

Le petit livre des trous noirs

Steven S. Gubser • Frans Pretorius

Le petit livre des trous noirs

Traduit de l'anglais (États-Unis)
par Julien Bambaggi

DUNOD

© 2017, Steven S. Gubser et Frans Pretorius

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en 2017 par Princeton University Press, sous le titre : *The Little Book of Black Holes*

Autorisé par l'université de Princeton, Princeton, New Jersey, États-Unis, en collaboration avec leur agent, L'Autre agence. Tous droits réservés. Aucune partie de ce livre ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, numérique ou papier, y compris la photocopie, l'enregistrement ou tout autre système de stockage et de récupération d'informations sans autorisation écrite des éditeurs.

Conception de la couverture et de la maquette intérieure :
Gregory Bricout

© Image de couverture : Jess Massabrook

© Dunod, 2018
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-077693-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Prologue

Le 14 septembre 2015, presque un siècle après qu'Albert Einstein eut formulé la théorie de la relativité générale, deux énormes détecteurs, l'un en Louisiane et l'autre dans l'État de Washington (États-Unis), entraient dans la phase finale des préparatifs pour une course scientifique destinée à détecter des ondes gravitationnelles. Brusquement, et contre toute attente, les instruments enregistrèrent une curieuse fluctuation qui, rendue audible, était une sorte de bruit vague, grave et sourd.

Cinq mois plus tard, après un examen minutieux des données recueillies par ses détecteurs, le *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory* (LIGO) rendait publics les résultats. Ce bruit correspondait très exactement au type de signal que ses équipes espéraient déceler : il s'agissait de l'écho lointain d'un événement concernant deux trous noirs. La communauté des physiciens était électrisée. C'était comme si nous avions passé toute notre vie sans jamais percevoir le rouge et qu'un coin de voile se soulevait pour nous révéler notre premier rose.

Et quel rose ! Les meilleures estimations des équipes de LIGO montraient que le vague bruit sourd qu'elles avaient

enregistré résultait de la fusion, il y a plus d'un milliard d'années, de deux trous noirs dont chacun avait approximativement la masse de trente soleils. Pendant la collision, l'énergie d'environ trois masses solaires s'était échappée, sous forme de rayonnement gravitationnel.

Les trous noirs et les ondes gravitationnelles sont deux conséquences de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Cette dernière permet de prédire quelle sorte d'ondes gravitationnelles les détecteurs de LIGO doivent observer dans le cas d'une collision entre deux trous noirs. Or, le décalage enregistré le 14 septembre était merveilleusement proche de cette attente! Il ne s'agissait pas seulement de la confirmation d'idées théoriques amoureusement élaborées depuis longtemps : cette première détection inaugurerait une ère nouvelle, celle de l'astronomie en ondes gravitationnelles. Les détecteurs LIGO avaient débusqué un de ces événements dont nous rêvions depuis des décennies. Ce que nous voulons désormais, c'est explorer cette nouvelle contrée remplie de surprises gravitationnelles.

La science ne parvient que très rarement à des certitudes mathématiques ; aussi nous faut-il vérifier : à quel point sommes-nous certains que LIGO a interprété correctement le petit décalage comme étant l'écho lointain d'une fusion de trous noirs distants d'un milliard d'années-lumière ? Pour faire vite, disons que nous en sommes « pratiquement certains ». Tout paraît coïncider. Le signal a été perçu par les deux détecteurs. Il semble bien que rien d'autre ne se soit produit à proximité qui aurait pu l'expliquer. Il était suffisamment fort pour pouvoir être observé avec nos dispositifs actuels, mais, trop faible, il n'aurait pas pu l'être avec des technologies plus anciennes. L'hypothèse

Prologue

d'une fusion de trous noirs il y a un milliard d'années n'entre pas en conflit avec nos connaissances générales en astrophysique et en cosmologie. Le point clé est que nous avons bon espoir de voir davantage d'événements de ce type. De fait, LIGO a fait part d'un deuxième événement confirmé qui s'est produit en décembre 2015, puis d'un troisième le 4 janvier 2017. Ces deux situations sont largement comparables à la première, ce qui devrait nous rendre davantage confiants dans le fait que LIGO est vraiment en train d'observer des fusions de trous noirs. Voilà pourquoi nous pensons être à l'aube d'une nouvelle ère des observations en astrophysique dans laquelle les trous noirs joueront un rôle essentiel.

