à la situation « train »
(pourcentages rapportés au nombre d'étudiants dans chaque population)

4.2. La situation « pont »

Avant de présenter les résultats eux-mêmes, nous explicitons l'analyse que nous avons menée à partir des réponses des étudiants. La situation du « pont » a pour objet de cibler les types de difficultés associées aux concepts de *référentiel* et d'*événement*. Ces notions ne sont pas explicitement et directement interrogées puisque les termes « référentiel » et « événement » ne sont pas mentionnés dans le questionnaire. Pourtant, les situations choisies permettent de mettre en évidence si ces notions sont opératoires et mobilisées. En effet, au-delà des connaissances spécifiques liées à la relativité restreinte (qui de fait ne sont nécessaires que pour répondre aux questions de l'ordre d'émission des flashes de A et B dans le référentiel du scooter cosmique), ce sont bien des connaissances propres à la cinématique classique qui permettent de répondre correctement à six des huit questions posées ici. Nous accéderons donc au niveau de compréhension que les étudiants ont des notions de *référentiel* et d'*événement* en examinant les types de raisonnement mis en place par les étudiants pour des paires de questions, conformément à ce qui est indiqué dans le tableau 3 (*cf.* page ci-après). Ainsi, pour répondre correctement aux questions de la situation « pont », il faut mettre en jeu les connaissances figurant dans la colonne 2 du tableau 3. Les réponses incorrectes des étudiants nous renseigneront, par inférence, sur les idées et les types de raisonnement qu'ils ont à propos du concept

mentionné dans la colonne 1 du tableau 3.

Concept visé	Énoncés mettant en jeu les connaissances auxquelles renvoie le concept visé	Questions de la situation « pont » associées
Référentiel	Pour tous les observateurs d'un référentiel donné, un événement est repéré par les mêmes coordonnées spatio-temporelles (i.e. : deux événements simultanés pour un observateur de ce référentiel le sont pour tous les observateurs de ce référentiel).	Q2 et Q4 Q6 et Q8
Événement	Deux événements repérés par les mêmes coordonnées d'espace-temps sont simultanés. Cette simultanéité ne dépend pas du référentiel.	Q1 et Q5 Q3 et Q7
	L'émission d'un signal lumineux est un événement distinct de la réception de ce signal par un observateur repéré dans un référentiel donné.	Q1 et Q2 Q3 et Q4 Q5 et Q6 Q7 et Q8

Tableau 3 : Explicitation des liens entre les questions posées et les énoncés visés qui constituent des critères permettant de valider les raisonnements des étudiants interrogés.

La recherche de cohérence entre les réponses aux questions Q2 et Q4 d'une part, et Q6 et Q8 d'autre part, permet de savoir si la notion de *référentiel* est mobilisée par les étudiants interrogés. En effet A, B, C et D étant immobiles les uns par rapport aux autres définissent un même référentiel, le référentiel du pont *Rp*. De ce fait, pour ces quatre observateurs, l'événement « A déclenche son flash » a la même coordonnée temporelle et les mêmes coordonnées spatiales. Il en est de même pour l'événement « B déclenche son flash ». De façon similaire, E et F définissent un référentiel, celui du scooter *Rs*, différent de *Rp*. Ainsi les propositions de réponses pour les coordonnées d'espace-temps des événements devraient être identiques pour E et F. C'est pourquoi nous attendons que les étudiants fournissent des réponses identiques dans Q2 et Q4 d'une part, et Q6 et Q8 d'autre part (*cf.* tableau 3).

Nous testons la compréhension de la notion d'*événement* (point de l'espace-temps), en localisant deux observateurs en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre en un même point de l'espace-temps qu'un événement « réception d'un flash », nous attendons des réponses identiques dans Q1 et Q5 d'une part, et Q3 et Q7 d'autre part. Pour accéder à la façon dont les étudiants mobilisent la notion d'événement, nous leur demandons si les deux événements « A déclenche son flash » et « B déclenche son flash » sont perçus en même temps par deux observateurs différents appartenant au même référentiel. La date à laquelle un événement se produit est différente de la date à laquelle il est perçu par n'importe quel observateur. Par conséquent, la localisation de l'observateur dans un

référentiel donné induit une différence pour l'*événement* « réception d'un flash ». Pour une paire d'observateurs, les dates d'émission des signaux ont des valeurs inchangées, mais les dates de réception sont différentes puisque la durée de propagation est différente. Les événements « émission du flash » sont les mêmes pour tous les observateurs du référentiel ; en revanche les événements « réception du flash » dépendent de l'observateur. Afin de vérifier si les étudiants sont conscients de cet aspect nous avons introduit une paire d'observateurs dans un premier référentiel (C et D) puis une seconde paire d'observateurs dans un deuxième référentiel (E et F). Nous examinons alors la cohérence des réponses aux quatre premières questions puis aux quatre suivantes.

