



HAL
open science

Rafraîchir la théorie de la relativité

Guy Bernard

► **To cite this version:**

| Guy Bernard. Rafraîchir la théorie de la relativité. 2024. hal-04408455

HAL Id: hal-04408455

<https://hal.science/hal-04408455v1>

Preprint submitted on 22 Jan 2024

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.

Rafraîchir la théorie de la relativité

Bernard GUY

Mines Saint-Etienne, Institut Mines Télécom

bernard.guy15@wanadoo.fr

Texte écrit sur l'invitation de la revue *Intentio*, parution courant 2024
(Centre Gilles Gaston Granger, CNRS, Aix-Marseille Université)
Version non définitive
Février 2024

Résumé

Il faut reprendre la théorie de la relativité. Tout simplement parce qu'elle n'honore pas correctement la question du temps. Elle évite de l'affronter, prenant son objet pour acquis, caché qu'il serait dans des horloges ponctuelles qui n'existent pas. Pour autant, il ne s'agit pas de s'en défaire, ni modifier fondamentalement son formalisme mathématique. Il faudrait même la considérer comme exprimant la structure générale de notre compréhension de l'espace et du temps, débordant le domaine de la physique, et ayant son sens jusque dans les sciences humaines et sociales. Elle nous montre le bon chemin d'une relation étroite entre temps et espace. Mais elle en reste au niveau des mesures (les liens entre temps et espace sont ceux des lectures des horloges et des règles). Elle ne se situe pas de façon plus profonde au niveau des concepts. Dans la situation actuelle, le poids de la relativité a isolé la physique des sciences humaines et sociales ; il a instauré une coupure dommageable, au point que l'on peine parfois à trouver un sens commun au temps physique et au temps humain. Il faut relire la théorie de la relativité, l'ouvrir à d'autres façons de raisonner (la raison complexe et ses circularités), modifier les images mentales sur lesquelles elle est construite. Elle doit accompagner l'élaboration du concept de temps, en l'associant à l'espace et au mouvement (tel qu'il est d'abord perçu et habité par l'homme), et non le prendre comme déjà établi. Elle doit en cela être indépendante d'un cadre préexistant, ou *background independent*. Cette relecture offre des voies de solution pour les difficultés plus ou moins importantes (d'ordre mathématique ou interprétatif) apparues depuis sa fondation. Elle la rend apte à remplir de nouveaux services et à restaurer le lien entre sciences physiques et sciences humaines et sociales sur la question du temps.

Mots-clés : théorie de la relativité ; rationalité relationnelle ; rationalité substantielle ; cognition incarnée ; espace ; temps ; mouvement ; vitesse de la lumière ; apories du temps ; sciences humaines et sociales ; sciences physiques ; relecture

Refreshing the theory of relativity

The theory of relativity must be reworked. Quite simply because it does not properly address the question of time. It avoids confronting it, taking its object for granted, hidden as it is in punctual clocks that do not exist. However, it is not a question of getting rid of it, or fundamentally modifying its mathematical formalism. We should even consider it as expressing the general structure of our understanding of space and time, extending beyond the realm of physics and into the human and social sciences. It points the way to a close relationship between time and space. But it remains at the level of measurements (the links between time and space are those of clock and ruler readings). It does not go deeper into concepts. In the present situation, the weight of relativity has isolated physics from the human and social sciences; it has created a damaging disconnect, to the point where we sometimes struggle to find a common meaning for physical and human time. We need to re-read relativity theory, open it up to other ways of reasoning (complex reason and its circularities), and modify the mental images on which it is built. It must accompany the development of the concept of time, associating it with space and movement (as first perceived and inhabited by man), rather than taking it as already established. In so doing, it must be independent of any pre-existing frame, or background independent. This re-reading offers solutions to the more or less significant difficulties (of a mathematical or interpretative nature) that have arisen since its foundation. It makes it capable of fulfilling new functions and restoring the link between the physical sciences and the human and social sciences on the question of time.

Keywords: relativity theory; relational rationality; substantial rationality; embodied cognition; space; time; motion; speed of light; aporias of time; human and social sciences; physical sciences; rereading

Text written at the invitation of the journal *Intentio*, to be published in 2024
(Centre Gilles Gaston Granger, CNRS, Aix-Marseille University)
Non-final version
February 2024

Introduction

Il faut reprendre la théorie de la relativité¹. Tout simplement parce qu'elle n'honore pas correctement la question du temps. Elle évite de l'affronter, prenant son objet pour acquis, caché qu'il serait dans des horloges ponctuelles qui n'existent pas. Pour autant, il ne s'agit pas de s'en défaire, ni modifier fondamentalement son formalisme mathématique : elle a montré son efficacité, elle qui a été construite, polie et employée par tant de chercheurs. Il faudrait même la considérer comme exprimant la structure générale de notre compréhension de l'espace et du temps, débordant le domaine de la physique, et ayant son sens jusque dans les sciences humaines et sociales (SHS). Elle nous montre en effet le bon chemin d'une relation étroite entre temps et espace. Mais elle en reste au niveau des mesures (les liens entre temps et espace sont ceux des lectures des horloges et des règles), et il faut des vitesses proches de celle de la lumière pour avoir des effets qui comptent. Elle ne se situe pas de façon plus profonde au niveau des concepts. Dans la situation actuelle, le poids de la relativité a isolé la physique des sciences humaines et sociales ; il a instauré une coupure dommageable, au point que l'on peine parfois à trouver un sens commun au temps physique et au temps humain.

Il faut relire la théorie de la relativité, l'ouvrir à d'autres façons de raisonner, modifier les images mentales sur lesquelles elle est construite. Elle doit accompagner l'élaboration du concept de temps, en l'associant à l'espace et au mouvement, et non le prendre comme déjà établi. Elle doit en cela être indépendante d'un cadre préexistant, ou *background independent*². Cette relecture offre des voies de solution pour les difficultés plus ou moins importantes (d'ordre mathématique ou interprétatif) apparues depuis sa fondation. Elle la rend apte à remplir de nouveaux services et à restaurer le lien entre sciences physiques et sciences humaines et sociales sur la question du temps.

Nous adopterons le plan suivant. Dans une première partie, nous listerons les raisons de remettre l'ouvrage sur le métier dans le domaine de la physique. Nous ferons une halte, en une démarche pour l'instant parallèle, sur les sciences humaines et sociales, soulignant quelques difficultés propres, ou apories, qu'elles ont en matière de temps. Nous proposerons ensuite (2^o partie) deux grandes dimensions de solution des problèmes posés : l'une mettant en valeur une rationalité relationnelle, non développée aux moments de la fondation de la

¹ Nous englobons ses deux versions, restreinte et générale.

² La relativité générale, si elle offre une certaine latitude dans le choix des variables mathématiques d'espace et de temps, reste *background dependent* pour ce qui est des concepts d'espace et de temps. Elle les prend déjà là.

relativité (on usait d'une rationalité substantielle) ; l'autre appuyée sur la conviction que les développements théoriques ne peuvent s'affranchir de la connaissance incarnée (*embodied cognition*), comme la phénoménologie nous le rappelle de son côté. Nous exprimerons alors (3^o partie) notre façon d'appréhender la relativité, *en mettant le concept de mouvement au centre*, et évoquerons brièvement le statut de la « vitesse » de la lumière. Dans une quatrième partie, nous passerons en revue quelques-uns des apports solides de notre relecture de la théorie de la relativité (validés par des pairs dans des revues à comité de lecture), ou en cours d'examen par la communauté scientifique, dans les différents domaines cités, autant du côté des sciences de la nature que des sciences humaines et sociales (le détail de ces apports sera repoussé dans deux annexes³). Nous mettrons ensuite notre approche en perspective (5^o partie) : d'autres ont proposé des abords différents (relativité d'échelle, constructivisme) : répondent-ils aux questions que nous posons ? Quel éclairage original apportent-ils ? Nous terminerons (partie 6) par quelques mots de conclusion. Du fait du rôle pivot de la théorie de la relativité, nous aurons tendance à identifier les deux expressions - *relecture de la relativité* et - *approfondissement des liens temps espace*, sans alors forcément mentionner la théorie physique.

1. Pourquoi il est utile de reprendre la théorie de la relativité et sa compréhension du temps et de l'espace

1.1. Rappel : la théorie de la relativité telle que nous la recevons

En quelques mots, la théorie de la relativité dépasse l'usage newtonien d'un espace et d'un temps absolus. Définissant des repères d'espace, elle vient, sous la contrainte de différents postulats, associer variables d'espace et de temps à chaque repère, et montrer les relations de passage des unes aux autres (transformations de Lorentz), manifestant de cette façon la perte du caractère absolu. La relativité restreinte se limite au cas sans gravitation, tandis que la relativité générale étend les résultats de la première au cas quelconque, sous réserve d'utiliser des espaces non euclidiens (la métrique est fonction du contenu local en masse-énergie). Suivant les auteurs, les différents postulats peuvent changer (identité des lois dans les

³ Des extraits, plus ou moins transformés, de textes déjà déposés seront donnés. Ceux-ci sont en grand nombre : c'est, côté face, la manifestation que les approches proposées ont de multiples voies d'application ; c'est aussi, côté pile, pour les textes déposés sur les archives HAL, l'aveu que les voies ouvertes ne sont pas encore toutes éprouvées par la critique des pairs dans des revues à comité de lecture.

différents repères, constance de la vitesse de la lumière, structure de groupe...), aucun des postulats n'allant jusqu'à remettre en cause l'usage de départ des variables spatiales et temporelles qui sont là sans discussion. Ainsi l'image mentale⁴ que le chercheur se fait dans le cadre standard lorsqu'il écrit ses équations comporte deux éléments (Fig. 1) : - un quadrillage régulier définissant les repères d'espace (en relativité générale, ce quadrillage pourra être déformé par les corps qui y sont plongés) ; - des horloges ponctuelles, souvent supposées synchronisées (de toute éternité ?) situées aux différents nœuds de ce quadrillage et permettant d'y évaluer le (mystérieux) flux temporel (la légende de la figure fournit d'autres éléments sur les soubassements de cette représentation).

Passons maintenant en revue divers points qui nous apparaissent non satisfaisants dans le maniement courant de la théorie de la relativité. Pour davantage de précisions, on se reportera à nos travaux (par exemple Guy, 2011, 2019a), ainsi qu'à ceux des nombreux auteurs qui y sont cités.

1.2. La relativité prend le temps pour acquis

La raison primordiale de reprendre les choses se manifeste d'emblée par le fait que la théorie ne se pose pas la question de l'existence du temps. Or ce concept ne va pas de soi. Il fait par ailleurs l'objet de nombreuses discussions, autant par les philosophes que par les physiciens. Sans nier l'utile fonctionnement des équations contenant le paramètre t , et qui a un sens par lui-même, il faut tenter de se situer en amont et coconstruire le concept correspondant. Un symptôme de cette difficulté gommée est, lorsqu'il s'agit de répondre à la question du temps, l'appel « circulaire » aux horloges (« le temps est ce que l'on lit sur une bonne horloge »). Et les horloges sont considérées comme ponctuelles. Le temps propre est également abondamment utilisé (« c'est le temps lu sur une horloge attachée à l'objet étudié »). Tout ceci ne correspond à rien de concret. Qu'y a-t-il dans une horloge ? Si on l'ouvre, on constatera que *le temps qu'on y lit est un point de vue sur un mouvement.*

Une autre façon qu'ont les physiciens de répondre à la question du temps est de se rapporter à une fréquence, offerte par tel atome⁵, comme isolée du reste et jugeant un temps pur (et qui ne dériverait pas sur des milliards d'années !). Cette voie n'est pas non plus satisfaisante. H.

⁴ Avec la phénoménologie, nous disons (et redisons) que même les concepts les plus purs de la physique ne peuvent être séparés de la pleine expérience humaine.

⁵ L'étalon de temps, la seconde, est défini à partir de la fréquence associée à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de Césium. Ceux-ci sont révélés par l'action d'un champ magnétique (effet Zeeman).

Poincaré a signalé le caractère circulaire de la définition (qui décide de la constance de la fréquence définissant le temps ?). On peut se demander aussi comment considérer cet atome comme ponctuel, lui dont les « vibrations » font intervenir les interactions entre ses composants (électrons, protons et neutrons) ? La prévision des fréquences définissant le temps passe par la solution de l'équation de Schrödinger où variables spatiales et temporelles sont associées. La fréquence n'est pas « seule » puis transmise (après sa « fabrication ») par une onde. C'est *la* fréquence de *l'onde* associée au photon qui récupère l'énergie de l'électron passant d'un niveau à un autre de l'atome (via la relation entre fréquence et énergie $E = h\nu$). Cette fréquence est donc indissociable de la propagation (du mouvement) de l'onde à la vitesse c . Les niveaux d'énergie E_i sont parmi les premiers résultats de la résolution de l'équation de Schrödinger et font intervenir les nombres quantiques associés aux différentes fonctions d'onde (n. q. principal, secondaire, etc.). Dans les horloges atomiques on tient aussi compte d'effets Doppler éventuels, autre façon de dire que le mouvement des atomes et ses variations est pris en compte. Au total, la séparation de la fréquence d'avec la propagation de l'onde qui nous la transmet est une pure commodité de l'esprit qui ne correspond à rien de possible. C'est alors fabriquer un temps fiction⁶ utile pour penser mais qui ne fait pas l'économie d'un temps concret toujours associé à un mouvement...

En bref nous dirons : non, ce n'est pas une approximation banale de considérer les horloges ponctuelles et de continuer notre chemin comme si de rien n'était. C'est une façon commode de ne pas s'interroger sur le temps.

1.3. La relativité garde deux concepts distincts d'espace et de temps

Le commentaire précédent s'étend à l'espace. La relativité postule l'existence de règles graduées, dont les points constitutifs sont rigidement liés entre eux. Avec elles, on définit un quadrillage tri-dimensionnel repérant les points de l'espace. Ce faisant, on s'appuie une nouvelle fois sur des objets qui ne correspondent à rien de concret : qui connaît une règle graduée rigide de 150 millions de kilomètres ? Le fait de parler de rigidité suppose des situations où celle-ci ne serait pas satisfaite. - Dans quel espace observer la rigidité, ou la non

⁶ Nous reviendrons plus loin sur l'espace et le temps fictionnels, obtenus par saut à partir d'un espace et d'un temps concrets, appuyés sur les entités matérielles : les objets fictionnels se détachent de tout support matériel mais en sont le prolongement ou la trace. Ainsi, pour ce qui concerne l'espace, par exemple, après avoir appuyé la forme de la terre sur les bornes matérielles qui y sont plantées, on définit une trame géométrique abstraite : elle en est le prolongement, mais en devient indépendante au point que les points matériels qui avaient servi à la définir peuvent en retour être repérés sur elle dans un éventuel déplacement. La circularité cachée dans ce procédé reste le plus souvent implicite. Ainsi aussi, après avoir appuyé l'espace de l'univers sur les galaxies, on en vient à parler d'un espace (fiction), contenant les galaxies, qui se dilaterait « tout seul ».

rigidité, de l'échafaudage définissant l'espace ? Il faut imaginer un second échafaudage, englobant le premier (le caractère fictionnel de celui-ci se révèle...). - Comment éviter de faire appel au temps dans l'examen d'une déformation possible des règles ? La propriété de rigidité n'existe pas (pas davantage que la ponctualité des horloges) ; elle renvoie à un espace de repérage conventionnel dont le statut doit être précisé, en association avec celui du temps.

Lorsque la relativité annonce étudier un continuum espace-temps, elle relie les valeurs des grandeurs associées, mais garde deux concepts séparés, appuyés sur deux types d'outils distincts, règles et horloges⁷. Une démarche plus appropriée doit unir les deux concepts dans celui du mouvement (comme on l'a annoncé). Ponctualité des horloges et rigidité des règles : certes nous devons à un moment donné fabriquer une représentation fictive du monde ; mais la fiction doit être un aboutissement, et non énoncée *a priori*. Car c'est tout le monde réel qui risque de nous échapper, faute de n'avoir pas repéré correctement les hypothèses faites.

1.4. La relativité ne regarde pas les questions et objections des physiciens critiques

Dès les débuts de la formulation de la théorie de la relativité, des physiciens, dits critiques, ont émis des réserves et souligné des difficultés qu'ils voyaient dans son exposition et son développement. Dingle (1972) fut l'un des premiers ; il était très connu comme physicien, ayant d'abord épousé la théorie, avant de s'en écarter pour des raisons exposées dans son livre⁸. Aujourd'hui, on ne compte plus les chercheurs, associations, séminaires, congrès, revues, ouvrages, blogs, communiqués, contestant différents points de la théorie et ses variantes. Il n'y a pas unanimité, certains appelant au rejet pur et simple de la relativité, d'autres demandant sa modification, selon des lignes que l'on pourra juger plus ou moins censées. Un travail à temps plein ne suffirait pas pour explorer cette constellation ! Pour le peu que nous en connaissons citons : les conférences PIRT (Physical Interpretations of the Relativity Theory), l'association NPA (Natural Philosophy Alliance) et ses épigones, la revue *Galilean Electrodynamics*, les compilations des théories « alternatives » faites par divers chercheurs, etc.

