

Publié dans : Nottale L., 2013, *Esquisse(s)* 4, 13-21. "Traverses, relativités..."

Traverses, relativités.

Laurent Nottale
CNRS
LUTH, Observatoire de Paris

L'histoire des sciences, en particulier de la physique, fournit de nombreux exemples de traversées, de passages au-delà dans l'espace des connaissances. Comment traverser le fleuve de l'ignorance, passer sur l'autre rive ?

Quand il s'agit des théories de la relativité, la méthode de recherche et le but recherché s'unissent. Le principe de relativité repose sur le constat imprescriptible qu'aucune propriété physique n'existe dans l'absolu. Dans le repère propre d'un corps, entraîné avec lui, les concepts de position, d'orientation, de mouvement ou d'échelle de ce corps perdent tout sens. Quelle est la position d'un objet par rapport à lui-même ? Je connais mon orientation par rapport à la Terre, mais quelle est l'orientation de la Terre par rapport à elle-même ?

Galilée fut le premier à constater que, pour tout ce qui participe d'un mouvement, le mouvement est totalement indiscernable, "comme rien", "comme s'il n'était pas", puis à ériger cette vérité fondamentale en principe. Il n'y a donc pas de mouvement ni de repos, compris comme propriétés intrinsèques à un objet. Le même objet, dans les mêmes conditions, est à la fois en mouvement par rapport à un système de référence et au repos par rapport à un autre. Mouvement et repos sont des propriétés relatives, des propriétés de couple, mais ne sont en rien des qualités individuelles. Nous avons tous fait l'expérience de lire un livre tranquillement au repos sur un bon siège, de lever les yeux et de constater que nous sommes dans un train qui roule à 300 km/h. Nous sommes à la fois au repos par rapport au train et en mouvement par rapport à la Terre.

Il en est de même de notre échelle. Pouvons nous donner un sens au fait d'être grand ou petit ? Nous sommes au même moment immenses par rapport à un atome et minuscules par rapport à l'Univers. Il n'existe aucune échelle absolue, mais seulement des échelles relatives. Seul un rapport d'échelles a un sens, jamais une échelle en soi. Que signifierait de vouloir indiquer la taille d'un objet par rapport à lui-même ? Seule l'utilisation d'une référence différente peut donner du sens à la notion d'échelle.

Ainsi il n'y a pas de position, mais seulement des différences de position. L'idée de passage d'un point à un autre, l'idée qu'il existerait un premier point puis qu'une translation nous amènerait à un deuxième, est fondamentalement erronée. Quand, en physique, on identifie un point par une certaine coordonnée x qui semble le caractériser, cette grandeur x est forcément définie par rapport à système de

coordonnées. La valeur x n'est donc pas la position du point, mais bien la distance entre ce point et un autre, l'origine du système de référence. Il y a toujours deux points, jamais un seul, et donc la position du point ou la translation d'un point à un autre ne sont en fait qu'une seule et même chose. Autrement dit, en relativité, il n'y a que le passage.

Il en est de même des échelles. Si l'on analyse un peu plus en profondeur cette idée de position d'un corps et de passage d'un corps à un autre, on voit bien qu'avec la définition habituelle en physique du système de coordonnées, caractérisé par son état (relatif) de position, d'orientation et de mouvement (vitesse et accélération), la coordonnée x est en réalité impossible à définir. Nous avons une origine, des axes, un mouvement ... mais pas d'unité ! Seule une mesure effective peut nous faire dire "l'objet que tu recherches est situé à 20 mètres d'ici". Mais qu'entend-on par là ? Tout simplement que le rapport de la distance qui nous sépare de l'objet et d'une autre distance, définie arbitrairement et appelée "un mètre", est de 20. Ainsi, pas de position sans échelle. C'est un rapport d'échelle, celui entre la taille d'un objet et celle d'un autre objet de référence appelé unité, qui nous permet de donner une mesure de taille ou de position. Ainsi, la mesure de la position de l'objet, qui n'est qu'une "inter-position" et dépend de l'orientation relative des axes du système de coordonnées et de son mouvement relatif, dépend également de l'échelle d'observation, elle-même relative.

Ainsi la simple notion de position met en oeuvre de multiples passages, dans l'espace-temps (positions et instants), mais aussi dans les dimensions d'orientation (angles), de mouvement (vitesse et accélération) et d'échelle (résolution et fenêtre d'observation), et n'est pas séparés d'eux.

