

Un modèle topologique de la génération des particules

Jonathan Tennenbaum

L'objectif de ce document est de synthétiser un modèle géométrique simple qui combine les notions d'ondes de choc et d'organisation harmonique de l'espace. Cet essai décrit le choix initial de la démarche actuellement adoptée.

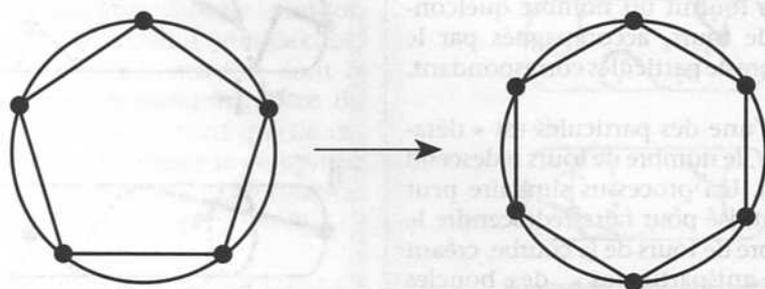
L'organisation harmonique de l'espace traduit effectivement en termes quantitatifs les modes sous lesquels l'univers nous apparaît. L'argument classique de Kepler, selon lequel les orbites planétaires possibles se limitent à un ensemble discret de possibilités, en est un exemple. L'onde de choc doit donc correspondre au « quantum d'action » par lequel l'univers passe d'une organisation harmonique à une autre. La forme la plus simple d'organisation harmoni-

Le Dr Tennenbaum est mathématicien et directeur européen de la Fondation pour l'énergie de fusion. Ce document est un rapport préliminaire sur la faisabilité d'un projet de recherche proposé par Lyndon LaRouche. Nous le publions tel quel parce qu'il ouvre des perspectives nouvelles, non-algébriques, dans la façon de penser le monde des particules.

que est celle qui se définit par la division de la circonférence du cercle au moyen de polygones réguliers inscrits. Comment pourrait-on, par exemple, dans ces termes de référence, considérer une onde de choc comme la caractéristique du processus de transformation d'un pentagone en hexagone (**Figure 1**).

Pour répondre à la question ainsi posée, je vais d'abord considérer les divisions de la circonférence d'un cercle comme un problème de topologie, c'est-à-dire que je vais penser ces divisions de la circonférence comme si elles étaient générées par une « onde » se déplaçant sur la circonférence.

Figure 1

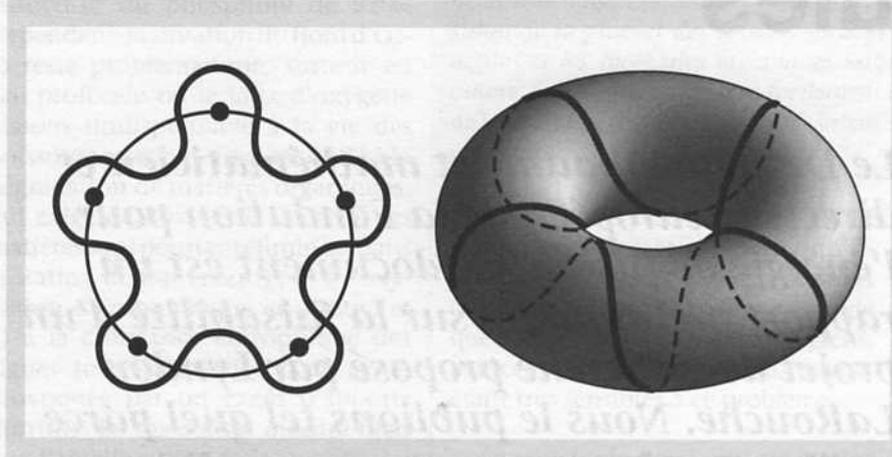


Ceci équivaut à considérer des courbes formées sur un tore (**Figure 2**). Du point de vue topologique, les courbes fermées sur un tore se différencient par leur nombre de tours : le nombre de fois qu'elles accomplissent un cycle complet autour du tore. Ce chiffre correspond au nombre de divisions sur la circonférence du cercle correspondant au nombre de cycles complets de l'onde sur chaque orbite complète. Deux courbes quelconques possédant le même nombre de tours sont topologiquement équivalentes, dans la mesure où chacune d'entre elles peut être transformée de manière continue pour devenir l'autre.

De ce point de vue, reprenons le problème concernant la transformation d'un pentagone en hexagone. Comment pourrions-nous concevoir une onde de choc qui accomplisse la transformation *discontinue* requise pour faire d'une courbe donnée une autre courbe possédant un nombre de tours supérieur (ou inférieur).

la direction opposée. Ensuite, imaginons un processus identique à une onde de choc par lequel la première partie de la courbe est « comprimée », jusqu'au moment où cette partie, avec la formation d'un front de choc, « fusionne » en un cercle fermé coupant le reste de la courbe (Figure 4a à Figure 4f).

Figure 2



Prenons un exemple simple. Considérons le cas équivalent d'une courbe flexible à l'extérieur d'un cylindre. Imaginons que cette courbe flexible soit un élastique d'abord tendu sur la surface, le long d'une ligne parallèle à l'axe central du cylindre. Ensuite, pensez que l'on tire sur cet élastique, pour représenter l'idée d'une courbe déformable. En première approximation (Figure 3a), cette coupe déformable a un nombre de tours égal à zéro. Le problème de la transformation d'une division pentagonale en division hexagonale de la circonférence d'un cercle peut donc se réduire à la transformation de la figure 3a en la figure 3b, dont le nombre de tours est un.

Dans cet exemple simple, il nous faut « une transformation par onde de choc » qui transforme la « division zéro » (l'exemple du nombre de tours égal à zéro) en une courbe qui fait une fois le tour du cylindre.

Je propose le processus suivant : nous déformons la courbe selon un trajet qui aille d'abord autour une fois dans le sens des aiguilles d'une montre, puis reparte dans l'autre sens pour tourner une nouvelle fois dans

Le résultat (Figure 4f) est une particule, représentée par le cercle, qui est une singularité déterminée et localisée sur l'axe du cylindre. Nous avons aussi une courbe qui fait un tour autour du cylindre dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. On peut considérer cette dernière comme le champ associé à la détermination de la particule, et dans ce sens, comme « générée » par la particule. La projection de ce processus ondulatoire caractérisé par un nombre complexe sur un plan parallèle au cylindre ne peut pas être décrit (Figures 5a à 5f). La ligne d'intersection de la figure 5f correspond au « delta » de Leibniz.

La répétition générale de ce processus fournit un nombre quelconque de tours, accompagnés par le nombre de particules correspondant.