⁷ On remarquera d'ailleurs que ce fameux continuum se manifeste pleinement lorsqu'on s'efforce de relier deux repères en mouvement relatif ; dans le « repère au repos », temps et espace sont parfaitement séparés. Mais pour aller dans le bon sens, nous dirons que, pour nous, temps et espace sont effectivement associés, dès le stade du repère au repos...

⁸ Peter Van nous signale récemment le livre du hongrois L. Janossy (1971). Avec lui nous admettons que, si les mathématiques de la théorie de la relativité sont une chose, la théorie ne nous éclaire nullement sur ce que sont le temps et l'espace...

Le grand public ignore ces familles de pensée. Les physiciens de l'institution en ont parfois connaissance, mais regardent ailleurs et font comme s'il n'y avait pas de problème. Sans sous-estimer l'effort qu'il faudrait pour examiner ces travaux, et se faire une idée de leur valeur, nous estimons que leur ignorance totale n'est pas satisfaisante. D'une part, ce n'est pas dans la ligne d'une éthique scientifique, ou éthique tout court : nous sommes en face d'hommes de bonne foi. Assurément, certains sont vieux, acrimonieux, agressifs et pour tout dire impossibles : faut-il les imiter ? D'autre part, l'ignorance conduit à se priver des apports potentiels de chercheurs qui ont passablement réfléchi à la question ; en retour ils peuvent conforter nos vérités ou nous faire regarder tel ou tel point de façon nouvelle (la connaissance a besoin de débat contradictoire ; souvenons-nous de Blaise Pascal : « regardez la vérité contraire »).

La liste est longue des sujets que l'on trouve discutés dans les enceintes que nous avons évoquées. En vrac : le paradoxe des jumeaux, celui des relations d'addition de vitesses non galiléennes, les difficultés posées par la composition de transformations de Lorentz non colinéaires... pour ne citer que quelques points que nous connaissons ; ce n'est que la partie émergée de l'iceberg. Nous reprendrons certains points plus bas, prétendant que nous pouvons chercher un point de vue surplombant qui pourrait concilier l'essentiel du développement standard et les critiques qu'il suscite, en modifiant parfois de façon légère le formalisme et / ou son interprétation. Nous sommes partisan d'un approfondissement et d'une consolidation de la théorie (dans le sens de dire espace = temps...) et non de son rejet et retour à un supposé âge d'or galiléen.

1.5. Difficultés rencontrées en sciences humaines et sociales en matière de temps.

Du côté des sciences humaines et sociales, diverses difficultés, ou apories, du temps sont énoncées, de façon *a priori* indépendantes du versant physique. Dans son aporétique de la temporalité, étudiant les contradictions indépassables sur le temps, Paul Ricoeur (1985) en énumère trois. La première discute la coupure entre un temps externe, repéré dans le monde (le temps du cosmos), et un temps interne, vu par le sujet, lui dont la raison serait le véritable lieu de construction du temps (cf. aussi Saint-Augustin). La deuxième est celle de la totalisation de la trilogie passé / présent / futur en un même concept qu'est le temps. La troisième est celle de l'irreprésentabilité du temps : on ne peut user que de métaphores. A propos du temps et ses difficultés, il faudrait aussi citer Platon, Aristote, Husserl, Heidegger, et tant d'autres (voir la discussion sur les temporalités par Dubar, 2008). Dans nos travaux

(Guy, 2019a), nous avons parlé de la « dilatation » de Poincaré – Bergson - Boscovich (« le monde pourrait s'enfler alors que les vitesses des mouvements s'accroitraient en proportion : nous n'en verrions rien »). On peut mentionner également la proposition que le temps s'arrête, puis reparte, sans non plus que ce soit décelé...

La discussion des embarras de la pensée du temps dans les humanités (philosophie y comprise) est un continent que nous ne voyons que de très loin. Mais nous estimons que la reprise de la compréhension d'ensemble, à partir d'un nouveau regard sur la théorie de la relativité, apportera des voies de solution. La théorie physique, en voyant comme incomparables le temps scientifique, appuyé sur des instruments éprouvés, déclaré objectif, et le temps humain, se référant à l'expérience de la conscience difficile à contrôler, déclaré subjectif (pourquoi le même mot de temps ?) a rendu la coupure dommageable.

2. Deux outils de pensée pour mettre le mouvement en premier

Nous cherchons à mettre en valeur une démarche où ni le temps ni l'espace ne sont acquis dès le départ, mais, au contraire construits au fur et à mesure de la progression de la connaissance savante, et ce, à partir du mouvement auquel nous donnons une valeur fondatrice. La reprise que nous proposons (Guy, 2021b, renvoyant à de nombreux auteurs⁹) est fondée sur deux piliers : - la cognition incarnée s.l. : le mouvement de l'homme, les mouvements montrés, précèdent les mots d'espace et de temps (ou, dit encore : le langage et ses artifices prolongent celui du corps) et - la rationalité relationnelle (le mouvement est relation ; les comparaisons de mouvements permettent de définir espace et temps). Nous présentons de façon graphique ces deux dimensions essentielles à prendre en compte (Fig. 2a et b) ; toutes deux, elles argumentent la primauté du mouvement par rapport à l'espace et au temps. Détaillons.

La première dimension, selon un axe vertical, oppose deux pôles, que les épistémologues, psychologues, etc., ont repérés dans notre appropriation du monde. Nous prenons ici cette dualité pour acquise ; parmi de multiples références, voir par exemple Dahan-Gaida (2020), Lobo (2021)¹⁰, Merleau-Ponty (1945), Vaihinger (1923), Virole (2009), et celles citées dans

⁹ Les lignes qui suivent empruntent des extraits au texte inédit déposé sur les archives HAL : Guy (2021b). Nous laissons de côté ici tout le développement qui nous permettrait de documenter de façon plus fine le passage entre les divers aspects de la mobilité humaine et le langage.

¹⁰ Cet auteur évoque la pensée d'Husserl : « la formalisation une fois effectuée, les opérations subjectives implémentées se trouvent pour ainsi dire mises de côté, comme un simple échafaudage provisoire, alors qu'elles continuent de conditionner la compréhension (l'appropriation) du symbolisme produit (son interprétation, son application, son apprentissage, etc.). » Les

Guy (2020b, 2021b). Il s'agit, d'un côté, vers le bas, de l'appréhension par le corps, les gestes, les images et l'imaginaire, avant les mots ; mode comprenant, par extension, les dispositifs expérimentaux et leur mise en œuvre dans les mesures¹¹. Et de l'autre, vers le haut, l'utilisation de mots, de concepts et de tout le formalisme discursif et ses procédés d'abstraction et de fiction, jusqu'aux mathématiques. Cette dimension, contrastant les images aux mots, est tout autant celle qui oppose le singulier à l'universel, la partie au tout, le nom propre au nom commun, le physique au philosophique, le *Monde 3.0* au *Monde 3.1* (au sens de Karl Popper, 1984, revisité, cf. Guy, 2021a¹²), etc. Nous nous demanderons par exemple : le mouvement (l'espace, le temps...) dont on parle, est-il montré, vécu, ..., ou défini par une formule mathématique ? Il y a une continuité entre les deux pôles extrêmes (avec toute une série d'étapes : gestes, langue des signes, idéogrammes, émoticônes¹³ ! ...), les mots temps, espace et mouvement se transportant le long de l'axe en changeant progressivement de sens, du fait du changement de contexte.

Mettre en valeur la première dimension, c'est affirmer, contre ce qu'on a parfois envie de penser (et toujours la tentation revient), qu'il n'y a pas en physique de concepts purs et vrais, en bonne correspondance avec la réalité, qui seraient coupés de la connaissance du corps et ses mouvements, avant qu'on les énonce comme tels.

La seconde dimension est repérée par un axe horizontal mettant en scène le mode de rationalité relationnel, fondamental pour nos affaires : nous sommes à l'intérieur du monde, nous ne pouvons que comparer les phénomènes (autre nom des mouvements) les uns aux autres, sans en sortir ni qualifier ses objets en eux-mêmes de façon substantielle¹⁴ (sur l'aspect relationnel voir par exemple : Morin, 1990, 2013 ; Pascal, 1662 ; Poincaré, 1905 ; à sa façon Granger, 1992). Nous opposerons ainsi la *mobilité* à l'*immobilité* : ces mots ont un caractère concret, sans préjuger de l'existence, ou du sens, de concepts tels que temps et espace¹⁵. Ces deux derniers termes mêmes ne font pas apparaître d'appariement entre eux, contrairement à la paire mobilité / immobilité. On peut saisir celle-ci à partir d'une expérience humaine,

physiciens croient pouvoir se passer de la phénoménologie : non ! Et il n'est pas déshonorant d'avouer le rôle du corps, de la subjectivité...

¹¹ Cela inclut aussi la dimension sociale ou pragmatique associée au mot temps...

¹² Karl Popper distingue le Monde 1 des phénomènes physico-chimiques, le Monde 2 des expériences subjectives et le Monde 3 de la connaissance objective ; nous proposons de diviser ce dernier en deux sous-parties : le Monde 3.0 de la connaissance incarnée, et le Monde 3.1 de la connaissance formulée (Guy, 2021a).

¹³ Nous passons à grandes enjambées par-dessus divers domaines de recherche permettant de passer de la mobilité (ou *motilité*, voir plus loin) au langage.

¹⁴ Divers noms peuvent être donnés à ces deux modes de rationalité : substantielle ou catégorielle ; relationnelle ou complexe, contradictoire, antagoniste, énantiomorphe, ou encore pensée synaptique (Ph. Dujardin).

¹⁵ Il est intéressant de noter que Piaget (1967), oppose constance et variation sans parler d'abord d'espace ni de temps.

étendue de différentes façons par des généralisations conceptuelles. Mobilité et immobilité sont qualifiées de relatives, pour souligner, si besoin était, le point de vue comparatif, à une certaine échelle de vitesses. Dans un contexte donné, nous parlons de mouvements de moindre mobilité, de moindre vitesse (appelons vitesse une façon de comparer des mouvements) ou arrêtés, comme base pour construire l'espace concret ; et, par comparaison, mouvements de plus grande mobilité, de plus grande vitesse, ou continués, comme base pour construire le temps concret. Tout un domaine s'étend où mettre la limite entre les temps et espace « concrets » envisagés, variable en fonction de ce qu'on peut ou veut regarder (cf. Guy, 2019a).

Mettre en valeur la seconde dimension, c'est affirmer, contre ce qu'on a souvent tendance à penser (et toujours la tentation revient !), que la réalité ne nous impose pas les mots pour la décrire ; on ne peut éviter de tourner en rond et de faire des conventions (telle celle du partage entre temps et espace concrets le long de l'axe horizontal). Les mots ont des sens relatifs les uns aux autres, fonction du contexte, etc., avec incertitudes et fragilités inévitables.

Il y a assurément, autant le long de la première dimension que de la seconde, des aspects de circularité¹⁶, selon le « cercle complexe » à la Morin (montrer ↔ dire). Ils se visualisent graphiquement ici : dans le trajet ascendant, le sens va des choses aux mots. Ceux-ci ne sont pas donnés *a priori* ; ils arrivent *a posteriori*, ils ont déjà été élaborés à partir du corps, etc., passant des noms propres aux noms communs. Pour « refermer » le cercle, il faut mentionner un autre trajet, descendant, qui va des mots aux choses : après avoir été fabriqués les mots redescendent, comme outils de pensée qu'ils sont devenus, et permettent de nommer les choses, les expériences, etc., comme nous le faisons couramment.

L'indépendance des deux dimensions n'est pas parfaite et s'accompagne de glissements de sens (Fig. 2a et 2b) : plus on « monte » en s'éloignant du corps, plus l'expression de la pensée, avec des mots, apparaît substantielle et s'éloigne de son caractère relationnel (elle sépare davantage et unit moins) ; et la pleine signification des concepts dépend aussi de la limite qui a été décidée entre temps et espace concrets (l'aspect relationnel a plus de poids dans la partie basse, plus « humaine », du diagramme). Mais dans cette représentation, tout reste relationnel, aussi bien en haut qu'en bas, par définition de l'axe horizontal (valable pour

¹⁶ Nous parlons de circularité quand, pour assurer une proposition, ou une définition, ou une désignation, nous avons besoin de nous appuyer sur un des éléments de la proposition elle-même ; la récursivité a un sens voisin, et insiste sur l'engendrement d'une série sans fin de propositions, chacune ayant besoin de la suivante ou précédente pour tenir.

tout l'espace). Ce qui est substantiel (abstrait, fictionnel au sens strict) échappe à la figure ; l'évasion se fait par le haut, car permise par les mots qu'on isole les uns des autres. Dans la partie supérieure, on écrit *rationalité relationnelle*. Dans la partie inférieure, nous pouvons encore user du mot *relationnel* par « redescende » des mots ; mais, pour marquer une différenciation, sans parler de *rationalité*, et en insistant sur l'enracinement dans la connaissance du corps, on pourrait utiliser d'autres vocables : *jeu d'oppositions*, *pensée synaptique* (avec un sens proche de la physiologie). Le substantiel nous importe moins dans la partie inférieure car c'est le niveau de la réalité concrète, avant les mots, où tout est relié (mais il est encore caché dans le relationnel, voir les commentaires de l'Annexe 3). Quant au glissement de sens du mot mouvement, on peut le souligner, en utilisant pour le plus élémentaire (en bas), le terme de *motilité*¹⁷ (dans un sens biologique premier).

Promouvoir ces deux dimensions, c'est, en creux, dire que la relativité ne les a pas empruntées et n'a pas suivi un bon chemin de rationalité. Ce reproche global s'éclairera par la suite. C'est celui d'un recul insuffisant sur la part, dans toute théorie, entre les éléments en correspondance directe avec la réalité, et ceux qui sont des outils de pensée, construits moyennant un certain saut à partir de la réalité : la correspondance avec elle n'est plus garantie. Leur justification est leur efficacité. Toute théorie fait appel à des fictions, mais celles-ci doivent advenir au cours de la démarche de recherche, et non être parachutées dès le début. Il faut en rendre compte par un chemin s'élevant au-dessus des expériences concrètes.

En conclusion partielle de cette seconde partie, il nous paraît indispensable de reprendre la question du temps et de l'espace dans la théorie de la relativité en l'insérant dans une problématique plus large où le mouvement est un pivot.

3. Une interprétation de la théorie de la relativité

3.1. Une nouvelle image mentale : un espace de mouvements comparés

En bref, nous devons user d'un nouveau paradigme, appuyé sur de nouvelles images mentales, fondées sur des comparaisons de mouvements (Fig. 3). Ainsi en remplacement de l'image du quadrillage (plus ou moins déformé) et des horloges ponctuelles, nous imaginons

¹⁷ Ce terme (plus général que celui de motricité) renvoie à de très nombreux mots du fonctionnement du corps humain, depuis les cellules jusqu'à la posture du corps dans son ensemble et ses mouvements visibles : lymphocytes, gamètes, mais aussi proprioception, fonction posturale, tension musculaire, émotions...

un espace de mouvements à partir desquels on construit, au moyen de conventions révisables arrêtant des régressions sans fin, des repères d'espace (points dont les mouvements relatifs sont négligeables / négligés) et des horloges (un point mobile dont le mouvement est pris comme étalon). On comprend la genèse de l'espace-temps fiction de la première représentation (cf. Fig. 1 et section 1.1.), à la limite, en bout de course, mais qui reste enracinée dans le corps et la pensée relationnelle. Pour parler d'un temps unique, on a eu besoin de s'accorder sur un mouvement étalon de valeur sociale. Du côté de la physique, la démarche quantitative va s'exprimer dans les transformations de Lorentz. Du côté des sciences humaines et sociales, les conséquences de cette prééminence du mouvement s'expriment dans une relativité qualitative qui n'a pas besoin de vitesses excessives ! En bref, une théorie de la relativité, qu'elle soit comprise autant du côté des sciences « dures » que de celui des sciences humaines et sociales, associe la construction d'un cadre d'espace et de temps, ancré sur des mouvements comparés, au choix d'un mobile étalon finissant de fixer ce cadre (pour un minimum de coordination quantitative).

