

Première partie

Une partie de poker cosmique

Où la physique des amortisseurs inertiels et des faisceaux magnétiques prépare le terrain pour les voyages dans le temps, la vitesse de distorsion, les boucliers défecteurs, les mini-trous noirs et autres excentricités spatio-temporelles.

1 - Newton est le premier à miser

« Peu importe où vous allez : vous y êtes. » Inscription relevée sur une plaque du vaisseau spatial Excelsior, in Star Trek VI: La contrée inconnue. Sans doute empruntée aux Aventures de Buckaroo Banzai:

Vous êtes aux commandes du vaisseau spatial le Defiant NCC-1764, actuellement placé en orbite autour de la planète Iconia, à proximité de la Zone neutre. Votre mission : vous rendre à l'autre extrémité du système solaire, escorté d'un vaisseau auxiliaire, pour réparer quelques enroulements primaires de téléportation. Inutile de passer en vitesse de distorsion : ordonnez seulement de pousser au maximum la manette de propulsion, histoire de voyager tranquille, à 50 % de la vitesse-lumière. Cela devrait vous amener à destination en quelques heures, et vous donner le temps de mettre à jour votre journal de bord. Mais, alors que vous quittez votre orbite, vous sentez soudain une forte pression s'exercer sur votre poitrine. Vos mains deviennent lourdes comme du plomb, et vous êtes littéralement collé à votre siège. Votre bouche se crispe en une affreuse grimace, vous avez l'impression que vos yeux vont jaillir de votre tête, et le sang cesse d'irriguer votre cerveau. Bientôt, vous perdez connaissance ... Quelques minutes plus tard, vous êtes mort.

Que s'est-il passé? S'agit-il des premiers symptômes d'une dérive spatiale d'interphase, qui d'ici peu gagnera tout le vaisseau, ou de l'attaque surprise d'un

vaisseau spatial romulien qui s'était dérobé aux radars? Rien de tout cela: c'est quelque chose de bien plus puissant. En fait, les ingénieurs auteurs de Star Trek n'ont pas encore inventé les amortisseurs inertiels, qu'ils introduiront un peu plus tard dans la série. Vous avez été vaincu par la très banale loi de gravitation d'Isaac Newton - la première chose qu'on oublie de ses cours de lycée.

Bon, j'entends d'ici quelques fans grommeler: « C'est n'importe quoi! On ne va quand même pas nous ressortir Newton! Parlez-nous plutôt de ce que nous avons vraiment envie de savoir, par exemple : comment fonctionne l'hyper-propulsion? Qu'est-ce que c'est que cet éclair qu'on voit au moment de passer en vitesse de distorsion - est-ce un genre d'explosion sonique? Et qu'est-ce au juste qu'un cristal de dilithium? » Patience, nous y viendrons en son temps. Voyager dans l'univers de Star Trek amène à rencontrer quelques-uns des concepts les plus ésotériques de la science physique. Mais il nous faut aborder bien d'autres aspects avant de pouvoir répondre à la question fondamentale que tout le monde se pose sur Star Trek : « Est-ce que tout cela est vraiment possible, et si oui, comment ? »

Pour nous rendre là où personne avant nous n'a mis les pieds - et avant même de quitter le Quartier général de la Flotte spatiale-, il nous faut examiner certaines bizarreries sur lesquelles Galilée et Newton se sont penchés il y a trois cents ans. Notre but ultime sera de répondre à la question cosmique qui était au cœur de la conception du créateur de Star Trek, Gene Roddenberry, et qui, à mes yeux, rend cette série digne de réflexion : « Qu'est-ce que la science moderne nous permet d'imaginer quant à l'avenir de notre civilisation ? »

Quiconque a déjà voyagé en avion ou à bord d'une voiture rapide a éprouvé la sensation d'être plaqué contre son siège au démarrage du véhicule. Ce phénomène est amplifié à bord d'un vaisseau spatial. Les réactions de fusion dans le propulseur produisent des pressions considérables, lesquelles projettent à l'arrière du vaisseau des gaz et des émanations, qui à leur tour provoquent sur les moteurs un véritable effet de recul ... vers l'avant. Le vaisseau, auquel sont arrimés les moteurs, subit ce même mouvement. Vous-même, vous êtes poussé vers l'avant à cause de la pression du siège de commandement sur votre corps. Celui-ci réagit en exerçant une pression contraire sur le siège.

Et voilà précisément le hic. De même qu'un marteau abattu à grande vitesse sur votre tête exercera sur votre crâne une force dont les effets seront le plus souvent mortels, de même le siège de commandement vous tuera si la force qu'il exerce sur vous est trop grande. Les pilotes de chasse et ceux de la NASA ont donné un nom à cette force qui s'exerce sur le corps lors d'accélération brutales, en avion ou au décollage d'une navette spatiale: la force gravitationnelle, ou force G . Je proposerai, pour l'expliquer, une comparaison avec mon dos, en ce moment fort douloureux : assis devant mon ordinateur et tapant à toute vitesse mon texte, je ressens la pression constante de ma chaise de bureau sur mon postérieur. Cette pression, j'ai appris à vivre avec (bien que, si je puis me permettre, mon postérieur y réagisse de façon assez peu esthétique). Cette force est celle de l'attraction terrestre qui, si elle avait libre cours, m'attirerait immédiatement vers le centre de la Terre. Ce qui m'empêche

de céder à cette attraction, et tout simplement de tomber de mon siège, c'est le sol qui exerce une pression contraire, vers le haut, sur les fondations de béton et d'acier de ma maison, de là, sur le parquet en bois de mon second étage (où je travaille), et enfin sur ma chaise, qui la reproduit sur la portion de mon corps en contact avec elle. Si la Terre pesait deux fois sa masse sans changer de diamètre, la pression serait deux fois plus grande. Il faudrait alors que la force ascensionnelle compense cette augmentation de la force de gravité en redoublant d'intensité.

Ces facteurs doivent être pris en compte pour les voyages dans l'espace. Supposons que vous soyez assis dans le fauteuil de commande, et que vous ordonniez au vaisseau d'accélérer: il vous faut prendre en compte la force avec laquelle le fauteuil vous poussera en avant. Si vous ordonnez de doubler l'accélération, la force exercée sur vous par le fauteuil sera deux fois plus grande. Plus l'accélération sera forte, plus la pression grandira. Le seul problème, c'est que rien ne peut résister à l'accélération nécessaire pour atteindre la vitesse de propulsion, et surtout pas votre corps.

Du reste, ce problème particulier apparaît à plusieurs reprises dans Star Trek, y compris dans les épisodes qui se passent sur Terre. Au début de Star Trek V: L'ultime frontière, James Kirk fait de la varappe dans la vallée de Yosemite au cours de ses vacances. Il glisse, et tombe. Spock, qui est chaussé de ses bottes à propulsion, vole à son secours et arrête la chute du capitaine à quelques mètres du sol. Hélas ! voici un cas où la solution peut s'avérer pire que le problème. Ici, c'est cet arrêt brutal de la chute qui peut se révéler mortel, qu'il soit dû au sol ou à la poigne vulcanienne de M. Spock.

Cependant, avant même qu'interviennent les réactions physiques qui déchireront ou briseront votre corps, d'autres problèmes physiologiques non moins graves auront surgi. Tout d'abord, votre cœur ne parviendra plus à pomper le sang nécessaire pour irriguer votre cerveau. C'est la raison pour laquelle les pilotes d'avion de chasse s'évanouissent parfois lors d'une brusque accélération. Des combinaisons spéciales ont été créées pour contraindre le sang à monter depuis les jambes des pilotes et leur permettre de garder toute leur tête lors de l'accélération. Cette réaction physiologique est un sérieux handicap pour déterminer quelle vitesse d'accélération peut atteindre une navette spatiale. Voici pourquoi la NASA, contrairement à Jules Verne dans son célèbre roman De la Terre à la Lune, n'a jamais lancé trois hommes en orbite par un tir de canon géant.

Si je décide d'accélérer de 0 à 150 000 km/s - soit la moitié de la vitesse-lumière -, il me faudra le faire graduellement, sans quoi mon corps sera disloqué au cours du processus. Pour que je ne sois pas écrasé sur mon siège par une force supérieure à 3 G, l'accélération ne doit pas être supérieure à trois fois l'accélération d'un objet dans sa chute sur terre. À ce niveau d'accélération, il me faudrait 5 millions de secondes, soit 2 mois et demi, pour atteindre 50 % de la vitesse-lumière ! L'expérience ne serait pas sans générer quelque ennui.

Pour résoudre ce dilemme, peu après la création du premier vaisseau spatial de la Fédération-1'Entreprise NCC-1701 -, les auteurs du scénario durent répondre aux

critiques qui affirmaient que de telles accélérations à bord d'un vaisseau spatial transformeraient l'équipage s'éance tenante en chili con came 1. Ils s'en tirèrent en créant les « amortisseurs inertiels », sorte d'absorbeurs de chocs cosmiques et ingénieuse trouvaille pour se débarrasser de ce petit problème tenace.

En fait, les amortisseurs inertiels se signalent surtout lorsqu'ils tombent en panne. L'on voit ainsi l'Entreprise échapper de peu à la destruction suite à la perte de contrôle des amortisseurs inertiels : des puces informatiques vivantes, les Nanites, avaient, pour assurer leur développement naturel, dévoré la mémoire morte de l'ordinateur central. À vrai dire, chaque fois ou presque que l'Entreprise est détruite (la plupart du temps au cours d'un égarement temporel), la destruction est précédée par la perte des amortisseurs inertiels. Une perte de contrôle similaire à bord d'un vaisseau spatial romulien nous a permis de constater que les Romuliens ont le sang vert.

Hélas - et cela vaut pour une bonne partie de la technologie exploitée dans l'univers de Star Trek - il est plus facile d'analyser les problèmes que résolvent les amortisseurs inertiels que d'expliquer en quoi exactement ils les résolvent. La première loi physique de Star Trek est celle-ci : plus le problème constaté est basique, plus la solution devra être ingénieuse. La raison en est, et cela nous permet de croire dans l'avenir de Star Trek, que la physique est un édifice scientifique qui ne cesse de bâtir sur ses propres fondations. Les embarras rencontrés dans Star Trek n'exigent pas seulement que l'on recoure à quelques principes de physique, mais également que l'on prenne en considération le moindre aspect des savoirs scientifiques élaborés à partir de ces questions. La physique ne progresse pas par des révolutions, qui balayeraient tous les acquis précédents, mais par des évolutions, qui exploitent ce que les acquis peuvent proposer de plus intéressant. Dans un million d'années, les lois de Newton ne vaudront pas moins qu'aujourd'hui, quelles que soient les découvertes intervenues entre-temps. Si, sur la Terre, nous lançons une balle, elle retombera quoi qu'il arrive. Si, assis à mon bureau, je continue à rédiger jusqu'à la fin des temps, mon postérieur continuera de subir les conséquences évoquées ci-dessus.

Quoi qu'il en soit, il serait injuste de passer sur les amortisseurs inertiels sans tenter une description concrète de leur mode de fonctionnement. Comme je l'ai dit, il leur faut créer au sein de l'astronef un monde artificiel qui annule la réaction due à l'accélération. Les objets à bord du vaisseau sont « manipulés » de façon qu'ils se comportent comme s'ils ne subissaient pas d'accélération. J'ai dit précédemment que l'on a l'impression, au moment de l'accélération, de subir la pression gravitationnelle. Cette relation, qui est à la base de la théorie de la relativité générale telle qu'Einstein l'a énoncée, est beaucoup plus profonde qu'on pourrait le croire à première vue, et n'autorise qu'une solution: il faut tout simplement instaurer à l'intérieur de l'astronef un champ gravitationnel artificiel, qui fournisse une poussée contraire à la force de réaction, et donc l'annule.

Cette solution laisse cependant quelques questions pratiques à régler. Tout d'abord, les amortisseurs inertiels mettent un certain temps à réagir en cas de chocs

inattendus. Par exemple, la fois où l'Entreprise fut catapultée dans une spirale de causalité par le Bozeman qui sortait d'un décrochage temporel, le choc fit valser en tous sens l'équipage sur la passerelle, et cela avant même la rupture du système de distorsion et la panne des amortisseurs. J'ai lu dans les descriptifs techniques de l'Entreprise que le temps de réaction des amortisseurs inertiels est d'environ 60 millisecondes². Ce laps de temps peut paraître très court, mais suffirait à vous tuer s'il intervenait au cours d'une phase d'accélération. Vous ne me croyez pas? Demandez-vous combien de temps il faut au marteau pour briser votre crâne, ou au sol pour vous écrabouiller lorsque vous dévissez du sommet d'une falaise du Yosemite. De même: subir une collision à 15 km/h revient à se jeter la tête la première contre un mur de brique ! Les amortisseurs inertiels ont donc intérêt à réagir diablement vite. Plus d'un fan a déjà remarqué que, lorsque le vaisseau subit un choc, les personnages ne sont jamais projetés à plus de quelques centimètres ...

Avant de quitter le monde familier de la physique classique, je ne peux m'empêcher de mentionner une autre merveille technologique qui ne fonctionne qu'en dépit des lois de Newton. Il s'agit du faisceau magnétique de l'Entreprise, qui s'est illustré sur Moab IV, dans le sauvetage de la colonie de Génomes. Il fit dévier le cours d'une météorite qui venait droit sur le vaisseau, puis tenta de préserver Bre'el IV en remettant une lune astéroïde dans son orbite (hélas, sans résultat). À première vue, le faisceau magnétique paraît simple, même s'il exerce une force gigantesque : c'est une sorte de corde ou de filin invisible. Telle une corde solide, il permet de remorquer une navette ou un astronef, ou d'empêcher un vaisseau ennemi de s'enfuir. Le problème, c'est que, lorsque nous tirons sur quelque chose à l'aide d'une corde, il nous faut être appuyé soit au sol, soit à un objet qui fasse notre poids. Ceux qui ont déjà pratiqué le patin à glace savent ce qui advient lorsque l'on tente de repousser quelqu'un qui s'accroche à soi. On y parvient, mais au risque de perdre l'équilibre. Sans appui ferme sur le sol, l'on devient la victime impuissante de sa propre inertie.

C'est ce principe qui incite le capitaine Jean-Luc Picard à ordonner au lieutenant Ricker d'éteindre le faisceau magnétique dans l'épisode intitulé «La bataille». Picard fait remarquer que le vaisseau qu'ils sont en train de remorquer peut fort bien se laisser porter par sa propre force d'impulsion, ou inertie. Dans le même ordre d'idée, si l'Entreprise décidait d'utiliser le faisceau magnétique pour repousser le Stargazer, l'impact rejetterait l'Entreprise en arrière tout aussi puissamment qu'il propulserait le Stargazer en avant.