Si l'une des particules est « détachée », le nombre de tours redescend de un. Un processus similaire peut être utilisé pour faire redescendre le nombre de tours de la courbe, créant des « antiparticules », des boucles compressées tournant dans la direction opposée. On peut aussi partir d'un nombre quelconque de tours et

Figures 3 et 4

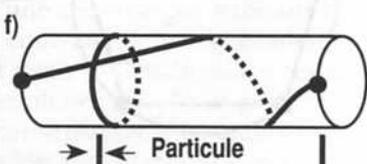
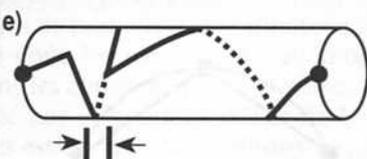
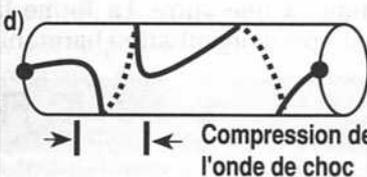
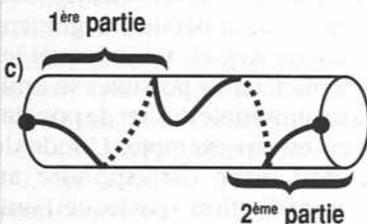
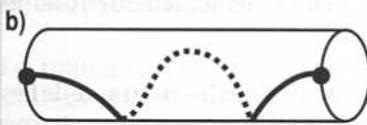
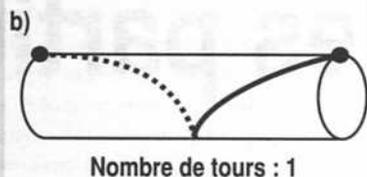
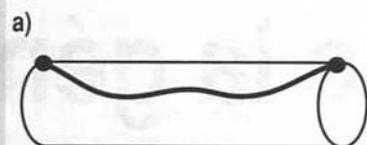
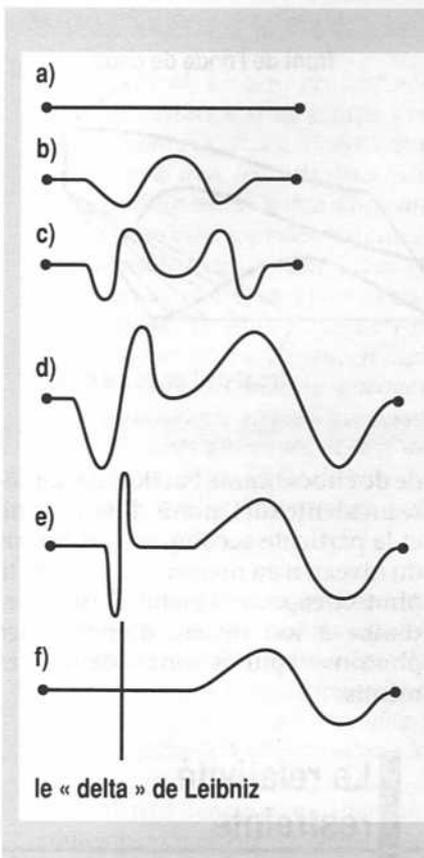


Figure 5



créer une « paire » (mathématiquement analogue à la production de paires électrons-positons⁵ observée dans la réalité) de singularités de signe opposé, sans modifier le nombre de tours global. De cette manière, nous pouvons obtenir un modèle de certaines caractéristiques typiques des phénomènes quantiques (Figures 6a à 6f).

Remarques sur cette construction

1. Lorsque l'on identifie la notion de *compression* à celle d'onde de choc, il faut penser à la manière dont la forme originellement régulière du front d'une onde (avant qu'elle devienne onde de choc) se comprime en un point au cours de la formation d'une onde de choc (Figure 7).

Je me réfère à la construction du modèle en plastique de la génération d'onde de choc acoustique décrite dans *Nouvelle Solidarité* du 10 décem-

bre 1982 (LaRouche, Que sont les ondes de choc économique ?). Il est relativement simple de modifier cette version du principe de l'onde de choc acoustique pour obtenir un processus par lequel une onde : (a) serait compressée de façon continue jusqu'à devenir une singularité (Figure 8) ; (b) ce processus serait décrit par des ondes complexes, et défini de telle façon que seules les boucles fortement courbées d'un certain type soient compressées et que les autres ne soient pas modifiées. Il faudra revenir sur cette question plus tard. Il est intéressant de constater la similitude entre le type de singularité créée par compression de la manière indiquée et les « fonctions delta » introduites par Paul Dirac dans la formulation mathématique de la mécanique quantique.

2. On pourrait objecter à cette façon de considérer les processus quantiques que la transformation décrite ci-dessus utilise un type de déformation continue, alors que les vrais phénomènes quantiques sont censés sauter d'une configuration harmonique à une autre, sans terme intermédiaire. On pourrait aussi objecter que, dans le processus de formation de la compression, la forme de l'onde est déformée, et s'écarte de la forme régulière correspondant à un polygone

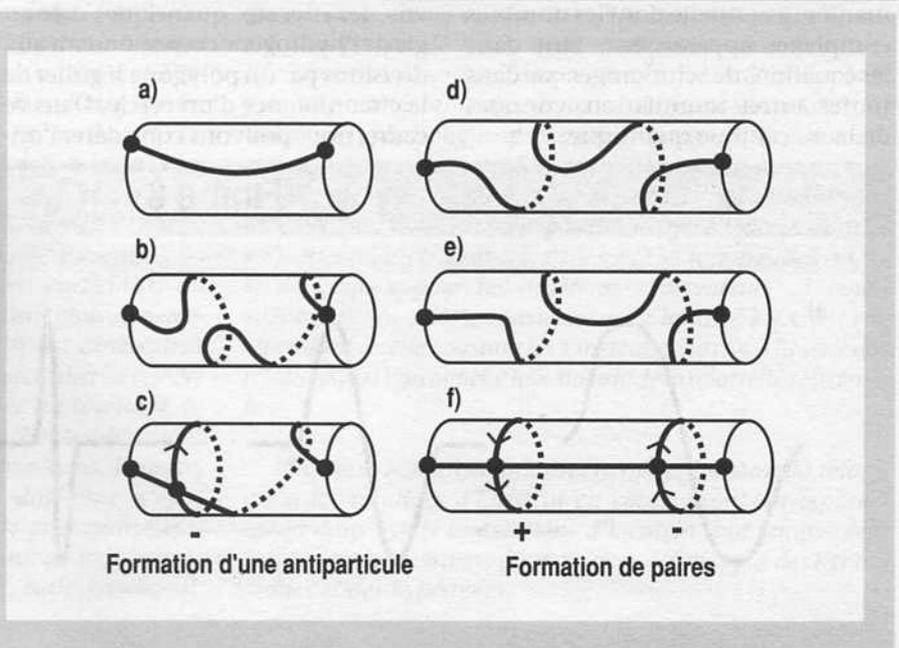
régulier. Les prémisses de ces objections s'écroulent si l'on considère le processus d'un point de vue relativiste.