3.2. *La transformation de Lorentz dans le nouveau cadre*

La transformation de Lorentz est la base de la théorie de la relativité. Dans le présent contexte de « relecture », nous pouvons poser quelques questions¹⁸. - Comment dériver la transformation de Lorentz en suivant une rationalité relationnelle, surtout si espace et temps ne préexistent pas et doivent être compris dans la foulée, à partir de mouvements comparés ? - Peut-on, comme on le fait d'habitude, exprimer le Second postulat en termes de vitesse de la lumière, sachant que cette dernière sert à définir les étalons d'espace et de temps ? – Peut-on écrire la transformation de Lorentz simplement en termes de comparaisons de *rapports* v/c (c est la vitesse de la lumière ; v désigne d'autres vitesses, de nature non électromagnétique, par exemple gravitationnelle) ? – Plus fondamentalement, que voulons nous exprimer, quel besoin avons-nous de formaliser par des équations la marche des phénomènes envisagés dans des repères en mouvement relatif ? Comment le faire, sur quelle base ?

La réponse à cette dernière question s'ancre sur une exigence de communication entre des observateurs ayant des points de vue différents sur le monde ; elle se traduit en disant que les lois de la physique doivent être les mêmes dans tous les référentiels (Premier postulat). Il faut pour cela définir proprement de tels référentiels et nous appuyer sur un (ou des) phénomène(s)

¹⁸ Les lignes qui suivent sont empruntées au texte inédit Guy (2022).

qui va (vont) nous servir de point(s) de comparaison, d'étalon(s), pour avoir une approche quantitative. C'est le sens du Second postulat, particularisé d'habitude en prenant la lumière et sa « vitesse » comme bases. Nous pouvons reformuler ce dernier de façon plus large, englobant le premier : « seules les comparaisons de phénomènes (comparaisons de mouvements) entre eux sont notre point de solidité » ? Cela rejoint les remarques de Poincaré (1902, 1905). Lee & Kalotas (1975) et Lévy-Leblond (1976) ont proposé chacun à leur façon une coalescence des deux postulats. L'aspect relationnel englobe lois, vitesses, confrontations de phénomènes, etc. (voir Guy 2010a, 2015, 2019b). Pour discuter quantitativement les différents mouvements offerts à notre investigation, *tout dérive de la nécessité relationnelle de choisir momentanément (provisoirement) une base de comparaison pour parler, décidant de fixer le numérateur ou le dénominateur d'un rapport v/c . A la question « c est-elle constante ? », nous répondons : « nous ne le savons mais nous sommes obligés de l'affirmer, au moins localement ».*

Du point de vue technique, allons-nous pouvoir dériver la transformation de Lorentz sans temps ni espace, simplement en s'appuyant sur un rapport de mouvements du type v/c ? Non, pas directement. Car, à partir du moment où l'on formule des propositions discursives ou des équations, on dissocie l'espace du temps. On est donc obligé de s'y prendre à plusieurs fois, dans des récursivités auxquelles on n'échappe pas lors de la dérivation. On commence à faire comme si on avait séparé l'espace du temps, se focalisant sur un des deux termes mis en relation dans un rapport v/c . On lui donne un sens en m/s dans une fiction, proclamant « $c = cte$ ». On s'aperçoit ensuite qu'espace et temps sont liés, que c n'est pas seule et intervient dans le rapport v/c . On revient en somme sur ses pas pour interpréter ce qu'on a fait : « non, ce n'étaient que des rapports v/c ». Dans la dérivation standard, le v/c apparaît tôt et on est embarrassé lorsque le rayon lumineux test est perpendiculaire au vecteur v du mouvement relatif des deux repères (Guy, 2019a). Le facteur γ de la transformation de Lorentz s'exprime en termes de v/c : dans Guy (2019b), nous exprimons des rapports de mouvements de façon vectorielle, après avoir ouvert les horloges qui cachaient elles-mêmes des mouvements de direction particulière. En bref, la transformation de Lorentz saisit le moment où l'on sépare l'espace du temps, liés dans la comparaison de mouvements.

Outre, et grâce à, ses aspects algébriques, seulement évoqués à l'instant, la théorie de la relativité (avec ou sans interprétation renouvelée), et son expression dans les équations de transformations spatio-temporelles, apporte un certain nombre de résultats qualitatifs

essentiels à rappeler : - les variables d'espace et de temps n'ont pas de caractère absolu, mais se modifient de façon associée d'un repère à un autre en mouvement relatif ; - les grandeurs physiques sont exprimées en paires, telle celle {champ électrique, champ magnétique} ou {énergie, quantité de mouvement}, formalisées dans des quadrivecteurs, ou des paires de vecteurs 3D ; - les transformations de ces grandeurs couplées permettent de relier des grandeurs de masse et d'énergie ; - espace et temps, dans la paire (r, t), peuvent être mises sur le même plan que les autres grandeurs physiques (cf. Guy, 2016a) ; etc.

3.3. *Quel statut pour la vitesse de la lumière ?*

Ce qui change d'abord, c'est le sens donné au mot vitesse : c'est un rapport de mouvements dont l'un est choisi comme étalon. La vitesse de la lumière n'y échappe pas, les autres mouvements étant dans ce cas de nature gravitationnelle (voir les mesures historiques de la vitesse de la lumière). La vitesse c est souvent prise comme constante de structure, mais c'est dans une seconde étape qui ne fait pas l'économie de sa construction première. Cette « vitesse » n'en est plus une aujourd'hui au sens où l'on disposerait déjà d'étalons d'espace et de temps indépendants d'elle, qui permettraient d'en faire la mesure. C'est au contraire la propagation de la lumière qui fournit de nos jours les étalons d'espace et de temps (qui reviennent au même étalon via le postulat $c = cste$). Par rapport aux pratiques plus anciennes, il y a ainsi un double changement : 1) changement d'ordre de priorité : la propagation de la lumière « précède » les étalons d'espace et de temps ; 2) changement du nombre d'étalons : on passe de deux étalons (espace et temps) à un seul. Y a-t-il continuité entre ces pratiques ? Oui et, pour le montrer, on peut faire correspondre au mètre et à la seconde dans leur définition ancienne des portions de mouvement de la lumière, évaluant ainsi deux grandeurs de natures *a priori* différentes par la même jauge. La « vitesse » de la lumière a alors deux valeurs : 299 792 458 m/s exprimant le ratio (figé par décret) entre les deux anciens étalons, comme deux « objets » particuliers de notre monde et désignés comme tels ; et $c = 1$, fréquemment utilisé en physique, exprimant aujourd'hui qu'elle n'a pas de nombre, c'est elle qui permet de mesurer. Parler de la « constance de la vitesse de la lumière » c'est exprimer une tautologie, mais pouvoir « constater » cette dernière nous rassure quant au savoir-faire remarquable des physiciens, et à l'efficacité du bouclage entre les pratiques et les choix d'écriture des équations. Dans ce contexte, il est plus approprié de dire qu'*il n'y a plus d'étalons d'espace ni de temps* et que *la seconde est l'étalon de mouvement*. Et de dire qu'une

vitesse est le ratio d'un mouvement à l'étalon de mouvement (il y a encore continuité entre les définitions anciennes et nouvelles de la vitesse)¹⁹.

Revenons enfin de façon un peu différente sur les rapports $r = v/c$: nous avons dit leur rôle fondateur par rapport aux deux termes v et c qui semblent les composer, en particulier à propos de la transformation de Lorentz et sa dérivation. De façon qualitative, ces rapports expriment d'abord la confrontation ou la comparaison de deux phénomènes perçus comme dissemblables par nos sens : nous voudrions leur affecter des valeurs différentes d'un point de vue quantitatif (à l'un accorder la valeur v , à l'autre la valeur c). Mais ce qu'il faut ajouter, c'est que les nombres r ne sont généralement pas obtenus par la division algébrique de deux autres nombres v et c déjà à notre disposition, comme mesurés séparément. En réalité, la valeur r est obtenue par une seule et même mesure. Et c'est dans un second temps que l'on va se permettre de la « couper » en deux et l'exprimer comme un rapport (en prenant l'un des deux phénomènes en jeu comme référence, ou se ramenant éventuellement à un troisième phénomène...). C'est cette inévitable *dualité de moments* que nous avons exprimée dans nos « tâtonnements » sur la transformation de Lorentz. Pour pouvoir dire, nous avons besoin de séparer par la fiction ce qui était uni dans la réalité. Cela nuance notre regard sur le concept de « relation », omniprésent dans ce travail : il peut signifier la mise en vis-à-vis d'entités définies de façon indépendante l'une de l'autre, ou, de façon plus profonde, l'expression *d'un lien tel qu'il contribue à la définition de chacun des deux termes qu'il unit* (Th. Berns, comm. pers. 2023). Alors que nous l'avons reçue comme établie sur des concepts acquis une fois pour toute, il faut mettre la théorie de la relativité dans ce mouvement circulaire : elle se présente comme utilisant des concepts de temps et espace déjà là, mais elle en produit un fonctionnement qui viennent ébranler leurs points de départ et ouvrir un champ de nouveauté.

4. De premiers fruits ?

Le cadre interprétatif précédent unit sciences physiques au sens large, d'un côté, et sciences humaines et sociales de l'autre en disant : *il y a identité des relations spatiales et temporelles ; espace et temps sont des comparaisons de mouvements*. Pour pouvoir mettre en mots la connaissance, il faut des conventions de nature sociale (comme l'hypothèse de la constance

¹⁹ Texte extrait de : Guy (2013).

d'un étalon). On retrouve cette nécessité des deux côtés. Arrêtons-nous sur les fruits d'ores et déjà apportés de part et d'autre par notre relecture. Ils manifestent la fécondité des représentations mentales décrites dans les sections 2 et 3 et l'intérêt de la reprise annoncée.

4.1. Fruits en physique

Plusieurs questions de physique nous semblent éclairées par un meilleur couplage entre les concepts de temps et d'espace, et par la primauté du mouvement. Elles constituent autant de chapitres de que l'on pourrait appeler une théorie physique basée sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles, ou encore sur la seule catégorie de « mouvement » (cf. Guy, 2016a). Une revue un peu plus détaillée en est proposée dans l'Annexe 1 (avec les références utiles). Regardons quelques-unes.

En thermodynamique, le couplage entre gradients des grandeurs (dans l'espace) et leurs dérivées temporelles est une façon de voir l'association fondamentale espace – temps donnant à la flèche du temps un caractère non restreint à ce paramètre seul : elle traduit la tendance des systèmes laissés à eux-mêmes à atteindre une homogénéité spatiale. Les frontières entre équilibre et déséquilibre, réversibilité et irréversibilité, chaleur et travail, ouverture et fermeture des systèmes, ne sont pas offertes par la nature mais décidées en fonction de l'endroit où l'observateur pose la limite entre temps et espace. La fonction entropie apparaît naturellement dans la description des systèmes à une échelle donnée, en figeant leur organisation à une échelle plus petite dans son état le plus probable (Guy, 2020d).

La composition de transformations de Lorentz non colinéaires est un lieu où nos propositions apportent une solution à des problèmes apparaissant inextricables : le paramètre temps, construit à partir de la position d'un mobile, est concerné par des transformations géométriques (rotations), mises en jeu dans les compositions, au même titre que les coordonnées spatiales. On rétablit ainsi une symétrie entre variables spatiales et temporelles dont le défaut était responsable de diverses difficultés.

Pour ce qui concerne le paradoxe dit des jumeaux, le point important est de comprendre le temps comme donné par la position d'un mobile : l'hypothèse de constance de la vitesse de la lumière se traduit par la décision d'attribuer le même comportement à un unique point en déplacement vu depuis deux repères différents. On aboutit alors à une variabilité des situations possibles quant à savoir quel jumeau revient plus jeune ou plus vieux que l'autre, et

de combien. On voit le rôle de l'interprétation, c'est-à-dire en l'occurrence le choix de la direction du mouvement marquant le temps dans les horloges.

C'est une façon d'aller du côté du facteur γ de la transformation de Lorentz, et son expression en fonction de la direction des mouvements des photons dans les horloges atomiques, en usage aujourd'hui. Nous avons ouvert les horloges situées dans chacun des deux repères en déplacement relatif, et découvert de tels mouvements. Nous proposons de nouvelles équations où le facteur γ dépend non seulement du rapport de vitesses $\beta = v/c$ (v vitesse du déplacement relatif des repères, c « vitesse » de la lumière) mais d'un angle δ entre mouvements. Elles se relient à divers résultats de la littérature.

Dans d'autres travaux, nous mettons en relief des relations de base de la physique. Nous les appelons *relations de degré zéro* alliant dérivées temporelles et spatiales, et invariantes de Lorentz. On peut y adjoindre ou en dériver des relations d'incertitude épistémique (on ne connaît pas les étalons !) ou d'a-certitude.

En allant du côté du hasard et sa compréhension relationnelle, nous dirons : on ne sait pas ce qui est aléatoire, on oppose ce qui est plus certain à ce qui l'est moins. Les probabilités sont données par des mesures d'amplitudes spatiales et temporelles. Temps et l'espace sont soumis eux-mêmes à incertitude en composition avec les diverses grandeurs physiques. Les relations entre mécanique quantique et relativité générale sont alors toutes proches, la première n'ayant pas le monopole de la quantification (elle doit être comprise par la comparaison de deux classes de phénomènes dans une vision probabiliste) ni la seconde de l'espace et du temps : il faut voir leur composition possible et non leur opposition en matière d'espace et de temps (la première serait dépendante du cadre extérieur d'espace-temps, alors que la seconde ne le serait pas) en prenant espace et temps comme couple de grandeurs associées en composition avec les couples des autres grandeurs physiques.

Enfin, en cosmologie, nous insistons sur le rôle des rapports v/c par lesquels on passe pour déterminer la vitesse des objets distants²⁰ (c'est d'ailleurs une nécessité « relationnelle » générale). Sur cette base, nous sommes encouragés à postuler une vitesse moindre de la lumière à l'échelle cosmologique : cela permet d'éviter le recours à la matière noire et l'énergie sombre, tout en rallongeant l'âge de l'univers (une façon de contourner le problème des galaxies impossibles découvertes par le James Webb Space Telescope ?).

²⁰ Par effet Doppler au sens large.

Qu'avons-nous fait pour obtenir tous ces résultats ? Quelles recettes avons-nous utilisées ? Elles sont diverses et sont *divers visages d'une approche relationnelle visant à comparer des mouvements*. Ainsi de dire que la variable t renvoie à un mouvement et peut se comprendre comme la position d'un mobile étalon. Dans ces conditions, le passage par un point ayant trois coordonnées peut rendre une heureuse symétrie entre variables spatiales et temporelles. L'équilibrage entre ces variables se fait également en symétrisant les dérivées $\partial/\partial t_i$ et $\partial/\partial x_i$, et exprimant les équations de base comme relations de conservation. Ceci se manifeste également, comme nous l'avons dit, en remarquant que la paire (r, t) où r et t sont *a priori* deux vecteurs de dimension 3, est à mettre sur le même plan que les paires de grandeurs conjuguées de la physique. La lumière n'échappe pas à la démarche relationnelle et l'on généralise l'appréhension de rapports v/c .

4.2. Fruits en sciences humaines et sociales

Du côté des sciences humaines et sociales, une plus profonde accointance entre le temps et l'espace paraît féconde. Nous avons parlé plus haut des apories du temps énumérées par Paul Ricoeur ; que pouvons-nous en dire ? La dualité entre temps cosmique et temps humain est-elle indépassable ? Non, ce ne sont que des mouvements comparés, sans prééminence du ciel sur les mouvements de l'influx nerveux qui suivent la conscience. En ce qui concerne la soudure en un seul « temps » des trois termes : passé, présent, futur, on peut donner deux éléments de réponse. Selon le premier, on aurait tort de vouloir appréhender le temps seul ; la langue s'occupe du tout que constitue l'association espace + temps. Le temps n'en est qu'un morceau. Et selon le second, on rappelle le caractère relationnel du tandem espace / temps, chacun se définissant par la négation de l'autre. Le présent est autant dans le nuage qui se fait et se défait, que dans la montagne paisible qui ne change. Le temps passe à côté de la montagne (on ne va pas dire que celle-ci disparaît et réapparaît constamment, c'est absurde ; voir Guy 2011 ; se reporter également à nos réflexions sur le « présent spécieux », Guy, 2019c). Le présent est particulier, non qu'il fuie sans cesse, mais il n'est pas sur le même plan que le passé et le futur : il est sous-tendu par l'expérience directe de tous les sens dans une présence de l'espace, au contraire du passé et du futur qui sont intégrés dans une fiction

intellectuelle²¹. Enfin, en ce qui concerne la nécessité d'images, nous dirons : oui, elles ont un rôle fondateur souligné plus haut, avant la formulation d'une connaissance discursive.