Ce phénomène affecte fondamentalement notre façon de travailler dans l'espace. Supposons que vous soyez un astronaute chargé de resserrer un boulon sur le télescope Hubble. Si vous vous munissez pour cette tâche d'un tournevis électrique, vous vous réservez un rude choc. Après avoir dérivé jusqu'au dit boulon, avoir calé le boulon dans le tournevis, et branché le courant, vous risquez tout autant de vous mettre à tourner autour du boulon que l'inverse. Cela parce que le télescope est beaucoup plus lourd que vous. La force exercée par le tournevis sur le boulon produit une force de réaction qui aura pour effet de vous faire tourner, vous, et non pas le

boulon qui est solidement fixé à sa structure. Bien sûr, si vous avez la chance (comme les assassins du chancelier Gorkon) de porter des chaussures de gravité qui vous arriment fermement au sol, vous pourrez vous déplacer aussi efficacement que si vous étiez encore sur Terre.

De même, vous avez pu voir ce qui se produit lorsque l'Entreprise tente de tirer à elle un autre astronef. À moins d'être, de loin, le plus lourd des deux vaisseaux, c'est l'Entreprise qui se déplacera vers sa cible lorsque fonctionnera le faisceau magnétique, et non l'inverse. Dans les profondeurs infinies de l'espace, cette distinction perd du reste tout son sens. S'il n'y a aucun point de référence alentour, comment savoir qui est tiré et qui tire? Cela dit, si vous vous trouvez sur Moab IV, cette malheureuse planète placée sur le trajet d'une étoile égarée, il importe très certainement de savoir si c'est l'Entreprise qui fera dévier l'étoile ou si c'est l'étoile qui fera dévier l'Entreprise !

Je connais un fan qui affirme qu'une solution à ce problème a été suggérée dans au moins un épisode: si l'Entreprise fait marcher ses moteurs de propulsion à l'instant où elle branche son faisceau magnétique, elle crée une force contraire qui compense le recul produit par la traction. Toutefois, je n'ai jamais entendu Kirk ou Picard ordonner de mettre les moteurs en marche en même temps que le faisceau. En vérité, une civilisation capable de concevoir et de construire des amortisseurs inertiels doit pouvoir se passer d'une telle solution, qui ne fait appel qu'à la force brute. Rappelez-vous Geordi LaForge qui avait besoin d'un champ de distorsion pour repousser la Lune autour de Bre'el IV: je pense qu'une manipulation délicate de l'espace et du temps, qui demeure impossible pour le moment, pouvait fournir une solution équivalente. Pour comprendre pourquoi, il nous faut enclencher les amortisseurs inertiels et accélérer, afin d'atteindre le monde moderne de l'espace temps courbe.

2 - Einstein relance la partie

*Une petite dame était bien fière
D'aller plus vite que la lumière.
Elle est partie dans la relativité
Et ne rentrera que la nuit dernière.
Auteur anonyme*

«Le temps, ou l'ultime frontière» -tel devrait être l'exergue de tout épisode de Star Trek. Les grands allers et retours temporels de l'Entreprise ont commencé il y a trente ans, dans l'épisode - devenu classique - «Demain est hier» (même si un épisode précédent, «Le temps mis à nu», montrait le vaisseau rejeté trois jours en arrière - mais il s'agissait d'un aller simple). Dans cet épisode, l'astronef revient au xx^e siècle après avoir frôlé de trop près une « étoile noire» (le terme de « trou noir» n'avait pas encore été vulgarisé). De nos jours, des concepts aussi ésotériques que ceux de mini-trous noirs et de « singularités quantiques» peuplent les épisodes de Star Trek: Le Voyageur, dernière série en date : grâce à Albert Einstein et à ses épigones, l'espace-

temps est devenu un ressort dramatique ...

Certes, d'une certaine manière, nous voyageons tous dans le temps. Mais le pathos cosmique qui hisse parfois l'histoire des hommes au rang de la tragédie procède justement de ce que nous semblons condamnés à ne voyager que dans une direction, celle de l'avenir. Et pourtant, que ne donnerions-nous pas pour voyager dans le passé, revivre des épisodes glorieux, corriger nos erreurs, rencontrer nos héros, conjurer des catastrophes, ou, tout simplement, revoir nos jeunes années avec toute la sagesse de notre maturité? Hélas, si la possibilité de voyager dans l'espace se rappelle à nous chaque fois que nous levons les yeux vers les étoiles, nous serons apparemment toujours prisonniers du temps. Ainsi, le questionnement qui fonde non seulement les licences poétiques des scénarios mais aussi une étonnante quantité des recherches théoriques de la physique moderne est simplement celui-ci: sommes-nous vraiment enfermés dans un train de marchandises cosmique, qui jamais ne déraillera?

Les origines du genre littéraire moderne que nous nommons «science-fiction» sont étroitement liées à la question du voyage dans le temps. Le roman de Mark Twain, *Un Yankee du Connecticut à la cour du roi Arthur*, aujourd'hui un classique, relève plus de la simple fiction que de la science-fiction, bien que l'ouvrage soit construit autour des aventures dans le temps d'un malheureux Américain égaré dans l'Angleterre du Moyen Âge. Peut-être Twain s'est-il contenté d'effleurer les aspects scientifiques du voyage dans le temps pour honorer la promesse faite à Picard, lors de son séjour à bord de l'*Entreprise*, de ne pas révéler ce qu'il avait vu de l'avenir lorsqu'il serait revenu au XIXe siècle, après avoir franchi la faille temporelle de Devidia IL.. (voir l'épisode intitulé « La flèche du temps »).

C'est en fait le remarquable roman de H. G. Wells, *La machine à explorer le temps*, qui assura la véritable émergence du thème tant repris et exploité par *Star Trek*. Wells avait fait ses études à Londres, à l'Imperial College of Science and Technology, et ses romans sont tout autant imprégnés de langage scientifique que les dialogues entre les membres d'équipage de l'*Entreprise*.

Assurément, les épisodes de *Star Trek* qui font intervenir les voyages dans le temps comptent parmi les plus captivants de la série. Dans les deux premières séries, dans trois des longs métrages et dans les épisodes des séries *Le Voyageur* et *Profondeur Espace 9* diffusés pour la première fois au moment où je rédigeais ce chapitre, je n'en ai pas recensé moins de vingt deux occurrences. Dans *Star Trek* - et c'est l'aspect le plus fascinant de ces voyages dans le temps -, tout semble inciter à violer la Règle d'Or, qui interdit aux équipages de la Flotte spatiale de perturber l'évolution historique des civilisations étrangères qu'ils visitent. Pourtant, en remontant le temps, il devient possible d'annuler le présent - voire l'histoire tout entière!

Un paradoxe célèbre a ainsi fait son apparition dans la science, et dans la science-fiction: que se passerait-il s'il était donné à un homme de remonter dans le temps et de tuer sa mère avant même qu'il ne fût né? Indubitablement, son existence serait aussitôt interrompue. Or, de ce fait même, il lui deviendrait impossible de remonter le temps et de tuer sa mère. À l'inverse, s'il ne tue pas sa mère, alors son

existence continue. D'où, pour résumer: il se peut que vous existiez alors même qu'il est impossible que vous existiez, et il se peut que vous n'existiez pas, alors même que nécessairement vous existez.

Les voyages dans le temps suscitent d'autres questions, plus insidieuses, mais non moins captivantes et troublantes. Par exemple, au dénouement de la «Flèche du temps», Picard, non sans ingéniosité, envoie un message au XXIX siècle depuis le XIX siècle (où il est égaré) : il le tape en code binaire dans la tête de Data, détachée du corps de l'androïde, dont il sait qu'elle sera découverte quelque cinq cents ans plus tard, et ressoudée au corps de Data. Nous le voyons taper ce message, puis, par un fondu enchaîné, nous voyons LaForge, au XXIV siècle, réussir à rattacher la tête de Data à son corps. Aux yeux du spectateur, ces deux événements paraissent concomitants. En fait, ils ne le sont pas : la tête de Data, où Picard tape son message, est destinée à rester là pour les cinq cents ans à venir. Supposons maintenant que nous soyons au xxrv= siècle, et que nous regardions attentivement la tête de Data, avant que Picard ne soit remonté au XIX" siècle pour modifier l'avenir: y verrons-nous vraiment le message? Si Picard n'a pas encore fait le voyage aller, me dira-t-on, il ne saurait y avoir de changement dans la tête de Data. Néanmoins, les modifications apportées à la programmation électronique de Data ont eu lieu au XIXe siècle, que Picard soit ou non revenu dans le passé pour les accomplir. Ces modifications ont donc été faites, même si Picard n'a pas encore quitté l'Entreprise ! Ainsi, une cause intervenue au XIXe siècle (Picard tape son message) peut produire son effet au xxrv= siècle (les circuits de Data sont modifiés) avant que la cause intervenue au xxrv= siècle (Picard quitte le vaisseau) n'ait produit son effet au XIXe siècle (Picard arrive dans la cave où se trouve la tête de Data), effet qui devait justifier la cause première (Picard tape son message).

Cet embrouillamini n'est rien comparé au paradoxe fondateur qui apparaît dans l'épisode final de Star Trek, Nouvelle génération, lorsque Picard déclenche une série d'événements qui auront des répercussions dans le passé, et finiront par détruire non seulement ses ancêtres, mais même toute forme de vie sur Terre! En d'autres termes, une « distorsion temporelle subspatiale », faisant intervenir « l'anti-temps », se développe chronologiquement à rebours, et élimine finalement les protoplasmes d'acide aminé présents aux origines du monde, avant même que les protéines primaires - la toute première forme de vie - aient eu le temps de se former. C'est bien là le cas le plus extrême d'un effet produisant une cause ! Cette distorsion temporelle est apparemment née dans l'avenir: si, trouvant des répercussions dans un lointain passé, elle a pu détruire les premières formes de vie sur Terre, alors aucune vie terrestre n'a pu se développer, et aucune civilisation susceptible de provoquer ladite perturbation n'a pu voir le jour!

La résolution classique de ces paradoxes consiste, du moins aux yeux de nombreux physiciens, à dire que de telles hypothèses sont infondées dans un monde rationnel tel que le nôtre. Cependant, et cela n'est pas pour clarifier les choses, les équations de la relativité générale élaborées par Einstein non seulement n'invalident pas, mais encore appuient ces hypothèses.

Environ trente ans après l'élaboration de ces équations, les conditions du voyage dans le temps furent énoncées par le célèbre mathématicien Kurt Gödel, collègue d'Einstein à l'Institute for Advance Study de Princeton. Pour parler comme dans Star Trek, cette solution permettait de créer une « spirale de causalité temporelle » semblable à celle dans laquelle l'Entreprise est engloutie après sa collision avec le Bozeman. La terminologie plus aride de la physique moderne parle d'une « courbe temporelle fermée ». Dans les deux cas, l'idée est la même : il est possible de voyager dans le temps, et de revenir à son point de départ, dans l'espace et dans le temps ! La solution de Gödel présuppose un univers qui, contrairement à celui dans lequel nous vivons, n'est pas en expansion, mais en rotation uniforme sur lui-même. Dans un tel univers, il suffit, pour remonter le temps, de décrire un vaste parcours circulaire dans l'espace. S'il est vrai que cet univers hypothétique est radicalement différent du nôtre, du moins le simple fait que cette solution existe indique clairement que voyager dans le temps est possible dans le contexte de la relativité générale.

Il y a, à propos de l'univers, une formule que je répète régulièrement à mes étudiants : ce que le discours scientifique n'exclut pas absolument se produira à coup sûr. Ou, pour citer Data dans l'épisode « Parallèles », à propos des lois de la mécanique quantique : « Tout ce qui est susceptible de se produire se produit. » C'est dans cet esprit, me semble-t-il, qu'il faut aborder la physique de Star Trek. Ce qui compte, ce n'est pas la distinction entre ce qui appartient effectivement au champ de l'expérience et ce qui n'y appartient pas, mais entre ce qui est possible et ce qui ne l'est pas.

Einstein en était bien conscient lorsqu'il écrivait : « [La solution de la machine à explorer le temps de] Kurt Gödel [soulève] le problème [qui] me perturbait déjà à l'époque où j'échafaudais la théorie générale de la relativité, problème que je n'ai jamais réussi à élucider ... Il sera intéressant de voir si ces [solutions] doivent être ou non exclues du domaine de la physique. »

Depuis lors, les physiciens ont dû relever ce défi : existe-t-il des « fondements de la physique » qui excluent définitivement la possibilité d'un voyage dans le temps, suggérée par les équations de la relativité générale ? L'examen de cette question nous amènera à voyager au-delà de l'univers classique de la relativité générale, et à pénétrer les régions obscures de la mécanique quantique, où s'altère même la nature de l'espace et du temps. Sur notre route nous croiserons, à l'instar de l'Entreprise, des trous noirs et des mini-trous noirs. Pour commencer, remontons le temps, et gagnons la seconde moitié du XIX^e siècle.

Les noces de l'espace et du temps, qui annonçaient les temps modernes, commencèrent avec celles de l'électricité et du magnétisme en 1864. Cette conquête intellectuelle de première importance, fondée sur les efforts conjugués de grands physiciens tels André-Marie Ampère, Charles-Augustin de Coulomb et Michael Faraday, atteint son sommet avec le remarquable physicien James Clerk Maxwell. Celui-ci découvrit que les lois de l'électricité et celles du magnétisme non seulement

s'avéraient intimement liées, mais, une fois réunies, impliquaient l'existence d'« ondes électromagnétiques» capables de traverser l'espace à une vitesse que l'on pouvait calculer en se basant sur les propriétés déjà connues de l'électricité et du magnétisme. Cette vitesse se révéla équivalente à celle de la lumière, mesurée antérieurement.

Or l'on s'interrogeait depuis l'époque de Newton pour savoir si la lumière était une onde - c'est-à-dire une vibration propagée sur un support -, ou une particule se déplaçant sans nul support. Les études de Maxwell, selon lesquelles les ondes électromagnétiques existaient bel et bien et se propageaient à une vitesse égale à celle de la lumière, mirent fin au débat : la lumière était une onde électromagnétique.