Dans cet ouvrage, nous aurons deux approches dans l'étude des trous noirs : nous les considérerons en tant qu'objets astronomiques dont l'existence ne souffre quasiment aucun doute, mais aussi en tant que laboratoires théoriques nous permettant d'affiner notre compréhension non seulement de la gravité mais aussi de la mécanique quantique et de la thermique. Aux chapitres 1 et 2, nous aborderons des éléments des théories de la relativité restreinte et générale. Puis, dans les chapitres suivants, nous parlerons des trous noirs de Schwarzschild, des trous noirs en rotation, du rayonnement de Hawking et de la perte de l'information.

Mais qu'est-ce au juste qu'un trou noir ? C'est d'abord une région de l'espace vers laquelle la matière est attirée et d'où il est impossible de s'échapper. Concentrons-nous sur les trous noirs les plus simples, connus sous le nom de *trous noirs de Schwarzschild*, en l'honneur de celui qui les a découverts, Karl Schwarzschild. Un vieux dicton affirme que « Tout ce

qui monte doit redescendre». À l'intérieur d'un trou noir de Schwarzschild, c'est encore plus contraignant : rien ne peut aller « en haut », seulement vers « le bas » – sans que nous sachions exactement où ce bas aboutit. L'hypothèse la plus simple et directe – en suivant les mathématiques sous-jacentes aux trous noirs de Schwarzschild – est celle de la présence d'un effrayant noyau de matière infiniment comprimée qui gît en son cœur : pour ce qui heurte ce noyau, c'est la fin de tout. Y compris celle du temps. Une hypothèse qu'il est difficile de soumettre à l'expérience parce qu'aucun observateur ne peut pénétrer dans un trou noir et nous rapporter ce qu'il aurait vu.

Avant de nous aventurer plus loin dans les trous noirs de Schwarzschild, prenons un moment pour examiner des formes moins violentes de la gravitation. À la surface de la Terre, si nous lançons un objet vers le haut avec une vitesse suffisamment grande, il poursuivra sa course « vers le haut » indéfiniment. La vitesse minimale pour laquelle cela est vrai est appelée *vitesse de libération*. En négligeant les frottements de l'air, elle est approximativement de 11,2 km/s. À titre de comparaison, un homme a du mal à lancer une balle à une vitesse supérieure à 45 m/s – moins de 1 % de la vitesse de libération. La vitesse au canon d'un fusil à longue portée est d'environ 1,2 km/s, soit un peu plus de 10 % de la vitesse de libération. Ce que, d'habitude, nous entendons par « tout ce qui monte doit redescendre » est que la gravité terrestre est grande par rapport à la vitesse que nous pouvons communiquer aux objets avec des moyens ordinaires.