Dans Guy (2019a) nous avons discuté d'autres questions comme celle du moteur du temps (le temps n'a pas de moteur car il n'existe pas !), de l'ancestralité (le temps n'existait pas il y a 100 millions d'années, mais il n'existe pas davantage aujourd'hui) : l'histoire est engrenage de mouvements. Le partage entre espace et temps peut se faire à différents endroits, en fonction des mouvements que nous percevons, ou auxquels nous attachons de l'importance dans tel ou tel contexte. Il y a multiplicités des espaces et des temps, le temps et l'espace unique des physiciens ayant un rôle particulier pour héberger une large communication dans le groupe social. L'espace et le temps (les espaces et les temps) que nous construisons s'appuient sur ce qui constitue notre monde, les pierres et les bornes de nos monuments et de nos rues, jusqu'aux hommes et femmes avec qui nous vivons. Dans certaines situations, la séparation entre espace et temps, liés dans le mouvement, ne se fait pas, ou se fait plus difficilement.

Comment ces premiers éléments se manifestent-ils dans la diversité des sciences humaines et sociales ? Plutôt qu'un parcours fastidieux de ces sciences, ou du moins celles que nous avons abordées ou simplement côtoyées, nous avons pris dans Guy (2020a) un autre angle d'attaque : celui, directement lié à notre démarche, consistant à repérer quelles articulations nouvelles entre espace et temps sont permises par notre point de vue et à les retrouver dans les différentes disciplines. Nous suivons la progression de la pensée et des formulations, depuis la situation « originelle » où temps et espace sont soudés dans le mouvement, jusqu'à celle où un seul temps et un seul espace, séparés, sont proposés comme bases de référence pour la société. Nous pouvons distinguer, plus ou moins artificiellement, plusieurs étapes, comme autant de clés de lecture originales, ponctuées de digressions sur les diverses modalités des assemblages spatio-temporels (voir les détails dans l'Annexe 2).

La première étape est le moment du nomadisme, où l'on erre sans voir de séparation franche entre espace et temps, appréhendés dans le mouvement. On ne se retourne pas sur ses pas. Dans une seconde étape, on perçoit un début de séparation, avec de premières conventions, de premières hypothèses ; mais on garde une multiplicité des temps (et des espaces). Le temps de l'histoire de chacun se situe quelque part entre les deux premières étapes : l'on y voit l'importance de l'espace dans la construction de l'identité, et non seulement du temps (cf.

²¹ Cette question du présent oppose les sciences humaines et sociales et la physique : les premières voient son poids dans l'expérience de la conscience, tandis que la seconde l'ignorerait et passerait à côté.

Abravanel, 2013). L'étape suivante consiste à choisir un temps et un espace uniques de large valeur sociale.

Séparer l'espace du temps, c'est alors séparer de façon artificielle l'homme du monde : avec Descartes le temps élaboré/situé dans la conscience s'oppose à l'étendue du monde autour du sujet. Séparé du monde, son identité se tient dans sa pensée (*cogito ergo sum*). Au contraire, on aura compris que l'identité de l'homme se construit par tous les mouvements (toutes les relations) qui le relie au monde, espace et temps formant un tout indissociable.

Les nouveaux points de vue sur les agencements d'espace et de temps éclairent le fonctionnement de différents domaines des sciences humaines et sociales. Les étapes et les arrêts de notre voyage sont une autre façon de regarder la variété des sciences humaines et sociales et la possibilité de les classer : les limites admises aujourd'hui sont contestables ou sujettes à variation, comme celle entre histoire et géographie (ou celle entre anthropologie et sociologie).

4.3. Confrontation des apports dans les deux domaines (physique, sciences humaines et sociales)

Ce que nous apportons de façon générale, et qui favorise un rapprochement entre physique et sciences humaines et sociales du point de vue de l'espace et du temps, c'est d'abord une motivation pour changer d'interprétation : reconnaître la complexité, mettre la pensée et la connaissance en mouvement, accepter une perte de stabilité, oser tourner en rond, se résoudre à arrêter des régressions sans fin au prix d'un manque, d'un reste inconnu (cf. Vaudène, 2021). Cela conduit à de nouvelles représentations mentales, « trans-scientifiques ». Le *lien temps / espace / mouvement* nous ramène au concret, nous offre de nouveaux angles d'attaque pour l'étude du temps, mais aussi de l'espace et concerne toutes les sciences.

On aurait pu se demander *a priori* comment des travaux qui cultivent la théorie de la relativité en physique, s'appliquent aussi à des domaines dont les praticiens ne se déplacent pas spécialement comme des photons de lumière ! Réconcilier les sciences humaines et sociales et la physique !? On nous objectera : « quel lien voyez-vous entre la transformation de Lorentz, pilier de la théorie de la relativité (un des aspects fondamentaux de la révolution scientifique du début du XX^e siècle), et l'expérience commune ? » Telle est la question aiguë que se sont posée les pragmatistes américains, en particulier Mead (2012) (voir aussi Leclerc-Olive,

2012). Pour ces philosophes, la tâche était de relier la science à la vie, y retrouver « des notions ordinaires de personnes ordinaires » (Mead), faire dialoguer sciences humaines et sociales et physique. C'était à un moment où les découvertes scientifiques (ici la relativité) semblaient contre-intuitives. Cela avait fonctionné pour Newton, il fallait trouver le chemin pour Einstein.

Dans nos travaux, (Guy, 2015b, 2019a), nous avons proposé une situation où la structure mathématique des transformations de Lorentz se retrouve (un peu cachée !) dans une expérience humaine. Il s'agit de ce que nous avons appelé l'effet Phileas Fogg (héros de Jules Verne). Imaginons que la seule horloge que nous ayons soit un cadran solaire ; pour mesurer le temps nous nous fions aux mouvements du soleil ; pour les jours, nous comptons les passages du soleil à son point de culmination dans le ciel à midi (c'est une façon d'attribuer à l'astre un mouvement de « vitesse » constante). Un jumeau pareillement équipé se déplace dans un voyage est-ouest ou ouest-est autour de la terre, alors que son frère reste sédentaire. Au moment des retrouvailles, il y aura entre eux un écart dans le comptage du temps. Le problème se pose dans les mêmes termes si l'on remplace le soleil par un photon dans une horloge atomique. Le temps (et l'espace) perdent leur caractère absolu. Ce n'est pas seulement une expérience de pensée : certes Phileas Fogg l'a éprouvée (à son avantage) au bout de longues tribulations ; mais, aujourd'hui avec le développement des voyages en avion, les décalages horaires se font sentir sans attendre 80 jours. Suivant la vitesse de l'avion par rapport à la course du soleil, le temps accélère, ralentit, ou même s'arrête par rapport à celui de nos amis restés à terre (voir la correspondance avec la formulation relativiste dans les travaux cités²²).

Au total, nous avons constaté l'intérêt omniprésent de l'approche relationnelle²³ de la connaissance, autre façon de dire que la discussion sur l'espace et le temps est à mener, non en termes d'ontologies, mais de « dynamiques »²⁴. Les fruits sont un peu différents entre physique d'un côté, et sciences humaines et sociales de l'autre mais contribuent à revoir, ou même contester, leur frontière, en donnant toute sa place à la *co-construction* des concepts

²² Un vaisseau spatial à vive allure dans le cosmos n'est donc pas requis ! Nul besoin non plus d'invoquer l'expérience de Michelson et Morley pour admettre la nécessité de la transformation de Lorentz.

²³ Non loin de celle de mouvement chez Mead, les pragmatistes américains Whitehead et Dewey ont élaboré la notion d'événement pour parler d'espace et de temps de façon relationnelle. Penser espace et temps ensemble comme « actes » parmi d'autres rejoint ce que nous disions plus haut (fin de la section 3.2), en mettant les deux paramètres sur le même plan que d'autres grandeurs physiques en dualité.

²⁴ Cf. le séminaire piloté avec Denis Cerlet dans le cadre de l'UMR 5600 EVS (Environnement, Ville, Société) pendant la période 2015-2019.

d'espace et de temps. Parce que le mouvement est d'abord humain et que la construction des concepts s'enracine dans l'expérience humaine, c'est du côté SHS que l'on suit mieux les étapes de cette construction. C'est là que l'on fait face à la multiplicité des temps et des espaces. Par contraste, en physique, on va directement à l'unique temps social qui a montré son efficacité dans la dualité temps (variable t) / espace (variables x, y, z). Sans contester radicalement cette dualité dans ce domaine (ce n'est pas là le premier sujet), on y acquiert maintenant plus de lucidité sur le paramètre t : il ne renvoie pas à une substance unique du monde, il demande des conventions ; il y a des transformations possibles entre espace et temps suivant les points de vue, etc. La représentation spatiale du temps est rendue plus aisée dans un rééquilibrage avec les coordonnées d'espace. Comme on le voit dans l'Annexe 1, de nouvelles pistes s'ouvrent.

5. Regardons ailleurs

Terminons par quelques remarques sur deux façons, parmi d'innombrables que nous ne prétendons pas connaître, de prendre la théorie de la relativité, représentées par deux articles du présent numéro de la revue *Intentio*.

5.1. La relativité d'échelle

Ce que nous en disons provient de la seule lecture de Nottale (1998). Les raisons d'être de la proposition de cet auteur reposent principalement sur une généralisation du principe de relativité à des caractéristiques des repères qui dépassent leur seule vitesse relative, et sur la solution qu'elle peut fournir à la disjonction entre mécanique quantique et relativité générale. A la lumière des développements précédents, faisons quelques remarques, à tempérer par notre large ignorance des travaux de L. Nottale.

La première concerne l'aspect relatif ou relationnel mis en avant de façon constante par cet auteur dans son ouvrage (*op. cit.*) : on ne connaît pas les choses en elles-mêmes, on ne connaît que des relations ou des différences. Il ne nous semble pas que cet aspect primordial ait été poussé à bout dans la théorie physique actuelle, ni dans la relativité d'échelle. Ainsi, on aurait pu souligner que le principe de relativité lui-même, si on le restreint à dire $c = \text{cte}$, échappe à l'esprit relationnel : à quoi compare-t-on la vitesse de la lumière ? Ainsi aussi il nous semble que l'esprit relationnel doit être appliqué en mécanique quantique pour expliquer la quantification (ou discrétisation) comme nous l'avons fait dans Guy (2016a).

Il reste intéressant de mettre en regard les incertitudes sur l'espace et le temps, les histoires de Feynman et le caractère fractal possible de l'espace-temps. L'extension du principe de relativité à des qualités telles que la jauge (cf. le caractère fractal) pourrait s'apparenter à ce que nous disons de la convention de séparation entre l'espace et le temps : on se place à une échelle où l'on décide en somme la précision des mesures d'espace et de temps (on ne cherche pas à savoir ce qui se passe en dessous de cette échelle).

De façon contrastée par rapport à la relativité d'échelle, nous pouvons constater que, dans le domaine de la thermodynamique par exemple, les lois ne sont pas les mêmes aux différentes échelles (lois de Newton à l'échelle des particules ; lois de type Fick ou Fourier à l'échelle des populations). La question de l'existence et l'universalité des lois se relie aux précédentes.

Enfin, de façon assez fondamentale, on constatera que ni le concept de temps ni celui d'espace ne sont critiqués par L. Nottale qui les prend comme acquis, au moins au stade de la relativité d'échelle. Il parle pourtant d'un au-delà ?

5.2. Une démarche constructiviste

Une démarche constructiviste appliquée à certaines des questions précédentes (relations entre théorie de la relativité et mécanique quantique, place du temps, etc.) est exposée par Giorgio Quadranti (2023). Elle le conduit à des résultats originaux. Ainsi le primat donné à la mécanique quantique et le caractère second de la relativité, comme déduit de la première. Ou la place prééminente donnée au temps, l'espace en paraissant dérivé. Ainsi encore l'importance donnée aux processus. Nous ne commenterons pas ces résultats en détail : ils s'inscrivent dans une réflexion de fond sur la construction de toute théorie à partir du réel (avec son ouvrage *Le monde comme texte*, 2020, G. Quadranti se présente dans le sillage de J. Piaget). Les points d'articulation avec nos propres travaux nous paraissent nombreux, tel celui de la convergence de diagnostic sur les problèmes de symétrie posés par la transformation de Lorentz lorsque les déplacements des repères et des photons-horloge sont de directions quelconques (Guy, 2019a ; G. Quadranti, com. pers. 2021).

Sans prétendre avoir tout compris de la démarche constructiviste, notons toutefois, à propos des travaux de G. Quadranti, quelques points de discussion possible par rapport à nos propres réflexions : - dans la démarche constructiviste, quelle place pour une pensée complexe affrontant les circularités et les conventions ? - Comment partir du temps comme acquis, sans

tenter de le définir ou le construire ? - Comment accepter également de prendre les horloges supposées déjà là ?

6. Quelques mots de conclusion

Dans le titre de notre texte, nous avons souhaité *rafraîchir la théorie de la relativité*. C'est, pour nous, raviver ses pleines couleurs, lui donner souffle, l'humaniser. Tournons-nous un instant vers Kurt Gödel : après avoir cherché pendant toute sa vie à assurer, de façon indépendante et autonome, les fondements des mathématiques, cet auteur avoue en somme : les mathématiques ne peuvent se passer de l'homme et son intuition (Cassou-Noguès, 2004). De façon un peu comparable, en donnant son entière place au mouvement, tel qu'il est d'abord perçu et habité par l'homme, nous donnons à la théorie de la relativité une ouverture nouvelle et sa capacité à faire se rejoindre les deux branches que sont les sciences dures et les sciences humaines et sociales²⁵. On peut amoindrir la coupure entre elles, la question du temps était un point majeur de division.

Remerciements

Ces lignes constituent une version d'un texte écrit à l'invitation de la revue *Intentio* (Centre Gilles Gaston Granger, CNRS, Aix-en-Provence) ; la version définitive à paraître pourra en différer quelque peu. Je remercie Carlos Lobo pour son intérêt et sa confiance. Je remercie également toutes les personnes avec qui, au fil des ans, j'ai discuté les questions abordées dans ce texte et qui m'ont encouragé. Je ne peux les citer toutes. Je note ici, pour les échanges récents : Nicolas Berns (Bruxelles), Philippe Dujardin (Lyon ; ce dernier a permis de rectifier diverses imperfections d'une version antérieure, la discussion se poursuit), David Lacoste (Paris), Pierre Mathieu (Charleroi), Peter Van (Budapest).

²⁵ Que nous appelons par ailleurs sciences azur et sciences pourpres respectivement (voir Guy, 2019a).

Références

- Abravanel N. (2013) L'historicité en milieu sépharade, ou le primat de la spatialité, Vingtième siècle, revue d'histoire, 117, janvier-mars 2013, 125-137.
- Ancori B. (2020) *Le manège du temps*, ISTE, London, 310 p.
- Bergson H. (1938) *La pensée et le mouvant*, Presses Universitaires de France, Paris, 294 p., reprinted 1998.
- Berque A. (1987) *Ecoumène, Introduction à l'étude des milieux humains*, Belin, Paris, 448 p. Reissued in 2015.
- Caruso E. M., Van Boven, L., Chin, M., & Ward, A. (2013) The temporal Doppler effect: When the future feels closer than the past, *Psychological Science*, 24 (4), 530-536.
- Cassou-Noguès P. (2004) Gödel, Belles Lettres, 190 p.
- Cerclet D. (2011) Les corps en mouvement comme lieu de constitution du temps ? in: *Le corps en acte, centenaire Merleau Ponty*, coord. A. Berthoz and B. Andrieu, Presses universitaires de Nancy, 171-185.
- Cerclet D. (2014) Marcel Jousse: à la croisée de l'anthropologie et des neurosciences, le rythme des corps, *Parcours anthropologiques*, 9, 24-38.
- Dahan-Gaida L. (2020) L'imagination visuelle dans l'invention scientifique : schèmes, images de pensée, diagrammes. In : *Imaginarios Tecnocientíficos*, organizadores Juliana Michelli S. Oliveira, Rogério de Almeida, David Sierra G., FEUSP Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, vol 1, 17-36.
- Dingle H. (1972) *Science at the crossroads*, Martin Brian & O'Keeffe, London.
- Dubar C. (2008) Temporalité, temporalités : philosophie et sciences sociales, in *Temporalités*, 8.
- Dujardin Ph. et Guy B. (2012) Vers une pensée de la relation, échanges entre un politologue et un physicien, *Actes des deuxièmes ateliers sur la contradiction*, coordination B. Guy, Presses des mines, Paris, 77-87.
- Gabel C.P., Guy B., Mokhtarinia H. R., and Melloh M. (2021) Slacklining: An explanatory multi-dimensional model considering classical mechanics, biopsychosocial health and time, *World Journal of Orthopedics*, Mar 18; 12(3): 102–118.
- Granger G.G. (1992) *La vérification*, Odile Jacob, 320 p.