Ayant rappelé ce qu'est cette connaissance de la relativité, revenons maintenant à la manière dont elle a été acquise. La grande méthode de découverte scientifique, celle qui a permis d'impressionnants "changements de paradigme" découle précisément de la relativité. C'est l'expérience de pensée par laquelle un Copernic, un Galilée ou un Einstein ont découvert la vérité. Ces expériences mentales, si on les analyse, sont toujours de même nature. Elles consistent toujours en un saut, une traversée par la pensée vers un autre état, un changement essentiel de référence. En se mettant à la place du système ou de l'objet à comprendre, en sautant mentalement de notre état à celui de l'objet, on réalise que les propriétés de ce système disparaissent quand il est vu ou expérimenté de l'intérieur.

Puis en revenant à notre place, dans une traversée inverse, on réalise que ces propriétés, n'ayant aucune existence absolue ou intrinsèque, trouvent leur origine uniquement dans le changement de repère entre l'objet et nous. Absence d'existence propre et relativité sont les deux facettes d'une même pièce. Nous participons ainsi de ce qui semble être autre que nous, mille références différentes donnent mille aspects différents du même objet. Mais parmi tous ces repères, dans celui qui est propre au sujet ou à l'objet, nous par rapport à nous ou l'objet par rapport à lui-même, il n'y a rien ! Tout apparaît donc des seules différences et uniquement par elles.

Ainsi Copernic fut le premier à se décentrer, à penser une Terre qui ne soit plus

immobile et qui tourne autour du Soleil. Le centre de la Terre n'était plus le centre du monde. Pour cela, il dut réfuter l'argument opposé à Aristarque de Samos, qui avait fait une proposition semblable 1700 ans auparavant : si la Terre tournait autour du Soleil, nous devrions ressentir ce mouvement. Mais Aristote lui-même n'a-t'il pas fait remarquer que si nous sommes entraînés avec le mouvement d'un navire qui court régulièrement sur son ère, sans accoups, nous ne sentons pas ce mouvement. Rien dans notre expérience n'invalide donc le mouvement possible de la Terre. Sur la base de la même expérience faite par tous ses habitants, celle de simplement être là, au repos, Copernic sauta par la pensée, sans rien faire ni rien changer aux apparences, vers un ressenti expérientiel totalement nouveau : celui d'être entraîné avec la Terre dans une ronde cosmique autour du Soleil à une vitesse inimaginable (nous savons aujourd'hui que nous bougeons avec la Terre à la vitesse de 30 km/s).

Puis Giordano Bruno poussa plus loin encore l'expérience copernicienne. Si la Terre n'est plus le centre du monde, pourquoi devrait-ce être le Soleil ? Pourquoi le monde devrait-il avoir un centre ? Bruno fut le premier à penser un Univers sans centre ni bord, où les étoiles ne sont rien d'autres que des Soleils lointains. Plus aucun point n'est alors privilégié dans notre description de l'Univers.

Avec Galilée, le changement devient radical. Pour Aristote puis Copernic, on ne sent pas le mouvement quand on est entraîné par lui, mais il n'y a pas de mise en cause de l'existence de ce mouvement. Il s'agit juste d'une difficulté technique. Galilée franchit le pas essentiel quand il réalise que si aucune expérience locale, quelle qu'elle soit, ne permet de caractériser de l'intérieur le mouvement d'un corps, c'est qu'il n'y a pas de mouvement en soi. Intrinsèquement, le mouvement n'existe pas, n'a aucun sens. Ce qu'on appelle "mouvement" n'a d'existence que relative, seul peut exister un "inter-mouvement" entre deux corps, jamais le mouvement d'un corps pris isolément. Avec sa compréhension du mouvement inertiel, Galilée devient en pensée le premier astronaute. Toutes les lois fondamentales de la physique grecque puis moyen-âgeuse, reposant apparemment sur le sens commun, sont définitivement invalidées et renvoyées dans le domaine de l'ignorance. Cette vision du monde, où le centre de la Terre serait le centre du monde et la Terre immobile, entourée par la sphère des fixes, où tout mouvement tendrait vers le repos, où pour qu'un mouvement se poursuive il faut une force, un "impetus", se révèle à Galilée comme totalement erronée.

