

Conceptualisation de la dilatation du temps à l'école secondaire

RICHARD GONZÁLEZ^{1,3}, MARÍA RITA OTERO^{1,2}, MARCELO ARLEGO^{1,2}

¹Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Argentina

rotero@exa.unicen.edu.ar

marlego@nicicyt.exa.unicen.edu.ar

³Agencia Nacional de Investigación e Innovación

Uruguay

rgonzalez@nicicyt.exa.unicen.edu.ar

ABSTRACT

This paper analyses the conceptualization of time dilation among Uruguayan secondary school students, using a constructivist teaching sequence to teach the Special Theory of Relativity (STR) in four physics courses. The framework of Vergnaud's Conceptual Field Theory is adopted, and a qualitative-interpretative methodology is used to identify operational invariants at four moments of each class based on the students' written, oral, gestural, and pictorial records. The results show that the situation considered is appropriate for conceptualizing time dilation.

KEYWORDS

Time dilation, Special Theory of Relativity, Conceptual Field Theory, conceptualization

RÉSUMÉ

Cet article analyse la conceptualisation de la dilatation du temps chez des élèves du secondaire uruguayens. Il utilise une séquence d'enseignement constructiviste pour enseigner la théorie de la relativité restreinte dans quatre cours de physique. Le cadre de la théorie conceptuelle des champs de Vergnaud est adopté, et une méthodologie qualitative-interprétative est utilisée pour identifier les invariants opératoires à quatre moments de chaque cours, à partir des enregistrements écrits, oraux, gestuels et picturaux des élèves. Les résultats montrent que la situation considérée est appropriée à la conceptualisation de la dilatation du temps.

MOTS CLÉS

Dilatation du temps, théorie de la relativité restreinte, Théorie des champs conceptuels, conceptualisation

Cite this article

González, R., Otero, M. R., & Arlego, M. (2026). Conceptualisation de la dilatation du temps à l'école secondaire. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 20(1), 107-128. <https://doi.org/10.26220/rev.5518>

LE PROBLÈME ET SON CONTEXTE

La relativité restreinte (RR) modifie profondément les notions fondamentales de la physique, telles que l'espace, le temps, la masse et l'énergie. La dilatation du temps et la contraction des longueurs comptent parmi les conséquences les plus notables et surprenantes de la RR. Le fait que les mesures de temps et de longueur dans un référentiel ne coïncident pas avec celles effectuées dans un autre référentiel se déplaçant par rapport au premier est propice à l'initiation des élèves à la physique moderne (Dimitriadi & Halkia, 2012; Kamphorst et al., 2023). Les idées classiques sont persistantes et fortement naturalisées, conséquence de la vie dans un monde où les vitesses sont « faibles » comparées à celle de la lumière. Plus d'un siècle après la formulation de la RR, ses concepts de base sont très peu enseignés au secondaire, bien que de plus en plus de programmes scolaires incluent des connaissances en physique moderne (Choudhary et al., 2019; Kersting & Blair, 2021). L'un des principaux objectifs de l'enseignement de la RR au secondaire est de comprendre la relation entre l'espace et le temps (Alstein et al., 2021; Levrini & diSessa, 2008).

Il est important de souligner qu'il existe peu de propositions pédagogiques éprouvées à la disposition des enseignants concernant le contenu et les modalités de l'enseignement de la RR. Depuis plusieurs décennies, de nombreuses difficultés de conceptualisation de la RR, notamment en ce qui concerne la dilatation du temps, ont été signalées. La conception absolue du mouvement constitue une difficulté majeure, car les élèves considèrent souvent la vitesse comme une propriété intrinsèque des corps et considèrent qu'il existe un référentiel privilégié à partir duquel le mouvement est « réel », tandis que dans d'autres référentiels, il n'est qu'« apparent » (Alstein et al., 2021; Dimitriadi & Halkia, 2012; Kizilcik et al., 2017; Panse et al., 1993). Cela conduit à percevoir la dilatation du temps comme un phénomène qui ne se produit que dans le référentiel « mobile » (Selçuk, 2011; Villani & Pacca, 1987). De plus, une tendance à concevoir le temps comme absolu a été documentée, certains élèves considérant le temps « vrai » comme celui mesuré au repos, et le temps dilaté comme une distorsion perceptuelle ou une erreur instrumentale (Hewson, 1982; Ozcan, 2017; Selçuk,

2011; Villani & Pacca, 1987). Ainsi, les élèves ne font pas clairement la distinction entre la procédure de mesure des coordonnées décrite par Einstein (1905) et l'observation visuelle personnelle (Stein et al., 2023). Le rôle de l'observateur est souvent conçu littéralement, comme s'il dépendait de l'observation sensorielle humaine (Hughes & Kersting, 2021; Scherr et al., 2001, 2002). Une autre difficulté réside dans la confusion entre temps « propre » et « non propre ». Certains élèves identifient le temps propre à celui mesuré dans le référentiel au repos par rapport à la terre, renforçant ainsi l'idée d'un référentiel absolu (Selçuk, 2011).

Cet article présente un travail s'inscrivant dans un projet de recherche plus vaste dont l'objectif à long terme est d'étudier la conceptualisation des notions relativistes fondamentales et de développer une approche didactique de la relativité basée sur la théorie des champs conceptuels (TCC) (Vergnaud, 1990, 1996, 2011, 2013). Depuis des années, nous avons développé, mis en œuvre et testé une séquence d'enseignement dans plus de dix cours à ce jour, dans des écoles secondaires en Argentine, en Colombie et en Uruguay (Arlego & Otero, 2017; González et al., 2022, 2024, 2025; Muñoz, 2020; Otero & Arlego, 2016, 2018; Otero et al., 2015, 2016; Prodanoff, 2015). Dans ce travail, nous nous demandons : quels sont les invariants opératoires qui émergent d'une situation conçue pour conceptualiser la dilatation du temps dans le cadre de la séquence susmentionnée ? Ci-dessous, nous décrivons quelques aspects centraux de la TCC.

THÉORIE DES CHAMPS CONCEPTUELS

La Théorie des Champs Conceptuels (TCC) aborde à la fois le problème de l'activité en situation et le développement de connaissances et de compétences complexes et durables. Pour Vergnaud (1996), l'étude des formes d'organisation de l'activité est un thème central en psychologie, où la notion de schème est essentielle. La TCC est une théorie cognitive pragmatique du développement et de la conceptualisation de la réalité en action. Elle est pragmatique car le sujet agit en fonction des conséquences de ses actions ; agir, c'est conceptualiser. Ces idées sont révolutionnaires pour l'enseignement et l'apprentissage, où l'accent est davantage mis sur l'implication en sens inverse : l'action suit la conceptualisation. À l'inverse, la TCC démontre que dans la dialectique action-conceptualisation, la connaissance émerge d'abord sous la forme opératoire, puis sous la forme prédicative (Otero, 2025). L'œuvre de Vergnaud (1990, 1996, 2011, 2013) reprend, élargit et développe longuement le concept piagétien de schème. L'activité comprend à la fois le comportement observable et les processus représentationnels, qui en constituent la composante inobservable. Où naît l'activité ? Les schèmes engendrent l'activité dans les situations. Pour analyser l'activité dans les situations, Vergnaud remplace l'interaction piagétienne sujet-objet par celle de schème-situation. S'il partage l'idée que la connaissance est adaptation chez Piaget, il s'en écarte en posant la ques-

tion : qui s'adapte et à quoi ? Pour Vergnaud (1990, 2013) ce sont les schèmes du sujet qui s'adaptent aux différentes situations de la « réalité ».