- Guy B. (2010) Les relations de Lorenz et le temps : proposition d'utilisation d'un paramètre temporel tridimensionnel défini par un déplacement. La question du temps en physique. Internet Archive, 41 p.
- Guy B. (2011) Penser ensemble le temps et l'espace, *Philosophia Scientiae*, 15, 3, 91-113.
- Guy B. (2012) Degré zéro des lois physiques, considérations heuristiques <hal-00723183>.
- Guy B. (2013) Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement ; <hal-00814874> ; et communication au 22^e Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013 (P082).
- Guy B. (2014) Pour un principe d'« a-certitude » en physique, <hal-01062731>.
- Guy B. (2015a) Ruptures urbaines, une pragmatique spatio-temporelle, *Parcours Anthropologiques*, 10, 46-64. Online: <https://pa.revues.org/422>.
- Guy B. (2015b) Sur l'âge et le vieillissement comparés de deux jumeaux (théorie de la relativité), <hal-01196320>.
- Guy B. (2016a) Relier la mécanique quantique et relativité générale ? Réflexions et propositions, <hal-00872968>.
- Guy B. (2016b) La mésologie et la pensée des relations entre l'espace, le temps et le mouvement : des convergences. En ligne sur le site ecoumene.blogspot.
- Guy B. (2016c) L'espace, le temps, l'entropie, Editions universitaires européennes, 120 p.
- Guy B. (2017a) What can a better coupling between space and time concepts bring to thermodynamics? <hal-01529570>.
- Guy B. (2017b) Hasard, espace, temps : introduction à une approche relationnelle de la probabilité, <hal-01468456>.
- Guy B. (2018) Sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles : une clé pour reprendre des problèmes de la physique, <hal-01870027 >.
- Guy B. (2019a) *ESPACE = TEMPS. Dialogue sur le système du monde*. Paris : PENTA Editions, 232 p.

- Guy B. (2019b) La transformation de Lorentz, le temps et l'espace. Généralisation du facteur gamma en fonction de la direction du mouvement caché dans les horloges, <hal-02068970>.
- Guy B. (2019c) Remarques sur ce qui est appelé « perception du temps » en psychologie et neurophysiologie, <hal-02195919>.
- Guy B. (2020a) Les sciences humaines et sociales et la trilogie temps / espace / mouvement, revue *Cosmopolis*, 2020, 1-2. Et <hal-01870014>, 2018.
- Guy B. (2020b) Quelles images pour sortir de l'espace et du temps ? in: *Imaginarios Tecnoscintíficos*, organizadores Juliana Michelli S. Oliveira, Rogério de Almeida, David Sierra G., FEUSP Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, vol 1, 92-121.
- Guy B. (2020c) La transformation de Lorentz, le temps et l'espace. Généralisation du facteur gamma en fonction du mouvement caché dans les horloges, communication congrès général Société française de Physique, Nantes, <hal-02068970>.
- Guy B. (2020d) Flèches du temps et de l'espace. Une compréhension du second principe de la thermodynamique. *Entropie*, 1, 1, 27 p.
- Guy B. (2020e) Le rythme à la croisée des mouvements de l'homme et des mouvements de la nature. Revue *Plastir* n° 57, 03 2020.
- Guy B. (2020f) Are there relativistic effects (in the sense of the relativity theory) in the perception of time? Elements for interpreting the experiments of Caruso et al. (2013), <hal-02509750>.
- Guy B. (2021a) Le mouvement précède l'espace et le temps. Où le montrer ? Comment le dire ? <hal- 03364629>, 23 p.
- Guy B. (2021b) Eléments d'histoire des concepts d'espace et de temps : la place du mouvement, les glissements de sens, <hal-03442268>.
- Guy B. (2022) Révision du statut de la « vitesse de la lumière » et examen de quelques problèmes cosmologiques, <hal-03860051>.
- Guy B. (2023) A diamond universe, <hal- 04233549>.
- Janossy L. (1971) Theory of relativity based on physical reality. Akademiai Kiado, Budapest.
- Jullien F. (2001) Du temps. Eléments d'une philosophie du vivre. Grasset, Paris, 214 p.

- Leclerc Olive M. (2012) Introduction, *in* : La philosophie du temps en perspective(s), Georges Herbert Mead. Editions de l'EHESS, volume 3, textes rassemblés et traduits par M. Leclerc-Olive et C. Soudan.
- Lee A.R. and Kalotas T.M. (1975) Lorentz transformations from the first postulate, *Am. J. Phys.*, 43, 5, 434-437.
- Leenhardt M. (1947) *Do Kamo, la personne et le mythe dans le monde mélanésien*, 1976, Gallimard, Paris, 314 p.
- Lévy-Leblond J.M. (1976) One more derivation of the Lorentz transformation, *Am. J. Phys.* 44, 3, 271-277.
- Lobo C. (2021) *Locus communis*. De la crise des sciences à l'analytique de l'évidence technique. Pour une critique de la raison logique élargie et approfondie. Academia Vivarium Nostrum, Frascati, Rome, *In defesa dell'uomo*, 25 p.
- Mead G.H. (2012) La philosophie du temps en perspective(s), Georges Herbert Mead. Editions de l'EHESS, volume 3, textes rassemblés et traduits par M. Leclerc-Olive et C. Soudan.
- Merleau-Ponty M. (1945) *Phénoménologie de la perception*, Gallimard 2020, 540 p.
- Morin E. (1990) *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Le Seuil.
- Morin E (2013) *Mes philosophes*, Fayard/Pluriel, 192 p.
- Naïm S. (2006) sous la direction de, *La rencontre du temps et de l'espace*, approches linguistique et anthropologique, Peeters, Paris, 268 p.
- Nottale L. (1998) *La relativité dans tous ses états*, Hachette littératures, 320 p.
- Pagni E. (2015) *Il corpo come fondamento epistemologico: Bergson, Merleau-Ponty, Patocka*, Encontro National de Epistemologia e Metafisica da UFJF, 9-11 Dezembro 2015, unpublished, 28 p.
- Pascal B. (1662) *Pensées*. Texte établi par Louis Lafuma. Point, 2018.
- Piaget J. (1967) *La construction du réel chez l'enfant*, Delachaux et Niestlé, Neuchatel, 342 p.
- Poincaré (1902) *La science et l'hypothèse*,
- Poincaré (1905) *La valeur de la science*, Flammarion, Champs sciences 2011, 190 p.
- Popper K. (1984) *L'univers irrésolu, plaidoyer pour l'indéterminisme*, édition Hermann.

- Quadranti G. (2020) *Le monde comme texte*, Intentio, Les Cahiers, CREALP, Toulon, 260 p.
- Quadranti G. (2023) *Canevas de la théorie de la relativité*, inédit, 2 p.
- Ricoeur P. (1983) *Temps et récit*, tome 1, *L'intrigue et le récit historique*, Editions du Seuil, Paris, 406 p.
- Ricoeur P. (1985) *Temps et récit*, III. RICŒUR Paul, 1985. *Temps et récit 3, Le temps raconté*, Paris, Seuil.
- Vaihinger H. (1923) *La philosophie du comme si*. Préface et traduction de Christophe Bouriau. Nancy : Philosophia Scientiae, Cahier spécial 8, 2013.
- Vaudène D. (2021) *De l'information à l'écriture*, Revue Intelligibilité du numérique, 2, en ligne.
- Viole B. (2009) *Surdité et sciences humaines*. L'Harmattan, Paris.

Annexe 1 Fruits d'une relecture de la théorie de la relativité et de notre compréhension

des liens temps - espace en sciences physiques

Muni des clés présentées dans le texte principal, nous avons, depuis une quinzaine d'années, étudié de nombreux problèmes. Nous redonnons ici les résumés des articles inédits principalement déposés sur les archives HAL (mais aussi pour quelques-uns parus dans des revues à comité de lecture ou dans les actes de congrès internationaux), et qui en rendent compte.

Flèches du temps et de l'espace. La question du lien entre l'espace et le temps se pose en thermodynamique ; il s'agit alors *a priori* d'un temps macroscopique associé à des ensembles de particules. Les formulations habituelles du second principe lient entropie et temps de façon étroite et quasi-exclusive : l'entropie d'un système isolé augmente. Et ceci, qu'on se rapporte à l'énoncé historique (Carnot, Clausius) ou statistique (Boltzmann, Gibbs). Cela ne fournit pas une compréhension intuitive de l'entropie qui reste mystérieuse. De plus, on ne voit pas l'unité conceptuelle qui se cache derrière deux contenus en apparence très différents, portant l'un sur les échanges de chaleur, l'autre sur les probabilités d'un état macroscopique en fonction des états microscopiques. Ces difficultés nous paraissent s'alléger à condition d'insister sur le rôle de la variable spatiale et ses gradients. Ainsi les deux formulations habituelles peuvent être reprises dans ce sens, la première en disant que « la chaleur va du chaud vers le froid » (déjà proposé par Clausius), et la seconde en disant qu'un système hétérogène évolue plus probablement vers l'homogénéité, en prenant le soin de définir des probabilités de trajectoires conduisant vers des états plus ou moins probables. On voit ainsi l'unité conceptuelle du second principe : il exprime que, dans un système isolé, des hétérogénéités, qu'elles soient de température ou d'autres paramètres, ont tendance à s'adoucir, faisant augmenter la probabilité des états microscopiques correspondants. On peut dire que *la flèche du temps est en relation étroite avec la flèche de l'espace*, c'est-à-dire les gradients dans les propriétés du système, temps et espace étant tous deux appuyés sur la matière et ses grains. On peut discuter dans ce contexte une série de sujets. - La notion d'équilibre : elle signifie une invariance du système par rapport au temps, mais le temps lui-même est défini par les phénomènes et fonction de l'échelle à laquelle on les considère ; la limite entre équilibre et déséquilibre relève *in fine* d'un choix. - La question des échelles de temps et d'espace est une autre façon de voir la question précédente : une échelle plus petite est celle où nous ignorons (ou décidons d'ignorer) les mouvements de (sous-)particules éventuelles plus modestes. - Le concept d'entropie suit logiquement : lorsque nous décidons de geler les mouvements à une échelle plus petite, la question se pose : dans quelle situation du système allons-nous faire cette opération ? La réponse la plus raisonnable est : dans sa situation la plus probable ; l'entropie est la fonction qui permet de trouver cette configuration. - L'affectation d'une entropie à une particule individuelle : cela se comprend si l'on envisage que cette particule est construite à partir de particules plus petites dont on prend la configuration la plus probable. - Les notions de chaleur, d'énergie interne et toutes les fonctions que l'on en déduit et qui sont caractéristiques de la thermodynamique, dérivent également des considérations précédentes : le bilan énergétique de la mécanique est bouclé en prenant en compte les énergies associées au mouvement des particules à l'échelle inférieure. - La distinction entre travail et chaleur : elle n'est pas intrinsèque, mais aussi question d'échelle. D'autres questions encore peuvent être discutées de cette façon (la distinction intérieur / extérieur pour un système, l'utilisation des expressions $d_i S$ et $d_e S$, la définition ou non d'une production d'entropie suivant l'échelle choisie et la compréhension de toute une hiérarchie de « thermodynamiques » et d'écritures du second principe)²⁶. Le problème du temps en thermodynamique, c'est-à-dire l'irréversibilité des lois macroscopiques par contraste avec la réversibilité des lois de la mécanique rassemble un certain nombre de ces propos. A la compréhension pragmatique de l'irréversibilité déjà proposée par divers auteurs (les perturbations poussent le système dans son état le plus probable²⁷) se relie une compréhension plus fondamentale liée à l'indétermination de la frontière entre espace et temps et à celle de la position des particules. La limite entre réversibilité et irréversibilité résulte d'un choix en relation avec les échelles d'intérêt.

²⁶ Texte extrait de : Guy (2016c et 2017a).

²⁷ Ce qui nous demande d'étudier le caractère aléatoire de ces perturbations et leurs conséquences sur les trajectoires des particules ; les perturbations aléatoires ont toujours tendance à effacer les hétérogénéités.

Composition de transformations de Lorentz non colinéaires. Une question plus technique concerne les transformations de Lorentz, pilier de la théorie de la relativité ; elles nous montrent comment les variables d'espace et de temps se transforment lorsque l'on passe d'un repère à un autre en mouvement relatif. Des difficultés se rencontrent dans les situations où l'on compose des transitions entre trois repères dont les vitesses relatives sont non colinéaires, c'est-à-dire non parallèles. On a alors du mal à corrélérer le passage direct du premier au troisième repère et la succession des passages du premier au deuxième, puis du deuxième au troisième repère. On n'a pas simplement $T_{13} = T_{12} \circ T_{23}$ où T_{ij} est la transformation de Lorentz faisant passer du repère i au repère j , et où \circ désigne la composition ou multiplication des opérateurs linéaires correspondants. Pour comprendre cette difficulté, il est utile de regarder de plus près les deux grandes classes de transformations de Lorentz définies dans la littérature et qui servent de façon différenciée dans ce problème : - les transformations spéciales, ou *boosts* (dans le cas d'un déplacement parallèle des repères), et - les transformations générales dans le cas de déplacements non parallèles. Pour définir ces dernières, on a besoin d'effectuer des rotations : on se ramène d'abord à une transformation spéciale en positionnant un axe du repère mobile parallèlement à la vitesse de déplacement relatif ; puis après transformation de Lorentz on revient à la disposition initiale par la rotation inverse. Les difficultés évoquées plus haut sont en relation avec le fait que les transformations générales perdent la symétrie entre variables spatiales et temporelles, présente dans les transformations spéciales en se restreignant à un seul axe de coordonnées. Selon la compréhension standard, les variables d'espace sont concernées de façon différente du scalaire temps dans les rotations évoquées à l'instant. La symétrie est restaurée en utilisant un paramètre temporel associé à un déplacement, de direction donnée dans l'espace, et ayant un caractère vectoriel. Les rotations des axes que l'on fait pour ajuster pas à pas les transformations générales (vitesses relatives de directions quelconques) aux transformations spéciales (où l'on manipule une seule paire de coordonnées temporelles et spatiales en dualité) vont alors avoir des effets identiques sur les variables spatiales et sur les variables intermédiaires de position qui servent à définir le scalaire temps. Cette compréhension des choses permet de rendre plus simple la composition de transformations de Lorentz non colinéaires alors que la discussion classique conduit à des situations inextricables ; ces dernières, bien analysées par les physiciens critiques, ne sont pas résolues, ni du point de vue mathématique, ni du point de vue de la signification physique, par les nouvelles rotations, dites de Wigner-Thomas, que l'on doit rajouter. Ceci montre pour les formulations standard de la relativité, dans des situations il est vrai rares et de peu de conséquences pratiques, l'intérêt d'une reprise technique du formalisme dans la voie que nous avons proposée²⁸.

Sur l'âge et le vieillissement comparés de deux jumeaux. La discussion de ce que l'on appelle le paradoxe des jumeaux nous donne une autre occasion de mettre à l'épreuve nos propositions. Plus d'un siècle après son énoncé par Langevin en 1911, le paradoxe des jumeaux continue en effet de susciter des débats passionnés dans la communauté des physiciens. S'il en est ainsi, ce n'est pas que l'on chercherait encore les erreurs de calcul ou de raisonnement disqualifiant les uns plutôt que les autres ; ou les expériences discriminantes permettant d'attribuer un âge plutôt qu'un autre à telle entité, différent de sa jumelle, comme si cela devait être imposé par le réel. Pour nous, cette situation révèle que le problème reste mal posé. Certes, avec la théorie de la relativité, l'idée d'un temps absolu qui serait le même partout est abandonnée ; mais, en voulant lui accorder une valeur locale propre, en voulant l'attacher à telle particule de matière (à tel jumeau), *on continue d'absolutiser le temps*. Le temps n'a pas une valeur substantielle qui n'aurait besoin de rien d'autre pour être définie. Sa valeur est relationnelle : il est défini par abstraction à partir des relations mutuelles des objets les uns par rapport aux autres dans l'espace (sinon, pourquoi changerait-il avec le mouvement ? Pratiquement, mesurer le temps revient comme nous l'avons dit à plusieurs reprises, à s'accorder sur le déplacement d'un mobile étalon). Dans ce processus, des conventions laissées au libre arbitre sont toujours nécessaires, et ouvrent à une pluralité d'interprétations. On peut montrer la variété des différences d'âge (dans un sens ou dans l'autre ; ou l'absence de différence ; rejoignant en cela les différents points de vue rencontrés) que l'on peut attribuer à des jumeaux, suivant les conventions faites pour mesurer le temps, c'est-à-dire en particulier celles concernant *la direction* du mouvement lui correspondant dans les horloges, et le type de modélisation physique adopté. Le formalisme relativiste au sens large est présent dans ces situations. Les équations utilisées ne peuvent se passer d'*interprétation* mettant à jour des choix différents pour le repérage du temps. Cela ne se pose pas lorsque le temps se définit tout seul sans besoin de choisir (de montrer) un mouvement. Il convient de distinguer *âge* (en relation avec un simple repérage) et *vieillesse* (en relation avec des phénomènes à discuter dans chaque cas). Un même cadre conceptuel nous paraît pouvoir être défini, unifiant la discussion sur la relativité standard d'une part, et notre compréhension de l'espace et du temps d'autre part, et n'écartant pas le point de vue des physiciens

²⁸ Texte extrait de : Guy B. (2010).

critiques sur le sujet²⁹. Il permet également de combler en partie le fossé d'incompréhension entre Einstein et Bergson sur ces questions.