Supposez que l'image du processus donnée ci-dessus corresponde au point de vue d'un observateur situé « en dehors » de l'univers (visible). Cet observateur regarde la déformation et la compression continue d'une boucle en une singularité-cercle. Un autre observateur examinant le même processus « de l'intérieur » voit les choses différemment, dans la mesure où l'observateur intérieur dépend de l'onde elle-même pour définir sa métrique visuelle.

Reprenons cette notion à l'aide d'un exemple simple (Figure 9). Un observateur extérieur pourrait voir le polygone inscrit dans un cercle comme en figure 9a, tandis que l'observateur intérieur, dont la vision est déterminée de telle manière que les lignes délimitées par des sommets lui apparaîtront comme droites et d'égale longueur, « verra » la construction de la figure 9b.

Dans cet exemple, l'observateur intérieur va « voir » un saut complètement discontinu d'une courbe sinus à n oscillations à une courbe à $n+1$ oscillations, sans rien entre les

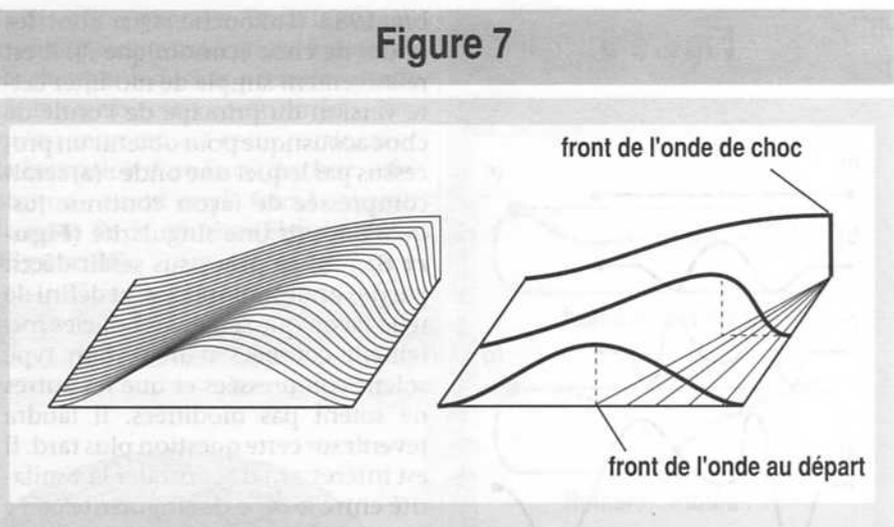
Figure 6



deux. Ce n'est qu'au moment de la formation de la singularité que l'observateur intérieur voit un changement dans les termes de sa métrique. La dynamique du changement appartient à une variété (au sens riemannien du terme) qui n'est pas directement observable dans la métrique adoptée par l'observateur intérieur (on peut noter le rapport existant avec le « delta » de Leibniz).

Je veux montrer dans la suite de cet article comment il est possible de dériver les éléments fondamentaux de la théorie de la relativité restreinte de constructions d'ondes et d'interférences ondulatoires². Je vais montrer que cela peut se faire sans faire appel à des notions a priori de « corps rigide », de « système de coordonnées en déplacement », ou « d'horloges ». Les ondes sont elles-mêmes utilisées pour définir la métrique « visuelle » au sein de la variété.

3. L'utilisation d'ondes complexes dans ces constructions est essentielle. Du point de vue d'ondes dans le plan des réels, il n'y a aucun obstacle à la déformation continue d'une onde réelle de n cycles en une onde réelle ayant $n+1$ cycles. La considération des courbes hélicoïdales, qui sont des fonctions d'onde complexe, sur un cylindre ou un tore, d'un autre côté, amène un principe topologique intrinsèque aboutissant à la quantisation recherchée. C'est la clef de la manière essentielle dont les nombres complexes apparaissent, tant dans les équations de Schrödinger que dans toutes autres formulations connues de la mécanique quantique.



4. Dans le cas physique le plus simple, celui de l'atome d'hydrogène, la longueur de l'onde de de Broglie⁴ d'un électron ayant un niveau énergétique E est donné par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{nh^2}{2\pi m_e e^2}$$

où m_e est la masse d'un électron au repos et e sa charge. Puisque la circonférence correspondante de la n ème orbite est :

$$2\pi r_n = 2\pi \left(\frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e e^2} \right)$$

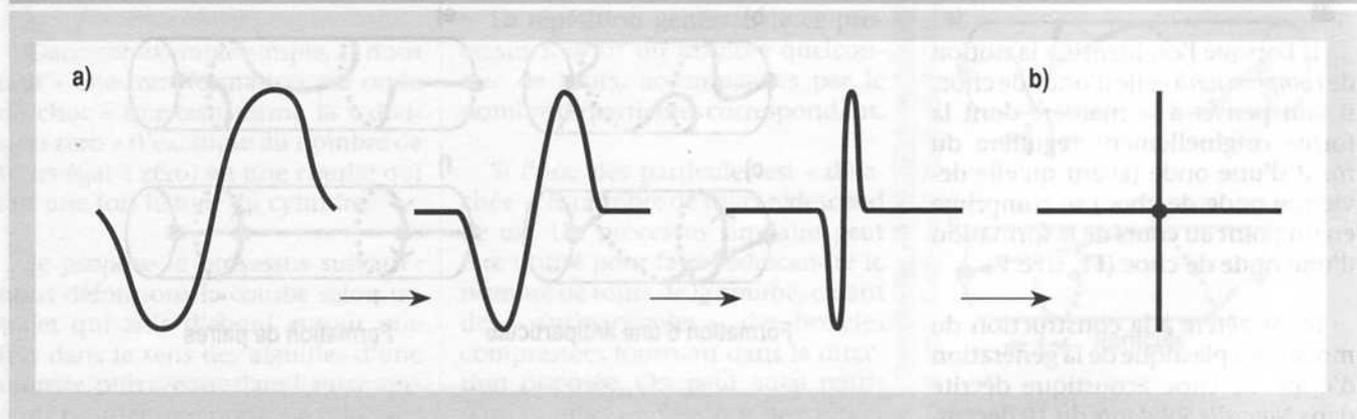
l'onde de de Broglie divise le cercle orbital en n parties égales et a donc un nombre n de tours. De ce point de vue, les niveaux quantiques d'énergie de l'hydrogène correspondent aux divisions par un polygone régulier de la circonférence d'un cercle. Dans ce cadre, nous pouvons considérer l'on-

de de choc comme l'action de lumière incidente sur l'atome d'hydrogène et la particule accompagnant le saut du niveau n au niveau $n+1$ comme le photon capturé. Quand l'atome retombe à son niveau d'origine, les photons capturés sont « déliés » et réémis.

La relativité restreinte

La formulation de la théorie de la relativité restreinte, en termes de métrique hyperbolique d'espace à quatre dimensions due à Minkowski, réduit la relativité à un principe géométrique simple et beau. Cependant, cette formulation souffre d'une carence caractéristique, une carence qui apparaît mathématiquement triviale, mais qui est d'une importance conceptuelle fondamentale. Bien que le contenu physique de la relativité

Figure 8



Qu'est-ce que la théorie de la relativité ?