La conceptualisation comporte un aspect immédiat, qui se manifeste par l'activité du sujet dans les situations, et un aspect à long terme, tel que le développement de divers schèmes permettant la maîtrise d'un certain champ conceptuel. À long comme à court terme, la conceptualisation requiert la notion de schème. Un schème est l'organisation invariante de l'activité pour une certaine classe de situations. La nature contingente de l'activité est évidente partout, en particulier du comportement, qui en est la composante observable et tend à évoluer selon les conditions de la situation, tandis que l'organisation de l'activité demeure inchangée (1990, 2013). Pour analyser un schème, il est inévitable de recourir au comportement observable, mais les schèmes vont bien au-delà du comportement. Les schèmes sont une représentation mentale dont la fonction est de générer toute activité, y compris le comportement, tout en s'autogénéralisant simultanément dans ce processus.

Pour Vergnaud (1990, 2013), d'un point de vue analytique, un schème contient nécessairement quatre types de composantes qui fonctionnent de manière intégrée et interdépendante : des buts et sous-buts, des invariants opératoires, des règles d'action et des inférences. Les buts, les sous-buts et les anticipations correspondent à l'intention, au désir, à la motivation et aux attentes. Dans une même activité, plusieurs buts peuvent exister sans que nous en soyons nécessairement conscients. Les règles d'action, la collecte d'informations et le contrôle génèrent à la fois les aspects observables et inobservables de l'activité. Ainsi, les actions physiques ou intangibles, la collecte d'informations et les contrôles permettant de modifier le comportement, lorsque cela n'est pas possible ou efficace, sont générés par des règles. D'un point de vue logique, les règles sont énoncées sous forme conditionnelles « si... alors », mais la plupart sont inconscientes. Les individus omettent souvent le raisonnement conditionnel qu'ils effectuent lorsqu'on leur demande comment ils ont réalisé une tâche, car, même s'ils peuvent verbaliser leurs connaissances, nombre de leurs actions et décisions conditionnelles sont inconscientes. Les règles d'action, en elles-mêmes, ne permettent pas l'analyse de l'activité, car leur exécution dépend de la sélection des informations et des conditions de la situation.

L'activité en situation requiert et génère des relations conceptuelles, ce qui conduit Vergnaud (1990) à intégrer les invariants opératoires (IO), c'est-à-dire les concepts et les théorèmes en acte, comme composantes épistémiques des schèmes. L'un n'existe pas sans l'autre. La conceptualisation, comprise comme la reconnaissance et l'identification des objets, de leurs relations, propriétés et transformations, est rendue possible par les invariants opératoires. Les concepts en acte n'ont pas de valeur de vérité ; ils sont soit pertinents, soit non pertinents pour le sujet, contrairement aux théorèmes en acte, qui sont des propositions tenues pour vraies. Un même concept en acte peut

intégrer de nombreux théorèmes différents, plus ou moins complexes et pas nécessairement vrais, selon son degré d'élaboration. Vergnaud (2011) souligne qu'affirmer qu'un élève a compris un concept n'a aucun sens ; il est plus approprié d'indiquer quels théorèmes en acte il est capable d'utiliser dans telle ou telle situation.

La fonction principale des invariants opératoires est de collecter et de sélectionner des informations pertinentes et d'en déduire des conséquences utiles pour l'action. Comme le note Otero (2025), pour Vergnaud, l'identification des invariants opératoires permet d'accéder à l'ensemble du schème :

« Du point de vue cognitif, les invariants opératoires sont les composants plus décisifs du schème, puisque les concepts-en-acte permettent de prélever dans l'environnement les informations pertinentes, et de sélectionner les théorèmes-en-acte nécessaires au calcul à la fois des buts et sous buts susceptibles d'être formés, et des règles d'action, de prise d'information et de contrôle permettant de les atteindre » (Vergnaud, 2013).

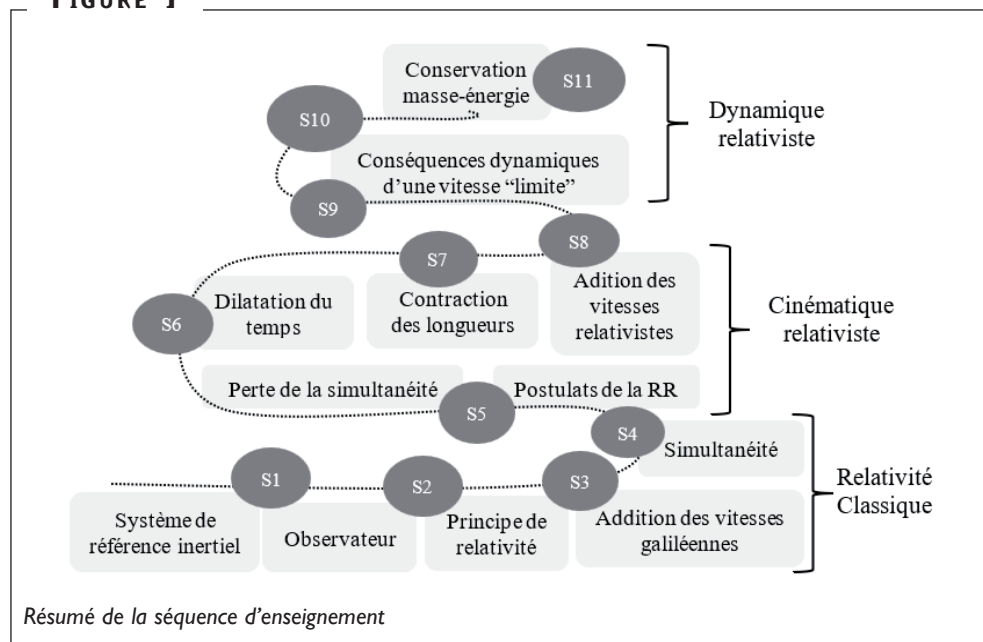
Les inférences sont un élément théorique indispensable, puisque l'activité dans une situation n'est jamais automatique, mais contrôlée par l'adaptation aux conditions, aux objectifs et aux règles. Les inférences font partie de toute activité car les actions ne sont pas le produit d'un stimulus et ne se développent pas non plus de manière complètement automatique, sans contrôle ni collecte d'informations. Les règles et les inférences sont fondamentales pour l'adaptabilité du schème et demeurent presque toujours implicites, voire inconscientes, pour le sujet.