Enfin, avec les questions Q6 et Q8, nous cherchons à analyser l'aptitude des étudiants à identifier la nécessité de changer de cadre d'interprétation et à déterminer jusqu'à quel point les étudiants utilisent le cadre cinématique classique. L'émission de chaque flash constitue deux événements simultanés dans le référentiel du pont, et non simultanés dans le référentiel du scooter qui se déplace à une vitesse relativiste par rapport au référentiel du pont.

4.3. Résultats

Les résultats obtenus à chaque question figurent dans les tableaux 4 et 5, nous ne les examinons pas en détail, puisque nous accédons à la compréhension des concepts en comparant les réponses à des paires de questions. Nous pouvons cependant voir que moins de la moitié des étudiants interrogés fournit une réponse correctement justifiée pour la question de l'émission des flashes (questions paires), la question de la réception des flashes étant mieux résolue dans les deux premiers cas (*cf.* tableaux 4 et 5, page ci-après). Les non-réponses augmentent au fur et à mesure que l'on avance dans le questionnaire signe à la fois d'une forme de perplexité et d'une certaine lassitude.

Pour évaluer la compréhension du concept de *référentiel*, nous examinons s'il est compris comme un ensemble d'observateurs immobiles les uns par rapport aux autres. Moins d'un quart, 15 %, des étudiants interrogés (N = 94) répond que les flashes de A et B ont été émis en même temps aux deux questions Q2 et Q4, et fournit une justification correcte du type *« A, B, C et D appartiennent au même référentiel et/ou ils sont au repos les uns par rapport aux autres »*. Une faible proportion, 4 % des étudiants interrogés, donne une justification aux questions Q6 et Q8 dans laquelle apparaît l'idée que E et F appartiennent au même référentiel (nous incluons ici les choix de réponses incorrectes étant donné le faible nombre de justifications fournies à ces questions). *« E et F appartiennent au même référentiel et/ou ils sont au repos l'un par rapport à l'autre »*. Un tri croisé permet de dire que seuls 2 % des étudiants interrogés donnent une réponse et une justification correctes à ce groupe de quatre questions (Q2 et Q4 ainsi que Q6 et Q8).

Le deuxième volet de notre exploration porte sur la compréhension de la notion d'événement ce qui nous conduit à explorer les réponses aux questions nécessitant de raisonner sur la position spatio-temporelle de l'observateur et non sur sa vitesse. Le ques-

Questions	Q1				Q2			
Choix	a (1)	b	c	d	a (1)	b	c	d
Réponses des étudiants (N = 94)	89 %	0 %	0 %	11 %	89 %	0 %	0 %	11 %
Justifications correctes pour le bon choix (N=94)	65 %				24 %			
	Q3				Q4			
Choix	a	b (1)	c	d	a (1)	b	c	d
Réponses des étudiants (N = 94)	23 %	71 %	0 %	5 %	61 %	24 %	5 %	10 %
Justifications correctes pour le bon choix (N = 94)		54 %			33 %			
(1) Indique le choix correct.								

Tableau 4 : Répartition des réponses à Q1, Q2, Q3 et Q4 concernant les protagonistes immobiles dans le référentiel du pont.

Questions	Q5				Q6			
Choix	a (1)	b	c	d	a	b	c (1)	d
Réponses des étudiants (N = 94)	49 %	18 %	18 %	15 %	29 %	20 %	27 %	24 %
Justifications correctes pour le bon choix (N=94)	28 %						4 %	
	Q7				Q8			
Choix	a (2)	b (1)	c	d	a	b	c (1)	d
Réponses des étudiants (N = 94)	20 %	40 %	7 %	33 %	27 %	17 %	13 %	44 %
Justifications correctes pour le bon choix (N = 94)		14 %					2 %	
(1) Indique le choix correct. (2) 6 % d'étudiants fournissent une justification acceptable dans la mesure où ils disent que D et F sont en un même lieu et parlent de persistance rétinienne pour justifier leur choix.								