Une onde n'est rien d'autre qu'une vibration propagée. Si la lumière est une vibration électromagnétique, quel est donc ce support qui se voit perturbé par le trajet de l'onde? Cette question fut, à la fin du xix^e-siècle, le point majeur des investigations scientifiques. Le milieu en question avait reçu un nom sous l'ère d'Aristote: l'éther. Jusque-là, personne n'avait essayé directement de l'analyser. En 1887, toutefois, Albert A. Michelson et Edward Morley - qui menaient leurs recherches au sein des institutions qui formèrent en 1967 l'établissement où je travaille aujourd'hui, la Case Western Reserve University - se livrèrent à une expérience qui devait leur faire découvrir non seulement la nature de l'éther, mais aussi ses effets. Puisque l'éther était censé remplir l'espace tout entier, logiquement la Terre se mouvait dans l'éther. En faisant voyager de la lumière en diverses directions, compte tenu de la progression de la Terre dans l'éther, on pouvait calculer les variations de cette vitesse. Depuis, on a reconnu que cette expérience comptait parmi les plus importantes du siècle passé, bien que Michelson et Morley n'aient jamais réussi à obtenir les résultats escomptés. En fait, c'est bien parce qu'ils n'ont pas réussi à détecter l'effet du mouvement de la Terre dans l'éther que leurs noms ne sont pas tombés dans l'oubli. (A. A. Michelson devint par la suite le premier lauréat américain du Nobel de physique, grâce à ses investigations expérimentales sur la vitesse de la lumière, et je me sens honoré d'avoir aujourd'hui le poste qu'il occupait il y a plus d'un siècle. Edward Morley devint un chimiste réputé qui réussit à calculer, entre autres, la masse atomique de l'hélium.)

La non-découverte de l'éther connut bien quelque écho dans la communauté des physiciens, mais, comme c'est souvent le cas des découvertes manquées, ses conséquences ne furent véritablement appréciées que par quelques individus qui avaient déjà commencé à examiner divers paradoxes liés à la théorie de l'électromagnétisme. À cette époque, un jeune étudiant en physique - âgé de huit ans à l'époque des investigations de Michelson et de Morley - se mit, en cavalier seul, à confronter ces paradoxes. À vingt-six ans, en 1905, Albert Einstein avait résolu le problème. Mais, comme souvent lorsque de grands progrès sont accomplis en physique, les résultats d'Einstein suscitèrent plus de questions qu'ils n'apportèrent de réponses.

La solution d'Einstein, qui était au cœur de sa théorie de la relativité, était fondée sur un fait simple, mais apparemment impossible: la théorie de Maxwell sur

l'électromagnétisme ne tenait debout que si la vitesse observée ne dépendait pas de la vitesse de l'observateur. Voilà qui défiait le sens commun. Si l'Entreprise envoie une sonde alors qu'elle se déplace à vitesse de propulsion, quelqu'un regardant depuis une planète située en dessous verra la sonde filer à travers l'espace à une vitesse bien plus grande qu'il ne semblera à un membre de l'Entreprise l'observant depuis un hublot. Mais Einstein découvrit que la théorie de Maxwell demeurerait logique si et seulement si les ondes-lumière se comportaient autrement: à savoir, si leur vitesse, telle que pourraient la mesurer les deux observateurs, demeurerait la même, indépendamment de la vitesse relative des observateurs. Ainsi, si j'émetts un rayon de phaseur depuis le pont avant de l'Entreprise, et que celui-ci se dirige vers le pont avant d'un vaisseau romulien à une vitesse de propulsion équivalant à 75 % de la vitesse-lumière, mes ennemis croiront voir le rayon foncer sur eux précisément à la vitesse de la lumière, et non à 75 % de cette vitesse. Ce genre d'illusion a interloqué certains adeptes de Star Trek : ils se figurent que, si l'Entreprise se dirige à une vitesse proche de la vitesse-lumière et qu'un autre vaisseau se dirige dans la direction opposée à une vitesse proche de la vitesse-lumière, les phares de l'Entreprise ne parviendront pas à rattraper l'autre vaisseau, et que l'Entreprise lui demeurera invisible. À l'inverse, l'équipage du second navire verra les feux de l'Entreprise se rapprocher à la vitesse de la lumière.

Einstein ne doit pas sa popularité à cette seule découverte. Le plus important, c'est qu'il a voulu explorer les implications de cette découverte - qui peuvent paraître absurdes à première vue. Dans notre expérience de tous les jours, le temps et l'espace sont des données absolues, et la vitesse est une donnée relative. La vitesse de déplacement d'un objet est perçue différemment selon la vitesse de déplacement de l'observateur. Mais, lorsqu'il s'agit de vitesse-lumière, c'est la vitesse qui devient une quantité absolue, et dès lors le temps et l'espace ne peuvent que devenir relatifs!

Cela vient du fait que la vitesse se définit littéralement comme la distance parcourue en un temps donné. Dès lors, plusieurs observateurs en mouvement relatif ne peuvent mesurer un rayon de lumière parcourant une même distance par rapport à chacun d'eux - disons, 300 millions de mètres - en, disons, une seconde que si chacune de leurs « secondes » et chacun de leurs « mètres » sont différents! Nous voyons donc que dans la relativité restreinte tout peut arriver: mètres et secondes deviennent des quantités relatives.

En se basant sur le simple fait que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, quel que soit leur mouvement relatif, Einstein obtient, quant à l'espace, le temps et la matière, quatre axiomes enchaînés :

a) Des événements qui, aux yeux d'un observateur, se produisent au même moment mais à deux endroits distincts n'apparaîtront pas forcément comme simultanés aux yeux d'un second observateur qui se déplace par rapport au premier. Le « présent » de chaque personne est unique en fonction de cette personne. « Avant » et « après » sont des notions relatives en ce qui concerne des événements ayant lieu à distance.

la lumière. D'où la règle instituée, qui veut que les déplacements ordinaires des vaisseaux spatiaux soient limités à une vitesse de 0,25 c (soit 1/4 de la vitesse-lumière, ou 75 000 km/s).

Et même en appliquant cette règle, les horloges des navires qui se déplacent à cette vitesse subiront un retard d'environ 3 % par rapport à celles stationnées au QG de la Flotte. Ce qui signifie que, au bout d'un mois, les horloges auront pris un retard d'environ un jour. Au retour d'un tel voyage, les horloges de l'Entreprise indiqueraient vendredi au lieu de samedi. Le problème ne semble pas beaucoup plus complexe que celui qui se pose à nous lorsque nous voyageons vers l'est et devons mettre notre montre à l'heure après le passage du fuseau horaire international - mais, dans le cas qui nous intéresse, l'équipage de l'Entreprise serait véritablement plus jeune d'un jour après cet aller-retour que s'il était resté au QG, tandis que nous gagnons un jour à l'aller, mais le perdons au retour.

L'on comprend mieux, alors, quel gain précieux la vitesse de distorsion représente pour l'Entreprise. Elle a été conçue non seulement pour éviter d'atteindre la vitesse-lumière - puisque celle-ci représente l'ultime limite - et rendre ainsi possibles les voyages à travers la galaxie, mais aussi pour éviter les problèmes de décalage temporel résultant d'un déplacement à une vitesse proche de celle de la lumière.

Je ne puis qu'insister sur l'importance de ces faits. Le retard pris par les horloges lorsqu'on se rapproche de la vitesse-lumière a incité les auteurs de science-fiction (et tous ceux qui ont rêvé de voyager jusque dans les étoiles) à penser qu'une vie humaine - ou plus exactement la vie des personnes embarquées à bord d'un vaisseau spatial - pourrait suffire à traverser l'immensité des plaines. À une vitesse proche de celle de la lumière, il faudrait, pour gagner le centre de notre galaxie, plus de 25 000 ans de notre temps terrestre. Pour l'équipage de l'astronef, en se déplaçant à une vitesse suffisamment proche de celle de la lumière, ce voyage pourrait prendre moins de dix ans. Cela reste long, mais devient possible. Néanmoins, si ce fait permet les explorations individuelles, il rend impossible le contrôle d'une fédération de civilisations éparpillées dans l'ensemble de la galaxie. Comme les auteurs de la série Star Trek l'ont bien vu, un voyage qui prendrait dix ans à l'Entreprise, tandis que 25 000 ans s'écouleraient au QG, rendrait irréalisable toute opération visant à contrôler les mouvements des multiples vaisseaux. Aussi est-il essentiel: a) que la vitesse-lumière soit évitée, afin de ne pas désynchroniser la Fédération; b) de mettre en place une vitesse qui soit supérieure à celle de la lumière afin de faciliter les déplacements dans la galaxie.

L'ennuyeux est que, dans le contexte de la relativité restreinte, la seconde condition ne peut être réalisée. De multiples impossibilités se font jour si l'on autorise la création d'une super-vitesse-lumière. Ainsi, puisque les objets se font plus lourds à mesure qu'ils se rapprochent de la vitesse lumière, il faudra de plus en plus d'énergie pour une accélération toujours moindre. Comme dans le mythe du héros grec Sisyphe, qui fut condamné à pousser un rocher le long d'une pente pour l'éternité, et à toujours le voir dévaler avant d'avoir atteint le sommet, toute l'énergie présente

dans l'univers ne suffirait pas à faire franchir cette ultime limite de la vitesse à un grain de poussière - moins encore à un vaisseau spatial.

Dans la même perspective, ce n'est pas seulement la lumière, mais encore toutes les radiations dépourvues de masse qui voyagent à la vitesse dite lumière. Ce qui signifie que de nombreux personnages qui sont «pure énergie», rencontrés par l'Entreprise et plus tard par le Voyageur, ne devraient logiquement pas exister, contrairement à ce que nous montre la série. Et d'abord, ils ne devraient pas pouvoir rester tranquillement assis : on ne saurait ralentir le cours de la lumière, et encore moins l'immobiliser en un espace donné. Ensuite, tout être énergétique doué d'intelligence (par exemple les êtres «photoniques» qu'on voit apparaître dans la série intitulée *Le Voyageur*, ceux du nuage Beta Renna dans *La nouvelle génération*, les Zétariens dans la série originelle, et enfin le Dal'Rok dans *Profondeur Espace 9*), dès lors qu'il serait contraint de voyager à la vitesse de la lumière, serait équipé d'horloges fonctionnant infiniment plus lentement que les nôtres. L'histoire de l'univers leur paraîtrait se dérouler en un seul instant. À supposer que ces êtres énergétiques puissent faire l'expérience de quelque chose, ils feraient l'expérience de toute chose en un seul moment! Inutile de dire que, avant qu'ils ne puissent établir un contact avec des êtres corporels, ces derniers seraient morts depuis belle lurette.

Toujours à propos du temps, je crois qu'il est grand temps de vous présenter la manœuvre Picard. Jean-Luc a accédé à la célébrité en adoptant cette stratégie à bord du *Stargazer*. Bien qu'elle oblige à voyager en vitesse de distorsion, ou en supervitesse-lumière, elle ne le fait qu'un bref instant, et convient très bien à notre analyse. La manœuvre Picard, destinée à confondre un vaisseau ennemi qui attaque, veut que le vaisseau attaqué accélère jusqu'à vitesse de distorsion un court moment : il paraît alors se trouver à deux endroits en même temps. En effet, en voyageant plus vite que la vitesse-lumière pour un très court instant, il dépasse les rayons de lumière qu'il a émis juste avant de passer en vitesse de distorsion. La stratégie est rien moins que brillante et, apparemment, cohérente dans sa présentation (en supposant que l'on soit capable d'atteindre la vitesse de distorsion). Vous pouvez, je crois, vous apercevoir facilement qu'il s'agit également d'une véritable boîte de Pandore. Pour commencer, cette stratégie pose une question que des milliers de fans ont déjà soulevée: comment l'équipage de l'Entreprise peut-il «voir» les objets qui approchent lorsqu'ils se déplacent en vitesse de distorsion? De même que le *Stargazer* dépasse sa propre image, tout objet se déplaçant à vitesse de distorsion doit faire de même ; par conséquent on ne peut voir un tel objet que lorsqu'il atteint son point d'arrivée. Il faut donc supposer que lorsque Kirk, Picard ou Janeway ordonnent de fixer un objet sur l'écran de contrôle, le résultat est une image reconstituée par une sorte de capteur subspatial à longue distance (à savoir, capable de communiquer des impressions en super-vitesse-lumière). Même en passant outre cette imprécision dans le scénario, l'univers de *Star Trek* devient un univers aussi intéressant que dangereux à parcourir, peuplé d'images fantômes d'objets arrivés depuis longtemps à leur destination en voyageant à vitesse de distorsion.

Revenons au monde de l'infra-vitesse-lumière: nous n'en avons pas encore fini avec Einstein. Sa fameuse équation mettant en rapport masse et énergie, $E = mc^2$, qui résulte de la relativité restreinte, pose un nouveau défi à qui voudrait voyager dans l'espace à vitesse de propulsion. Comme je l'ai décrit au chapitre 1, le principe du réacteur est de réaliser une poussée vers l'arrière pour provoquer une propulsion vers l'avant. Plus la poussée arrière sera importante, plus la propulsion créée par le réacteur sera forte. La poussée arrière ne peut excéder la vitesse-lumière. Même à la vitesse-lumière, cela ne va pas de soi: il faut, pour y parvenir, un carburant composé de matière et d'antimatière, qui, en s'annihilant entièrement comme je le décrirai dans le chapitre suivant, pourrait ne produire qu'une pure radiation voyageant à vitesse-lumière.

Toutefois, si la vitesse de distorsion à bord de l'Entreprise consomme un carburant de cette fabrication, il n'en va pas de même pour la vitesse de propulsion. Celle-ci puise son énergie dans la fusion nucléaire, cette même réaction nucléaire qui nourrit le soleil en transformant l'hydrogène en hélium. Dans les réactions de fusion, environ 1 % de la masse disponible est transformée en énergie. Avec cette énergie disponible, les atomes d'hélium produits seront projetés à l'arrière du réacteur à une vitesse d'environ un huitième de la vitesse-lumière. En nous basant sur cette vitesse ultime, nous pouvons calculer combien de carburant sera nécessaire à l'Entreprise pour accélérer jusqu'à, mettons, la moitié de la vitesse-lumière. C'est une opération qui ne pose pas de problème, mais je passerai directement aux résultats, qui pourront vous surprendre. Chaque fois que l'Entreprise accélère jusqu'à la moitié de la vitesse-lumière, il lui faut consommer 81 fois sa masse totale en carburant à base d'hydrogène. Si l'on suppose qu'un vaisseau spatial galactique tel que l'Entreprise-D de Picard pèse environ 4 millions de tonnes métriques, cela signifie qu'il lui faudra environ 300 millions de tonnes métriques de carburant toutes les fois qu'on aura recours à l'impulseur pour atteindre la moitié de la vitesse-lumière! Si l'on utilise un système de propulsion reposant sur l'alliage matière-antimatière, il suffira de consommer deux fois la masse totale de l'Entreprise pour atteindre une telle accélération.