Relations de degré zéro. Nous avons à plusieurs reprises dans nos travaux évoqué l'intérêt de considérer des formulations des lois physiques mettant en jeu au niveau fondamental un meilleur couplage entre les variables d'espace et les variables de temps. Nous les appelons lois ou relations *de degré zéro* ; nous les voyons déjà fonctionner dans la physique. En effet, les grandeurs y apparaissent souvent par groupes de deux (par exemple les paires {champ électrique, champ magnétique}, {énergie, quantité de mouvement}, {charge, courant} etc.) ; et on retrouve ces grandeurs dans des lois physiques se manifestant également en binômes (les équations de Maxwell vont par paires ; énergie et quantité de mouvement se retrouvent dans deux types d'équations, exprimant des conservations d'une part et des lois de forces d'autre part, etc.). Ces constats révèlent des qualités fondamentales de nos représentations possibles du monde, à comprendre dans une « pensée de la relation » : nul sens à une grandeur seule, mais à une dualité de grandeurs, ou mieux à des *variations liées de deux grandeurs* ; et les points de vue possibles (spatial / temporel) sur ces variations peuvent eux-mêmes être échangés. Pour le temps et l'espace, le constat est le même : nul sens à une variable d'espace ou de temps seule, mais à leur dualité et à leurs variations associées. Sur cette base, nous proposons qu'une loi élémentaire de la physique relie les dérivées partielles de deux grandeurs en dualité, par rapport au temps et à l'espace respectivement. Du fait de la symétrie espace - temps, l'échange, dans l'équation de la loi, des variables temporelles et spatiales, ou des deux grandeurs en dualité, donne une autre loi admissible. Cette approche permet de comprendre, *comme deux formes de la même loi*, des paires de lois de la physique *a priori* distinctes, et reliant chacune des combinaisons des dérivées temporelles et spatiales des grandeurs en dualité : ainsi les lois qui expriment des conservations d'une part, et celles qui expriment des fonctions de forces d'autre part, reliant des dérivées spatiales (dans des divergences dans le premier cas, dans des gradients dans le second), à des dérivées temporelles. Ainsi pouvons-nous interpréter la deuxième loi de Newton (la dérivée temporelle de la quantité de mouvement est égale au gradient de l'énergie) et la loi de la conservation de l'énergie (la divergence de la quantité de mouvement est égale à la dérivée temporelle de l'énergie) *comme deux formes de la même loi*. On peut lire de la même façon les diverses équations de Maxwell. Sous leur forme élémentaire, les lois proposées sont invariantes par transformation de Lorentz, et les grandeurs en dualité se transforment par des relations analogues à celles portant sur les coordonnées spatio-temporelles (on pourrait inversement parler du temps et de l'espace comme des fonctions des champs de grandeurs en dualité)³⁰.

Relations d'a-certitude. Les dualités rencontrées dans les relations de degré zéro vont se manifester d'une façon particulière à propos des valeurs numériques attribuées aux grandeurs physiques ; ces valeurs sont soumises à diverses sources de variabilité semblant limiter leur bonne connaissance. On connaît déjà les *incertitudes* ou *erreurs* associées au processus de mesure. Il y a ensuite l'*indétermination* imputable au fait que telle grandeur physique n'est pas susceptible par elle-même d'avoir une valeur précise mais montre un spectre de valeurs. Une troisième source d'incertitude, dénommée *a-certitude* pour la différencier des deux premières peut être distinguée³¹. Elle est en relation avec les propriétés de solidité que l'on est forcé d'attribuer, sans en être certain, aux différents éléments du cadre de référence selon lequel les représentations sont construites : les étalons (auxquels sont comparées les grandeurs à mesurer pour obtenir des valeurs numériques), les constantes, les lois, les repères d'espace-temps, les mots mêmes utilisés. L'a-certitude, c'est la déclaration d'une certitude qui se nie elle-même dans sa fragilité. Des conséquences concrètes en sont dérivées : – relations d'a-certitude, portant sur des grandeurs connues non séparément mais en composition l'une avec l'autre : la méconnaissance du repère, source de variabilité, est simulée par un petit déplacement dans une transformation de Lorentz ; – discussion sur la dimensionnalité des représentations. On en retire le point positif du constat du caractère provisoire des théories, la liberté de faire certains choix, associés à des désignations, sur lesquels nous bouclons l'énoncé de nos lois et la mise en œuvre de nos mesures. Ainsi le postulat de constance de la vitesse de la lumière dans le vide permet de construire nos représentations de l'espace et du temps à l'intérieur de la théorie de la relativité ; l'a-certitude associée favorise le recul par rapport à cette construction et l'acceptation plus sereine des phénomènes de non-localité (ou non-séparabilité) et non-temporalité, étudiés aujourd'hui dans le cadre de la mécanique quantique ; elle ouvre encore à la possibilité de neuf degrés de liberté pour les modèles

²⁹ Texte extrait de : Guy B. (2015b).

³⁰ Textes extraits de : Guy B. (2012).

³¹ Extrait de : Guy B. (2014).

physiques (nombre également requis par les théories de la supersymétrie et des supercordes). L'a-certitude est une conséquence de la pensée relationnelle.

Hasard, espace, temps. L'aspect « mesure » des probabilités renvoie toujours concrètement, pour un problème donné, à des *comparaisons de morceaux d'espace et/ou de temps occupés par les divers événements discutés*. Et nous savons que les mesures d'espace et de temps sont établies à travers la confrontation entre différents phénomènes physiques et supposent des choix arbitraires quant à la définition des étalons. Une approche relationnelle de la notion de probabilité peut ainsi être envisagée, le caractère relationnel des uns (espace, temps) retentissant nécessairement sur les autres (hasard, probabilités)³². Le modèle probabiliste attaché à telle série d'événements, que nous qualifions d'« apparents », se construit en opposition à, ou en composition avec, un autre modèle probabiliste, concernant un ensemble d'événements « cachés » ; ceux-ci servent de jauge et leur loi est uniforme (les probabilités de leurs différents événements sont égales). Les deux points de vue peuvent être échangés, en s'appuyant, pour définir la jauge, sur les événements initiaux du modèle de probabilité non uniforme : on leur accorde alors une loi uniforme, et, par comparaison, on définit de nouvelles mesures pour le modèle caché initialement uniforme. Parlons de formulation duale du problème, par opposition à sa formulation primale initiale. Suivant les circonstances, suivant l'histoire, on peut être amené à changer d'étalon. On voit ainsi un caractère inéluctable de récursivité dans la démarche : il y a un aspect relationnel, révisable, de discussion et de choix des étalons au sein même des probabilités. Cela permet de contribuer au débat entre fréquentistes et bayésiens (il n'y a pas de probabilité intangible sans nécessité d'aucun choix) et de formuler quelques considérations générales sur le hasard, indéfinissable de façon substantielle : on ne peut qu'opposer des situations plus hasardeuses, ouvrant de façon égale à un ensemble d'éventualités (auxquelles on attache de façon révisable un caractère d'étalon dans une loi uniforme), à des situations moins hasardeuses où telle ou telle éventualité a davantage de poids (ou à la limite, reste seule). Une des applications potentielles se rapporte à la conciliation conceptuelle de la relativité générale et de la mécanique quantique, où interviennent des fonctions à caractère probabiliste (voir section suivante). Les sauts qui y sont observés sont compris comme des intervalles de valeurs des grandeurs de faible probabilité, c'est-à-dire de faible occupation de l'espace et du temps.

A propos de gravitation quantique. Pour de multiples raisons, la relativité générale et la mécanique quantique ont une coexistence difficile, qui se cherche encore. Ce qui frappe, quand on observe les travaux des physiciens qui s'essaient à faire converger d'une façon ou d'une autre les deux théories, c'est le degré élevé de technicité mathématique. Sans être complètement capable de les juger, faute de les suivre dans tous leurs développements, nous formulons l'acte de foi qu'il manque à cette entreprise un nouveau regard conceptuel ; c'est en reformulant les bases mêmes de notre intellection que l'on pourra avancer. Plus précisément, les deux théories se font des représentations différentes de l'espace et du temps, et il nous paraît intéressant de reformuler la question en se rapportant à notre compréhension de ces concepts, construits en opposition l'un à l'autre à partir des phénomènes physiques, et non constituant un cadre extérieur *a priori*. Dans le cadre d'une pensée relationnelle, on ne peut que comparer des phénomènes à d'autres phénomènes, et de cette confrontation naissent les repères d'espace-temps, dessinés par les trajectoires de certains phénomènes considérés arbitrairement de façon privilégiée. C'est dans ce cadre qu'il faut penser la possible association de la relativité générale (qui n'a pas le monopole de l'espace et du temps) et de la mécanique quantique (qui n'a pas le monopole de la quantification, cette dernière devant être comprise par la comparaison de deux classes de phénomènes dans une vision probabiliste). La question générale à se poser est celle d'échanges possibles entre les différents points de vue, appuyés sur les divers phénomènes possibles, c'est-à-dire ceux sur lesquels espace et le temps sont définis, et les autres. Ce ne sont pas l'espace et le temps qui disparaissent, ce sont les points de vue qui s'intervertissent. Ces échanges sont rendus possibles en représentant espace et temps, comme les autres phénomènes, par une paire de champs (r, t) ; r et t sont des vecteurs dans un espace à trois dimensions (le temps est marqué par la position d'un point mobile dans le même espace que celui définissant la position des points), en opposition aux paires de champs (f, g) associées aux autres phénomènes (comme l'est la paire des champs électrique et magnétique). On peut *in fine* envisager une quantification de l'espace et du temps ; on peut envisager encore la définition de temps et espace par la seule mécanique quantique. Ces quelques idées ouvrent un cadre préliminaire et qualitatif comme base de futures recherches quantitatives³³.

³² Texte extrait de : Guy B. (2017b).

³³ Extrait de : Guy B. (2016a).

*Facteur γ de la transformation de Lorentz*³⁴. Revenons sur la transformation de Lorentz ; il convient d'examiner son articulation avec la construction même du concept de temps. Ce dernier n'existe pas tout prêt, en attente d'être enrôlé dans les équations de la physique mathématique. Toutefois, lors de la dérivation de la transformation, l'existence du temps n'est pas contestée. Dans ces conditions, la notion d'horloge ne fait pas l'objet de discussion spéciale. Nous voulons critiquer cette démarche classique car, si l'on veut bien approfondir et contester cette existence même du temps, on est conduit à « ouvrir » les horloges et à regarder ce qui s'y passe... On s'aperçoit que l'on y transforme toujours un mouvement en temps (une horloge est un point de vue sur un mouvement). Dans ces conditions, il s'agit de reprendre de façon concrète, c'est à dire en regardant telle ou telle horloge particulière, ce qui se passe à propos du temps. Dans le cas d'une horloge atomique comme aujourd'hui, c'est d'un mouvement de lumière qu'il s'agit. Dans ce contexte, nous sommes amenés à comparer la relation d'un même photon à deux repères (au repos / mobile ; c'est ainsi que l'on définit les deux horloges) tout en lui attribuant la même vitesse (deuxième postulat de la relativité). La nouvelle démarche conduit à étudier l'écriture de la transformation en fonction de l'orientation du mouvement définissant le temps. On élargit le sens du facteur γ de la relativité, le faisant dépendre non seulement, comme dans le cas standard, du rapport $\beta = v/c$ des modules des vitesses (du mouvement relatif des repères et de la lumière), mais aussi de l'angle δ entre ces deux mouvements. Une relation générale $\gamma = \gamma(\beta, \delta)$ est proposée qui permet de retrouver dans un même cadre diverses transformations déjà connues, dont celle de Lorentz (l'intelligence du mot transformation est renouvelée dans le sens d'accommoder tel mouvement de lumière particulier, et non tous les mouvements possibles).

*Examen de quelques problèmes cosmologiques*³⁵. Dans un passé récent, nous avons discuté de problèmes cosmologiques. Le problème de la matière noire ne nous paraît pas un problème de matière (un problème de particules, de gravité, d'énergie...). C'est d'abord un problème de vitesses v d'objets célestes surévaluées. Un facteur α d'environ 2.4 est observé par rapport à ce qui est attendu ; traduit en masses, en élevant au carré, $(2.4)^2 \approx 6$, c'est le ratio entre la matière noire postulée et la matière baryonique. Nous pensons approprié de remettre sur le métier notre compréhension des étalons d'espace et de temps, et le rôle donné à la vitesse de la lumière c . Cette dernière n'a pas de sens toute seule ; elle s'évalue en comparaison avec d'autres mouvements. Symétriquement, les vitesses des mobiles offerts à notre investigation sont *in fine* évaluées par des rapports v/c (en particulier, pour les objets célestes lointains, par effet Doppler). Nous tombons sur un cercle de régressions sans fin, où l'on compare des rapports v/c entre eux, cercle arrêté en donnant 'provisoirement' à c une valeur étalon (dans un statut de fiction à la Vaihinger). Il importe de ne pas détourner notre regard sur ces circularités. Respectant les rapports v/c , qui seuls sont 'réels', nous souhaitons diminuer les numérateurs, pour les accorder aux vitesses attendues dans un cadre théorique éprouvé. Nous sommes alors encouragés à postuler, à l'échelle cosmologique de millions à milliards d'années-lumière, une vitesse de la lumière inférieure d'un facteur $\alpha \approx 2.4$ à sa valeur à l'échelle locale (système solaire). Les interactions de nature gravitationnelle entraînent une vitesse 'macroscopique' moindre, comme dans les milieux réfringents. Un effet Shapiro étendu à l'échelle de l'univers, modélisé avec la métrique de Schwarzschild pour une densité moyenne ρ_u et un rayon gravitationnel équivalent R_u en rend compte. Remarquablement, des univers avec des indices supérieurs à deux sont tout à fait concevables, et leurs propriétés sont proches de celles que nous déterminons pour notre propre univers. Cette proposition vient apporter un regard neuf sur l'ensemble des problèmes cosmologiques. Elle conduit à un rallongement de l'histoire de l'univers : il pourrait avoir quelques 33 milliards d'années (soit l'âge annoncé aujourd'hui, de 13,8 milliards d'années, multiplié par 2,4), sans compromettre l'enchaînement des étapes définies par les physiciens ; ni les fondements de la théorie de la relativité. *Les puissances du paramètre α , soient $\alpha^1 = \alpha$, α^2 et α^4 permettent de retrouver la hiérarchie et les bonnes proportions pour la trilogie matière baryonique / matière noire / énergie sombre*, les deux derniers termes étant le nom des corrections nécessaires pour compenser l'erreur d'appréciation concernant la vitesse de la lumière à l'échelle cosmologique (l'un dans le cadre de la mécanique newtonienne, l'autre dans celui de la relativité générale). Le télescope spatial James Webb a mis en lumière la question des galaxies "impossibles". L'âge plus important de l'univers lui permettrait d'accueillir dans ses phases relativement jeunes des objets déjà vieux et structurés par rapport aux échelles de temps établies pour eux ailleurs.

³⁴ Extrait de Guy B. (2020c).

³⁵ Extrait de Guy (2022, 2023).

Annexe 2 Fruits d'une relecture de la théorie de la relativité et des relations temps - espace dans le domaine des sciences humaines et sociales

De même que pour l'Annexe 1, nous redonnons ici des morceaux de textes inédits déposés sur les archives ouvertes HAL. Des articles sont également parus dans des revues à comité de lecture : *Philosophia scientiae*, *Parcours anthropologiques*, *Cosmopolis*, *Plastir*. Tout ceci permet d'évoquer les différentes étapes de notre découverte du temps humain et de l'espace.