Prologue

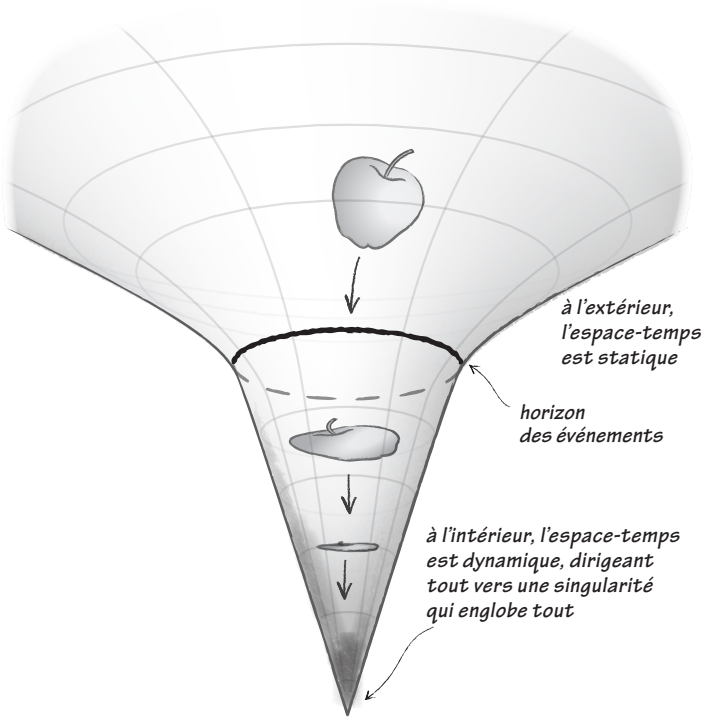


Figure 0.1 : Représentation schématique de la géométrie d'un trou noir. Loin à l'extérieur de l'horizon, l'espace-temps est plat. Quand on se dirige vers l'horizon, sa courbure s'accroît mais est toujours indépendante du temps statique. Mais, quand on traverse l'horizon, l'espace-temps acquiert une dynamique: pendant que le temps s'écoule, deux des dimensions spatiales (possédant la géométrie d'une sphère) sont comprimées alors que la dernière (qui n'est pas représentée) s'allonge jusqu'à ce que tout l'espace soit étiré et pressé en une singularité infiniment longue et mince.

C'est grâce aux fusées et à leur technologie que nous pouvons, de nos jours, vaincre la gravité terrestre et lancer des objets dans l'espace. Pour échapper à l'attraction de la Terre, il n'est pas strictement nécessaire pour une fusée de dépasser la vitesse de 11,2 km/s (bien que certaines fusées le fassent). Il y a une autre possibilité: une fusée lancée à une vitesse

moindre mais disposant d'une quantité suffisante de carburant pour atteindre une altitude où le champ de gravité terrestre est sensiblement plus faible – la vitesse de libération y est alors plus faible aussi. Autrement dit, une fusée qui doit emporter une sonde spatiale entièrement hors de ce champ doit aller plus vite que la vitesse de libération de l'endroit où les réacteurs de la fusée s'interrompent.

Et maintenant, une question : que se passerait-il si la Terre était beaucoup plus dense ? La vitesse de libération serait beaucoup plus grande parce que le champ gravitationnel serait beaucoup plus intense. La forme stable de matière ordinaire la plus dense de l'Univers connu se trouve dans les étoiles à neutrons. Elles renferment environ une fois et demie la masse du Soleil dans une sphère qui n'a que 12 km de rayon, encore que ce rayon n'est pas connu avec une grande précision. La matière ordinaire est complètement écrasée en surface par des forces gravitationnelles formidables environ cent milliards de fois plus grandes que sur Terre. Avec l'hypothèse d'un rayon de 12 km, la vitesse de libération représenterait 60 % de la vitesse de la lumière.

Pourquoi en rester là ? Par une expérience de pensée, nous pourrions imaginer compresser une étoile à neutrons davantage encore. En la comprimant jusqu'à obtenir un rayon de 4,5 km, la vitesse de libération atteindrait celle de la lumière. Au-delà, le caractère de la gravitation est complètement modifié. La matière, quelle que soit sa forme, devient incapable de résister à l'attraction gravitationnelle. L'évolution ne peut se faire que vers l'intérieur. S'échapper est impossible. C'est un trou noir.

L'objectif principal des tout premiers chapitres de ce livre est de préciser la notion de trou noir. Nous étudierons

Prologue

le concept essentiel d'horizon, qui représente la « surface » du trou noir. Il s'agit d'une surface au sens géométrique : un lieu bidimensionnel plongé dans un espace tridimensionnel. Dans l'exemple de trou noir le plus simple, celui de Schwarzschild, l'horizon est une sphère parfaite dont le rayon est appelé *rayon de Schwarzschild*. Ce qu'il y a de curieux dans l'horizon d'un trou noir vient (au moins pour la compréhension ordinaire) de ce qu'il ne s'agit pas d'une surface à proprement parler : si vous passiez au travers de l'horizon, vous ne remarqueriez rien de particulier. Les problèmes ne commenceraient que si vous vous retourniez et tentiez d'aller vers l'arrière. Quels que soient vos efforts – que vous vous serviez d'une fusée, d'un canon laser ou de n'importe quel autre moyen –, et l'aide que vous pourriez avoir de l'extérieur, impossible de ressortir de l'horizon, voire de lancer un SOS disant que vous êtes piégé. Si l'on veut une image plus poétique, il faut penser l'horizon d'un trou noir comme étant le bord d'une cascade au-delà duquel l'espace-temps s'écoule inexorablement vers le bas, vers la singularité qui détruit tout.