Les quatre composantes des schèmes mentionnées ci-dessus expliquent la double nature de la structure de l'activité : systématique (stable) et contingente (adaptable à la nouveauté et aux événements imprévus). Les invariants opératoires sont essentiels pour donner du sens à une situation nouvelle et la résoudre. Ils émergent de l'interaction entre un schème et la situation, soit parce qu'ils existaient auparavant, soit parce qu'ils ont été recombinaisonnés ou modifiés pour générer quelque chose de nouveau. La fonction de conceptualisation permet aux schèmes de s'adapter à la nouveauté et à la variété. Le rôle que jouent les schèmes les plus primitifs dans la génération de nouveaux schèmes, que ce soit parce qu'ils favorisent leur formation ou parce que, comme le soutient Bachelard (1938), ils l'entravent, est une question centrale en psychologie du développement. La plupart des invariants opératoires sont implicites, et seule une petite partie d'entre eux sont conscients, explicites ou formalisables (Vergnaud, 2013). L'accès direct aux IO est impossible ; par conséquent, les chercheurs doivent les déduire de différentes représentations sémiotiques explicites utilisées par les élèves, telles que des signes et des symboles, qu'ils soient linguistiques ou non (par exemple, symbolisation mathématique ou physique, picturale, gestuelle, etc.).

SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT SUR LA RR

La Figure 1 résume la version actuelle de la séquence de situations et les principaux concepts abordés à chaque étape.

FIGURE 1



Dans notre proposition, la relativité de la simultanéité est la « porte d'entrée » vers la RR et vers le questionnement de la nature absolue du temps et de l'espace (Arlego & Otero, 2017; Muñoz, 2020; Otero & Arlego, 2016, 2018; Otero et al., 2015, 2016; Prodanoff, 2015). « Perdre » la simultanéité remet en question l'idée courante d'un « maintenant » absolu. Cependant, pour « perdre » la simultanéité, il est nécessaire d'en prendre conscience. Cela nécessite d'enseigner certaines notions de mécanique classique, que les programmes scolaires ou les enseignants négligent généralement, afin de prendre conscience qu'en habitant un monde de très faibles vitesses par rapport à c , nous naturalisons la simultanéité classique.

Dans la première étape de la séquence, appelée *relativité classique*, nous cherchons à conceptualiser le premier postulat de la théorie de la relativité restreinte, les référentiels inertiels et non inertiels, le concept d'observateur et l'addition des vitesses galiléennes. Les quatre premières situations produisent l'émergence d'IO liées à la simultanéité classique, qu'il est nécessaire de prendre en compte pour comprendre la perte de la simultanéité et sa relativité. En particulier, les situations impliquant la simultanéité nécessitent la compréhension de l'addition des vitesses galiléennes (Otero & Arlego, 2018).

Dans la deuxième étape, appelée *cinématique relativiste*, nous abordons la perte de simultanéité et discutons de la dilatation du temps, ces invariants étant nécessaires à la conceptualisation de la contraction des longueurs. Bien que ce ne soit pas nécessairement le cas en logique savante, à condition de maintenir une certaine vigilance épistémologique, éviter de reproduire cette logique favorise la conceptualisation. À cette étape, l'ajout des vitesses relativistes est également abordé, car les IO liées au deuxième postulat de la RR et l'existence d'une « vitesse limite » sont importantes pour l'introduction de la dynamique relativiste au lycée (González et al., 2022, 2024, 2025).

L'étape finale, appelée *dynamique relativiste*, aborde les conséquences dynamiques des postulats de la RR, remet en question la nature absolue de la masse et aboutit à l'expression $E = mc^2$, largement diffusée dans la société sans que sa justification soit connue.

MÉTHODOLOGIE

La séquence complète a été mise en œuvre dans quatre cours de physique de trois heures par semaine, sélectionnés intentionnellement, en Uruguay, chacun étant dispensé par le chercheur. Dans un premier temps, une mise en œuvre pilote a été réalisée dans le groupe A (N=16) en 2023. L'année suivante, dans un autre lycée, les mises en œuvre restantes ont été réalisées dans les groupes B (N=7), C (N=20) et D (N=10). Le contexte socio-économique des deux établissements est similaire et ils appartiennent à la même région. Tous les élèves sont en terminale et ont entre 17 et 19 ans. Un questionnaire à choix multiples a été administré au début et à la fin de la séquence. Les résultats du prétest ont montré un coefficient α de 0,7 (Cronbach, 1951), ce qui permet d'établir une relative similarité initiale entre les différents groupes.

Dans toutes les situations de la séquence, les IO sont identifiées en effectuant les actions suivantes. Tout d'abord, une fois la situation présentée à chaque élève, un retour individuel écrit est demandé. Ensuite, en petits groupes, les élèves discutent de la situation, puis discutent avec la classe. Enfin, la séance individuelle reprend, où une réponse finale est demandée. Conformément à la méthodologie de la recherche, tous les protocoles sont numérisés par le chercheur et remis à la classe suivante. Pendant la séance, le chercheur adopte une approche didactique (Brousseau, 1998), ce qui signifie que les élèves interagissent avec la situation sans intervention de l'enseignant.

La méthodologie est interprétative qualitative (Erikson, 1986; Moreira, 1999) et permet au chercheur d'enregistrer quatre moments de la séance, avec différents systèmes de représentation : écrit, oral, gestuel et pictural. Cette approche s'inscrit dans les tendances actuelles de la recherche en didactique des sciences, qui soulignent le rôle central des représentations multiples dans les processus d'enseignement et d'apprentissage (Diani et al., 2024). Il est à noter que les preuves des IO sont recueillies à chacun

des quatre moments d'une même séance, et celles-ci ne sont comptabilisées qu'une seule fois par séance. Dans les enregistrements initial et final, les réponses représentent des états plus stables du système cognitif. Pour la situation analysée dans cet article, 12 heures d'audio ont été transcrites et 159 protocoles écrits d'élèves ont été numérisés.

LA SITUATION DE LA DILATATION DU TEMPS

La situation vise à démontrer la dépendance des mesures temporelles à la vitesse relative entre référentiels. Dans d'autres situations précédentes de la séquence, les postulats de la RR et de la perte de simultanéité ont été abordés. La situation présentée en classe se présente comme suit :

SITUATION 6

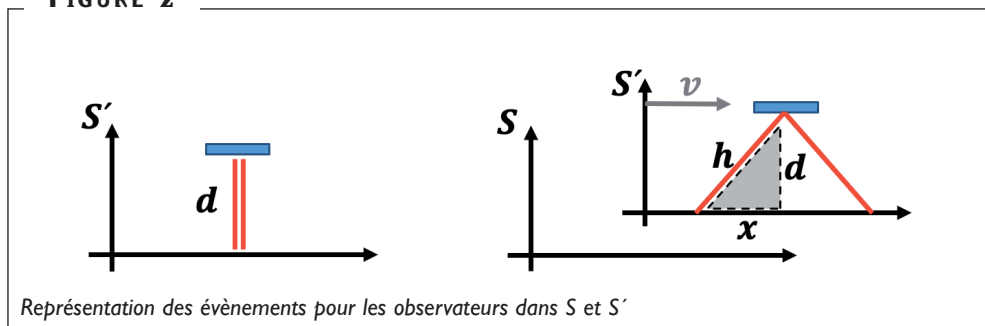
Un observateur est assis au milieu d'un bus, qui se déplace à vitesse constante (vitesse par rapport à l'autoroute). Sur le toit du bus se trouve un miroir plan. L'observateur dispose d'un dispositif capable d'émettre un rayon lumineux perpendiculairement au toit. Le rayon frappe le miroir et est réfléchi vers l'observateur.