Première étape : un moment de nomadisme. La première étape de notre voyage, est celle *du mouvement primaire*, avant même les saisies dissociées de l'espace et du temps³⁶. Comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises dans nos travaux, cette étape peut à peine se dire : elle s'appréhende par l'intuition bergsonienne (cf. Bergson, 1938), par la pensée compréhensive par images. C'est l'étape de l'élan qui nous pousse vers l'avant, sans songer à quelque retour en arrière que ce soit : mouvement du nomade qui part à la recherche de nouveaux territoires, du migrant qui quitte sa patrie sans sécurité ; mouvement de la pensée qui devine les choses avant de pouvoir les dire, sans mots déjà solides pour ce faire, les mots anciens n'étant pas adaptés. C'est aussi la performance de l'artiste qui crée dans un jaillissement de sa personne ; de celui qui découvre l'œuvre d'art en un mouvement co-créateur. Parmi les sciences humaines et sociales, sont concernées au premier chef l'anthropologie (le sujet en mouvement dans la multitude des situations possibles offertes par l'existence : Cerlet, 2011, 2014 ; Pagni, 2015), l'ethnologie (des peuples se sont passés de concepts séparés de temps, et/ou d'espace et se sont appuyés sur les mouvements de la nature : Leenhardt, 1947 ; Jullien, 2001), les arts et la réflexion esthétique (des arts plastiques, peinture, sculpture, à la danse, en passant par l'architecture) ; sans oublier la littérature qui rend compte des motions internes du sujet en relation avec un environnement changeant (cf. la durée bergsonienne). Dans les divers discours que l'on peut tenir pour analyser ces situations, la « clé du mouvement primaire » permet de souligner à sa façon le lien entre le déroulement du temps et l'appréhension d'un paysage qui se révèle nouveau et non pensé auparavant. On utilise certes des mots, auxquels on attribue une stabilité minimale, celle de leur sens périmé peut-être (ce qui est dans une certaine mesure contradictoire avec ce que nous venons de dire, et renvoie déjà à l'étape deux ci-après) ; mais tout le talent du poète, de l'écrivain, de l'artiste, du chercheur, est de proposer, à défaut de mots nouveaux, des nouvelles combinaisons des mots anciens pour désigner des choses nouvelles.

La linguistique est également concernée par cette étape un. Celle-ci permet de comprendre la convergence des mots de l'espace et de ceux du temps (Naïm, 2006), si souvent repérée sans véritable explication (autre que celle consistant à dire que l'espace précède le temps, le second faisant appel aux mots du premier faute de mieux ; - nous schématisons passablement !-). Une suite de positions dans l'espace est toujours associée aux étapes d'un cheminement, comme autant de repères temporels. Se cache ici aussi la possibilité, déjà offerte par la langue, de n'utiliser qu'un seul registre pour parler de nos rapports au monde, et tout décrire soit en termes d'espace soit en termes de temps.

Un début de séparation entre espace et temps : les fondations. La deuxième étape de notre voyage, bien amorcée dans ce qui précède, s'attarde sur la séparation entre espace et temps, ou le début d'une séparation, dans la mesure où espace et temps ont simplement d'abord valeur locale, donc multiple (avant les conventions sociales permettant de définir un seul espace-temps commun). La disjonction se fait par un retour en arrière, fondé sur une hypothèse fragile, mais féconde : celle qui suppose une certaine stabilité des points construisant l'espace (des mots constituant la langue) et un retour possible sur ses pas (opposition relationnelle entre ce qui est plus mobile et ce qui est moins mobile...). La réflexion sur cette étape d'établissement d'entités réputées solides concerne tous les champs des sciences humaines et sociales dans la construction de leurs fondements. On peut examiner dans chaque cas la nature des hypothèses faites, leurs limites d'application, leur possible révision ; cette clé nous donne aussi un point de vue surplombant permettant de mieux comprendre les contradictions éventuelles entre divers choix. Dans chaque cas, nous devons renoncer à l'invisible du temps (il n'y a que des mouvements, rien de plus) et à son caractère supposé strictement contraint par le réel (il reste des choix à faire). La question de la coupure permettant de définir un objet d'étude, comme séparé d'autres objets laissés à part, et

³⁶ Nous pouvons aussi parler d'espace et de temps « primaires ». La référence Guy (2020a) nous a servi pour ces passages.

celle des échelles de mouvements relatifs, se retrouve aussi bien du côté de la sociologie, de l'anthropologie, des sciences politiques (construction des groupes sociaux³⁷), et de la réflexion sur l'évolution des sociétés humaines, que dans le développement de la pensée abstraite (apparition de dualités, fondation d'ontologies provisoires ; contemplation de l'incomplétude, du vide, des blancs inévitables suspendus derrière ces choix, etc.). De façon concrète, c'est en résumé la fondation de la sédentarité par opposition au nomadisme (Guy, 2015a).

Au cours de cette deuxième étape, nous remarquons la multiplicité possible d'espaces et de temps (sans encore, comme nous l'avons dit, privilégier en son sein un unique espace-temps social). Ce constat établit un des apports importants de notre approche. Il vient fournir une première libération par rapport au temps monopolistique des physiciens, que nous devons certes prendre en compte. Cette multiplicité parle à la littérature, à l'anthropologie : le sujet est au milieu d'une multitude de temps et d'espace qu'il peut « tisser » à sa guise, ou qui font plus ou moins irruption le long du cheminement de sa vie intérieure³⁸. Dit d'une autre façon, c'est la multitude de mouvements, internes et externes au sujet, qui sont comparés / composés les uns aux autres (cette confrontation est un autre nom de l'espace et du temps). Toutes les disciplines de la psychologie au sens large sont concernées : psychologie, psychiatrie, psychomotricité (le mouvement précède la psychologie ; perception et action sont deux faces de la même pièce), neurosciences, cognition... Le sujet change lui-même par les déplacements qu'il effectue dans l'espace.

Nous pouvons ici parler de façon préliminaire de ce qu'on appelle « perception du temps » chez le sujet humain (Guy, 2019c). Une meilleure compréhension de cette question est utile pour deux raisons : - l'approfondissement d'une connaissance de type fondamental en psychologie et neurophysiologie ; - la recherche d'une modélisation appropriée des processus internes à l'œuvre lorsque le sujet accomplit diverses tâches, en particulier sportives. Les spécialistes affichent leur embarras : on ne sait précisément ni où, ni comment dans le cerveau, fonctionne le « sens du temps » qui pilote le sujet dans sa conduite. Pour nous, la question doit être retournée : il n'y a pas à chercher de temps, il n'existe pas. Il est construit (en opposition à l'espace et en dualité avec lui), par comparaisons de mouvements dans une rationalité relationnelle. Le sujet est susceptible de construire plusieurs temps selon les circonstances sociales, psychologiques, physiques, biologiques où il se trouve. Le temps physique mesuré par les horloges externes et le (les) temps interne(s) au sujet ont la même légitimité et les mêmes propriétés qualitatives. Ils ont des propriétés quantitatives différentes, et doivent être reliés les uns aux autres. L'analyse du présent spéculaire fournit un angle d'attaque pour cela.

Par un jeu de miroir, les mots et les concepts mêmes, sont définis par des sommes de mouvements : multiplicité des objets, multiplicité des espace-temps. Nous avons parlé à ce propos de « pragmatique spatio-temporelle » (ou pragmatique de mouvement, Guy, 2015a) : nous y définissons tout objet par la somme (infinie) des mouvements que l'on peut faire en relation avec lui ou à son propos. Ce n'est pas d'abord : « nous appréhendons l'objet » ; puis : « nous le mettons en mouvement » ; c'est : « les mouvements de / autour de l'objet précédent et aident à sa définition ». Cette façon de voir irrigue les diverses sciences humaines et sociales : la réflexion sur l'économie circulaire n'est pas le dernier lieu où le constater.

Au sein de la multiplicité des espaces et des temps, c'est là où les frontières entre ce que l'on désigne de l'une ou l'autre façon (espace / temps) que l'on peut déplacer, par le choix de ce qui est considéré ou non comme négligeable en matière de mouvements relatifs. C'est l'occasion de parler des rapports changeants entre histoire et géographie (on parlera de la confrontation d'ondes historico-géographiques), d'insister sur l'incarnation dans l'espace de la mémoire de l'histoire, du patrimoine, de la politique, etc. Nous pouvons aussi « repousser » espace et temps comme d'inaccessibles pôles purs et envisager des concepts intermédiaires entre eux. Toutes sortes de disciplines (anthropologie, ethnologie, histoire, géographie, linguistique etc.) sont concernées par cette opportunité.

Les conventions d'un espace et d'un temps de large valeur sociale. La troisième étape va voir le choix d'un temps et d'un espace uniques, de valeur sociale, indispensable pour un minimum de communication et coordination au sein du groupe humain. C'est ici qu'interviennent les outils des savants et des physiciens, eux qui observent avec attention les mouvements du soleil et des astres, ceux des particules de matière et jusqu'aux

³⁷ Voir Dujardin Ph. et Guy B. (2012) et la définition d'« opérations invariantes de la pensée ».

³⁸ Voir le numéro 12 de la revue *Parcours anthropologiques* (2017).

photons, et travaillent à leur mise en cohérence. C'est là que se pose de façon également nouvelle les rapports entre sciences dites dures et sciences humaines et sociales, les premières offrant aux secondes un cadre solide pour se repérer, mais qui doit être agréé au niveau collectif (choix de l'étalon) ; les secondes orchestrant cette discussion et ne voyant plus le bornage des premières comme un carcan auquel se raccorder coûte que coûte. Cette étape permet la production de mesures quantitatives, par comparaison au mouvement étalon. Toutes les sciences humaines et sociales sont concernées peu ou prou par cette quantification à regarder de façon sereine, c'est à dire non appuyée sur une vérité ultime, inaccessible.

A ce stade, nous sommes en possession de plusieurs voies de repérage de l'espace et du temps dont l'une a un rôle particulier (celle proposée par les sciences dites dures), et nous sommes naturellement conduits à nous positionner par rapport à cette dernière spécialement. Plusieurs des sciences humaines et sociales discutent cette confrontation avec la voie définie par les sciences physiques ; avec son abstraction inévitable, quoique parfois excessive, par rapport aux phénomènes, et les différentes façons de saisir ces derniers dans la variété des objets d'étude. La linguistique par exemple où l'on comprend temps et aspects des verbes en se plaçant dans un espace conjuguant le temps social d'un côté et une opposition particulière temps / espace de l'autre (frontière séparant d'un côté la mobilité associée à l'objet étudié : mise en mouvement, dispersion, désagrégation ; et d'un autre côté l'immobilité associée à ce même objet : arrêt, agrégation, etc.). Nous revenons aussi du côté de l'anthropologie, de la philosophie, ou de la littérature, en cherchant à comprendre, par des mises en relation de voies ou d'échelles différentes d'appréhension de l'espace et du temps, la perception continue ou discontinue du temps humain, le présent spécieux (cf. aussi Ancori, 2020), la trilogie passé présent futur, etc. La mésologie n'est pas loin non plus, qui se préoccupe de l'enracinement de nos concepts dans les mouvements de la nature.

Dans la suite des réflexions précédentes, nous pouvons considérer plus généralement espace et temps sur le même plan que tous les phénomènes offerts à notre investigation : ils sont le nom de la comparaison entre certains d'entre eux qui nous sembleraient plus importants, leur unicité apparente quand nous les nommons comme tels (« le temps, l'espace »), ne tient qu'à une place dans cette hiérarchie. Cette situation se retrouve aussi bien dans les sciences de la nature que dans les sciences humaines et sociales. Nous pouvons de ce point de vue mettre toutes les sciences, des deux pôles, sur le même plan : il y a multiplicité de temps et d'espaces des deux côtés, et toujours la nécessité, dans une démarche relationnelle, d'avoir plusieurs registres à comparer.

Les sections suivantes ne sont pas également reliées au fil que nous venons de dérouler, depuis l'association forte entre espace et temps jusqu'à la définition d'un unique espace et d'un unique temps sociaux. Nous les présentons chacune munie d'un titre succinct.

Séparer le temps de l'espace, c'est aussi couper l'homme du monde. La mésologie (Berque, 1987) propose une critique de l'espace abstrait et étudie les rapports de l'humanité à un espace concret, propre à chacun, le milieu (par opposition à une localisation simplement géométrique dans un espace identique pour tous, que serait l'environnement³⁹). Science des relations, elle propose une réflexion sur les impasses et difficultés dans lesquelles le paradigme de la pensée occidentale nous a conduits, en séparant le monde et la pensée. Celle-ci ne peut se dire en dehors de l'insertion de l'être vivant dans sa géographie palpable. Toutes les sciences humaines et sociales sont concernées par cette importance de l'espace qu'elles ont souvent dédaigné (au profit du temps). Inversement, il faut noter la présence constante du temps dans les relations spatiales, et plus généralement le caractère spatio-temporel de toute relation. Ceci peut s'exprimer en utilisant, à la place de *milieu* seul, la dualité (milieu, récit) ; nous rajoutons à *milieu*, espace propre à chacun, *récit*, appréhension personnelle du temps, dans un sens un peu élargi par rapport à celui de Paul Ricoeur (1983). Chacun des deux termes peut se transformer dans l'autre suivant les échelles spatio-temporelles envisagées. C'est aussi le lien avec divers courants philosophiques qui se montre à cette occasion : pragmatisme, phénoménologie, positivisme... La discussion sur la mésologie permet également des analogies plus techniques entre sciences physiques et sciences humaines et sociales.

L'homme et les rythmes. Arrêtons-nous un instant sur le découpage en rythmes, que l'on retrouve dans toutes les sciences humaines et sociales (Guy, 2020e). Les rythmes sont déjà imposés par la nature, au premier chef les mouvements des astres qui associent toujours des portions d'espace et des portions de temps, en

³⁹ Voir Guy (2016b) où l'on montre de façon plus précise les analogies entre mésologie et différents domaines des sciences dites dures. Les lignes en cours en sont issues.

proportion des vitesses. L'homme soumis à ces rythmes établit et modifie les correspondances temps / espace du ciel en fonction des propres vitesses qu'il peut atteindre, et en fonction des rythmes naturels de départ dont il doit tenir compte. Ainsi on a pu dire que le rythme offert par la succession des jours et la vitesse de transport à cheval imposaient la taille d'un département français ; les nouvelles régions administratives accommodent des transports plus rapides. Les spatialités et temporalités étudiées par les sciences humaines et sociales nous parlent de ces rythmes qui allient toujours chacune à sa façon temps et espace.

Un effet proprement relativiste en sciences humaines et sociales ? Nous donnons dans Guy (2020f) quelques indications sur la manière dont nous comprenons les expériences de Caruso et al. (2013). Le sujet humain estime une plus grande proximité pour les événements futurs, par rapport aux événements passés à la même distance temporelle, s'il est lui-même en mouvement. Ce résultat est discuté à la lumière de notre compréhension de l'espace et du temps, définis uniquement en comparant des mouvements entre eux : la perception du temps revient à comparer des mouvements neuronaux internes invisibles à des mouvements externes visibles. Nous supposons qu'au cours de notre éducation, le temps interne standard a été calibré par rapport à un mouvement externe standard. Tout se passe donc comme si l'image du temps qui passe, du futur qui vient, se référerait en fait au déroulement d'événements qui nous arrivent dans l'espace à une certaine vitesse c , que par "éducation" nous prenons constante (par exemple la marche d'un homme "standard" ; nous prenons la notation c , ce n'est pas la vitesse de la lumière). On conçoit alors (cf. les expériences de Caruso et al.) que, si le sujet humain est en mouvement à la vitesse v , ou s'il expérimente, d'une manière ou d'une autre, un mouvement à la vitesse v , tout en continuant à déclarer que le futur vient vers lui à la même vitesse c , il y a un effet relativiste dans l'écoulement de son temps t' par rapport à l'écoulement t lorsqu'il est au repos. Si, par des expériences, on peut mesurer le nouveau t' par rapport à t , en fonction de v , alors on peut déterminer la valeur de c en utilisant le facteur $\gamma(v/c)$ de la transformation de Lorentz (théorie de la relativité) ; la structure conceptuelle est la même.