Galilée se projeta dans l'espace vide, dépourvu de toute force et vit deux choses :

- si, par rapport à un système de référence donné, un corps possède un mouvement, alors ce mouvement se poursuivra sans fin ni limite. Un corps libre dans le vide suivra un mouvement relatif inertiel, rectiligne et uniforme à vitesse constante. La poursuite du mouvement n'a besoin d'aucune cause, d'aucun moteur, c'est dans la nature du mouvement inertiel. Seul un changement de mouvement (une accélération) nécessite l'action d'une force. Si les corps sur Terre semblent tendre vers le repos, c'est en raison des forces de frottement qui les freinent.
- dans le référentiel propre au corps, ce même mouvement inertiel disparaît et fait place au repos.

Mais la vision Galiléenne, explicitement réalisée avec sa compréhension de la relativité du mouvement inertiel, se révéla encore plus vaste avec sa métaphore du "livre de la nature, écrit en langage mathématique", ce langage étant d'essence

géométrique. C'est tout le développement futur de la physique moderne qu'il a ainsi anticipé, des "principes mathématiques de la philosophie naturelle" de Newton à la théorie de la relativité généralisée d'Einstein, construite dans le cadre des géométries courbes riemanniennes, jusqu'à l'émergence dans la physique d'aujourd'hui des géométries fractales de Mandelbrot.

Le saut newtonien, tout aussi impressionnant, fut aussi un saut dans l'espace. Mais Newton, lui, fut le premier astronaute à atteindre, par la pensée, la lune elle-même. Comment unifier la gravité terrestre, caractérisée par des corps systématiquement attirés par la Terre et tombant sur elle, avec le mouvement des corps célestes, orbitant sans fin les uns autour des autres et ne tombant donc jamais ? La réponse est encore dans un saut, une traversée du miroir. Apparemment la lune ne tombe jamais, mais ceci n'est vrai que vu depuis notre référentiel terrestre. Si l'on se donne le droit de changer de repère et de se placer sur l'orbite lunaire, que voit-on ? Si la lune était en mouvement inertiel libre, elle devrait, suivant Galilée et Descartes, poursuivre une trajectoire rectiligne à vitesse constante, et donc s'écarter de la Terre. Comme elle reste à distance constante de la Terre, c'est donc qu'elle s'est rapproché d'elle par rapport à cette trajectoire libre, et donc qu'elle tombe en fait continuellement vers la Terre. C'est cette vision de la chute de la lune qu'eut sans doute Newton à 27 ans en regardant tomber... une pomme. La fondation du calcul différentiel et de la théorie de la gravitation universelle fut ensuite la mise en oeuvre mathématique de cette vision initiale.

Avec Einstein, l'expérience de pensée prend des dimensions extraordinaires. A l'âge de 15 ans, il tenta d'imaginer ce qu'expérimenterait une personne entraînée avec une onde électromagnétique, voyageant donc à la vitesse de la lumière. Il vit alors que pour un tel observateur, le temps lui-même disparaîtrait ! C'est cette intuition incroyable qui prit la forme, dix ans plus tard, de la théorie de la relativité restreinte.

Puis en 1907, il eut l'idée qu'il qualifia de "la meilleure de toute sa vie". Il s'agit d'une expérience de pensée d'apesanteur, non pas dans l'espace vide loin des corps comme celle de Galilée, mais bien ici et maintenant, sur notre Terre même. Il réalisa qu'une personne qui tomberait d'un toit, pendant tout le temps de la chute, ne sentirait plus son propre poids. Autrement dit, la force de gravitation, considérée comme universelle par Newton, n'a aucune existence propre, puisqu'elle disparaît dans un référentiel accéléré. La gravitation elle-même est relative. Einstein traduisit cette intuition en "principe d'équivalence", suivant lequel un champ de gravitation est localement équivalent à un champ d'accélération. Dans un système de coordonnées en chute libre, il n'y a plus de force, plus de champ, même la forme géométrique disparaît : la forme parabolique de la trajectoire d'un corps vue depuis le sol devient parfaitement droite dans le repère accéléré dans lequel le mouvement est devenu inertiel (ou même se réduit à un point et s'évanouit donc dans le repère propre du corps). Chez Einstein, même la géométrie devient relative. Cette apparition ou disparition simultanée de la dynamique et de la géométrie suivant le repère choisi l'ont alors mené à sa théorie de la relativité généralisée, où la gravitation est comprise comme manifestation relative de la géométrie, tout aussi relative, de l'espace-temps.