Combien de temps faut-il au rayon lumineux pour faire l'aller-retour ? Pour :

- L'observateur dans le bus.
 - Un autre observateur debout sur l'autoroute qui regarde le bus passer.
- Vous pouvez dessiner chaque situation si vous le jugez nécessaire.

Pour répondre à cette question, il faut utiliser le second postulat et établir la distance parcourue par la lumière, selon les deux observateurs. Notons que, pour éviter toute suggestion, dans la conception de la situation, on ne propose pas de questions sur le trajet de la lumière, ni sur l'égalité des temps mesurés par chaque observateur. Étant donné que c est constant et que le trajet de la lumière dans chaque référentiel S et S' n'est pas le même, on peut conclure que pour l'observateur sur l'autoroute (OR), le temps est plus long. L'équation de dilatation du temps peut être obtenue comme suit.

FIGURE 2



Considérant le premier postulat de la relativité restreinte, pour l'observateur dans le bus (OB) situé dans le système S' , la lumière suit une trajectoire verticale à l'aller comme au retour, parcourant une distance d dans chaque section (Figure 2). Soit c la vitesse de la lumière, le temps qu'elle met à l'aller comme au retour est :

$$t' = \frac{d}{c} \quad (1)$$

En revanche, pour l'OR situé dans le système S , le trajet du rayon lumineux est oblique comme le montre la Figure 2. En analysant le triangle formé, on obtienne :

$$h^2 = x^2 + d^2 \quad (2)$$

Où x est la distance parcourue par le bus selon l'OR, et h la distance parcourue par le feu à l'aller. Puisque le bus se déplace à une vitesse v par rapport à l'itinéraire, on peut affirmer que :

$$x = v \cdot t \quad (3)$$

En outre, selon le deuxième postulat de la RR, la lumière parcourt la distance h avec une vitesse c :

$$h = c \cdot t \quad (4)$$

En remplaçant (3) et (4) dans (2), et en utilisant (1) : $t = \gamma \cdot t'$ (5) où : $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Comme $c > v$, il résulte que $\gamma > 1$, en donnant comme résultat que $t > t'$, c'est-à-dire que le temps mesuré depuis OB est toujours inférieur à celui mesuré par OR. D'autre part, nous pouvons définir le temps propre t_0 comme le temps qui s'écoule entre deux événements qui se produisent au même endroit (dans ce cas la partie inférieure de l'omnibus) et on obtient l'expression connue pour la dilatation du temps : $t = \gamma \cdot t_0$

IDENTIFICATION DES INVARIANTS OPÉRATOIRES

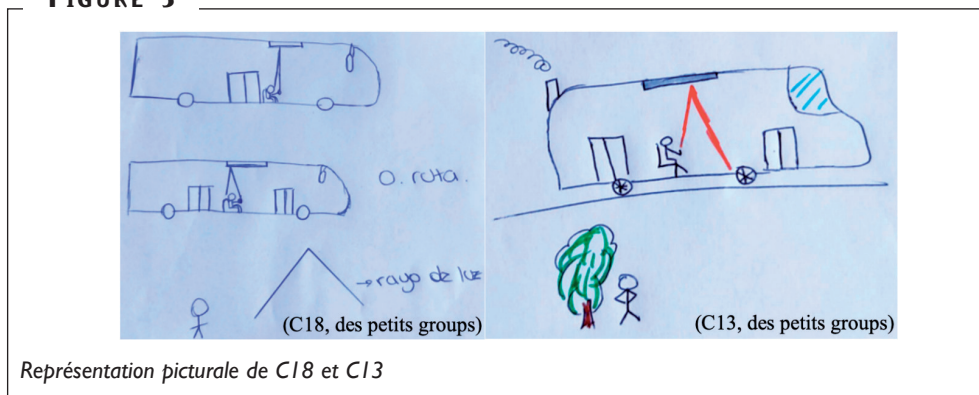
Ensuite, les IO identifiés à partir de l'analyse de l'activité des élèves dans la situation sont proposés en ce qui concerne : la trajectoire de la lumière, la dilatation du temps, la rapidité, et les deux postulats de la RR.

Invariants sur la trajectoire de la lumière

a) Pour l'OB, elle est « droite » et pour l'OR, elle est diagonale.

Cet invariant caractérise les élèves dont la trajectoire dépend du référentiel. Pour l'identifier, les indicateurs illustrés ci-dessous ont été utilisés. Les exemples correspondent à différentes instances, groupes et différents systèmes de représentation.

FIGURE 3

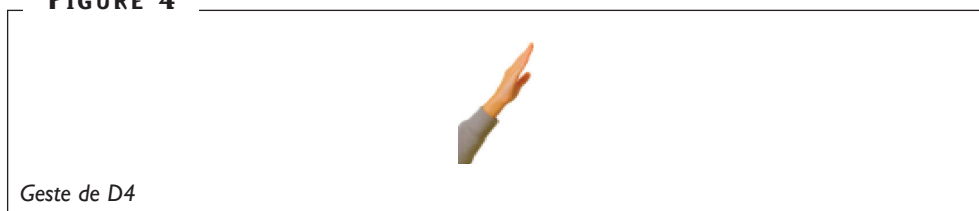


C4, anticipation, écrit : *Pour l'observateur extérieur, le rayon suit une trajectoire diagonale due au mouvement du bus.*

C9, anticipation, écrit : *De l'extérieur du bus, l'observateur extérieur voit le rayon lumineux suivre une trajectoire diagonale due au mouvement du bus, formant un triangle.*

D4, groupe-classe, oral : *La personne à l'intérieur du bus le voit comme s'il suivait une trajectoire verticale (...) (et la personne à l'extérieur) comme ceci, on voit que lorsqu'ils entrent en collision, ils viennent... (il fait le geste)*

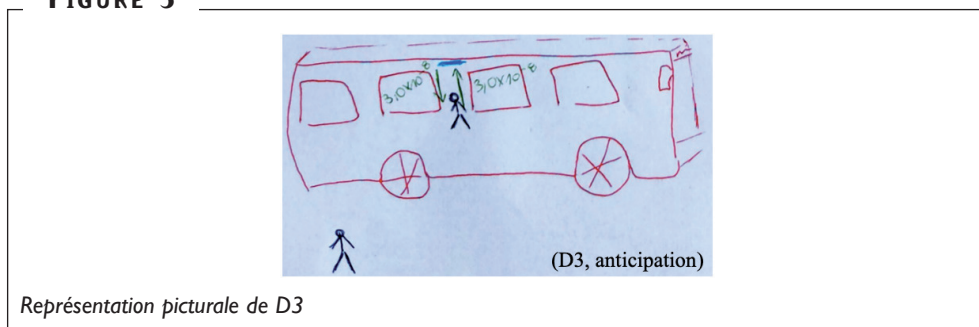
FIGURE 4



b) *La trajectoire est la même*

Cet invariant caractérise les élèves dont la trajectoire est absolue et indépendante référentiel. Pour l'identifier, des indicateurs tels que les suivants ont été utilisés.