En fait, les choses vont en empirant, car les calculs décrits ci-dessus ne valent que pour une accélération unique. Pour freiner et immobiliser le vaisseau, une fois le but atteint, il faut à nouveau multiplier par 81 sa masse en carburant. Ce qui signifie que, simplement pour se rendre quelque part et s'y arrêter, le vaisseau devra consommer une somme de carburant équivalant à **81 x 81 fois = 6561** sa masse totale! De plus, imaginons que l'on veuille atteindre la moitié de la vitesse-lumière en quelques heures (bien sûr, les amortisseurs inertiels sont en bon état de fonctionnement et préservent vaisseau et équipage des terribles effets de la force G): la force émanant des réacteurs serait alors d'environ 1022 watts - à savoir un milliard de fois la somme totale d'énergie produite et consommée en ce moment par l'ensemble des humains sur la Terre!

Certes, on peut toujours suggérer une échappatoire (comme l'a fait un brillant collègue lorsque je lui ai exposé le problème l'autre jour). La difficulté tient à ce qu'il

faut nécessairement transporter le carburant à bord du navire. Et si on le stockait au fur et à mesure du voyage? Après tout, l'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers. Ne pouvons-nous l'amasser tout en progressant dans la galaxie? Mais voilà : la densité matérielle moyenne dans notre galaxie est d'environ un atome d'hydrogène par centimètre cube. Pour amasser ne serait-ce qu'un gramme d'hydrogène par seconde, même en se déplaçant à une bonne proportion de la vitesse-lumière, il faudrait donc déployer des panneaux accumulateurs d'environ 40 kilomètres de diamètre. Et une fois transformée en énergie propulsive, la récolte ne fournirait qu'environ un cent-millionième de l'énergie souhaitée!

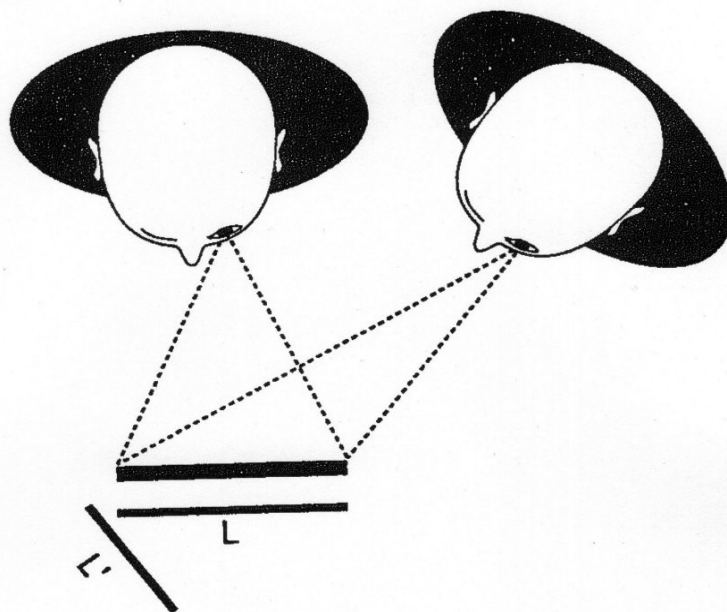
Pour paraphraser Edward Purcell, prix Nobel de physique, dont j'ai repris et développé ici les arguments: si tout cela vous paraît absurde, vous avez raison. L'absurdité même de ces raisonnements découle des lois élémentaires de la mécanique classique et de la relativité restreinte. Les données ici présentées sont aussi indépassables que le fait qu'un ballon lâché au-dessus du sol terrestre ne pourra que tomber. Les voyages galactiques à bord de vaisseaux propulsés par réacteurs sont impossibles pour des raisons de physique, et le seront toujours!

Me faut-il alors conclure ici? Nous faut-il renvoyer nos souvenirs de Star Trek, et demander à être remboursés? Non, car nous n'en avons pas fini avec Einstein. Sa découverte ultime, peut-être la plus importante de toutes, laisse entrevoir un mince espoir.

Faisons un rapide retour en 1908 : la découverte par Einstein de la relativité du temps et de l'espace précède l'une de ces expériences époustouflantes qui, de temps à autre, viennent modifier du tout au tout notre idée de l'univers. C'est à l'automne 1908 que le physicien et mathématicien Hermann Minkowski écrit ces mots célèbres: «Dorénavant, l'espace en soi et le temps en soi sont des notions destinées à disparaître, et seule une forme d'union entre les deux pourra préserver une réalité indépendante. »

Ce que Minkowski a réalisé, c'est que, même si l'espace et le temps sont relatifs aux yeux d'observateurs en mouvement relatif (votre horloge marche plus lentement que la mienne, les distances nous apparaissent sous des angles différents), dès lors que l'espace et le temps sont confondus, contribuant à établir un univers à quatre dimensions (les trois dimensions de l'espace plus le temps), une réalité objective «absolue» refait son apparition.

Pour expliciter cette intuition de Minkowski, imaginons un monde dont tous les habitants posséderaient une vision monoculaire, et seraient donc incapables de percevoir directement la profondeur. Si vous fermez un œil, de façon à réduire votre perception de la profondeur, et que je vous présente une règle tout en demandant à quelqu'un, qui observe cette règle sous un autre angle, de fermer également un œil, la règle en question paraîtra d'une longueur différente aux deux observateurs, comme le montre le dessin ci-dessous .



Chacun des deux observateurs, dans ce schéma, est incapable de discerner directement la profondeur : il donnera le nom de «longueur» (ou L') à la projection bidimensionnelle de la véritable règle (elle-même objet tridimensionnel) sur son champ de vision. Parce que nous savons que l'espace a bel et bien trois dimensions, nous ne nous laissons pas abuser par cette illusion. Nous savons que, lorsque nous regardons un objet un angle différent, cela ne modifie que sa longueur apparente et non sa longueur réelle. Minkowski montre que la même idée peut éclairer les divers paradoxes de la relativité. Il nous faut maintenant supposer que notre perception de l'espace ne prend en compte que les trois quarts d'un objet qui a véritablement quatre dimensions, dans lequel le temps et l'espace se confondent. Deux observateurs en mouvement relatif perçoivent des réalités tridimensionnelles différentes, issues d'un espace quadridimensionnel, de même que les deux observateurs tournants de l'illustration voient des réalités bidimensionnelles différentes, relevant d'un espace tridimensionnel.

Minkowski a imaginé que la distance spatiale telle que la mesurent deux observateurs en mouvement relatif n'est autre que la projection d'une distance spatio-temporelle à quatre dimensions sur l'espace tridimensionnel qu'ils peuvent percevoir; de même, la « distance» temporelle qui sépare deux événements est une projection de la distance spatio-temporelle à quatre dimensions sur la chronologie particulière des observateurs. De même que, en faisant tourner un objet tridimensionnel, on altère la perception de sa longueur et de sa largeur, de même la relativité propre à l'espace quadridimensionnel peut confondre les notions d'espace et de temps dans l'esprit des différents observateurs. Enfin, de même que la longueur véritable d'un objet ne change pas lorsque nous le faisons tourner dans l'espace, la distance spatio-temporelle qui sépare deux événements reste absolue, quelles que puissent être les distances spatiales ou temporelles relatives calculées par les différents observateurs.

Ainsi, la constance incroyable de la vitesse de la lumière pour tous les

observateurs suggère une clef pour décoder la véritable nature de l'univers quadridimensionnel de l'espace-temps dans lequel nous vivons. La lumière révèle le lien caché entre l'espace et le temps. Notamment, c'est la vitesse de la lumière qui définit cette connexion.

Voilà en quoi Einstein sauve l'univers de Star Trek. Une fois que Minkowski eut montré que l'espace-temps dans la relativité restreinte est comme une feuille de papier quadridimensionnelle, Einstein passa l'essentiel des dix années suivantes à entraîner ses muscles mathématiques jusqu'à ce qu'il soit capable de plier cette feuille, ce qui lui a permis d'assouplir les règles du jeu. Comme vous pouvez vous en douter, c'est encore la lumière qui devait fournir la solution.

3 - Hawking abat ses cartes

«Vous autres mortels n'entendez rien au temps.

Vous faut-il être si linéaire, Jean-Luc ?»

Q à Picard, dans l'épisode «Les meilleures choses ... »

La planète Vulcain, patrie de Spock, occupe une place honorable dans les archives de la physique du xx^e siècle. L'une des choses qui posait problème au début de notre siècle, c'était le fait que l'axe du périhélie de Mercure (le point de son orbite où la distance par rapport au Soleil est la plus courte) subissait chaque année mercurienne une précession en contradiction avec la loi de la gravitation établie par Newton. On suggéra alors l'existence d'une planète nouvelle à l'intérieur de l'orbite de Mercure, planète dont les perturbations fourniraient une réponse au problème. (De fait, en appliquant cette solution à l'orbite d'Uranus, qui manifestait une anomalie, on avait abouti à la découverte de la planète Neptune.) On donna à l'hypothétique planète le nom de Vulcain.

Hélas ! la mystérieuse planète Vulcain ne se situe pas là.

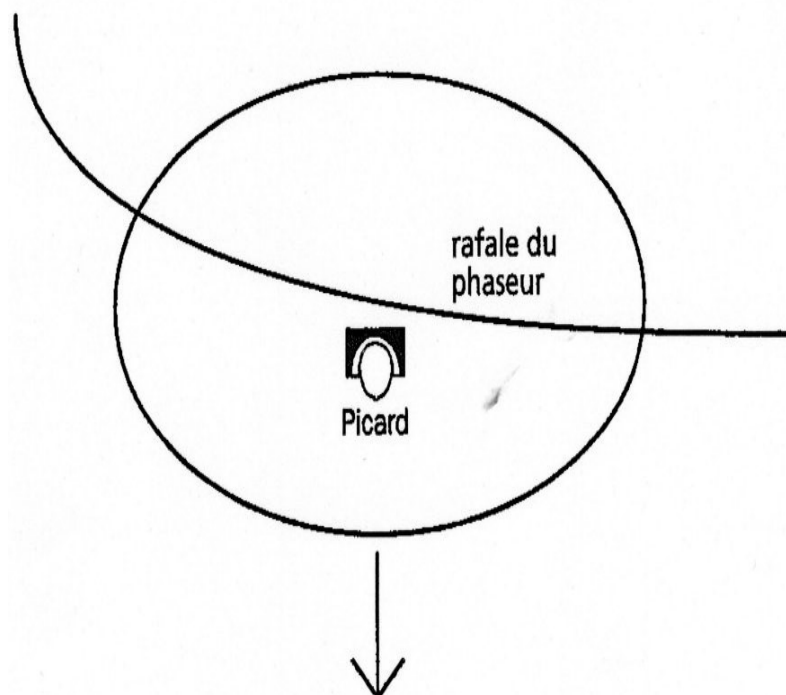
Einstein suggéra comme autre solution qu'il fallait abandonner l'espace plan de Newton et de Minkowski pour recourir à la courbe spatio-temporelle de la relativité générale. Dans cet espace courbe, l'orbite de Mercure déviait quelque peu de celui calculé par Newton, d'où le décalage observé. Cette hypothèse, si elle mettait fin à la planète Vulcain, introduisait des possibilités bien plus intéressantes. À la suite de l'espace courbe, on trouve les trous noirs, les mini-trous noirs, et peut-être même la vitesse de distorsion et les voyages dans le temps.

De fait, bien avant que les auteurs de Star Trek aient inventé les champs de distorsion, Einstein lui-même avait distordu l'espace-temps - tout comme eux, par le seul recours à son imagination. Au lieu de concevoir la technologie propre aux vaisseaux spatiaux du $XXII$ siècle, Einstein se représenta un ascenseur. C'était indubitablement un grand physicien, mais il n'aurait sans doute jamais réussi à vendre un scénario.

Ses démonstrations gardent néanmoins toute leur valeur lorsqu'on les replace à

bord de l'Enterprise. Parce que la lumière est ce fil qui tisse ensemble l'espace et le temps, la trajectoire des rayons de lumière nous offre une carte de l'espace-temps aussi nette que lorsque les fils croisés d'une trame donnent à voir le dessin d'une tapisserie. La lumière voyage généralement en ligne droite. Mais que se passera-t-il si un commandant de bord romulien, à bord d'un Rapace proche, tire un rayon de phaseur sur Picard alors que celui-ci est sur la passerelle du vaisseau pilote, le Calypso, et qu'il vient juste d'enclencher la vitesse de distorsion (et là, pour une fois, nous supposons que les amortisseurs inertiels sont en position de repos)? Picard subirait une accélération vers l'avant et n'éviterait que de peu l'impact de la rafale de phaseur. Du point de vue de Picard, les choses se passeraient comme sur le schéma suivant.

Le trajectoire du rayon de phaseur paraîtrait courbe à Picard. Que percevrait-il encore? Eh bien, comme l'expose la démonstration du premier chapitre, aussi longtemps que les amortisseurs inertiels ne seraient pas connectés, il serait rejeté dans son siège. Je note également que, si Picard subissait une accélération vers l'avant similaire aux accélérations causées sur Terre par la gravité, il ressentirait la même force de projection en direction de son siège que sur Terre. C'est bien ce que montre Einstein : Picard (ou tout individu se trouvant dans un ascenseur qui monte) ne saurait d'aucune manière trouver de différence entre la force de réaction émanant de l'accélération et la poussée gravitationnelle émise par quelque objet pesant situé à proximité du vaisseau. Cela permit à Einstein d'aller plus loin, là où nul physicien ne l'avait précédé: il prouva qu'un phénomène ressenti par un observateur en état d'accélération était identique à celui ressenti par un observateur soumis à la loi de gravitation.



Notre exemple a ceci pour conséquence: puisque Picard observe que le rayon de phaseur a une trajectoire courbe lorsqu'il s'en éloigne par l'effet de l'accélération,

alors le rayon doit également être courbe dans un champ gravitationnel. Mais si les rayons de lumière donnent à voir la constitution de l'espace-temps, cela signifie que l'espace-temps doit nécessairement être courbe dans un champ gravitationnel. Enfin, puisque c'est la matière qui produit le champ gravitationnel, alors c'est nécessairement elle qui est responsable de la courbe de l'espace-temps!