De nombreux autres exemples peuvent être donnés, avec Huygens qui utilise la

pensée relativiste pour comprendre les lois des chocs en se donnant le droit de se placer mentalement du point de vue de chacun des corps ou de leur centre de gravité; Mach et la compréhension des forces d'inertie comme effets (d'"induction") de gravitation des corps lointains de l'Univers, Maxwell et l'unification de l'électricité et du magnétisme et du champ électromagnétique et de la lumière, de Broglie et son intuition des ondes de matière et beaucoup d'autres...

Tous ces grands exemples ont servi de modèle évident pour le problème nouveau de la relativité des échelles. Dans ce cas, la question posée n'était plus celle du mouvement inertiel ou du champ de gravitation, mais de l'origine des effets et propriétés quantiques et des champs "de jauge" (électromagnétique, faible et fort). Comment fonder ces effets sur le principe de relativité ? L'expérience de pensée consiste, une nouvelle fois, à tenter de se mettre à l'intérieur du système qu'on veut comprendre, ici, un système quantique. Or, ce qui caractérise de manière universelle les mesures en mécanique quantique, c'est la dépendance systématique des résultats en fonction de la résolution de l'ap de la mesure. D'où l'idée que la mécanique quantique, qui ne saurait résulter de la relativité de position, d'orientation ou de mouvement, soit en fait une manifestation de la relativité des échelles. En conséquence, la géométrie de l'espace-temps qui mettrait en oeuvre une telle relativité nouvelle devrait être explicitement dépendante d'échelle, c'est-à-dire fractale. Dans ce cadre, les diverses propriétés quantiques, y compris celles qui semblaient intrinsèques aux particules élémentaires, telles leur masse, leur spin ou leur charge, n'ont aucune existence propre mais résultent du changement de repère entre l'objet quantique et l'appareil de mesure. Mais dans ce cas il ne s'agit plus seulement de se placer dans un référentiel accéléré, mais dans un repère fractal, structuré suivant les échelles (jusqu'aux intervalles de distance et de temps les plus microscopiques et donc des énergies infinies) et susceptible de dilatations et de contractions locales (ce qui donne naissance, dans ce cadre de pensée, aux champs fort, faible et électromagnétique).

Mais une fois élucidée cette méthode des expériences de pensée relativiste, d'autres questions se posent : comment les obtenir, quelle voie y-conduit elle ? Dans l'investigation et la recherche scientifique, on utilise souvent et naturellement la déduction, où un résultat est dérivé d'un autre de manière linéaire, et parfois l'induction, où le chercheur procède par extension et généralisation, souvent d'un cas particulier vers une situation plus générale. La déduction est comme unidimensionnelle, et l'induction comme un agrandissement bidimensionnel de territoire à partir d'un centre. Au lieu d'une simple passerelle d'un point à un autre, c'est un pays entier qui est découvert. Mais ces explorations restent continues, alors que dans les grands changements de paradigme à la Galilée ou Einstein, prévaut une impression de saut brusque, discontinu, de passage au delà ou au dessus, de changement total et inattendu, de plongée dans l'inconnu. Face au caractère incompréhensible et apparemment indescriptible de ces découvertes, on parle souvent d'intuition, d'"insight", comme d'un mystère insondable. Un Newton, Einstein ou Poincaré en ont parlé, ont tenté de décrire ces intuitions. Elles semblent provenir de nulle part, ne pas être issues du raisonnement ou de concepts, apparaître d'un coup. Leur nature, nous l'avons décrite: ce sont des expériences de pensée consistant en une plongée au coeur du système ou de la propriété à comprendre, où le chercheur se met à sa place, en une sorte d'empathie avec la

nature. Une fois cette intuition en place, il faut souvent dix ou vingt ans de travail pour la mettre en oeuvre, la "réaliser", parfois au prix de la construction des outils nécessaires à cette "matérialisation" ou "incarnation".

Il est frappant à cet égard que, du témoignage même de ces créateurs, la vision intuitive initiale contenait souvent, en un éclair, tous les éléments que des années de travail doivent construire ensuite explicitement.