FIGURE 5



Le Tableau 1 présente les fréquences relatives des invariants opératoires sur la trajectoire lumineuse dans les différentes instances de classe.

TABLEAU 1

<i>Invariants opératoires sur la trajectoire</i>								
IO	Anticipation		Petits groupes		Groupe classe		Final	
	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D
<i>Pour l'OB c'est « droit » et pour l'OR c'est diagonal</i>	6/16 0,37	13/37 0,35	4/16 0,25	22/37 0,59	8/16 0,50	29/37 0,78	11/16 0,69	33/37 0,89
<i>La trajectoire est la même</i>	10/16 0,63	11/37 0,30	7/16 0,44	7/37 0,19	7/16 0,44	7/37 0,19	0/16 0	0/37 0
<i>Ne sont pas identifiés</i>	0/16 0	13/37 0,35	5/16 0,41	8/37 0,22	1/16 0,06	1/37 0,03	5/16 0,31	4/37 0,11

Les résultats montrent que, dans l'anticipation, plus d'un tiers des élèves ont spontanément déclaré que les trajectoires étaient différentes et dépendaient du référentiel, même si cela n'était pas suggéré dans la formulation de la situation. Lors des interactions en petits groupes et avec le groupe-classe, la fréquence de cet invariant augmente progressivement, se consolidant à la fin, jusqu'à plus que doubler sa valeur par rapport à l'anticipation.

En revanche, l'invariant « *la trajectoire est la même* », qui ne contribue pas à la conceptualisation, diminue progressivement en fréquence jusqu'à disparaître à la dernière instance.

Invariants de la dilatation du temps

a) Le temps est différent

Cet invariant indique que, pour les élèves, le temps de trajet et de retour de la lumière dépend du référentiel. Les indicateurs suivants ont été utilisés pour l'identifier :

A22, anticipation, écrit : *La personne qui regarde de l'extérieur verra que le rayon arrivera plus lentement que la personne qui le lance, car la vitesse du bus peut fausser le temps d'arrivée du rayon.*

C17, anticipation, écrit : *L'observateur sur l'autoroute le verra plus vite que la personne dans le bus ; il met moins de temps à frapper le miroir, donc le temps de retour sera inférieur à celui du bus.*

B5, groupe-classe, parlé : *Puisque la distance est plus grande, il faudrait plus de temps pour*

atteindre la vitesse de la lumière, car la vitesse est toujours la même. Ainsi, si la distance augmente, le temps augmentera également.

b) Le temps est le même

Cet invariant caractérise les élèves qui considèrent le temps comme absolu et identique pour les deux observateurs. Pour l'identifier, les indicateurs suivants ont été utilisés.

C7, anticipation, écrit : *L'observateur à l'intérieur du bus et l'observateur sur le trajet arriveront en même temps, car le faisceau se déplace uniquement de haut en bas, et non d'un côté à l'autre. Par conséquent, l'observateur sur le trajet n'augmentera ni ne diminuera le mouvement horizontal du bus.*

D6, groupe classe, oral : *Si la lumière se déplace verticalement tandis que le bus se déplace horizontalement, je pense que les deux observateurs devraient voir la lumière apparaître et disparaître en même temps.*

A14, anticipation, écrit : *L'heure sera la même, mais pour l'observateur sur le trajet, elle sera différente.*

Le Tableau 2 présente les fréquences relatives des invariants opératoires concernant la dilatation du temps à différents moments de la séance.

TABLEAU 2

Invariants opératoires sur la dilatation du temps

IO	Anticipation		Petits groupes		Groupe classe		Final	
	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D
<i>Le temps est différent</i>	5/16 0,31	12/37 0,32	3/16 0,19	22/37 0,59	4/16 0,25	32/37 0,86	11/16 0,69	33/37 0,89
<i>Le temps est le même</i>	6/16 0,38	14/37 0,38	8/16 0,50	7/37 0,19	9/16 0,56	4/37 0,11	0/16 0	3/37 0,08
<i>Ne sont pas identifiés</i>	5/16 0,31	11/37 0,30	5/16 0,31	8/37 0,22	3/16 0,19	1/37 0,03	5/16 0,31	1/37 0,03

L'invariant « le temps est différent » est utilisé par plus d'un tiers des élèves en anticipation. Dans cette situation, ils considèrent spontanément que le temps n'est pas absolu. Cette fréquence augmente progressivement dans les interactions et fait plus que doubler dans l'instance finale, par rapport à l'anticipation. L'invariant se référant au temps absolu, en revanche, est identifié par plus d'un tiers des élèves en anticipation, et diminue progressivement dans les interactions, sa fréquence relative étant quasi nulle dans l'instance finale.

Invariants sur la vitesse

a) La vitesse est la distance proportionnelle au temps.

Cet invariant indique que les élèves conceptualisent correctement la vitesse comme une relation entre deux quantités, en l'occurrence la longueur du trajet et le temps. Les indicateurs suivants ont été utilisés pour l'identifier.

FIGURE 6

Calculs faits par C8

DI3 : J'ai fixé T, ou temps, à 2D, qui est la distance, divisée par C, la vitesse de la lumière.

Le Tableau 3 présente les fréquences relatives des invariants liés à la vitesse à différents instants de la classe.

TABLEAU 3

Invariants opératoires sur la vitesse

IO	Anticipation		Petits groupes		Groupe classe		Final	
	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D
<i>La vitesse est la distance proportionnelle au temps</i>	3/16 0,19	19/37 0,51	11/16 0,61	31/37 0,84	11/16 0,69	34/37 0,92	9/16 0,56	35/37 0,95
<i>Ne sont pas identifiés</i>	13/16 0,81	18/37 0,49	5/16 0,39	6/37 0,16	5/16 0,31	3/37 0,08	7/16 0,44	2/37 0,05

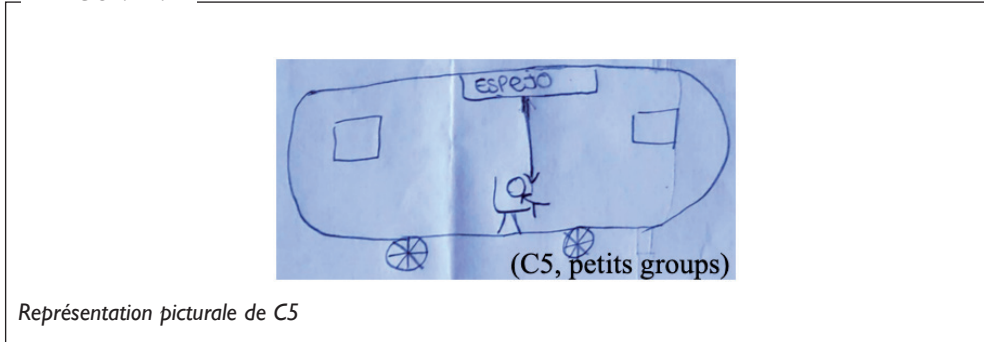
Les résultats montrent que l'invariant « la vitesse est la distance proportionnelle au temps » est utilisé par plus de la moitié des élèves dans l'anticipation. Sa fréquence relative augmente significativement lors des interactions en petits groupes et en classe. Enfin, presque tous les élèves l'utilisent. Il est à noter que la vitesse est un invariant qui intègre également le champ conceptuel de la proportionnalité.