Mais les trous noirs sont davantage que des objets servant à des expériences de pensée. Nous pensons qu'ils se trouvent dans l'Univers dans au moins deux situations. L'une ressemble à celle que nous avons rencontrée à propos des étoiles à neutrons : elle se produit lorsque des étoiles massives sont en panne de carburant et s'effondrent sur elles-mêmes. Il s'agit d'un processus désordonné dans lequel une grande quantité de matière est emportée dans l'univers environnant dans une explosion qu'on nomme *supernova*. (En fait, on pense généralement que les *supernovæ* jouent un rôle essentiel dans la distribution des métaux et autres éléments modérément lourds dans l'Univers.) Il se peut que

la masse résiduelle soit suffisamment grande pour empêcher une étoile à neutrons de se former tout en restant stable. Elle s'effondre alors et constitue un trou noir dont la masse représente au moins quelques fois la masse du Soleil. Les trous noirs dont LIGO a observé la fusion étaient quelque peu plus massifs mais leur formation par effondrement stellaire reste plausible.

On soupçonne l'existence de trous noirs bien plus gros tapis au centre des galaxies. La façon dont ils se sont exactement formés reste nimbée de mystère – peut-être est-elle liée à la matière noire, ou à la physique qui prévalait dans le tout jeune univers, ou encore aux deux. Ils sont monstrueusement massifs, d'une masse représentant des milliers voire des milliards de fois celle du Soleil. On pressent, au centre de la Voie lactée, la présence de l'un d'entre eux : il contiendrait quelque quatre millions de masses solaires. On peut légitimement se demander comment nous pouvons être certains de la présence de trous noirs en l'absence de signal s'échappant de leur horizon. La réponse vient du fait que les objets de leur environnement sont sensibles à leur attraction gravitationnelle. En suivant le mouvement des étoiles situées près du centre de la Galaxie, nous pouvons être certains qu'un objet très massif et très dense s'y trouve. Cela ne prouve pas qu'il s'agit d'un trou noir. Mais nous pouvons affirmer que, si ce n'est pas un trou noir, il s'agirait alors d'un objet bien plus étrange. Les trous noirs représentent donc la possibilité la plus simple et il y a aujourd'hui consensus pour dire qu'ils existent vraiment au centre de nombreuses galaxies, voire de la plupart d'entre elles.

Les trous noirs constituent des laboratoires théoriques d'une incroyable utilité du fait de leur relative simplicité

Prologue

mathématique, contrairement à de nombreux objets de l'astrophysique. Une étoile est quelque chose de très complexe. Son énergie lui vient des réactions nucléaires qui se produisent en son cœur. Les pressions que subit la matière qui la compose, la dynamique des fluides qui régit les mouvements de cette dernière peuvent faire l'objet de simulations numériques, mais nous ne les comprenons certainement pas entièrement. Les étoiles ont des dynamiques de surface probablement aussi compliquées que les configurations météorologiques terrestres. Par comparaison, un trou noir est merveilleusement simple. En l'absence d'autre matière, un trou noir doit adopter l'une des quelques formes bien définies entièrement comprises comme des géométries courbes qui sont solutions des équations d'Einstein de la relativité générale. Bien sûr, la matière qui s'y effondre complique le tableau, mais nous disposons d'une assez bonne compréhension de la façon dont la matière ordinaire se comporte pendant qu'elle tombe dans un trou noir. Aujourd'hui, nous possédons même une bonne connaissance numérique de ce qui se produit lors de la collision de deux trous noirs – un des objectifs principaux du chapitre 6 de ce livre est d'expliquer comment nous sommes parvenus à cette compréhension et ce que cela signifie pour des expériences comme celles de LIGO.