Temps et physiologie du sport. Nous pouvons signaler notre contribution à un travail sur la « slackline » dans Gabel et al. (2021). La slackline est une activité utilisée à des fins récréatives, mais elle est également adoptée dans le cadre de la rééducation et de la réadaptation. Issue de la marche sur corde ou "Funambulus", elle a une longue histoire, mais les recherches publiées sont limitées, notamment en ce qui concerne les interventions cliniques et les modèles décrivant les stratégies de contrôle neuro-mécanique. Ces imperfections doivent pouvoir être comblées en fournissant un modèle englobant les circonstances plus larges de l'utilisation de la slackline. Celui-ci détaille la capacité de l'individu à employer des stratégies de contrôle pour atteindre la stabilité lors du mouvement fonctionnel. Il prend en compte les forces mécaniques classiques régies par les lois physiques de Newton, influencées par des facteurs de santé biopsychosociaux et dans la perspective des multiples facettes du temps. Notre contribution se situe à ce niveau, consistant à utiliser plusieurs temps, associés à des processus physiologiques différents, à corrélés aux horloges externes. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour étudier et définir mathématiquement le modèle proposé et permettre une meilleure compréhension du mouvement fonctionnel humain.

Deux regards sur les géosciences. Alors que nous terminons l'écriture de ce texte, de nouvelles publications viennent s'ajouter à celles déjà mentionnées. Sans rallonger la liste bibliographique précédente, citons ici : - un livre « décalé » sur la psychanalyse écrit en collaboration avec T. Brachet (*Visitez le karst de la psychanalyse. Plongez dans l'inconscient*, Penta Editions Paris, 2023) : la dualité structure / histoire (Lacan / Piaget) présente dans cette discipline se comprend comme les deux faces d'une même pièce. Ou encore - un texte à paraître (2024) dans les travaux du Cofrhigeo (Comité français d'histoire de la géologie) : *From deep time to physics : the contribution of geology to the understanding of some fundamental concepts*. L'expérience fondatrice du lien temps-espace fournie par la géologie y est rappelée. Les conséquences sur le déplacement de certains concepts y sont décrites : alors que le roc fournit pour le commun des mortels l'archétype de la stabilité, il faut désormais le voir plutôt comme un processus arrêté...

Annexe 3 A propos de la dualité du relationnel et du substantiel

La figure 2a et les développements qui la sous-tendent ont leurs limites⁴⁰. Nous n'allons pas les exposer en détail ici (une littérature abondante leur est consacrée, c'est le vaste sujet de la *relation*) ; ce qui nous importe dans notre démonstration, c'est de pouvoir dire à un moment donné : nous construisons temps et espace par comparaisons de mouvements. Ces mouvements sont le nom de relations des objets s.l. entre eux, et non avec un temps et un espace déjà là qui auraient acquis un caractère "substantiel". Pour éviter le problème épistémologique qui mettrait en compétition, uniquement dans le champ des mots, les trois termes espace, temps et mouvement (voulant donner au troisième un caractère fondateur sans passer par les deux autres), nous avons invoqué la connaissance incarnée. A ce niveau, l'aspect relationnel s'exprime dans le concret des processus biologiques. Mais si nous donnons de cette façon à ce fonctionnement relationnel un rôle éclairant (le choisissant même comme axe de représentation), l'aspect substantiel n'est jamais complètement absent.

Plutôt que l'un ou l'autre, il y a toujours les deux, dans une polarité qui inclut les contraires ou complémentaires. Le substantiel a rapport à l'activité de pensée qui isole et catégorise. Le langage relève d'une pratique substantielle pour autant que les mots sont détachés les uns des autres et répondent à une entrée du dictionnaire. Mais le processus langagier, et donc la production de sens, relèvent d'une mise en rapport de termes sur le mode relationnel. Au lieu du couple relationnel / substantiel, nous pouvons aussi parler de : continu / discontinu, joint / disjoint, relié / séparé, inclus / exclus, dedans / dehors, dissymétrique / symétrique, proche / à l'écart ... Tout se passe comme s'il y avait un mouvement caché au sein des mots, les brassant et les branchant entre eux dans la cognition humaine⁴¹. Nous avons mis en relief ce qui nous importe le plus dans l'explication d'ensemble : le relationnel ; et avons chassé dehors, ce qui relève du substantiel, de la fiction, de l'abstraction, qui conduit, jusqu'à l'absurde, à la séparation des mots de leur substrat concret, les laissant comme seuls (efficaces) outils de pensée.

⁴⁰ Merci à Philippe Dujardin pour la discussion et les propositions qui ont nourri ces lignes.

⁴¹ Le processus cinématographique où la cognition relie ce qui est séparé, à son imperfection : l'on prétend partir d'images "fixes" (donc l'espace est là séparé du temps) que l'on va faire bouger (voilà le temps séparé de l'espace).

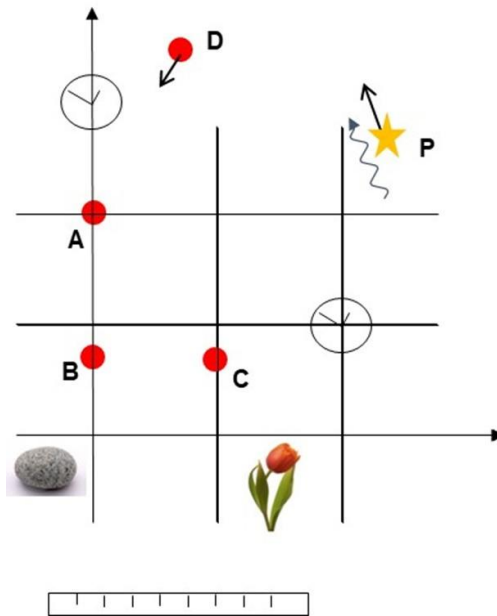


Figure 1 Espace-temps reçu

Dans le cadre d'une pensée substantielle (comme si l'on pouvait contempler le monde de l'extérieur), on se figure un repère d'espace-temps comme composé, d'une part d'un quadrillage arpenté par des règles rigides (où l'on positionne de façon indépendante les uns des autres des points tels A, B, C), et, d'autre part, d'un ensemble d'horloges ponctuelles synchronisées disposées aux nœuds de ce quadrillage. Les mouvements et les vitesses des mobiles variés (tels D), y compris des photons (P) sont définis de façon seconde par les rapports d'espaces parcourus par des temps mis à les parcourir (lus sur les graduations du quadrillage et les horloges). Les liens entre les mesures d'espace et de temps pour deux repères en déplacement relatif sont donnés par les transformations de Lorentz (voir texte). De façon plus générale, les différents objets de pensée sont envisagés indépendamment les uns des autres, et définis par des qualités à prendre dans un réservoir de mots « au-dessus » du monde (le caillou d'un côté, la fleur de l'autre).

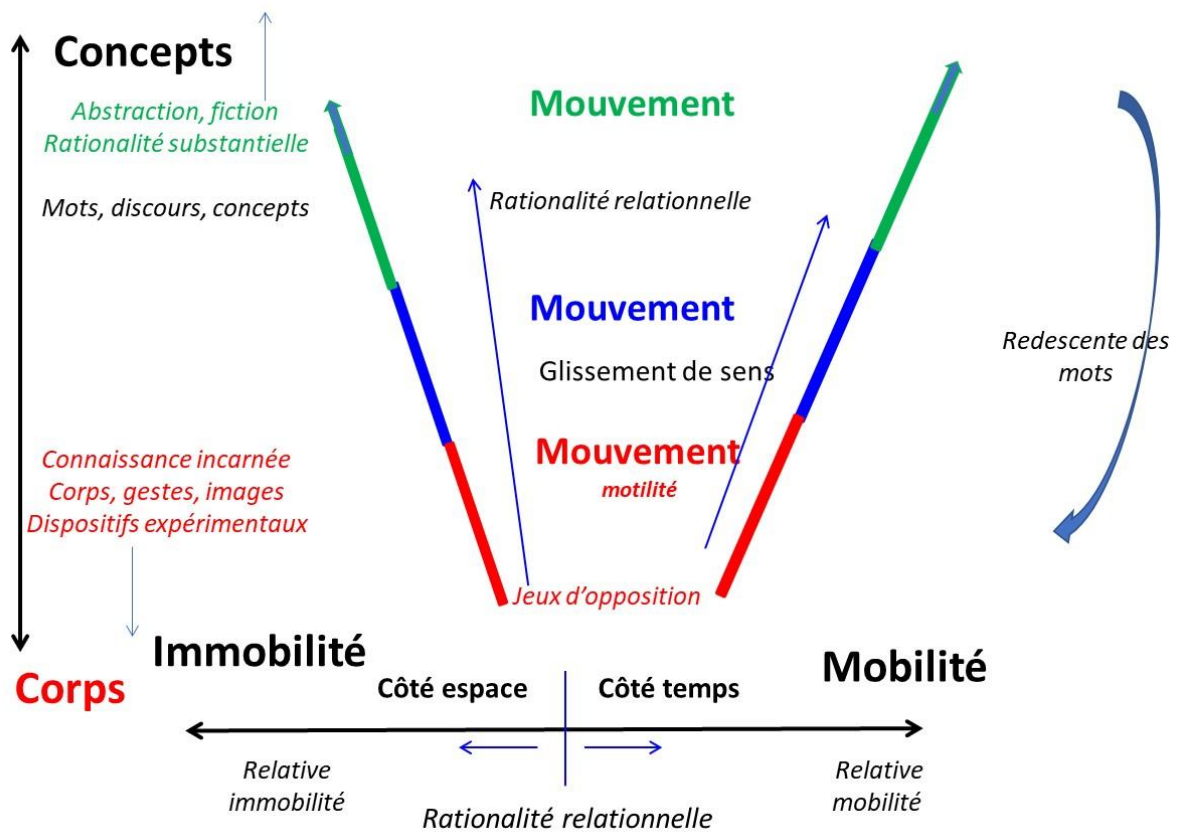


Figure 2a Deux dimensions de pensée pour mettre le mouvement en premier

La dimension horizontale reflète une rationalité relationnelle opposant la mobilité à droite (côté temps) à l'immobilité à gauche (côté espace). La frontière entre les deux est variable et choisie par l'observateur en fonction de ce qu'il souhaite ou est capable d'observer. La dimension verticale oppose la cognition incarnée (le fonctionnement du corps) en bas à la connaissance discursive (le fonctionnement des concepts) en haut. Les mots glissent du bas vers le haut et du haut vers le bas en changeant de « valeur » suivant la situation dans le plan (figuré par un changement de couleur). Le mouvement est d'abord montré (en bas), puis nommé dans tel contexte particulier (position médiane), et enfin nommé de façon plus générale en référence à un espace et un temps fictionnels séparés. La flèche dessinant la redescente des mots, exprime que les mots fabriqués dans la partie supérieure nous servent pour désigner ce qui n'était que montré dans la partie basse ; des glissements de sens suivent ces « déplacements » des mots (se reporter au texte et à l'Annexe 3 pour davantage de précautions sur ce qui concerne la dualité du relationnel et du substantiel).

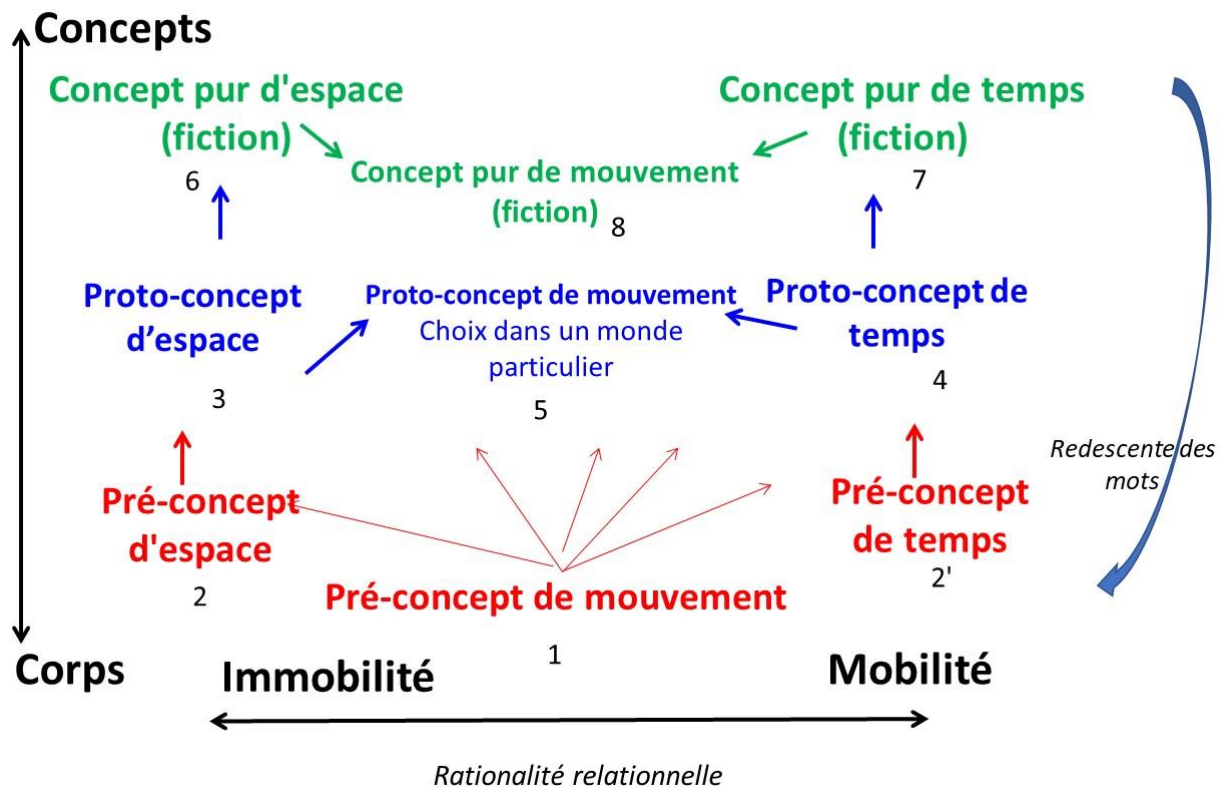


Figure 2b Essai de nomenclature des différentes étapes de construction des concepts et mots d'espace et de temps

En bas du plan, les pré-concepts sont « à peine » dits : ils sont compris dans une connaissance incarnée (nommés par les mots qui redescendent une fois formés dans la partie supérieure du plan). En position médiane, les proto-concepts correspondent aux choix faits dans un monde particulier. En position supérieure, les concepts « purs » se détachent du monde et correspondent à un espace et un temps séparés, fictifs. Les différents numéros (de 1 à 8) correspondent aux différentes étapes de la construction.

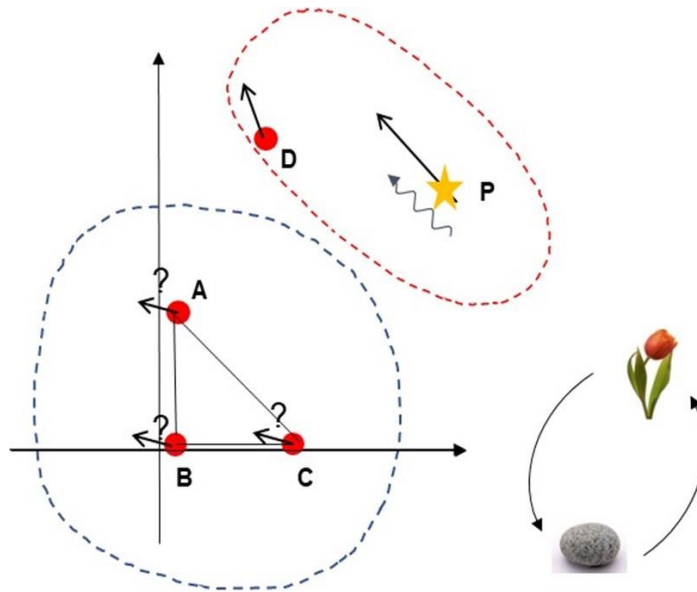


Figure 3. Un champ de mouvements comparés

Nous sommes devant un monde où ni règles ni horloges ne sont données *a priori*. Nous choisissons d'appuyer l'espace et les règles sur les points (tels A, B, C) supposés / décidés moins mobiles que ceux sur lesquels nous nous fondons pour définir des horloges (un mobile élu parmi les points mobiles de type D, et auquel nous attribuons un rôle d'étalon, tel P). La transformation de Lorentz est à écrire dans un premier temps en $(3 + 3)$ dimensions avant d'être écrite en $(3 + 1)$ dimensions. Par contraste avec ce que nous avons présenté sur la figure 1, les objets du monde sont définis les uns par rapport aux autres : on ne peut envisager les uns indépendamment des autres : ainsi une fleur n'est pas un caillou, un caillou n'est pas une fleur.