Invariants sur le premier postulat

a) Pour l'observateur à l'intérieur du bus, sa vitesse est nulle.

Cet invariant indique que les élèves utilisent correctement le premier postulat de la théorie de la relativité restreinte. Les indicateurs sont :

FIGURE 7



Représentation picturale de C5

On peut noter que C5 trace la trajectoire selon le système de référentiel inertiel du bus, car il ne représente pas la vitesse par une flèche et n'utilise aucun autre indicateur, c'est-à-dire que son analyse se réfère au référentiel de l'autoroute. Ces résultats coïncident avec ceux rapportés par Otero et al. (2015).

DI3, groupe classe, oral : Ce qui se passe, c'est que de l'extérieur, on voit le bus passer, mais à l'intérieur, c'est comme si on était immobile. Parce qu'on ne bouge pas, le bus bouge, mais on est à l'intérieur.

Le Tableau 4 présente la fréquence relative des invariants liés au premier postulat.

TABLEAU 4

Invariants opératoires sur le premier postulat

IO	Anticipation		Petits groups		Group de classe		Finale	
	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D
<i>Pour l'observateur à l'intérieur du bus, sa vitesse est nulle</i>	12/16 0,75	18/37 0,49	13/16 0,81	30/37 0,81	14/16 0,88	36/37 0,97	11/16 0,69	34/37 0,92
<i>Ne sont pas identifiés</i>	4/16 0,25	19/37 0,51	3/16 0,19	7/37 0,19	2/16 0,12	1/37 0,03	5/16 0,31	3/37 0,08

Comme le montre le Tableau 4, près de la moitié des élèves utilisent le premier postulat par anticipation, et cette fréquence relative augmente progressivement au cours des interactions. Enfin, presque tous les élèves affirment que, dans le référentiel du bus, celui-ci a une vitesse nulle.

Invariants sur le deuxième postulat

a) *La lumière a la même vitesse pour les deux.*

Cet invariant fait référence au deuxième postulat de la RR et les élèves l'utilisent correctement pour déterminer le temps. Les indicateurs sont les suivants.

C2, anticipation, écrit : *Pour les deux observateurs le rayon de lumière va à 3×10^8 m/s.*

C21, petits groupes, écrit : *La vitesse dans les deux cas sera la même, parce que la lumière est une constante.*

b) *À la vitesse de la lumière s'ajoute celle du bus*

Cet invariant caractérise les élèves qui n'utilisent pas le second postulat, mais l'ajout de vitesses classiques. Les indicateurs sont :

D11, anticipation, écrit : *l'observateur de l'autoroute voit le rayon plus rapide parce que de sa vue il est plus long par le mouvement du bus.*

Dans le Tableau 5, on trouve les fréquences relatives des invariants opératoires sur le second postulat.

TABLEAU 5

Invariants opératoires concernant le deuxième postulat

IO	Anticipation		Petits groupes		Group de classe		Finale	
	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D
<i>La lumière a la même vitesse pour les deux</i>	5/16 0,31	11/37 0,30	8/16 0,50	15/37 0,41	7/16 0,44	26/37 0,70	11/16 0,69	36/37 0,97
<i>la vitesse de la lumière s'ajoute celle du bus</i>	1/16 0,07	6/37 0,16	0/16 0	13/37 0,35	3/16 0,19	6/37 0,16	0/16 0	0/37 0
<i>Ne sont pas identifiés</i>	10/16 0,62	20/37 0,64	8/16 0,50	9/37 0,24	6/16 0,37	5/37 0,14	5/16 0,31	1/37 0,03

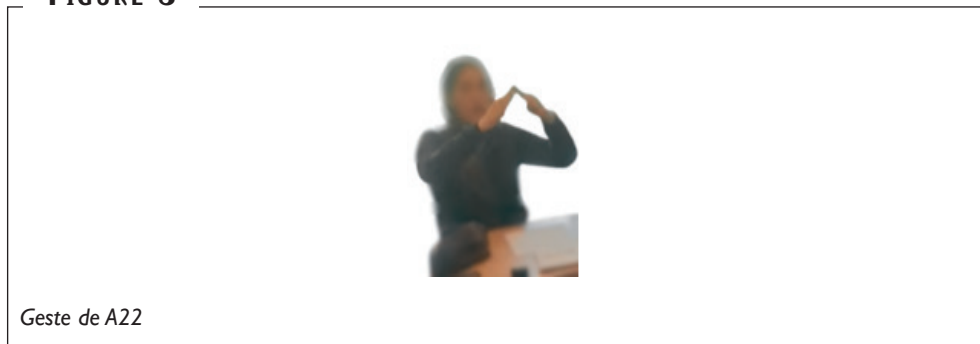
Ces résultats montrent que, dans l'anticipation, près d'un tiers des élèves utilisent le second postulat de la RR et une infime partie utilise l'addition de vitesses classique. Autrement dit, la plupart n'ont pas de réponse dans l'anticipation. Ensuite, dans les instances successives, augmente progressivement la fréquence relative de l'invariant se référant au second postulat, qui est finalement utilisé par presque tous les élèves.

LES INVARIANTS DANS LE GROUPE DE CLASSE

Les fragments de dialogues et gestes proposés ci-dessous montrent comment les invariants, analysés séparément plus haut, émergent ensemble lors des mises en commun dans le groupe classe. Ainsi, à partir du geste effectué par A22 pour représenter

la trajectoire de la lumière vue par l'observateur sur l'autoroute (Figure 8), d'autres élèves comme A19 s'interrogent à ce sujet et affirment qu'une trajectoire a plus de longueur que l'autre.