Mais, dira-t-on, puisque la lumière contient de l'énergie, et que la masse et l'énergie sont mises en rapport dans la célèbre équation d'Einstein, le fait que la lumière se courbe dans un champ gravitationnel n'a rien de bien surprenant et n'implique pas nécessairement que l'espace-temps lui-même soit courbe. Après tout, les trajectoires suivies par la matière ne le sont pas moins (lancez une balle en l'air pour voir). Galilée aurait pu démontrer, si ces objets avaient existé de son temps, que les trajectoires des balles de base-ball et des missiles Pathfinder sont courbes, mais il n'aurait jamais eu l'idée d'un espace courbe.

Eh bien! il s'avère que l'on peut mesurer la courbe d'un rayon de soleil. Pour cela, il faut supposer que la lumière se déplace à la façon d'une balle de base-ball, et calculer le degré de courbure du rayon, comme le fit sir Arthur Stanley Eddington en 1919, dans l'expédition qu'il mena afin d'observer la position apparente des étoiles les plus proches du Soleil au cours d'une éclipse solaire. Faites-le, et vous remarquerez, comme Eddington, que la lumière est deux fois plus courbe que si elle suivait la trajectoire d'une balle de base-ball dans l'espace plan. Comme vous l'avez peut-être deviné, ce facteur de 2 est celui qui avait été prédit par Einstein, dans le cas où l'espace-temps serait bien courbé à proximité du Soleil, et dans le cas où la lumière (ou la planète Mercure, en l'occurrence) se déplacerait suivant une ligne droite dans cet espace courbe! Du jour au lendemain, Einstein devint une célébrité.

L'espace courbe ouvre tout un univers de possibilités - que l'on me pardonne le jeu de mots. Nous voici libérés, tout comme l'Entreprise, des entraves de la pensée linéaire imposées par la relativité restreinte et que Q, pour sa part, semblait tellement abhorrer. On peut réaliser dans un univers courbe bien des choses impossibles dans l'espace plan. Par exemple, il devient possible, alors qu'on garde toujours le même cap, de se retrouver au point de départ : ceux qui font le tour du monde le constatent régulièrement.

Les postulats principaux de la relativité générale énoncés par Einstein sont faciles à résumer: la courbure de l'espace-temps est directement déterminée par la distribution de la matière et de l'énergie qu'ils contiennent. Les équations d'Einstein, de fait, ne font que traduire en termes mathématiques les relations entre, d'un côté, la courbure de l'espace-temps, et, de l'autre, la matière et l'énergie:

$$\begin{array}{l} \text{Du côté gauche} \\ \text{[Courbure]} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Du côté droit} \\ \text{[Matière et énergie]} \end{array}$$

Ce qui rend la théorie si diablement difficile à utiliser comme outil de travail, c'est qu'elle fonctionne à la façon d'un cercle vicieux: la courbure de l'espace-temps est déterminée par la distribution de la matière et de l'énergie dans l'univers, mais

cette distribution repose elle-même sur la courbure de l'espace. On retrouve la fameuse énigme de l'œuf et de la poule : qui a, le premier, produit l'autre? La matière se présente comme l'origine de la courbure, et celle-ci, à son tour, détermine l'évolution de la matière, évolution qui altère la courbure, etc.

Cette question est peut-être l'aspect le plus important de la relativité générale en ce qui concerne Star Trek. La complexité de cette théorie montre que nous n'avons pas encore pénétré toutes ses conséquences; dès lors, nous ne pouvons exclure diverses possibilités exotiques. Ce sont ces dernières qui apportent de l'eau au moulin de Star Trek. De fait, nous verrons qu'elles reposent toutes sur une inconnue, unique et essentielle, qui influence tout, des trous noirs et mini-trous noirs jusqu'aux machines à remonter le temps.

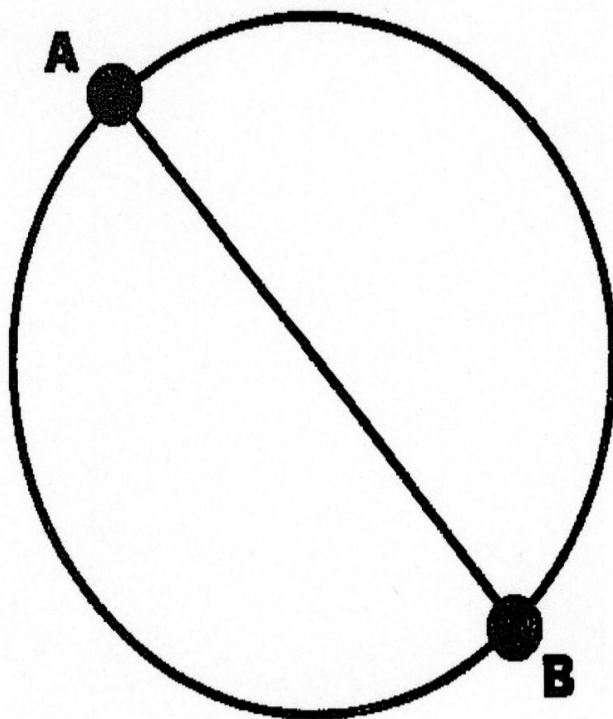
La première implication, reposant sur le fait que l'espace-temps n'est pas forcément plan, et qui est utile aux aventures de l'Entreprise, c'est que le temps lui-même devient une quantité plus dynamique encore que dans la relativité restreinte. Le temps peut s'écouler à des vitesses différentes selon les observateurs, même si ceux-ci ne sont pas en mouvement relatif. Essayez de concevoir les tic-tac d'une horloge comme des traits tracés à intervalles réguliers sur une règle en caoutchouc. Si j'étire ou plie cette règle, l'espace séparant les intervalles ne sera pas le même partout sur la règle. Si nous reprenons notre image, nous comprenons que des horloges situées à différents endroits peuvent décompter le temps à des vitesses différentes. Dans la relativité générale, seule la présence d'un champ gravitationnel peut plier la règle, impliquant à son tour la présence de matière.

Traduisons cela en termes plus pragmatiques : si je pose une lourde balle de fer près d'une horloge, la vitesse de fonctionnement de l'horloge en sera modifiée. Ou, pour user d'un exemple encore plus pratique, si je dors avec mon réveille matin enfoui près de la masse au repos de mon corps, je serai réveillé un peu plus tard que je ne le serais autrement.

Une célèbre expérience menée en 1960 dans les laboratoires de physique de l'université Harvard permit de démontrer que le temps peut dépendre de l'endroit où l'on se trouve. Robert Pound et George Rebka montrèrent que la fréquence de la radiation gamma, mesurée à sa source, dans les sous-sols du bâtiment, différait de la fréquence de la radiation lorsque celle-ci était captée 22 mètres plus haut, sur les toits des bâtiments (sachant que les détecteurs avaient été soigneusement calibrés afin de ne pas influencer les écarts observés). La différence se révéla incroyablement minime: d'environ un degré sur un milliard de millions. Si chaque cycle de l'onde de rayons gamma équivaut au tic-tac d'une horloge atomique, l'expérience implique qu'une horloge atomique placée au sous-sol paraîtra fonctionner plus lentement qu'une même horloge placée sur le toit. Le temps ralentit à l'étage le plus bas parce que celui-ci est plus proche de la terre que le toit, si bien que le champ gravitationnel et, par conséquent, la courbure de l'espace-temps y sont plus étendus. Si infime que fut cet effet, il confirme les prédictions de la relativité générale sur la courbure de l'espace-temps à proximité de la terre.

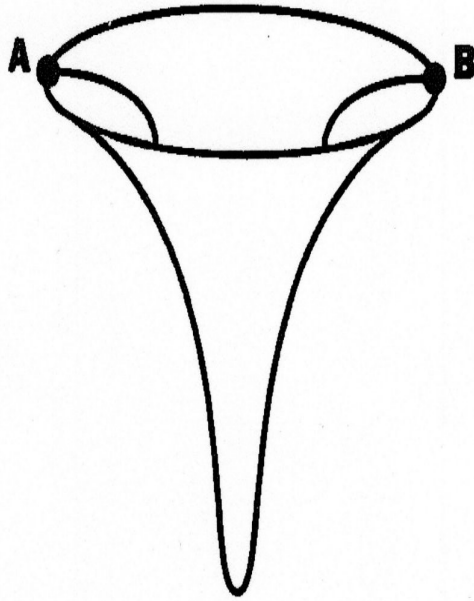
La seconde implication de l'espace courbe est peut-être plus intéressante

encore dans la perspective des voyages dans le temps. Si l'espace est courbe, alors une ligne droite n'est pas forcément le plus court chemin entre deux points. En voici un exemple. Soit un cercle dessiné sur une feuille de papier. Normalement, la distance la plus courte entre deux points A et B, situés sur ce cercle et diamétralement opposés, se calcule en tirant une ligne qui les relie en passant par le centre du cercle :



Si, au lieu de cela, on faisait le tour du cercle pour parvenir de A à B, le voyage prendrait une fois et demie plus de temps. Maintenant, dessinons ce même cercle sur une feuille de caoutchouc, et exerçons une distorsion sur sa région centrale.

Dans ce nouveau contexte tridimensionnel, il est clair que si l'on veut atteindre B en partant de A, et en passant par le centre du cercle, on mettra beaucoup plus longtemps qu'en faisant simplement le tour du cercle. Notez que si nous prenions une photographie en plongée de cette figure, nous n'aurions plus qu'une perspective bidimensionnelle, si bien que la ligne reliant A à B via le centre nous apparaîtrait comme une droite. Il est plus intéressant de noter que si un minuscule insecte (ou un être bidimensionnel, tels ceux que l'Entreprise rencontre parfois) suivait cette trajectoire de A à B via le centre, en rampant le long de la surface de la feuille de caoutchouc, sa trajectoire nous apparaîtrait également comme une ligne droite. L'insecte découvrirait à son grand étonnement que la ligne droite entre A et B passant par le centre n'est plus la distance la plus courte entre ces deux points. Si l'insecte était intelligent, il serait alors forcé de conclure que l'espace bidimensionnel dans lequel il vivait était courbe. Pour observer plus directement cette courbure, il nous faudra d'abord porter notre attention sur la façon dont la feuille de caoutchouc s'intègre dans un espace tridimensionnel.



À présent, rappelez-vous que nous vivons dans un espace-temps à quatre dimensions qui peut être courbe, et que nous ne percevons pas plus la courbure de cet espace de façon directe que l'insecte rampant le long de la feuille ne peut détecter sa courbure. Vous voyez sûrement où je veux en venir: si, dans l'espace courbe, la distance la plus courte entre deux points n'est pas nécessairement une ligne droite, alors il devient possible de traverser ce qui peut nous apparaître comme une distance considérable en trouvant un chemin plus court à travers l'espace-temps courbé.

Les propriétés que je viens de décrire tissent l'étoffe des rêves de Star Trek. Reste une question essentielle : sur ces rêves, combien pourront se réaliser un jour?

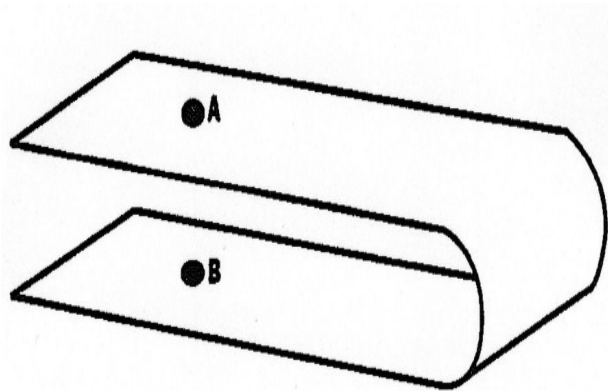
Les mini-trous noirs : imagination et réalité

Le mini-trou noir de Bajora dans Profondeur Espace 9 demeure peut-être le mini-trou noir le plus célèbre de Star Trek, bien qu'il y en ait eu beaucoup d'autres: celui, fort dangereux, que Scotty pourrait créer en altérant l'équilibre entre matière et antimatière dans le distordeur; l'instable mini-trou noir barzien où se perd un vaisseau Ferengi dans l'épisode de la Nouvelle génération intitulé «Le prix»; et celui que le Voyageur rencontre alors qu'il s'efforce de regagner sa base depuis les confins de la galaxie.

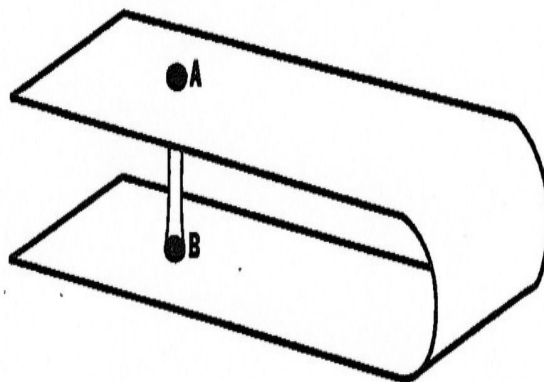
L'idée qui se trouve à l'origine des mini-trous noirs est celle que je viens de décrire. Si l'espace-temps est courbe, alors il y a peut-être différentes façons de relier deux points de sorte que la distance entre eux soit beaucoup plus réduite que celle que l'on mesurerait en traçant une « ligne droite » à travers l'espace courbe. Parce que les phénomènes de l'espace courbe quadridimensionnel sont impossibles à visualiser, il nous faut recourir une fois de plus à une feuille de caoutchouc bidimensionnelle, dont nous pouvons observer la courbure en lui faisant intégrer

l'espace tridimensionnel.

Si cette feuille est courbée à grande échelle, nous pouvons nous figurer qu'elle ressemble à ceci :



Il est évident que, si nous pointions un crayon sur le point situé en A en étirant le caoutchouc jusqu'à ce que la pointe du crayon touche le point B, et que nous cousions ensemble les deux pans de la feuille, nous aurions ceci :



Et nous créerions par la même occasion un chemin de A à B qui serait beaucoup plus court que le chemin parcourant la feuille d'un point à l'autre. Notez également que la feuille semble être plane dans la région du point A et dans celle du point B. La courbure qui relie ces deux points de façon à permettre de les joindre en un tunnel est due à la courbure générale adoptée à grande échelle par la feuille. Un petit insecte situé en A, fût-il intelligent, et qui ne pourrait que ramper sur la feuille, n'aurait aucune idée que B fût si «proche», même s'il réussissait à faire quelques expériences locales autour de A pour rechercher une éventuelle courbure de la feuille.