En général, les gens pensent normalement que les notions de distance et de temps sont en quelque sorte des choses données, fixes. Il est cependant évident que les instruments avec lesquels nous mesurons les distances (la règle graduée ou la chaîne d'arpenteur) ou le temps (l'horloge à balancier) sont des systèmes physiques. Ces systèmes dépendent des lois physiques, et ces lois ont parfois des implications étonnantes pour la mesure de distances ou de temps dans certaines conditions physiques particulières. On peut dire cela autrement en expliquant que les notions de temps et de distances ne sont que des aspects secondaires d'un être unique appelé processus. Les lois physiques s'occupent des processus, et non du temps ou de l'espace séparément. Voilà l'idée de base de ce que l'on appelle la théorie de la relativité restreinte, qui fut élaborée par Albert Einstein en 1905.

L'idée est en fait très ancienne et remonte pour le moins au dialogue du Timée, dans lequel Platon (qui parle par la bouche de Timée) explique que l'univers visible est un processus, « une image mouvante de l'éternité », et que le temps et l'espace sont nés ensemble. Plus tard, au XVIII^{ème} siècle, Gottfried-Wilhelm Leibniz écrit que temps et espace ne sont que de simples aspects des phénomènes physiques, et n'existent donc pas en dehors de ces phénomènes. Son contemporain sir Isaac Newton expliquait au contraire que le temps et l'espace sont des notions absolues, existant indépendamment des événements physiques. Pour Newton, l'espace est une espèce d'organe physique de perception sensorielle par lequel Dieu perçoit les objets de l'univers, mais est quelque chose d'immuable et d'éternel.

Le développement de la théorie unifiée de l'électricité, du magnétisme et de la lumière par Carl Friedrich Gauss, Wilhelm Weber et Bernhard Riemann dans la première moitié du XIX^{ème} siècle (développement codifié de manière newtonienne par Maxwell dans la seconde moitié du XIX^{ème}) amena l'apparition incompatibles avec l'idée newtonienne de temps et d'espace absolus. En particulier, on pensait que la lumière était une vibration d'une substance appelée éther, laquelle remplissait l'espace et était si ténue qu'elle pouvait pénétrer et traverser les corps matériels. Si tel était le cas, alors les propriétés de la lumière auraient dû dépendre du mouvement de l'éther ; en particulier, un observateur se déplaçant dans l'éther devait pouvoir percevoir certaines différences par rapport à un observateur immobile. Une série d'expériences, en particulier la célèbre expérience de Michelson-Morley, réalisée au tournant du siècle, qui analysait la lumière dans différentes directions par rapport au mouvement de la Terre dans l'espace, montra qu'il n'en était rien. Aucune différence n'était perceptible. En particulier, la vitesse de propagation des ondes lumineuses s'avéra être indépendante du mouvement éventuel de l'observateur. Ce résultat était paradoxal,

puisque l'on pouvait à bon droit supposer qu'un observateur se déplaçant dans le même sens qu'un rayon lumineux devait observer une vitesse plus faible que celui se déplaçant, par exemple, en sens inverse, ou même qu'un observateur devait observer une vitesse nulle s'il pouvait se déplacer à la même vitesse que le front d'ondes.

Pour expliquer ce paradoxe, le physicien néerlandais Henrik Anton Lorentz, un contemporain d'Einstein, supposa que les instruments de mesure de l'observateur se déplaçant dans l'éther étaient déformés par leur mouvement de telle manière qu'ils annulaient exactement les modifications attendues de la vitesse mesurée. Il imagina que le mouvement à travers l'éther avait pour effet de contracter ou de raccourcir les corps solides, et donc de fausser la mesure de la vitesse. C'est ce que l'on appelle la contraction de Lorentz. Naturellement, l'observateur n'est pas capable de remarquer cette contraction, puisque chaque corps participant au mouvement, y compris l'observateur lui-même, est contracté dans exactement la même proportion (autrement dit, si j'utilise mon pied pour mesurer une longueur, mon pied n'aura toujours qu'une longueur d'un pied !).

En 1905, Albert Einstein proposa une solution beaucoup plus simple, mais aussi provocatrice et révolutionnaire. Non seulement il écarta l'idée d'un éther support des vibrations lumineuses, mais il rejeta également l'espace et le temps absolus de Newton, et expliqua que la constance de la vitesse de la lumière reflétait une loi physique déterminant la métrique de l'espace et du temps pour les différents observateurs. Il souligna qu'il existait un certain cercle vicieux dans les mesures de la vitesse de la lumière, faisant remarquer que les propriétés de la lumière sont implicitement sous-entendues par le fait de mesurer. Ainsi, par exemple, si nous voyons deux choses arriver au même moment, et que l'une est plus proche de nous, nous nous rendons compte que l'événement lointain a dû arriver un peu avant l'événement proche, puisque la lumière nous renseignant sur cet événement a pris plus longtemps pour nous parvenir. Cependant, si nous voulons dater précisément l'événement, il nous faut présupposer une valeur à la vitesse de la lumière. Einstein brisa ce cercle vicieux en posant la question suivante : « Quelles relations doit-il y avoir entre les mesures du temps et de l'espace pour les différents observateurs, si nous supposons une vitesse constante de la lumière ? » C'est en répondant à cette question qu'Einstein est arrivé à la série de relations que l'on appelle la « théorie de la relativité restreinte ».

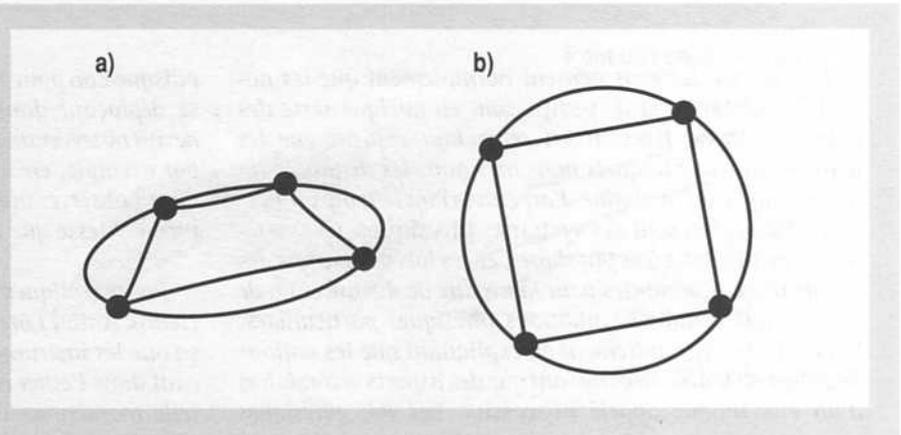
Plus tard, le mathématicien Hermann Minkowski reformula les résultats d'Einstein en construisant un espace-temps dans lequel les relations d'Einstein sont remplacées par de simples relations géométriques définies par des lignes droites et des hyperboles.

restreinte soit fondé sur la cohérence de tous les phénomènes avec la propagation des ondes lumineuses, Minkowski ne part pas de la notion d'onde. Au lieu de prendre la notion d'onde comme racine de sa formulation, il construit son argument en commençant par présupposer l'existence axiomatique d'un point abstrait dans l'espace. Ce postulat impose, dès le départ, un paradoxe onde-particule.