FIGURE 8



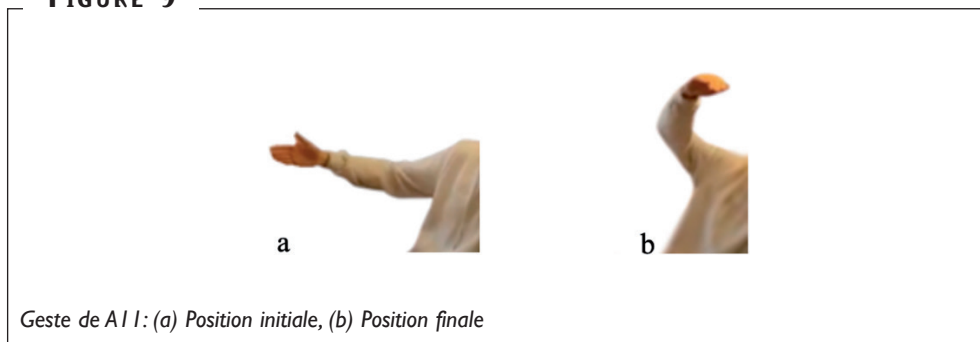
A19 : *ils m'ont fait réfléchir, (...) celui qui est dehors voit bouger l'autobus, c'est-à-dire qu'il ne voit pas (directement) la ligne de lumière. Cependant, celui qui est à l'intérieur du bus le voit droit.*

Dans le même sens, au cours de cette classe, d'autres élèves comme A11 font des gestes qui sont convaincants pour réaffirmer la différence de trajectoire, ce qui conduit à d'autres comme A15 à l'inférence manifeste que le temps que prend la lumière sur la plus longue trajectoire doit être plus long.

E : *Avez-vous changé votre point de vue ?*

A11 : *Oui ! nous pensons que (...) la lumière va réellement parcourir plus loin pour la personne de l'extérieur. Parce que (...) le premier éclair vous allez commencer à le voir ici (Figure 9.a), mais comme le bus se déplace, la lumière se déplace aussi. Alors vous allez le voir d'abord ici : (Figure 9.a), mais quand il arrive en haut possible que vous le voyez ici : (Figure 9.b)*

FIGURE 9



A15 : *Alors, le temps doit changer !*

Lors de la mise en commun d'un autre groupe, on voit comment B4 change d'avis sur la trajectoire de la lumière sous l'explication de B3.

E : Quelle est la trajectoire de la lumière ? Par exemple, pour l'observateur à l'intérieur, comment la lumière se déplacerait-elle ?

B4 : Verticalement.

E : Et pour l'extérieur aussi ?

B4 : Oui.

B3 : Je ne sais pas si je les verrais de la même façon parce que le bus se déplace. Si je suis debout ici, la lumière monte, je regarde qui monte, mais à un moment donné le bus va bouger et je ne vais plus le voir comme s'il descendait au même endroit. Vous comprenez ? C'est parce que le bus se déplace. Non pas parce que la lumière se déplace, mais parce que le bus se déplace.

B4 : Mais il ne change pas de position.

B3 : Le regarder de l'extérieur change, parce que le bus a bougé. La personne s'est déplacée, la lumière, le rayon s'est déplacé.

B4 : Ah, bien sûr, le bus avec tout à l'intérieur !

DISCUSSION

Les résultats proposés dans les tableaux montrent que la situation fonctionne correctement pour produire l'émergence d'invariants opératoires qui conduisent à la dilatation du temps. En général, cela est insinué dans l'anticipation pour environ un tiers des élèves et universalisé dans leurs réponses finales.

Plus spécifiquement, nous observons que, pendant l'anticipation, l'invariant lié à la rapidité se présente avec une fréquence plus élevée que les autres (0.51). Nous attribuons cela au fait que cet invariant fait partie du champ conceptuel des structures additives et multiplicatives (Vergnaud, 1990) qui est abordé de manière répétée et prolongée tout au long de la scolarité, du moins en ce qui concerne la proportionnalité directe entre deux grandeurs. De plus, cet invariant doit être disponible au moins dans la condition explicite. Ainsi, les élèves relient la longueur de la trajectoire avec le temps, et en assumant la constance de la vitesse de la lumière dans tous les systèmes de référence inertiels, ils concluent que le temps n'est pas le même pour les deux observateurs.

À ce moment de la séquence, il est évident que la conception de la situation est appropriée car elle demande combien de temps prend la lumière, sans suggestions d'aucune sorte. Ainsi, il est remarquable que, de manière directe, les buts implicites des élèves orientent leur prise d'information vers la trajectoire de la lumière. Ceci réaffirme le pouvoir explicatif de la théorie de Vergnaud en considérant la relation schéma-situation plutôt que sujet-objet. Autrement dit, le schéma en tant qu'ensemble dynamique et fonctionnel dirige et contrôle toute l'activité du sujet dans la situation (les objectifs, la prise d'information, les règles d'action et de contrôle, et les déductions).

Le rôle des interactions entre les sujets dans les petits groupes et lors de la mise en commun est également remarquable. Ces instances affectent la conceptualisation et favorisent la prise de conscience et l'explicitation des invariants. Comme nous l'avons signalé, ces interactions augmentent les fréquences relatives des invariants opératoires qui contribuent à la conceptualisation. Ainsi, comme on le voit dans la section 7, les invariants de plusieurs élèves sont modifiés par rapport aux instances précédentes grâce aux arguments qu'offrent leurs camarades. Les moments de travail en groupe supposent une plus grande instabilité du système cognitif et des schèmes, raison pour laquelle les résultats doivent être analysés avec prudence. Cependant, comme le note Vergnaud (2013), sans perturbations et stabilisations successives, il ne peut pas y avoir de progrès dans la conceptualisation. En ce sens, et surtout l'anticipation et dans une moindre mesure l'instance finale, sont considérées comme plus stables dans l'évolution des invariants opératoires, comme on le voit dans les tableaux. En tout cas, les schèmes et l'activité qu'ils engendrent sont dynamiques dans l'interaction avec la situation.

CONCLUSION

Ce travail présente des résultats sur la conceptualisation de la dilatation du temps qui résultent de l'application d'une séquence complète, spécialement conçue pour l'enseignement-apprentissage de la RR, dans quatre cours de l'enseignement secondaire uruguayen. Les résultats soutiennent l'efficacité de cette situation pour produire l'émergence et le développement d'invariants opératoires favorables à la conceptualisation de la dilatation du temps dans un grand nombre de sujets. On souligne le pouvoir explicatif de la théorie des champs conceptuels et de la notion de schéma pour comprendre et générer l'activité des élèves dans la situation. Contrairement à l'accent mis par les recherches existantes sur l'enseignement de la relativité restreinte au lycée, notre objectif n'est pas d'identifier les erreurs en physique classique, ni de qualifier les invariants comme étant physiquement corrects ou non, mais de montrer une possible genèse conceptuelle de la dilatation du temps, qui se construit à partir d'invariants classiques comme celui relatif à la notion de vitesse, ajouté aux postulats relativistes. Par ailleurs, les résultats obtenus ouvrent la voie à un enrichissement de la séquence pédagogique par le développement d'outils éducatifs, tels que des jeux numériques conçus à partir des situations analysées dans cette recherche. Cette approche pourrait constituer un prolongement pertinent, comme cela a déjà été envisagé dans d'autres contextes disciplinaires (Otero et al., 2024). Enfin, les résultats montrent, en considérant les conditions de la recherche qualitative, que les élèves peuvent apprendre des notions relativistes fondamentales à l'école secondaire.