Comme vous l'avez sans doute supposé, le tunnel qui relie A et B sur le schéma est l'équivalent bidimensionnel d'un minitrou noir qui pourrait, en principe, relier des régions éloignées de l'espace-temps. Si excitante que soit cette hypothèse, je n'en dois pas moins attirer votre attention sur certains aspects trompeurs de ce schéma. Tout d'abord, même si nous avons intégré la feuille de caoutchouc dans un espace tridimensionnel pour vous montrer la courbure de la feuille, cette feuille courbe n'a

pas besoin d'un contexte spatial tridimensionnel pour exister. Un mini-trou noir peut bien exister, qui relie A à B; mais, s'il n'existe pas, on ne peut en aucune façon dire que A et B sont «proches» l'un de l'autre. Ce n'est pas comme si nous avions toute liberté de quitter la feuille de caoutchouc et de gagner B depuis A à travers l'espace tridimensionnel dans lequel la feuille est intégrée. S'il n'y a pas d'espace tridimensionnel, c'est la feuille de caoutchouc qui constitue l'univers tout entier.

Ainsi donc, imaginez que vous fassiez partie d'une civilisation hyper-évoluée (mais pas tout à fait autant que les êtres Q omnipotents, qui semblent transcender les lois de la physique), civilisation qui aurait le pouvoir de construire des mini-trous noirs dans l'espace, tout comme nous en avons produit un en appuyant sur notre crayon. Si vous aviez le pouvoir de créer d'énormes courbures locales dans l'espace, il vous faudrait tâter le terrain à l'aveuglette dans l'espoir de relier par ce trou noir deux régions de l'espace qui, sinon, resteraient à une distance considérable l'une de l'autre. Mais cette proximité ne pourrait advenir qu'une fois un pont établi entre elles par le mini-trou noir. C'est la création même du pont qui change l'état des choses en matière d'espace-temps.

Voilà pourquoi cette tâche ne doit pas être prise à la légère. Lorsque Bhavani, premier ministre de Barzan, se rend à bord de l'Entreprise pour mettre aux enchères les droits de propriété sur le mini-trou noir barzien, elle s'exclame: «Vous avez devant vous le premier et l'unique mini-trou noir stable connu à ce jour!» Malheureusement, stable, il ne l'est pas. Et de fait, les seuls mini-trous noirs dont l'existence mathématique ait été établie avec certitude dans le contexte de la relativité générale sont par nature transitoires. Ces mini-trous noirs apparaissent lorsque deux «singularités» microscopiques - c'est-à-dire deux régions de l'espace-temps où la courbure devient infiniment aiguë - se rencontrent et se soudent momentanément. Cependant, en un temps plus court que celui qu'il faudrait à un explorateur de l'espace pour le traverser, ce mini-trou noir se défait, et les deux singularités redeviennent distinctes. Le pauvre explorateur se verrait alors broyer en petit morceaux dans l'une ou l'autre singularité avant même d'avoir atteint l'extrémité du mini-trou noir.

Le problème de savoir comment maintenir l'ouverture d'un mini-trou noir est terriblement difficile à résoudre mathématiquement, mais en physique elle se résume à cette formule simple : la gravité aspire ! Toute matière ou énergie, quelle qu'elle soit, tend à s'affaisser sous sa propre attraction gravitationnelle, à moins que quelque obstacle ne l'en empêche. De même, en des circonstances normales, l'orifice d'un mini-trou noir se rétracte jusqu'à présenter une surface plane.

La solution consiste donc à se débarrasser des circonstances normales. Récemment, le physicien Kip Thorne, du Caltech, a suggéré, avec d'autres, que l'unique moyen de maintenir ouverts les mini-trous noirs est d'y infiltrer des « matériaux exogènes ». L'expression renvoie à ces matériaux dont certains observateurs pourront mesurer qu'ils recèlent de l'énergie « négative ». Comme vous le présumiez sans doute (encore que les présomptions naïves soient généralement suspectes dans le domaine de la relativité générale), ces matériaux: auraient tendance à « souffler » et non à

«aspirer».

Le plus inconditionnel des fans refusera peut-être encore de croire à l'existence de matière possédant de l'«énergie négative» : mais, nous l'avons noté, dans le domaine de l'espace courbe, les présomptions ordinaires sont souvent suspectes. Si vous combinez cela avec les éléments exogènes imposés par les lois de la mécanique quantique, lois qui régissent le comportement de la matière à petite échelle, on peut tout imaginer - littéralement, tout !

Les trous noirs et le Dr Hawking

Entrée en scène de Stephen Hawking. Il se fit d'abord connaître dans le milieu des physiciens travaillant sur la relativité générale par sa démonstration des théorèmes sur les singularités dans l'espace-temps, puis, dans les années 1970, pour ses remarquables découvertes théoriques sur le comportement des trous noirs. Ces objets sont formés d'un matériau qui s'est affaissé à un tel point que le champ gravitationnel local, à leur surface, empêche jusqu'à la lumière de s'échapper.

Soit dit en passant, le terme de « trou noir », qui a tellement captivé l'imagination populaire, fut inventé par le chercheur en physique théorique John Archibald Wheeler, de l'Université de Princeton, à la fin de l'automne 1967. Cette date n'est pas sans intérêt : à ma connaissance, le premier épisode de Star Trek à faire référence à un trou noir (sous le nom d'«étoile noire») sortit en 1967, avant que Wheeler n'ait utilisé son terme en public. Lorsque je vis cet épisode dans les premières phases préparatoires de cet ouvrage, j'ai trouvé amusant que les concepteurs de la série aient pu se tromper sur le nom. À présent, je me rends compte qu'ils l'ont quasiment inventé!

Les trous noirs sont des objets remarquables à plus d'un titre. Pour commencer, tous les trous noirs finissent par receler une singularité spatio-temporelle en leur centre, et tout ce qui tombe dans le trou noir s'y heurte inévitablement. C'est au niveau d'une telle singularité - sommet d'une courbe infiniment prolongée dans l'espace-temps - que les lois de la physique telles que nous les connaissons s'effondrent. Lorsqu'elle se rapproche de la singularité, la courbure est si étendue sur un si petit espace que les effets de la gravité sont gouvernés par les lois de la mécanique quantique. Pourtant, personne n'a pu écrire de théorie susceptible de combiner la relativité générale (à savoir, la gravité) et la mécanique quantique. Les auteurs de Star Trek ont bien senti cette tension entre les deux : aussi nomment-ils toute singularité spatio-temporelle « singularité quantique ». Une chose, toutefois, est certaine : lorsque le champ gravitationnel au centre d'un trou noir atteint une force assez grande pour faire s'effondrer nos théories physiques actuelles, tout objet physique ordinaire s'y trouve déchiqueté. Rien n'y pourrait survivre.

J'ai dit, vous l'avez noté, que le trou noir « cache » une singularité en son centre. La raison en est que les lisières d'un trou noir constituent une surface mathématiquement définie, appelée « horizon événementiel », qui nous empêche de

voir ce qui arrive aux objets tombés dans ce trou. À l'intérieur de l'horizon événementiel, l'objet devra forcément heurter la dangereuse singularité. À l'extérieur, il peut encore s'échapper. Certes, un observateur assez malchanceux pour tomber dans un trou noir ne remarquera rien de spécial au moment où il ou elle (avant de devenir «ça») franchit l'horizon événementiel, mais un observateur qui suivrait le processus de loin verrait quelque chose de bien différent. Le temps ralentit pour un observateur qui tombe librement dans les abords de l'horizon événementiel; le temps est relatif pour un observateur situé à distance. Le résultat, c'est que le premier semblera, aux yeux du second, ralentir au fur et à mesure qu'il s'approchera de l'horizon événementiel. Plus le premier s'approchera de l'horizon événementiel, plus son horloge ralentira par rapport à l'observateur extérieur. Il faudra peut-être quelques instants seulement (en temps local) au premier pour franchir l'horizon événementiel - où, je le répète, rien de spécial ne se produit et rien de spécial ne se trouve-, mais ce même événement durera une éternité aux yeux du second observateur. L'objet en état de chute semble figé dans le temps.

De plus, la lumière émise par cet objet est de plus en plus difficile à percevoir de l'extérieur. Au fur et à mesure que l'objet se rapproche de l'horizon événementiel, il s'éteint (parce que la radiation qu'il donne à voir se trouve déplacée sur des fréquences infra-visibles). Enfin, quand bien même vous pourriez, de l'extérieur, voir l'objet franchir l'horizon événementiel (ce qui est impossible, quel que soit le temps que vous pourriez y consacrer), il disparaîtrait entièrement une fois l'horizon franchi, puisque toute la lumière qu'il émettrait se retrouverait coincée à l'intérieur, avec l'objet lui-même. Tout ce qui franchit les limites internes de l'horizon événementiel est perdu à jamais pour le monde extérieur. Et ce défaut de communication est à sens unique : un observateur placé à l'extérieur peut envoyer des signaux à l'intérieur du trou noir, mais aucun signal ne peut lui être renvoyé.

Pour ces raisons, les trous noirs rencontrés dans Star Trek tendent à produire des résultats impossibles. L'horizon événementiel n'est pas un objet tangible, mais plutôt un marqueur mathématique que nous imposons à notre description d'un trou noir pour distinguer la région intérieure de la région extérieure. Cela signifie que l'horizon ne connaît aucune «faille», comme il apparaît dans l'épisode où l'équipage du Voyageur s'échappe miraculeusement d'un trou noir. (Cette idée est si absurde qu'elle a gagné le droit d'admission à ma liste des dix plus grandes erreurs de Star Trek, que vous trouverez au dernier chapitre.) Quant aux «formes de vie proches des singularités quantiques» rencontrées par l'équipage de l'Entreprise, alors qu'elles voyagent dans le temps à proximité d'un Rapace romulien, elles ont élu un nid assez inconfortable pour leurs petits, puisqu'elles les déposent dans des trous noirs naturels (qu'elles croient reconnaître à tort dans la singularité quantique «artificielle» que contient le moteur romulien). Ces trous noirs peuvent constituer des nurseries à toute épreuve, mais il y aura quelque difficulté à récupérer le bébé. Je vous rappelle que nul objet contenu dans un trou noir ne peut communiquer avec un objet demeuré à l'extérieur.

Néanmoins, les trous noirs, quelles que soient leurs intéressantes propriétés, ne

sont pas si exotiques qu'on le dit. Les seuls qui nous soient connus dans l'univers résultent de l'effondrement d'étoiles ayant une masse bien supérieure à celle du Soleil. Ces objets effondrés sont d'une telle densité qu'une cuillerée de leur matière pèserait plusieurs tonnes. Toutefois, les trous noirs ont une autre propriété extraordinaire : plus leur masse est importante, plus leur densité est faible au moment où ils se forment. Ainsi, la densité du trou noir formé par l'effondrement d'un objet dont la masse est égale à cent millions de fois celle du Soleil aura une densité égale à celle de l'eau seulement. Un objet d'une masse encore supérieure formera en s'effondrant un trou noir de densité encore plus faible. Si on continue d'extrapoler, on voit que la densité nécessaire à la formation d'un trou noir d'une masse égale à la masse de l'univers tel qu'on peut l'observer équivaut à peu près à la densité moyenne de la matière contenue dans cet univers ! Il est donc bien possible que nous vivions à l'intérieur d'un trou noir.

En 1974, Stephen Hawking fit une découverte remarquable sur la nature des trous noirs. Ils ne sont pas entièrement noirs ! Bien plutôt, ils émettent une radiation à une température précise, qui dépend de leur masse. Bien que la nature de cette radiation ne puisse nous donner la moindre information sur le destin des objets tombés à l'intérieur, l'idée qu'un trou noir pouvait émettre une radiation n'en était pas moins stupéfiante, et semblait contredire un certain nombre de théorèmes - dont certains démontrés précédemment par Hawking - qui prouvaient que la matière pouvait tomber dans le trou noir, mais non en sortir. Cela reste vrai, sauf à la source de la radiation émise par le trou noir, qui n'est pas constituée de matière normale. Il s'agit d'un espace vide qui peut adopter un comportement tout à fait original, notamment dans le voisinage d'un trou noir.

Depuis l'adaptation des lois de la mécanique quantique à la théorie de la relativité restreinte, peu après la Seconde Guerre mondiale, nous savons que l'espace vide n'est pas si vide que cela. C'est une mer bouillonnante et écumante de fluctuations quantiques. Ces fluctuations recrachent parfois des paires de particules élémentaires, qui subsistent durant des périodes si brèves que nous ne pouvons pas les évaluer directement, et disparaissent à nouveau dans le vide d'où elles provenaient. Le principe d'incertitude de la mécanique quantique nous apprend qu'il n'y a aucune façon de sonder directement un espace vide sur des périodes aussi courtes, et, dès lors, aucune façon d'empêcher que l'existence de ces «particules virtuelles» soit si brève. Mais, bien qu'elles ne puissent être mesurées directement, leur présence n'en affecte pas moins certains processus physiques que nous pouvons mesurer - ainsi le taux et l'énergie des transitions entre certains niveaux d'énergie atomique. L'effet présumé des particules virtuelles s'accorde avec les observations autant que toutes les prédictions faites en physique.

Voilà qui nous ramène au remarquable résultat obtenu par Hawking à propos des trous noirs. En des circonstances normales, lorsqu'une fluctuation quantique crée une paire de particules virtuelles, cette paire s'annihile et disparaît à nouveau dans le vide en un laps de temps si court qu'il est impossible d'observer une telle violation de la règle de la conservation énergétique (violation due à la création de la paire, tirée du

néant). Toutefois, lorsqu'une paire de particules virtuelles surgit ainsi dans l'espace courbe à proximité d'un trou noir, l'une de ces particules peut tomber dans le trou, l'autre y échapper, et se prêter à observation. Cela parce que la particule qui tombe dans le trou noir peut, en principe, perdre dans ce processus plus d'énergie que n'en avait requis sa création ex nihilo. Dès lors, elle apporte de «l'énergie négative» au trou noir, et l'énergie propre de ce dernier diminue en conséquence. Voilà qui satisfait à la règle de conservation de l'énergie, l'énergie émise par la particule demeurée à l'extérieur du trou noir venant compenser la perte de sa jumelle. C'est pourquoi le trou noir émet une radiation. De plus, comme l'énergie propre au trou noir diminue progressivement dans ce processus, sa masse connaît une rétraction proportionnelle à cette diminution. Il peut finir par s'évaporer entièrement, ne laissant derrière lui que la radiation qu'il a émise au cours de son existence.

Hawking et beaucoup d'autres ne s'en sont pas tenus aux fluctuations quantiques de la matière au sein d'un espace courbe. Ils ont trouvé quelque chose d'encore plus original, et de moins bien défini. Si la mécanique quantique ne s'applique pas seulement à la matière et à la radiation, mais aussi à la force de gravité, alors des fluctuations quantiques sur une échelle minuscule doivent se produire également dans l'espace-temps. Malheureusement, nous n'avons pas de théorie applicable pour élucider de tels processus. Ce manque n'a pas empêché les scientifiques de multiplier leurs investigations théoriques sur les phénomènes qui pourraient en résulter.