Dans le groupe que Lyndon LaRouche a rassemblé pour travailler sur la méthode analytique de prévision économique, la méthode LaRouche-Riemann, il est devenu habituel de suivre sa politique consistant à rejeter toute construction dépendant de la supposition d'existence d'une géométrie axiomatique. LaRouche, le Dr. Uwe Parpart, et d'autres ont souligné qu'il fallait bâtir toutes les constructions mathématiques sur les prémisses d'une adhésion stricte aux racines des idées associées à la géométrie synthétique de Jacob Steiner. L'objet pratique de ceci était d'éviter précisément le type d'erreurs exemplifié par le cas de Minkowski.

Comme Nicolas de Cuse, Steiner et d'autres l'ont montré, les points et les droites mathématiques n'ont en fait pas d'existence indépendante,

Figure 9



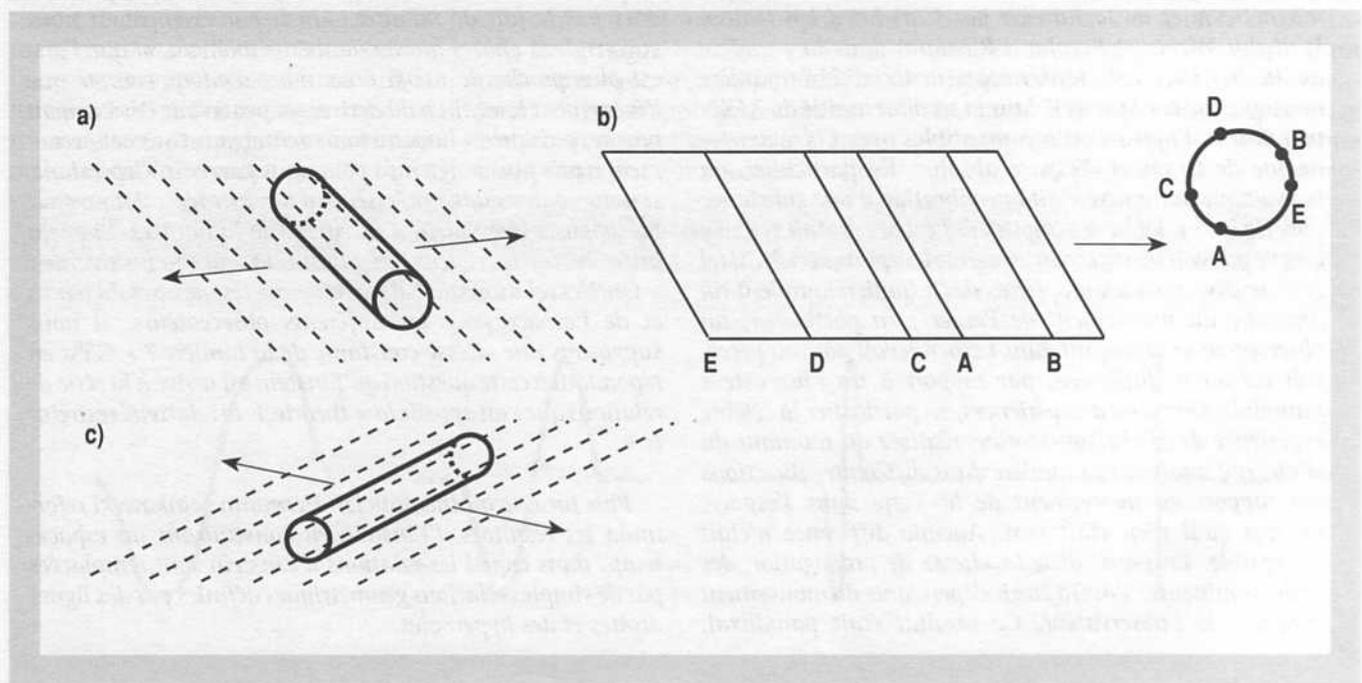
axiomatiques, mais sont des êtres géométriques dont l'existence dérive du seul être véritablement premier dans la géométrie plane, le cercle, celui-ci se définissant par un théorème topologique élémentaire bien connu. En dérivant et en définissant la droite et le point du point de vue du cercle, on extirpe ce genre insidieux d'illusions formelles des conceptions mathématiques. C'est pourquoi j'ai entrepris ici de réexaminer le problème de Minkowski avec cette rigueur.

Je suggère de reconstruire l'espace de Minkowski, à partir de la notion

que *l'onde est un principe élémentaire*. Les interférences ondulatoires, qui correspondent au pliage et à l'intersection de cercles, définissent les « lignes d'univers »³ et les hyperplans que l'on peut considérer comme « du genre espace ». Les oscillations des ondes déterminent la métrique du temps et leur longueur d'onde la métrique de l'espace.

Comme le résumé suivant de ma construction devrait le montrer, cette idée mène à une dérivation très simple des principaux aspects de la relativité restreinte. Ceci évite la mystification considérable du sujet

Figure 10



introduite du côté de Bertrand Russell et consorts. Dans cette démarche, les équations de Louis de Broglie reliant l'énergie et la quantité de mouvement d'une particule à une fréquence et à la longueur d'onde de « l'onde de matière » correspondent comme une conséquence immédiate de la construction. C'est un résultat heureux, dans la mesure où de Broglie a fondé sa prévision originelle des ondes de matière sur une simple considération de la théorie de la relativité. Cette relation, qui est mise en valeur dans ma démarche, a été très largement sous-estimée, bien que de Broglie l'ait soulignée à de nombreuses reprises dans ses premiers écrits.

Je vais d'abord présenter la construction géométrique, ensuite je discuterai de son fondement empirique. On ne perd rien d'essentiel en considérant ici qu'une seule dimension, plutôt que trois.

Je commence par un plan, qui représente la variété de l'espace-temps, et un cylindre de longueur infinie. En faisant rouler le cylindre sur le plan, je définis une onde complexe. De cette manière, à chaque lieu géométrique du plan correspond une position sur un cercle, c'est-à-dire le point auquel un cercle de référence tracé sur le cylindre, touche le plan au moment où le cylindre passe sur le lieu géométrique en question (**Figure 10**).

Autrement dit, c'est la rotation, ou le nombre complexe, requise pour faire tourner le cylindre d'une orientation donnée de référence à l'orientation du cylindre quand il passe sur le lieu géométrique. Les lignes sur lesquelles le cylindre touche le plan au fur et à mesure de sa rotation sont des « fronts » d'onde, les lignes de phase égale.