Les choses deviennent étranges quand on considère que les trous noirs ne sont pas vraiment noirs. À l'aide de la mécanique quantique, Stephen Hawking a montré que les trous noirs possèdent une température définie liée à leur gravité de surface. En fait, s'est ouvert tout un champ d'étude – qu'on nomme *thermodynamique des trous noirs* –, dans lequel les propriétés géométriques des solutions représentées par les trous noirs sont mises en correspondance précise avec

les propriétés familières obtenues dans l'étude de la chaleur : température, énergie et entropie. On a même avancé que des trous noirs situés dans des parties de l'Univers éloignées les unes des autres pourraient posséder des intérieurs qui se recoupernt et permettent de coder un effet quantique qu'on nomme *intrication*. Nous introduirons ces sujets au chapitre 7.

Jusqu'à ce jour, les trous noirs continuent à nourrir l'imagination des scientifiques. Les astronomes recherchent des manifestations toujours plus précises des propriétés des trous noirs en rotation et ils se frottent les mains à l'idée d'une collaboration avec les observatoires d'ondes gravitationnelles afin de comprendre ces événements cataclysmiques qui entourent la fusion de trous noirs. Et il ne s'agit là que du commencement de l'astronomie en ondes gravitationnelles qui est l'objet d'un effort international pour constituer un réseau de détecteurs aux États-Unis (les deux détecteurs LIGO situés à Hanford, dans l'État de Washington, et à Livingston, en Louisiane), en Europe (Virgo et GEO600) au Japon (KAGRA) et en Inde (LIGO India). Pendant ce temps, les théoriciens des cordes étudient les trous noirs dans des dimensions plus élevées, non seulement comme un moyen d'exploration des effets quantiques sur la gravité, mais aussi comme les analogues de situations physiques aussi diverses que les collisions d'ions lourds, les fluides visqueux et les supraconducteurs. Les trous noirs nous posent à tous les questions les plus étranges : pourront-ils jamais nous servir ? Que se passe-t-il vraiment en leur sein ? À quoi cela ressemble-t-il de tomber dans l'un d'entre eux ? Ou encore : serait-il possible que nous soyons déjà tombés dans un trou noir et que nous ne le sachions pas encore ?

1

La relativité restreinte

Avant de nous intéresser aux trous noirs, il nous faut regarder de plus près ce qu'est la relativité restreinte. La théorie de la relativité est scindée en deux parties : la relativité restreinte et la relativité générale. Albert Einstein a publié la première en 1905. Elle traite des mouvements relatifs des corps les uns par rapport aux autres et, dans son cadre, la perception du temps et de l'espace par un observateur dépend de son mouvement. Ses principales idées peuvent être traduites dans le langage de la géométrie à l'aide d'un élégant concept : *l'espace de Minkowski*.

La relativité générale englobe la relativité restreinte tout en intégrant la gravitation. C'est de cette théorie dont nous avons besoin pour vraiment comprendre ce que sont les trous noirs. Il a fallu à Einstein une longue période de mise au point avant l'article publié fin 1915 dans lequel il présentait ce qu'on nomme désormais *les équations du champ d'Einstein*. Elles décrivent la façon dont la gravité déforme la géométrie de l'espace de Minkowski en celle d'un espace-temps courbe comme, par exemple, la géométrie d'un trou

noir de Schwarzschild que nous étudierons au chapitre 3. La relativité restreinte est plus simple et plus accessible que la relativité générale parce qu'elle néglige la gravité – qui est ignorée, ou considérée comme trop faible pour affecter les résultats de façon significative.

La formule $E = mc^2$ fait partie de la relativité restreinte : elle met en relation l'énergie E , la masse m et la vitesse de la lumière c . C'est une des formules les plus célèbres de la physique – voire de tout le corpus de connaissance de l'humanité. C'est $E = mc^2$ qui a permis la prévision de l'extraordinaire puissance des armes nucléaires et elle se situe au cœur de nos espoirs – non aboutis à ce jour – d'obtenir une source propre d'énergie par la fusion nucléaire. $E = mc^2$ est aussi très utile dans l'étude de la physique des trous noirs. Par exemple, la valeur de trois masses solaires éjectées sous forme d'énergie lors de la première collision de trous noirs observée est une illustration de première importance de l'équivalence masse-énergie. Pour imaginer à quel point cette collision a été cataclysmique, considérez le fait que, dans l'explosion d'une arme nucléaire – avec une puissance de, par exemple, 400 kilotonnes –, la masse qui s'est transformée en énergie n'est que de 19 g !