L'une des spéculations les plus intéressantes est celle-ci : les processus de mécanique quantique pourraient favoriser la création spontanée non pas simplement de particules, mais de « bébé univers » tout neufs. Les théories de la mécanique quantique à ce sujet reflètent, au moins mathématiquement, les solutions découvertes à propos des mini-trous noirs dans le contexte de la relativité générale ordinaire. Ces trous noirs « euclidiens » permettent la création d'un « pont » temporaire, d'où surgit un nouvel univers. La possibilité des mini-trous noirs euclidiens et celle des bébés univers se sont révélées assez excitantes pour que les fluctuations quantiques soient mentionnées au cours de la partie de poker disputée par Hawking avec Einstein et Newton dans l'épisode de la Nouvelle génération intitulée « Descente 1 », La confusion commise par les auteurs de Star Trek ne saurait certes leur être imputée. Actuellement, cette question est passablement embrouillée. Jusqu'à ce que nous ayons découvert le bon angle mathématique pour étudier ces processus de gravitation quantique, tous les arguments sont autant de salves tirées au hasard.

Ce qui nous importe le plus ici, ce n'est pas le phénomène de l'évaporation des trous noirs, ou la création de bébés univers, quel que soit leur intérêt, mais plutôt la découverte que les fluctuations quantiques de l'espace vide peuvent, du moins en présence de forts champs de gravité, acquérir des propriétés similaires à celles qu'il faudrait pour maintenir un trou noir ouvert. La question centrale, à laquelle on n'a pas encore répondu aujourd'hui, est de savoir si, à proximité d'un trou noir, les fluctuations quantiques peuvent adopter un comportement suffisamment original pour permettre de maintenir un trou noir ouvert.

(Et soit dit une fois encore en passant, je trouve remarquable la prescience des

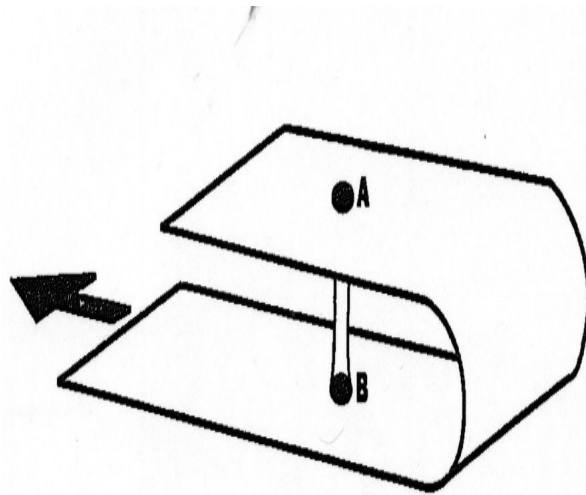
auteurs de la série Star Trek dans leur choix d'une nomenclature. Les mini-trous noirs bajorien et barzien sont censés inclure des champs de « verteron », J'ignore si ce mot a été inventé de toutes pièces ou non. Mais dans la mesure où les particules virtuelles - les fluctuations quantiques dans ce qui est, par ailleurs, un espace vide - sont pour l'instant bien placées pour être considérées comme la « matière exotique » évoquée par Kip Thorne, je pense que les auteurs de Star Trek méritent des félicitations pour leur intuition, si cela en était bel et bien une.)

De façon plus générale, si les fluctuations quantiques dans le vide peuvent être exotiques, il est possible qu'une autre configuration originale de matière et de radiation - mettons, une rupture dans le distordeur, ou peut-être un déséquilibre mélangeur introduit par Scotty dans le nœud de distorsion - puisse fournir une solution. Mais ce genre de questions demeure sans réponse. Sans pour autant négliger l'hypothèse - hautement improbable - de mini-trous noirs stables dans l'univers réel, elles n'en débouchent pas moins sur la véritable question: traverser un mini-trou noir relève-t-il d'une impossibilité totale ou seulement partielle? Le problème du mini-trou noir ne se contente pas d'opposer la science à la fiction: c'est une clef qui peut ouvrir des portes que beaucoup souhaiteraient voir demeurer closes.

Les machines à voyager dans le temps, le retour

Les mini-trous noirs, si remarquables qu'ils puissent être en établissant un tunnel à travers de vastes distances dans l'espace, possèdent un potentiel encore plus étonnant, qu'on a pu observer brièvement dans l'épisode du Voyageur intitulé «Le chas de l'aiguille». L'équipage du Voyageur découvre un minuscule trou noir qui les ramène à leur « quadrant alpha » dans la galaxie. Après avoir communiqué avec ce quadrant, il s'avère, à leur grande horreur, que ce n'est pas celui qu'ils connaissent et apprécient, mais le quadrant alpha de la génération précédente. Les deux extrémités du mini-trou noir communiquent avec l'espace à deux époques bien distinctes!

Eh bien, voici un autre exemple où les auteurs de Voyageur ont eu une intuition juste. Si les mini-trous noirs existent, ils peuvent servir de machine à voyager dans le temps ! Cette découverte surprenante a été développée au cours de la dernière décennie. Divers théoriciens, n'ayant rien de plus intéressant à faire, se mirent à examiner la physique des mini-trous noirs un peu plus sérieusement. Les machines à remonter le temps fondées sur les mini-trous noirs sont faciles à dessiner: l'exemple le plus simple (dû une fois de plus à Kip Thorne) est d'imaginer un mini-trou noir avec une extrémité fixe et l'autre se déplaçant à une vitesse rapide, mais en deçà de la vitesse-lumière, à travers une région éloignée de la galaxie. En principe, c'est possible, même si la longueur du mini-trou noir reste inchangée. Dans celui que j'ai dessiné plus haut en deux dimensions, il suffit de tirer la partie inférieure de la feuille vers la gauche, de façon que l'espace représenté par la feuille glisse et dépasse l'ouverture du bas du mini-trou noir, tandis que cette ouverture demeure fixe par rapport à l'autre ouverture:



Parce que l'ouverture inférieure du mini-trou noir se déplace par rapport à l'espace dans lequel il est situé, alors que l'ouverture supérieure reste stable, la relativité restreinte nous apprend que les horloges situées près de l'une et de l'autre ouverture fonctionnent à des vitesses différentes. D'une part, si la longueur du mini-trou noir demeure stable, alors, aussi longtemps que l'on est à l'intérieur, les deux extrémités semblent fixes l'une vis-à-vis de l'autre. Dans ce cadre, les horloges situées à ces deux extrémités devraient tourner à la même vitesse. Maintenant, glissez la feuille du bas dans l'autre sens, jusque là où le trou noir était, de façon à remettre son ouverture inférieure dans sa position initiale. Et supposons qu'il faille pour cela une journée, dans la perception d'un témoin à proximité de l'ouverture inférieure. Pour un observateur placé près de l'ouverture supérieure, ce même processus pourrait sembler prendre dix jours. Si ce second observateur tentait de regarder par l'ouverture supérieure pour voir l'observateur situé près de l'ouverture inférieure, il verrait sur le calendrier de l'observateur la date de neuf jours plus tôt! Et s'il décide de traverser le mini-trou noir pour lui rendre visite, il remontera dans le temps.

Si des mini-trous noirs stables existent, il nous faut concéder que les machines à voyager dans le temps sont possibles. Nous voici de retour chez Einstein, dont j'ai cité les remarques dans le chapitre précédent. Le voyage dans le temps, et par conséquent les mini-trous noirs stables, et donc la matière exotique chargée d'énergie négative - tout cela peut-il encore « être exclu pour des motifs purement physiques » ?

Après tout, les mini-trous noirs ne constituent qu'un exemple parmi d'autres des machines à voyager dans le temps proposées dans le contexte de la relativité générale. Au vu de notre discussion précédente sur la nature de cette théorie, il n'est peut-être pas surprenant que le voyage dans le temps devienne possible. Rappelons la description heuristique des équations d'Einstein que j'ai proposée précédemment :

$$\begin{array}{l} \text{Du côté gauche} \\ \text{[Courbure]} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Du côté droit} \\ \text{[Matière et énergie]} \end{array}$$

Le côté gauche de cette équation définit la géométrie de l'espace-temps; le côté droit, la distribution de matière et d'énergie. En général, nous demandons: soit une distribution donnée de matière et d'énergie, quelle courbure de l'espace en résultera? Mais nous pouvons également faire le raisonnement à l'envers: pour toute géométrie donnée de l'espace, y compris avec des « courbes spatio-temporelles fermées » - à savoir, les « spirales de causalité » qui vous permettent de retourner à votre point de départ spatio-temporel, telle cette spirale où l'Entreprise est engagé après avoir heurté le Bozeman -, les équations d'Einstein disent exactement quelle distribution de matière et d'énergie correspond. Ainsi, en principe, vous pouvez imaginer tous les voyages dans le temps possibles : les équations d'Einstein vous renseigneront sur la façon dont la matière et l'énergie devront y être distribuées. La question clef devient simplement la suivante : une telle distribution de matière et d'énergie est-elle physiquement possible?

Nous avons déjà rencontré cette question dans le contexte des mini-trous noirs. Les mini-trous noirs stables exigent de la matière exotique chargée d'énergie négative. La solution de Kurt Gödel quant aux machines à voyager dans le temps implique un univers doté d'une densité constante d'énergie uniforme et à pression zéro, lequel univers tourne sur lui-même sans connaître d'expansion. Plus récemment, on suggéra l'idée d'une machine à voyager dans le temps impliquant des « cordes cosmiques » : elle aussi nécessitait une configuration d'énergie négative. De fait, on a récemment prouvé que toute configuration de matière dans la relativité générale venant appuyer l'idée du voyage dans le temps doit impliquer une matière exotique chargée d'énergie négative - du moins aux yeux d'un observateur.

Il est intéressant de noter que presque tous les épisodes de Star Trek où interviennent le voyage dans le temps ou les distorsions temporelles impliquent également quelque forme catastrophique de décharge énergétique, habituellement associées à une rupture de distordeur. Ainsi, la spirale de causalité temporelle dont l'Entreprise est prisonnier est le résultat (encore que les repères chronologiques cessent de faire sens dans les spirales de causalité) d'une collision avec le Bozeman qui a provoqué la rupture du distordeur, et, par extension, la destruction de l'Entreprise: série d'événements qui ne cessent de se répéter à l'infini, jusqu'à ce que, dans un de ces cycles, l'Entreprise réussisse finalement à éviter la collision. La paralysie momentanée du temps à bord de l'Entreprise, découverte par Picard, Data, Troy et LaForge dans l'épisode «Le temps interrompu», semble également être le résultat d'un début de rupture de distordeur, s'ajoutant à une panne de moteur à bord d'un vaisseau romulien proche. Dans « Le temps au carré », un vaste « vortex d'énergie » envoie Picard dans le passé. Dans le tout premier exemple, « Le temps mis à nu », l'Entreprise était rejeté trois jours en arrière à la suite de l'implosion du distordeur. Et la distorsion géante de l'espace-temps dans l'épisode final de La nouvelle génération, qui remonte le temps et menace d'engloutir l'univers tout entier, était causée par l'explosion simultanée de trois versions temporelles distinctes de l'Entreprise, convergeant vers un point identique dans l'espace.

Ainsi, le voyage dans le temps dans l'univers réel (comme dans celui de Star Trek) semble dépendre de la possibilité de configurations originales de matière. Une civilisation étrangère suffisamment évoluée serait-elle en mesure de construire un mini-trou noir stable ? Ou bien, pouvons-nous déterminer toutes les distributions de masse qui peuvent conduire au voyage dans le temps, et les exclure ensuite, sans exception, pour des « raisons de pure physique », comme aurait dit Einstein ? À ce jour, nous ignorons la réponse. Certaines machines à voyager dans le temps spécifiques - telle celle de Gödel, ou le système basé sur des cordes cosmiques - se sont révélées contraires aux lois de la physique. Si les voyages dans le temps grâce aux mini-trous noirs n'ont pas encore été définitivement écartés, des investigations préliminaires suggèrent néanmoins que les fluctuations gravitationnelles quantiques peuvent conduire les mini-trous noirs à s'autodétruire avant même d'avoir rendu possibles les voyages dans le temps.

Jusqu'à ce que nous ayons une théorie sur la gravité quantique, l'ultime solution à la question des voyages dans le temps restera sans doute sans réponse. Néanmoins, quelques braves, dont Stephen Hawking, s'y sont déjà risqués. Hawking est convaincu que les machines à voyager dans le temps sont impossibles, à cause des paradoxes évidents qui pourraient en résulter, et il a proposé une « conjecture de protection chronologique » : « Les lois de la physique ne permettent pas l'apparition de courbes spatio-temporelles fermées. »

Personnellement, je suis d'accord avec Hawking. Néanmoins, la physique ne se fait pas sur injonction. Comme je l'ai noté plus haut, la relativité générale se montre souvent plus maligne que nos présomptions naïves. En avertissement de quoi j'offre ici deux précédents historiques. Deux fois déjà, pour autant que je le sache, d'éminents théoriciens ont démontré qu'un phénomène suggéré par la relativité générale devait être rejeté parce que les lois de la physique l'interdisaient :

1. Lorsque le jeune astrophysicien Subrahmanyan Chandrasekhar suggéra que des météorites dont la masse représentait 1,4 fois celle du Soleil ne pouvaient pas, après avoir consommé tout leur carburant nucléaire, se fixer en formant une naine blanche, mais devaient continuer à chuter à cause de la gravité, l'éminent physicien sir Arthur Eddington rejeta le résultat en public, par cette affirmation : « Divers accidents peuvent intervenir pour sauver l'étoile, mais je souhaiterais que nous en soyons un peu plus garantis que cela. Je crois qu'il devrait y avoir une loi de la nature pour empêcher toute étoile d'adopter un comportement aussi absurde ! » À l'époque, une grande partie de la communauté astrophysicienne prit le parti d'Eddington. Un demi-siècle plus tard, Chandrasekhar obtenait le prix Nobel pour ses intuitions, qui ont depuis été prouvées.