Maintenant, introduisons un autre cylindre que nous faisons rouler dans une autre direction, de façon à générer une deuxième onde complexe dans l'espace-temps. Ceci définit un deuxième groupe de fronts d'ondes parallèles ayant un angle constant avec les lignes définies par la première onde.

Figure 11

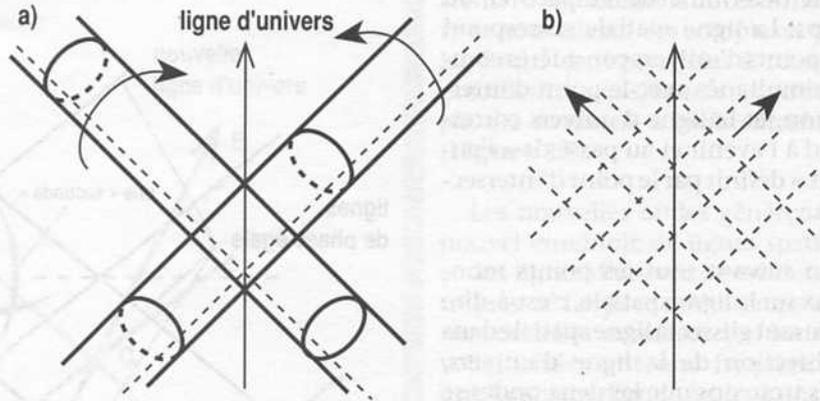
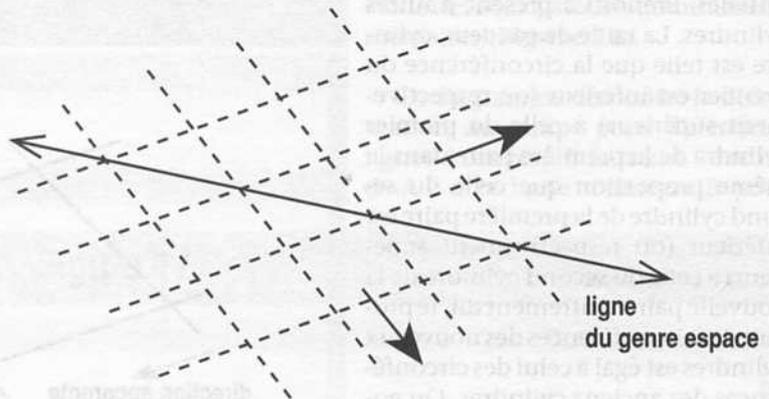


Figure 12



Nous procédons comme suit pour définir deux ensembles de lieux géométriques, les « lignes d'univers » et des « lignes du genre espace » (ou lignes spatiales). Les premières, les lignes d'univers, sont définies comme l'intersection des lignes de phase égale, telles qu'elles sont définies par les deux cylindres au cours de leur rotation vers l'avant à partir d'une origine donnée (**Figure 11**).

Les deuxièmes, les lignes spatiales, sont définies par le lieu géométrique de l'intersection des lignes de phase égale, définies par les deux cylindres quand l'un roule vers l'avant et l'autre vers l'arrière — ou vice versa — à partir de n'importe quelle position de départ donnée (**Figure 12**).

Dans une telle construction, les lignes d'univers correspondent à un renforcement mutuel des deux ondes, tandis que les lignes spatiales correspondent à leur annulation.

Les deux ondes, qui sont en phase le long des lignes d'univers, définissent le « temps » pour ces lignes. Une *oscillation*, correspondant à une rotation du cylindre, sera l'unité de temps. Sur les lignes spatiales, une *oscillation* de l'une des ondes, qui sont de phase opposée le long de ces lignes, définira l'unité de longueur. On voit alors (**Figures 13**) le « parallélogramme élémentaire » défini par la rotation d'un tour vers l'avant de chaque cylindre à partir d'une position donnée.

Des deux diagonales, l'une est la ligne d'univers et l'autre la ligne spatiale. Leur intersection définit un point d'univers, un événement à un point déterminé de l'espace et du temps. La ligne spatiale correspond aux points d'univers considérés comme simultanés avec le point d'intersection, et la ligne d'univers correspond à l'avenir et au passé de « l'endroit » défini par le point d'intersection.

En suivant tous les points mondiaux sur la ligne spatiale, c'est-à-dire en faisant glisser la ligne spatiale dans la direction de la ligne d'univers, nous trouvons que les deux ondes se propagent le long de la ligne spatiale dans une direction opposée, avec une fréquence 1 et une longueur d'onde 1 (Figure 14).

Jusqu'à maintenant, nous avons tout défini en termes des deux ondes initiales. Prenons à présent d'autres cylindres. La taille de ces deux cylindres est telle que la circonférence du premier est inférieure (ou respectivement supérieure) à celle du premier cylindre de la première paire dans la même proportion que celle du second cylindre de la première paire est inférieure (ou respectivement supérieure) à celle du second cylindre de la nouvelle paire. Autrement dit, le produit des circonférences des nouveaux cylindres est égal à celui des circonférences des anciens cylindres. Ou encore, la surface du nouveau parallélogramme élémentaire généré par les deux nouveaux cylindres est égale à celle du parallélogramme élémentaire des deux premiers.