Comment est-ce possible ? Une explication probable est que ces intuitions relèvent, non de la fabrication intellectuelle, mais de la vision. De plus, il ne s'agit pas d'une vision extérieure, mais intérieure, comme le mot anglais "insight" l'indique bien. D'autres expressions imagées sont claires à cet égard. Alors qu'on parle d'invention dans le cas d'innovations expérimentales ou technologiques, le mot consacré pour le résultat de la recherche théorique est "découverte". Ce qui était couvert, caché, est soudain vu, dé-couvert, dévoilé. "Il a soulevé un coin du voile", s'est exclamé Einstein à propos de la découverte par Louis de Broglie des ondes de matière. Il s'agit là d'un point essentiel, car c'est toute la méthodologie de la recherche scientifique théorique qui en découle. S'il s'agit d'une construction, alors il faut agir, fabriquer, ajouter une pierre à une autre. Mais peut-on construire la vérité ? Elle ne peut qu'être vue, réalisée, certainement pas fabriquée. Si elle n'avait pas été vue auparavant, c'est qu'elle était voilée, masquée : Copernic n'a pas soudain fait tourner la Terre autour du Soleil, il a juste réalisé qu'il en avait toujours été ainsi, et que l'humanité était simplement dans l'erreur. Le voile à la vérité est l'ignorance, il s'agit donc de mettre fin à l'ignorance, pas de fabriquer la vérité.

Dans ces conditions, il devient clair que tout le travail préparatoire, souvent long et ingrat, d'où émergera finalement l'intuition première, cette vue instantanée qui contient en germe toute la théorie à venir (comme par exemple la réalisation par Einstein de l'absence d'existence propre de la gravitation du fait de sa disparition dans un référentiel accéléré), est un travail sur la dissipation des voiles de l'ignorance plutôt que sur la vérité que l'on recherche. Une fois les voiles dissipés, celle-ci émergera naturellement, sans effort, comme la lumière du Soleil une fois les nuages chassés. Il n'y a pas à supprimer l'obscurité et à allumer la lumière. La lumière est déjà là, et la dissipation des voiles la révèle, parce que l'obscurité n'est pas quelque chose, mais simplement l'absence de lumière. Tout le mécanisme de l'intuition, de l'insight, prend sens dès lors qu'il est compris pour ce qu'il est, une vision instantanée par l'oeil de la conscience de la vérité (de la relativité et de l'absence d'existence propre de toute chose), éclairée par la lumière-clarté de cette même conscience connaissante, dès l'instant où les ténèbres de l'ignorance sont dissipées. Tous les aspects de clarté, complète et immédiate, de caractère non-conceptuel et d'efficacité quand à la construction ultérieure de la théorie qui en découle, sont bien compris dans ce cadre où l'intuition est une vue intérieure plutôt qu'une construction intellectuelle.

Une métaphore peut être donnée pour finir afin d'éclairer la nature de cette remarquable méthode et de son fonctionnement (qui est en quelque sorte l'équivalent pour le théoricien de ce qu'est la méthode expérimentale pour l'expérimentateur ou l'observateur). Imaginons un territoire inexploré au sein d'une jungle inextricable. La déduction serait comme tenter d'y avancer tout droit sans

repère. Nul doute que quantité d'obstacles inattendus, abîmes, rivières à traverser, falaises abruptes, empêcheraient immédiatement une telle progression. Muni de la seule déduction, le chercheur est comme un aveugle qui marche à tâtons. L'induction serait comme trouver ou construire une clairière, au centre de laquelle la vue porte un peu plus loin. Mais impossible ainsi de connaître tout le territoire, très vite la forêt masque tout, au delà d'une certaine distance. L'intuition est alors comme l'accès à la troisième dimension. En montant au sommet d'une montagne élevée – ou en prenant un hélicoptère – tout le paysage apparaît instantanément. De là-haut, on voit et on sait où se trouvent le gué permettant de traverser la rivière, le chemin qui évite l'abîme, la voie qui mène au sommet de la falaise, etc... On peut alors en dresser une carte ou simplement s'en souvenir, redescendre et guider n'importe qui dans la jungle. On sait alors s'il faut tourner à gauche ou à droite, aller ici ou là. "Mais comment le savez-vous, on ne voit rien, c'est impossible..." s'exclamera la personne guidée. Même si le chemin reste long à parcourir effectivement, chacune de ses étapes est connue car on sait où on va, parce qu'on en a eu une vision complète.

Evidemment, une dernière question demeure : comment monter au sommet de la montagne ? Autrement dit, quelle est la nature du travail préparatoire qui permet un jour d'avoir cette vue supérieure, d'en-haut, sur la nature des phénomènes, vue qui permet des passages au-delà, de véritables sauts dimensionnels dans l'espace des connaissances ? Ceci est une autre histoire, dont nous dirons quelques mots dans un texte futur.