RÉFÉRENCES

- Alstein, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., & van Joolingen, W. R. (2021) Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2). [https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEduc Res.17.023101](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023101)
- Arlego, M., & Otero, M. (2017). Teaching basic Special Relativity in high school: The role of classical kinematics. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 9(1), 9-12.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique : Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Paris, France: Vrin.
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble, France: La Pensée Sauvage.
- Choudhary, R., Kraus, U., Kersting, M., Blair, D., Zahn, C., Zadnik, M., & Meagher, R. (2019). Einsteinian Physics in the classroom: Integrating physical and digital learning resources in the context of an international research collaboration. *The Physics Educator*, 01(04):1950016. <https://doi.org/10.1142/s2661339519500161>
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>
- Diani, R., Viyanti, Lengkana, D., Jalmo, T., Destiana, A., Saregar, A., & Putra, F. D. (2024). Trends, challenges, and opportunities of multiple-representation in Science learning: A systematic literature review. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 18(1), 29-52. <https://doi.org/10.26220/rev.4657>
- Dimitriadi, K., & Halkia, K. (2012). Secondary students' understanding of basic ideas of Special Relativity. *International Journal of Science Education*, 34(16), 2565-2582. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.705048>
- Einstein, A. (1905). On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen Der Physik*, 322(10), 891-921. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-006995-1.50014-4>
- Erickson, F. (1986). Qualitative methods in research on teaching. In M. C. Wittrock (Ed.), *Handbook of Research on Teaching* (3rd ed., pp. 119-161). New York: Macmillan Publishing Co.
- González, R., Otero, M. R., & Arlego, M. (2022). Análisis del enfoque de la dinámica relativista en los libros de texto de secundaria y la universidad. *Revista de Enseñanza de la Física*, 34, 211-219. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/39833>
- González, R., Otero, M. R., & Arlego, M. (2024). Sitios web educativos para enseñar la dinámica relativista en el nivel secundario y universitario. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 19(1), 1-12. <https://reiec.unicen.edu.ar/reiec/article/view/430>
- González, R., Otero, M. R., & Arlego, M. (2025). Enseñanza-aprendizaje de la dinámica relativista en la escuela secundaria uruguaya. Paper presented at XVI Conferencia Interamericana de Educación en Física (XVI CIAEF), Valparaíso, Chile.
- Hewson, P. W. (1982). A case study of conceptual change in Special Relativity: The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4(1), 61-78.
- Hughes, T., & Kersting, M. (2021). The invisibility of time dilation. *Physics Education*, 56(2). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abce02>
- Kamphorst, F., Vollebregt, M. J., Savelsbergh, E. R., et al. (2023). An educational reconstruction of special relativity theory for secondary education. *Science & Education*, 32, 57-100. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00283-2>

- Kersting, M., & Blair, D. (2021). *Teaching Einsteinian Physics in schools*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003161721>
- Kizilcik, H. S., & Yavas, P. U. (2017). Investigating the reasons of difficulty understanding of students in Special Relativity topics. *Cukurova University Faculty of Education Journal*, 46(2), 399-426. <https://doi.org/10.14812/cuefd.297883>
- Levrini, O., & diSessa, A. A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4, 010107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107>
- Moreira, M. A. (1999). *Investigación en enseñanza: Aspectos metodológicos* (Texto de Apoyo n.º 1). Universidad de Burgos / Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física.
- Muñoz, E. (2020). *Enseñanza de conceptos básicos de la Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria colombiana*. Tesis de Doctorado en Enseñanza de las Ciencias. Facultad de Ciencias Exactas UNICEN, Tandil, Argentina.
- Otero, M. R. (2025). Esquemas e conceptualização em física e na formação de professores de matemática. In S. Almouloud, V. Rezende, C. Nogueira, & A. Teles (Eds), *Teoria dos campos conceituais: Fundamentos teórico-metodológicos para a pesquisa e a formação*. Educ – Editora da PUC-SP (in press).
- Otero, M. R., & Arlego, M. (2016). *Secuencia para enseñar la Teoría Especial de la Relatividad en la Escuela Secundaria*. Tandil, Argentina: Ed. UNICEN.
- Otero, M. R., & Arlego, M. (2018). Relativity of the simultaneity in high school: an analysis based on the Theory of the Conceptual Fields. *Review of Science, Mathematics & ICT Education*, 12(1), 61-83. <https://doi.org/10.26220/rev.2878>
- Otero, M. R., Arlego, M., & Prodanoff, F. (2015). Design, analysis and reformulation of a didactic sequence for teaching the Special Theory of Relativity in high school. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 37(3), 3401. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173731891>
- Otero, M. R., Arlego, M., & Prodanoff, F. (2016). Teaching the basic concepts of the Special Relativity in the secondary school in the framework of the Theory of Conceptual Fields of Vergnaud. *Nuovo Cimento - Societa Italiana di Fisica Sezione C*, 38(3), 1-13. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2015-15108-0>
- Otero, M. R., Gazzola, M. P., Castro Filho, J. A., & Gomez, A. S. (2024). Teaching and learning mathematics using digital games in the classroom. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 18(2), 69-87. <https://doi.org/10.26220/rev.5065>
- Ozcan, O. (2017). Examining the students' understanding level towards the concepts of Special Theory of Relativity. *Problems of Education in the 21st Century*, 75(3), 263-269.
- Panase, S., Ramadas, J., & Kumar, A. (1994). Alternative conceptions in Galilean relativity: Frames of reference. *International Journal of Science Education*, 16(1), 63-82. <https://doi.org/10.1080/0950069940160105>
- Prodanoff, F. (2015). *Enseñanza de las nociones básicas de la Teoría Especial de la Relatividad (TER) en la escuela Secundaria*. Tesis de Doctorado en Enseñanza de las Ciencias. Facultad de Ciencias Exactas UNICEN, Tandil, Argentina.
- Selçuk, G. S. (2011). Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity. *European Journal of Physics*, 32, 1. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/32/1/001>
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, 69(7 SUPPL. 1), S24-S35.

- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238-1248.
- Stein, B., Stein, H., & Galili, I. (2023). The concept of observer in science teaching in middle school: Pre-instructional knowledge as a lever for learning rather than an obstacle. *Education Sciences*, 13(1), 95. <https://doi.org/10.3390/educscil3010095>
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), 133-170.
- Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. En J. M. Barbier (Ed.), *Savoirs théoriques, savoirs d'action* (pp. 275-292). Paris: Presses Universitaires de France.
- Vergnaud, G. (2011). La pensée est un geste : Comment analyser la forme opératoire de la connaissance. *Enfance*, 63(1), 37-48.
- Vergnaud, G. (2013). Pourquoi la théorie des champs conceptuels ? *Infancia y Aprendizaje*, 36(2), 131-161.
- Villani, A., & Pacca, J. L. A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1), 55-66.