Figure 13

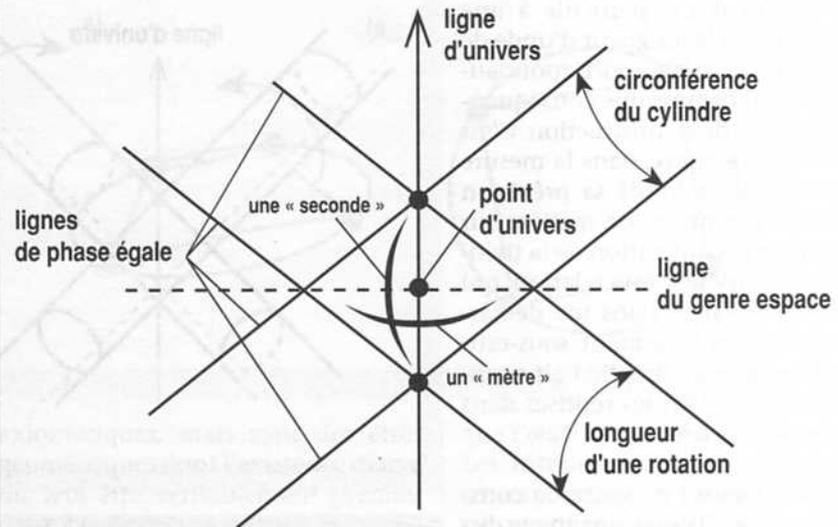


Figure 14

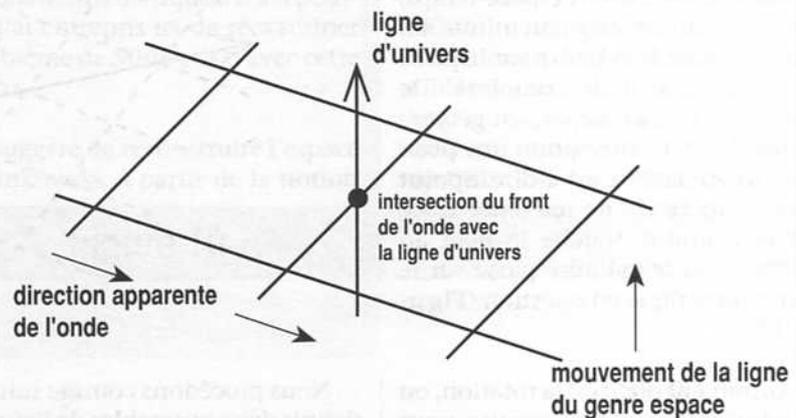


Figure 15

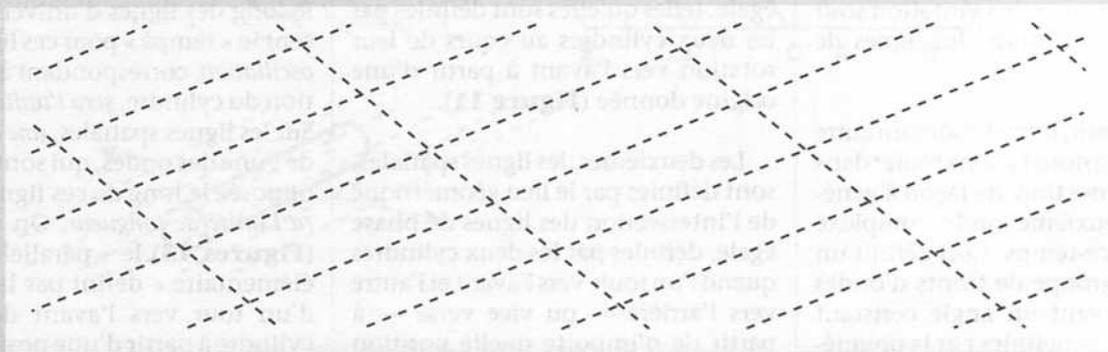
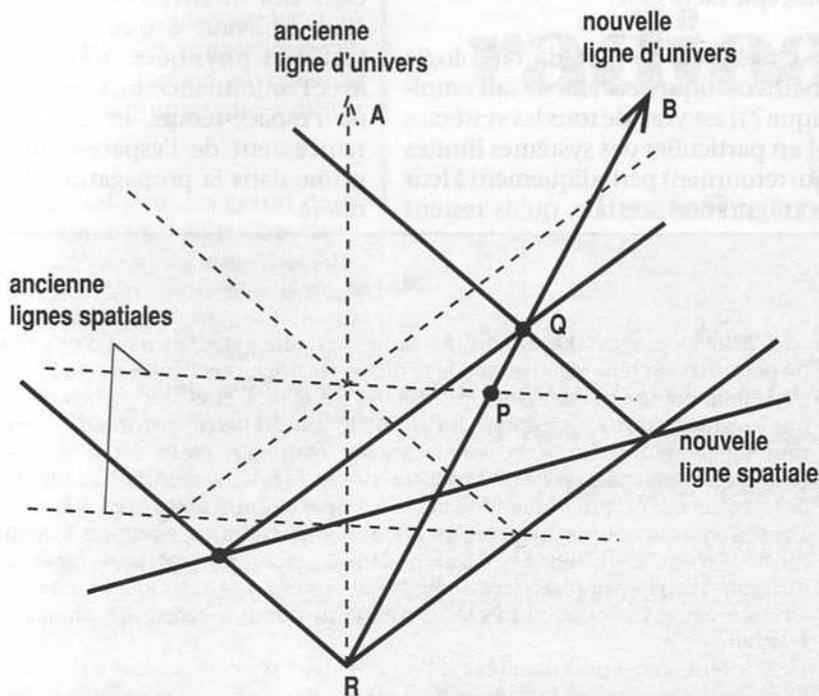


Figure 16



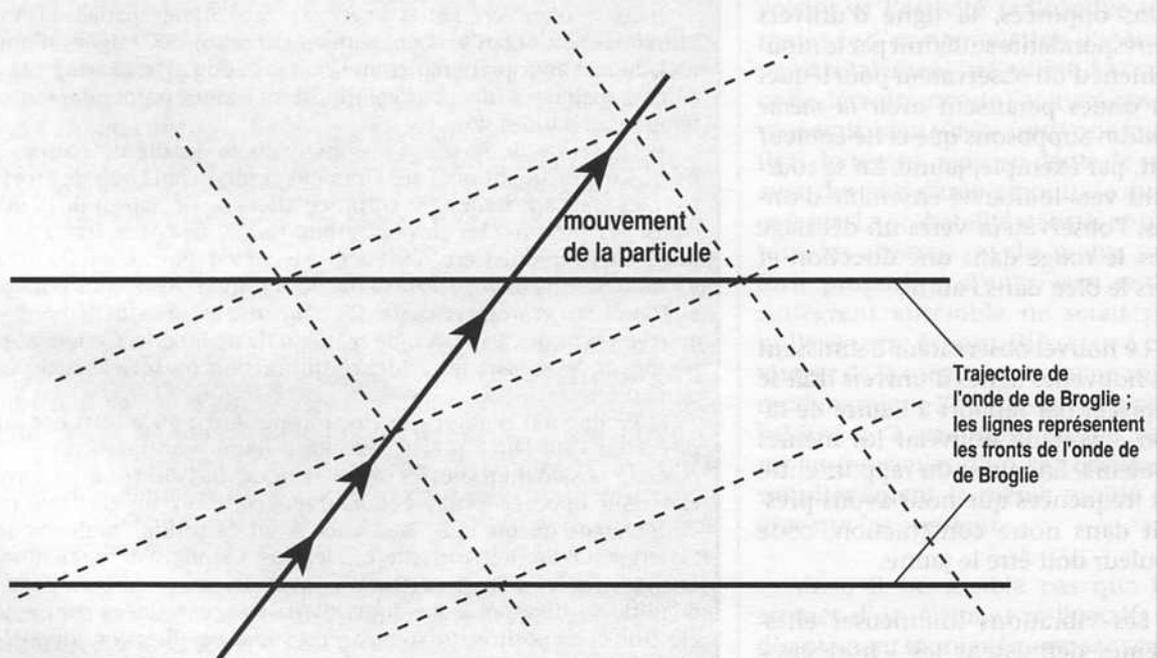
Nous recommençons la construction antérieure avec ces deux nouveaux cylindres, en les faisant rouler dans la même direction que les anciens. Nous obtenons de cette manière de nouvelles ondes complexes dont les fronts sont parallèles à ceux de précédentes, *mais, dans ce nouvel exemple, les longueurs d'onde ont changé (Figure 15).*

Les nouvelles ondes génèrent un nouvel ensemble de lignes spatiales et des lignes d'univers, avec des métriques de l'espace et du temps définies de telles manières que les nouvelles ondes ont une fréquence et une longueur d'onde égales à un *dans le nouveau système.*

Il est maintenant simple de comparer ces deux systèmes, l'ancien et le nouveau, pour obtenir les familières transformations de Lorentz, l'effet Doppler¹,... On peut visualiser cela à l'aide des deux parallélogrammes élémentaires (Figure 16).