La relativité restreinte est étroitement liée à la théorie de Maxwell sur l'électromagnétisme. En fait, ce qu'on appelle la *transformation de Lorentz* avait déjà, à la fin du XIX^e siècle, conduit à une idée relativiste de l'espace et du temps en ce sens qu'elle explique que la perception qu'ont les observateurs des phénomènes électromagnétiques dépend de leur mouvement. Le phénomène électromagnétique le plus connu est la lumière, qui est une onde circulant dans un champ électromagnétique. Une des conséquences de la théorie de Maxwell

est que la lumière a une vitesse définie: la relativité repose sur l'idée que la vitesse de la lumière est une constante indépendante du mouvement et de l'observateur.

Dans la relativité restreinte, le mouvement d'un observateur est décrit dans un cadre de référence, un référentiel. Précisons un peu cela en imaginant un train à grande vitesse. Si tous les passagers sont assis et les bagages bien rangés, tout dans le train est immobile par rapport à lui. Mais il se déplace rapidement par rapport à la Terre. Supposons que ce soit en ligne droite et à vitesse constante. Pour bien saisir ce qu'est un référentiel, il nous faut présumer en outre l'absence de tout champ gravitationnel significatif. Au lieu d'un train lancé en ligne droite à la surface de la Terre, il faudrait donc plutôt imaginer un vaisseau spatial filant à vitesse constante dans une région de l'espace vide par ailleurs. Mais le champ gravitationnel terrestre est suffisamment faible pour que, dans la situation qui nous intéresse, nous puissions ignorer ses effets sur le train et nous contenter de la relativité restreinte sans faire intervenir la relativité générale.

Si l'on ne regarde pas par la fenêtre, il est difficile de dire à quelle vitesse le train se déplace. Si le train a des suspensions très efficaces et que les rails sont sans à-coups, avec les rideaux baissés sur les vitres, il est même impossible de savoir si le train est en mouvement. Le train est un référentiel – celui qui est utilisé de façon naturelle pour détecter les mouvements à l'intérieur du train par les passagers. Ces derniers sont incapables de dire (dans la situation idéale où nous nous sommes placés) si le train lui-même est en mouvement. Mais ils remarquent très bien quelqu'un qui marche dans le couloir parce qu'il se déplace par rapport à leur référentiel. En outre, tous les phénomènes physiques

tels que la chute d'une balle ou la rotation d'une toupie seront perçus de la même façon par un observateur, que le train soit en mouvement ou non. En résumé, un référentiel est une façon d'observer l'espace et le temps associée à un observateur, ou un groupe d'observateurs, dans un état de mouvement rectiligne uniforme. Dire du mouvement du train qu'il est rectiligne uniforme signifie qu'il n'accélère pas, ni ne ralentit, ni ne tourne: si le train faisait cela, les passagers le remarqueraient. Par exemple, une accélération brutale les tasserait vers le dossier de leur siège alors qu'un ralentissement brusque les basculerait vers l'avant.

Supposons que notre train traverse une gare sans s'arrêter ou ralentir. Les passagers du train – appelons-les Alice, Allan et Avery – sont observateurs dans un référentiel en mouvement que nous appellerons référentiel A. Pendant ce temps, leurs amis Bob, Betsy et Bill sont sur le quai, dans un référentiel immobile que nous appellerons référentiel B. Pour les représenter, plaçons les positions et le temps du référentiel B comme suit: les positions sur l'axe horizontal (abscisse) et le temps sur l'axe vertical. Nous pouvons ainsi représenter les trajectoires des différents observateurs dans l'espace et le temps de façon que, avec le temps, les observateurs du référentiel B restent toujours dans la même position dans ce référentiel tandis que les observateurs du référentiel A se déplacent vers l'avant. La représentation graphique qui en ressort est en fait l'espace-temps de Minkowski. L'expression espace-temps signifie que nous représentons l'espace et le temps sur le même schéma. Mais on peut regarder l'espace-temps de Minkowski d'un autre point de vue: les observateurs du référentiel A sont ceux qui sont immobiles et ce sont ceux du référentiel B qui sont en mouvement vers l'arrière. Nous reviendrons là-dessus plus loin.