Tableau 5 : Répartition des réponses à Q5, Q6, Q7 et Q8 concernant les protagonistes animés d'une vitesse relativiste dans le référentiel du pont.

tionnaire met en scène la réception du signal par deux observateurs différents situés au même point d'espace-temps (en un point donné de leur ligne d'univers), mais qui ne sont pas immobiles l'un par rapport à l'autre. Il s'agit de C et E dans les questions Q1 et Q5, D et F dans les questions Q3 et Q7. 65 % des étudiants font le choix de réponse attendue et justifient de façon correcte ou partiellement correcte dans Q1 et 54 % dans Q3. Moins d'un tiers des étudiants choisit la réponse attendue en fournissant une justification correcte dans l'une des deux questions Q5 ou Q7 : 28 % des étudiants interrogés donnent une justification du type *« E et C ont la même coordonnée d'espace-temps qui est également celle où se croisent les photons émis par A et B »* à Q5 ; 20 % (2) des étudiants interrogés donnent une réponse du type *« F et D ont la même coordonnée d'espace-temps »* ou *« F et D sont au même endroit quand arrive la lumière »* à Q7. Si on croise les réponses fournies à Q1 et Q5, on note que ce sont 21 % des étudiants qui fournissent des justifications correctes et cohérentes à ces deux questions. Si on fait de même avec Q3 et Q7, on constate que ce sont 20 % des étudiants qui font preuve de cohérence. La diminution du nombre de réponses correctement justifiées est notable, que ce soit de Q1 à Q5 ou de Q3 à Q7, ce qui suggère que la mention de la vitesse influe profondément sur la nature de la réponse. Pour compléter cet aspect de l'analyse, signalons que 13 % des étudiants interrogés répondent de façon cohérente à chaque paire de questions (Q1-Q5 et Q3-Q7). Nous constatons ainsi que la plupart des étudiants peinent à produire une réponse dans laquelle apparaît un raisonnement reposant uniquement sur la localisation spatio-temporelle des observateurs lorsque la vitesse de ceux-ci est mentionnée, comme si la vitesse « contaminait » l'événement.

Pour déterminer si les étudiants font une confusion entre l'instant auquel un événement se produit et celui auquel cet événement est perçu par un observateur, nous focalisons sur une paire de questions (Q3, Q4) par souci de simplicité et examinons les réponses à la question Q4, dans laquelle il est demandé quand les flashes ont été émis dans le référentiel du pont, pour D. Seuls 33 % des étudiants interrogés produisent une réponse et une justification correctes, en écrivant que C et D appartiennent au même référentiel, ou bien, que l'événement « A déclenche son flash » et l'événement « B déclenche son flash » sont directement dépendants de l'événement « C émet un signal vers A et B ». 18 % des étudiants interrogés répondent de manière incorrecte à cette question en choisissant la réponse, « la lumière du flash de A a été émise en premier », et justifient leur choix soit en évoquant l'instant auquel cette même lumière a été perçue par D selon un raisonnement du type « le déclenchement du flash de A est antérieur à celui du flash de B puisque D reçoit la lumière du flash de A avant celle du flash de B », soit en évoquant le fait que la distance entre D et A est plus petite que la distance entre D et B. Tous ces étudiants avaient précisé cette différence entre les distances pour justifier, à juste titre, l'écart dans la réception des signaux lumineux dans leur réponse à Q3, et leur réponse à Q4 semble directement dépendre de leur choix de réponse à Q3. On peut aussi interpréter cela en disant que les étudiants raisonnent comme si les dates d'émission des flashes pouvaient

(2) Voir tableau 5, cela correspond à 14 % de réponses b) et 6 % de réponses a).

être inférées de l'ordre dans lequel l'observateur reçoit les flashes, comme si le futur conditionnait le présent.

Notre dernière interrogation concerne l'influence du cadre de la cinématique classique dans la résolution de questions spécifiquement relativistes. Beaucoup d'étudiants ne répondent pas à ces questions relativistes Q6 (24 %) et Q8 (44 %). Seuls 2 % des étudiants interrogés produisent une réponse « B déclenche son flash en premier » et une justification correcte à ces deux questions. Au contraire, 20 % des étudiants interrogés (dont 11 % ont suivi un cours de relativité) répondent « A et B déclenchent leur flash en même temps » aux deux questions Q6 et Q8 et fournissent des justifications du type « l'instant initial est toujours le même », ce qui finalement représente presque la moitié des étudiants qui répondent à ces deux questions.