Ce diagramme démontre la déformation du temps pour différentes lignes d'univers. Il faut une « seconde-A » à la ligne d'univers B pour

Figure 17



passer du point R au point P. Cependant, dans une « seconde-B », la ligne B arrive plus loin, au point Q, donc par rapport à A, l'horloge de B retarde.

La synthèse onde-particule de Louis de Broglie se définit facilement dans ce cadre.

Si la ligne d'univers B, ci-dessus, représente le mouvement d'une particule de masse unitaire 1, alors le système correspondant des lignes spatiales représente les fronts d'onde de l'onde de Louis de Broglie pour cette particule. La fréquence et la longueur d'onde de l'onde de de Broglie le long de n'importe quelle ligne d'univers ou spatiale sont déterminées par le fait que l'onde de de Broglie a une fréquence de 1 le long de la ligne mondiale de la particule (**Figure 17**). Telle était l'idée de départ de Louis de Broglie. On conçoit la particule comme un phénomène oscillatoire localisé et l'onde de de Broglie est choisie de façon à être toujours en phase avec l'oscillateur corpusculaire.

D'un point de vue empirique, on peut réélaborer la construction ci-dessus de la manière suivante. Etant données deux ondes lumineuses de fréquences quelconques se propageant sur une ligne dans des directions opposées, la ligne d'univers correspondante se définit par le mouvement d'un observateur pour lequel les ondes paraissent avoir la même couleur. Supposons que cette couleur soit, par exemple, jaune. En se tournant vers le nouvel ensemble d'ondes, l'observateur verra un décalage vers le rouge dans une direction et vers le bleu dans l'autre.

Le nouvel observateur définissant les nouvelles lignes d'univers doit se déplacer par rapport à l'autre de façon à voir de nouveau les mêmes couleurs. En raison du rapport entre les fréquences que nous avons prescrit dans notre construction, cette couleur doit être le jaune.

Les vibrations lumineuses elles-mêmes définissent les « horloges » pour ces observations. La longueur d'onde apparente de la lumière, que

les observateurs peuvent mesurer au moyen d'interférences, définit « l'éta- lon ». *L'invariance de la vitesse de la lumière n'est pas une loi de l'univers, mais le résultat de la façon dont la métrique est définie.*

Qu'elle est la part de tautologie mathématique, et celle de fait empirique ? Il est vrai, de tous les systèmes et en particulier des systèmes limités qui retournent périodiquement à leur configuration initiale, qu'ils restent

« en accord » avec l'horloge lumineuse. C'est un fait que tous les corps rigides, les cristaux par exemple, se comportent comme si leurs espacements dépendaient des caractéristiques des interférences lumineuses. Cela équivaut à dire que tous les systèmes physiques sont cohérents avec l'ordonnement harmonique de l'espace-temps, et que l'ordonnement de l'espace-temps s'exprime dans la propagation de la lumière. ■

Notes

1. Effet Doppler : Chacun sait que la sirène d'une ambulance ou d'une voiture de pompiers est plus aiguë quand le véhicule se dirige vers l'auditeur que lorsqu'il s'en éloigne. C'est ce que l'on appelle l'effet Doppler. L'effet Doppler est dû au fait que lorsque la source s'approche de l'auditeur, celui-ci perçoit les ondes successives plus rapidement, comme si leur fréquence était plus haute (et vice versa, la fréquence paraît plus grave si la source s'éloigne relativement à l'auditeur). On observe le même phénomène avec la lumière : si un objet bleu s'éloigne de l'observateur avec une vitesse suffisante, la couleur paraît virer vers le jaune ou même le rouge. On observe ce décalage dans les galaxies en rotation : les étoiles se dirigeant vers nous apparaissent « plus bleues », celles qui s'en éloignent paraissent « plus rouges ». Cet effet est très facile à expliquer dans le cadre de la théorie de la relativité.

2. Interférences ondulatoires : si l'on crée deux séries de vagues à la surface de l'eau, par exemple en jetant deux pierres simultanément dans un étang, on peut observer ce que l'on appelle des interférences lorsque les vagues se rencontrent : en certains points, deux sommets de vagues vont se rencontrer, formant un sommet d'une hauteur double ; en d'autres, un sommet va rencontrer le bas de l'autre vague, et les ondes s'annulent alors. On peut faire le même genre d'expérience avec des ondes lumineuses de même couleur (cohérentes), où l'on observe alors une alternance de régions claires et sombres, correspondant respectivement à l'addition ou à l'annulation de phase de l'amplitude des ondes. La production d'interférences est la principale expérience mettant en évidence la nature ondulatoire de la lumière.

3. Lignes d'univers, lignes du genre espace (lignes spatiales) : l'espace-temps de Minkowski est organisé topologiquement selon des « lignes d'univers » (Weltlinie), dont chaque point représente l'ensemble du monde à un instant donné, et les « lignes spatiales » (Raumartigelinie), dont chaque point représente l'ensemble du temps à un endroit donné.

4. Ondes de de Broglie : en observant la dualité de nature, ondulatoire et corpusculaire (quantique) de la lumière, le physicien Louis de Broglie supposa que tous les états apparemment corpusculaires (particulaires) de la matière, les électrons, les protons, les noyaux atomiques, ... devaient être accompagnés d'un phénomène ondulatoire, dont la fréquence est donnée par les formules $E = h\nu$ et $p = h/\lambda$ (où E est l'énergie de la particule, p sa quantité de mouvement, h la constante de Planck et ν et λ respectivement la fréquence et la longueur d'onde de l'onde). On appelle ces ondes les ondes (de matière) de de Broglie. Certaines expériences ont permis de les mettre en évidence (diffraction ou interférences de faisceaux de particules).

5. Production d'une paire électron-positon : au milieu des années vingt, le physicien Paul Dirac prévit l'existence d'une « antiparticule » de l'électron, le positon, possédant toutes les caractéristiques de l'électron, mais ayant une charge électrique opposée, positive. Lors d'une collision, un électron, et un proton se désintègrent en donnant naissance à un quantum lumineux (photon), dont l'énergie est donnée, dans le cas le plus simple, par la relation d'équivalence énergie-matière d'Einstein ($E=mc^2$). Inversement, un photon peut, dans certaines conditions, disparaître en donnant naissance à une « paire », c'est-à-dire un électron et un positon qui sont expulsés dans des directions opposées. On a mis ce phénomène en évidence peu après la prévision de Dirac.