POUR CONCLURE

À l'occasion de cette enquête, nous avons constaté que près de la moitié des étudiants interrogés n'a jamais suivi de cours de relativité restreinte. Étant donnée la spécificité de ces étudiants, tous engagés dans un parcours de formation d'enseignant de sciences physiques, nous pouvons supposer que de nombreux collègues qui auront à enseigner certaines des conséquences de l'invariance de c par changement de référentiel inertiel n'auront jamais reçu d'enseignement des principes relativistes. Les besoins de formation (à la fois disciplinaires et didactiques) seront vraisemblablement patents dans les mois à venir.

Le concept de *référentiel* n'est pas compris comme un ensemble d'observateurs immobiles les uns par rapport aux autres. La plupart des étudiants sont incapables de produire un raisonnement reposant uniquement sur la localisation spatio-temporelle des observateurs lorsque la vitesse de ceux-ci est mentionnée, comme si la vitesse « contaminait » l'événement.

L'ordre selon lequel deux événements sont perçus détermine l'ordre selon lequel ces événements sont produits. En conséquence, la non-simultanéité de deux événements n'est pas un problème puisqu'elle apparaît liée à la non-simultanéité de leur perception. Le cadre de la cinématique classique semble conditionner les raisonnements des étudiants, y compris ceux d'étudiants ayant déjà reçu un enseignement de relativité restreinte.

Cette enquête révèle aussi des difficultés qui ne sont pas spécifiques de la cinématique relativiste. Certaines réponses permettent d'inférer un usage non opératoire de la notion de référentiel qui est réduit à un individu singulier. Il s'avère alors déterminant de préciser lors de l'introduction à l'étude des mouvements en contexte classique qu'un référentiel est constitué d'un ensemble d'objets et, ou d'observateurs immobiles les uns par rapport aux autres, ce qui signifie qu'ils ont tous le même vecteur vitesse instantanée par rapport à un autre référentiel. En bref, il s'agit de soigner la présentation que l'on fait de ce qu'est un référentiel. Il est souhaitable de multiplier les exemples d'objets différents animés d'un mouvement de translation de même vecteur vitesse par rapport à un

référentiel donné, et qui constituent un référentiel galiléen ou inertiel pourvu que ce vecteur vitesse soit constant dans le temps. Nous pensons qu'il est judicieux de revenir à un usage plus systématique des graphiques, y compris en cinématique classique, même si des études [4] ont montré que cela pouvait générer des difficultés. À partir d'un graphique, curviligne ou rectiligne, donnant la position d'un mobile en fonction du temps les élèves avaient des difficultés par exemple à déterminer si c'était la pente ou la position qui importe pour donner la vitesse du mobile ou dire s'il accélère ou change de direction. Les graphiques peuvent également permettre d'aborder autrement la question de l'effet Doppler (*cf.* [2-3]). Dans le cas de la relativité restreinte, le graphique permet de donner à voir l'invariance de c. Cela se concrétise par une ligne d'univers qui conserve sa pente quel que soit le repère considéré, ce qui est une caractéristique simple à mémoriser et à reproduire et qui permet d'insister sur cet aspect majeur, l'invariance de c, à la base de la théorie d'EINSTEIN.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Étienne PARIZOT, responsable de l'ANR EVEILS ainsi que Tony DOAT, Jean-Marc VÉZIEN, Clément MAISCH et Nicolas LADEVÈZE avec lesquels nous collaborons dans le cadre d'EVEILS depuis trois ans. Nous remercions également les collègues des IUFM dont sont issus les étudiants que nous avons interrogés sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

BIBLIOGRAPHIE

[1] EINSTEIN A. *La relativité*. Paris : Payot, 1990.

[2] Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA. « Romer et la vitesse de la lumière ». *Cahier Claireaut*, 1998, hors série n° 5.

[3] LEROY-BURY J.-L. et VIENNOT L. « Doppler et Römer : physique et mathématique à l'œuvre ». *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, décembre 2003, vol. 97, n° 859 (1), p. 1595-1611.

[4] MCDERMOTT L.C., ROSENQUIST M.L. and VAN ZEE E.H. "Student difficulties in connecting graphs and physics: examples from kinematics". *American Journal of Physics*, 1987, n° 55, p. 503-513.

[5] Ministère de l'Éducation nationale, BO spécial n° 8 du 13 octobre 2011.

[6] SCHERR R., SCHAFFER P. and VOKOS S. "Student understanding of time in special relativity: simultaneity and references frames". *American Journal of Physics*, 2001, n° 69, p. 24-35.

Annexe 1

Questionnaire « Physique relativiste »

I1 - UN TRAIN RELATIVISTE, UN LASER

Un laser est allumé sur le quai d'une gare et envoie des impulsions de lumière très intense. Celles-ci se déplacent par rapport au quai à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) dans le sens de déplacement d'un train relativiste passant devant cette même gare à la vitesse de 100 000 km/s. Quelle est la vitesse des photons émis par le laser pour un observateur au repos dans le train ?

a) 300 000 km/s.

b) 200 000 km/s.

c) On ne peut pas répondre.

d) Autre réponse.

e) Je ne sais pas.

Justifier.

I2 - UN PONT, DES SCOOTERS COSMIQUES

1. Il fait nuit. Deux touristes Alice et Bernard se tiennent immobiles face à face chacun à une extrémité d'un même pont. Leur fille Cécile se tient au milieu du pont. À un instant donné, elle leur fait signe de la prendre en photo au flash (on considère que les temps de réaction d'Alice et Bernard sont identiques). Cécile perçoit-elle la lumière des flashes au même instant ?

   a) Oui, elle perçoit la lumière des flashes au même moment.

   b) Non, elle perçoit la lumière du flash d'Alice en premier.

   c) Non, elle perçoit la lumière du flash de Bernard en premier.

   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

2. Dans le référentiel de Cécile, les flashes lumineux d'Alice et Bernard ont-ils été émis au même instant ?

   a) Oui, les deux flashes ont été émis au même moment.

   b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier.

   c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier.

   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

3. Denis se tient immobile sur le pont entre Alice et Cécile. Denis perçoit-il la lumière des flashes au même instant ?
   a) Oui, il perçoit la lumière des flashes au même moment.
   b) Non, il perçoit la lumière du flash d'Alice en premier.
   c) Non, il perçoit la lumière du flash de Bernard en premier.
   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

4. Dans le référentiel de Denis, les flashes lumineux d'Alice et Bernard ont-ils été émis au même instant ?
   a) Oui, les deux flashes ont été émis au même moment.
   b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier.
   c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier.
   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

5. Étienne traverse le pont sur un scooter cosmique à la vitesse constante $v = 0{,}8$ c par rapport au sol. Il se dirige d'Alice vers Bernard et arrive à la hauteur de Cécile à l'instant même où celle-ci reçoit la lumière émise par les deux flashes. Étienne perçoit-il la lumière des flashes au même instant ?
   a) Oui, il perçoit la lumière des flashes au même moment.
   b) Non, il perçoit la lumière du flash d'Alice en premier.
   c) Non, il perçoit la lumière du flash de Bernard en premier.
   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

6. Dans le référentiel du scooter cosmique d'Étienne, les deux flashes lumineux ont-ils été émis au même instant ?
   a) Oui, les deux flashes lumineux ont été émis au même moment.
   b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier.
   c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier.
   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

7. Fanny traverse le pont sur un deuxième scooter cosmique à la même vitesse et dans le même sens qu'Étienne. Elle arrive à la hauteur de Denis au moment où celui-ci reçoit la lumière du flash produit par Alice. Fanny perçoit-elle la lumière des flashes au même instant ?
   a) Oui, elle perçoit la lumière des flashes au même moment.
   b) Non, elle perçoit la lumière du flash d'Alice en premier.
   c) Non, elle perçoit la lumière du flash de Bernard en premier.

d) Je ne sais pas.

Justifier.

8. Dans le référentiel du scooter cosmique de Fanny, les deux flashes lumineux ont-ils été émis au même instant ?
   a) Oui, les deux flashes lumineux ont été émis au même instant.
   b) Non, le flash d'Alice a été émis en premier.
   c) Non, le flash de Bernard a été émis en premier.
   d) Je ne sais pas.

   Justifier.

Cécile de HOSSON
Maître de conférences
Laboratoire de didactique André Revuz
Université Paris-Diderot 7
Paris

Isabelle KERMEN
Maître de conférences
Laboratoire de didactique André Revuz
Université d'Artois
Lens (Pas-de-Calais)