2. Environ vingt ans après qu'Eddington avait réfuté la proposition de Chandrasekhar, un événement très similaire se produisit lors d'une conférence à Bruxelles. J. Robert Oppenheimer, distingué chercheur en physique théorique et père de la bombe atomique, avait calculé que les objets appelés des étoiles à neutrons - les restes des supernovas, encore plus denses que les naines blanches - ne pouvaient pas dépasser environ deux fois la masse du Soleil sans s'affaisser et former ce que nous

nommons un trou noir. Le non moins distingué John Archibald Wheeler démontra que ce résultat était impossible, pour la même raison que dans notre premier exemple : il faut bien que les lois de la physique protègent des objets d'un sort aussi absurde. Une décennie plus tard, Wheeler capitulait entièrement, et, détail ironique, devenait célèbre comme l'homme qui avait donné leur nom aux trous noirs.

4 - Data conclut la partie

*« Car j'ai pénétré l'avenir,
si loin que porte un regard d'homme,
Vu la Vision de ce monde,
et tous les prodiges à venir. »*

*Extrait de Locksley Hall, par Alfred Lord Tennyson,
affiché à bord de l'astronef Voyageur.*

Qu'à l'avenir Star Trek fasse jouer ou non un mini-trou noir stable, et que l'équipage de l'Entreprise puisse ou non remonter le temps jusqu'au San Francisco du XIXe siècle, les véritables mises de ce poker cosmique relèvent d'une autre question, celle qui a fondé notre analyse de l'espace-temps courbe: peut-il y avoir une vitesse de distorsion? En effet, si l'on exclut l'hypothèse improbable selon laquelle notre galaxie serait criblée de mini-trous noirs stables, alors - et nos analyses précédentes l'ont clairement démontré - la plupart des galaxies sont vouées à demeurer toujours hors de notre portée. Voilà pourquoi il est enfin temps de poser cette délicate question, et l'on y répondra par un vibrant: « C'est possible. »

Une fois de plus, la perspicacité linguistique des auteurs de Star Trek nous est un guide précieux. J'ai montré qu'aucun mécanisme de propulsion par réacteur ne saurait contourner les trois obstacles qu'oppose la relativité restreinte au voyage interstellaire. Tout d'abord, rien ne voyage plus vite que la vitesse-lumière dans un espace vide. Ensuite, les objets qui se déplacent à une vitesse proche de la vitesse-lumière voient leurs horloges ralentir. Enfin, même si un réacteur pouvait permettre à un vaisseau spatial d'accélérer de façon à se rapprocher de la vitesse-lumière, ses besoins en carburant constitueraient un obstacle insurmontable.

L'idée serait de ne pas utiliser de réacteur pour la propulsion, mais l'espace-temps lui-même, en le distordant. La relativité générale exige que nous précisions nos propos sur le mouvement. Nous avons affirmé que rien ne peut voyager plus vite que la vitesse-lumière: disons plutôt que rien ne peut voyager plus vite que la vitesse-lumière en un endroit donné. Autrement dit, rien ne se déplace plus rapidement que la lumière si l'on se réfère aux repères de distance locaux. Toutefois, si l'espace-temps est courbe, ces repères de distance ne sauraient être universels.

Prenons, si vous le voulez bien, l'univers pour exemple. La relativité restreinte nous enseigne que tous les observateurs immobiles par rapport à leur environnement proche voient leurs horloges fonctionner au même rythme. Dès lors, en me déplaçant à travers l'univers, je peux m'arrêter périodiquement, et déposer des horloges à

intervalles réguliers dans l'espace, avec l'idée qu'elles marqueront toutes la même heure. La relativité générale n'altère pas ce résultat. Des horloges immobiles marqueront toutes la même heure. En revanche, la relativité restreinte permet à l'espace-temps lui-même de s'étendre. Des objets placés de chaque côté de l'univers observable s'éloignent l'un de l'autre à une vitesse qui est presque celle de la lumière, mais demeurent immobiles par rapport à leur environnement immédiat. De fait, si l'univers ne cesse de s'étendre de façon uniforme et s'il est assez grand - apparemment, ces deux hypothèses sont avérées -, il existe des objets que nous ne pouvons encore voir et qui, en ce moment, s'éloignent de nous à une vitesse plus grande que celle de la lumière, même si les civilisations situées aux confins de cet univers sont immobiles dans le contexte local de leur environnement.

La courbure de l'espace perce donc un trou dans les postulats de la relativité restreinte, et ce trou est juste de taille à permettre à un vaisseau spatial de la Fédération de faire la traversée. Si l'espace-temps lui-même peut être manipulé, les objets peuvent voyager dans une région donnée à une vitesse très basse - mais en même temps, par une expansion ou une contraction de l'espace proprement dit, ils parcourent d'immenses distances en très peu de temps. Nous avons déjà vu comment une manipulation radicale - la découpe et la soudure de régions éloignées de l'univers grâce à un mini-trou noir - pouvait créer des raccourcis dans l'espace-temps. Ce que nous suggérons maintenant, c'est que, à défaut de faire appel à pareille chirurgie, le voyage à super-vitesse-lumière reste globalement possible, même s'il ne peut être appliqué dans un contexte local.

Cette idée fut corroborée par un physicien exerçant au pays de Galles, Miguel Alcubierre, qui décida, juste pour s'amuser, de vérifier si l'on pouvait tirer en matière de relativité générale une solution cohérente qui correspondrait au « voyage dans la distorsion ». Il réussit à démontrer qu'il était possible de déterminer une configuration de l'espace-temps dans laquelle un vaisseau spatial pourrait voyager entre deux points dans un laps de temps volontairement court. De plus, au cours du voyage, ce vaisseau pouvait se déplacer, dans son contexte spatial propre, à des vitesses bien inférieures à celle de la lumière, si bien que les horloges placées à bord resteraient synchronisées avec celles restées au point de départ et celles placées au point d'arrivée. La relativité générale nous permettrait d'avoir à la fois le beurre et l'argent du beurre.

Cette idée tient debout. Si l'espace-temps peut être distordu en un point donné de façon à s'étendre derrière un vaisseau spatial et à se contracter devant lui, alors le vaisseau sera porté par ce mouvement comme un surfeur par la vague. L'équipage ne voyagera jamais plus vite que la lumière, puisqu'elle sera portée au même rythme par la vague d'espace en mouvement.

Une façon de se représenter la chose est de s'imaginer à bord du vaisseau spatial. Si l'espace s'étend soudain derrière vous, vous découvrirez que la base stellaire que vous venez tout juste de quitter se trouve à présent à bien des années-lumière de distance. De même, si l'espace se contracte devant vous, vous découvrirez que la base stellaire qui est votre objectif, et qui, tout à l'heure, se

trouvait à quelques années-lumière de distance, est maintenant à portée de vos réacteurs: c'est l'affaire de quelques minutes.

Cette solution permet d'arranger la géométrie de l'espace-temps de telle sorte que les immenses champs gravitationnels nécessaires à de telles expansions et contractions de l'espace ne seront jamais très puissants à proximité du vaisseau ou des deux bases stellaires. À proximité du vaisseau et des bases, l'espace peut être quasi plan, et, dès lors, les horloges à bord du vaisseau et dans les bases stellaires resteront synchronisées. Entre le vaisseau et les bases, les forces marémotrices dues à la gravité seront immenses, mais il n'y a pas à s'en faire tant que vous ne vous y trouverez pas.

Ce scénario est sans doute celui qu'avaient en tête les auteurs de Star Trek lorsqu'ils ont inventé la vitesse de distorsion, même s'il a peu de points communs avec les descriptions techniques qu'ils ont imaginées. Il remplit toutes les exigences dont nous avons fait l'inventaire pour une traversée intergalactique qui soit entièrement maîtrisée : a) un voyage à une vitesse supérieure à celle de la lumière, b) sans aucune dilatation du temps, c) qui ne fasse pas appel à la propulsion par réacteur. Bien sûr, jusqu'ici nous nous sommes fondés sur une pétition de principe. En faisant de l'espace-temps lui-même un facteur dynamique, la relativité générale permet la création d'« espaces-temps créatifs», dans lesquels presque toute forme de mouvement devient possible dans l'espace et le temps. Pour faire de l'espace-temps souhaité un concept de physique, il faut déterminer la distribution de matière et d'énergie nécessaires. Je reviendrai bientôt sur ce point.

Quoi qu'il en soit, ces « espaces-temps créatifs» ont ce merveilleux avantage qu'ils permettent un retour au défi originel de Newton, et la création d'amortisseurs inertiels et de faisceaux magnétiques. L'idée est la même que pour la vitesse de distorsion. Si l'espace-temps autour du vaisseau peut être distordu, alors les objets s'éloigneront ou se rapprocheront sans provoquer ces accélérations locales qui, on s'en souvient, empoisonnaient l'existence de Newton. Pour éviter les accélérations incroyables qu'exige une vitesse d'impulsion inférieure à la vitesse-lumière, il fallait avoir recours aux mêmes ruses spatio-temporelles que pour la vitesse de distorsion. La différence entre vitesse d'impulsion et vitesse de distorsion s'en trouve réduite. Ainsi, pour haler un objet lourd, une planète par exemple, à l'aide d'un faisceau magnétique, il suffit d'étendre l'espace de l'autre côté de la planète et de le contracter du nôtre. C'est tout simple !

Distordre l'espace comporte bien d'autres avantages. Il est clair que si l'espace-temps se courbe fortement devant l'Entreprise, tout rayon de lumière, ou, en l'occurrence, de phaseur sera dévié du vaisseau. C'est sans aucun doute selon ce principe que fonctionnent les boucliers défecteurs. Bien sûr, ils opèrent, nous dit-on, par « émission cohérente de gravitons». Mais puisque les gravitons sont par définition des particules qui transmettent la force de gravité, une « émission cohérente de gravitons» n'est rien d'autre que la création d'un champ gravitationnel cohérent. Or ce dernier est précisément, pour parler le jargon moderne, ce qui courbe l'espace!

Ainsi, une fois de plus, les auteurs de Star Trek ont fini par choisir le terme juste.

J'imagine que les techniques de brouillage opèrent de la même manière : un vaisseau de l'Entreprise qui déploie des boucliers déflecteurs ne diffère pas beaucoup d'un Rapace roroulien qui se dissimule. Après tout, si nous voyons un objet qui n'émet pas de lumière en soi, c'est bien parce qu'il en renvoie une, qui nous parvient. Le brouillage consiste d'une façon ou d'une autre à distordre l'espace de façon que des rayons de lumière incidents se courbent tout autour du Rapace au lieu d'être réfléchis par lui. La distinction entre ce phénomène et les boucliers déflecteurs de l'Entreprise est minime. À ce sujet, une question qui a troublé maint fan de la série jusqu'à ce que fût diffusé l'épisode de la Nouvelle génération intitulé «Pégase» est la suivante: pourquoi la Fédération n'emploie-t-elle pas de technologie de brouillage? Il semblerait, d'après ce qu'on a vu, qu'une civilisation capable d'inventer les boucliers déflecteurs pourrait aussi bien accéder à cette technologie. Comme nous l'avons appris dans «Pégase», ce qui retarde la Fédération dans sa mise au point des techniques de brouillage, c'est un traité diplomatique plus qu'un retard technologique. (L'épisode «Les meilleures choses ... », le tout dernier de la Nouvelle génération, montre clairement que la Fédération semble avoir autorisé les techniques de brouillage à bord des vaisseaux spatiaux.)

Enfin, étant donné ce tableau de la distorsion dans un contexte de relativité générale, la vitesse de distorsion revêt un aspect un peu plus concret. Elle semble dépendre de l'extension et de la contraction du volume spatial devant et derrière le vaisseau. Les conventions en matière de vitesse de distorsion n'ont jamais été très fixes: entre la première série et la seconde, Gene Roddenberry a apparemment décidé qu'il fallait recalibrer la vitesse de distorsion de façon à ne jamais dépasser le niveau 10. Ce qui signifiait qu'elle ne pouvait se contenter d'être une échelle logarithmique dans laquelle le niveau 10, par exemple, correspondrait à 210, à savoir 1024 fois la vitesse-lumière. Si l'on en croit le Manuel technique de la Nouvelle génération, le niveau 9,6, qui représente l'extrême limite admise pour l'Entreprise-D, correspond à 1 909 fois la vitesse-lumière, et le niveau 10 correspond à une vitesse illimitée. On notera avec intérêt que, malgré cette redéfinition, certains objets (le cube Borg, par exemple) sont signalés de temps à autre comme allant à une vitesse supérieure au niveau 10 : je suppose donc qu'il ne faut pas se préoccuper outre-mesure de ces petits détails.

Voilà pour les bonnes nouvelles.

Sachant que la vitesse de distorsion n'est pas impossible, du moins en principe, il nous faut maintenant examiner les conséquences du côté droit des équations d'Einstein, celui qui gère la distribution de l'énergie et de la matière nécessaires à produire la courbure souhaitée de l'espace-temps. Et devinez quoi : la situation est presque pire que dans le cas des trous noirs. Des observateurs qui voyagent à grande vitesse à travers un mini-trou noir peuvent mesurer une énergie négative. En ce qui concerne la matière nécessaire à produire la distorsion, même un observateur

immobile par rapport au vaisseau (autrement dit, qui se trouve à bord) mesurera une énergie négative.

Ce résultat n'a rien de bien surprenant. À partir d'un certain niveau, les solutions bizarres qui nous ont paru nécessaires pour maintenir un mini-trou noir ouvert, autoriser les voyages dans le temps et réaliser la vitesse de distorsion impliquent toutes qu'à certaines échelles la matière doit repousser gravitationnellement d'autres formes de matière. Or un théorème de la relativité générale précise que cette condition revient quasiment à exiger que l'énergie de la matière observée soit négative.

Ce qui ne peut que surprendre, en revanche, c'est le fait, mentionné plus haut, que la mécanique quantique, combinée avec la relativité restreinte, implique que, du moins à des échelles microscopiques, la distribution locale d'énergie soit négative. De fait, comme je l'ai noté dans le chapitre 3, les fluctuations quantiques ont souvent cette propriété. La question principale, qui n'a pas encore trouvé de réponse à ce jour, est la suivante : les lois de la physique telles que nous les connaissons permettent-elles à la matière de garder ces propriétés à une échelle macroscopique ? En fait, nous n'avons pas la moindre idée de la façon dont on pourrait produire une telle matière sans contrevenir aux lois de la physique.

Toutefois, laissons un moment de côté les obstacles potentiels à la création de cette matière, et supposons qu'il sera un jour possible de créer de cette matière exotique, en recourant à quelque manipulation quantique, sur la matière ou l'espace vide. Même ainsi, en comparaison de l'énergie nécessaire à effectuer ces extraordinaires manipulations spatio-temporelles, la puissance requise pour atteindre la vitesse de propulsion paraît fort réduite. Considérons la masse du Soleil, qui équivaut à environ un million de fois celle de la Terre. Le champ gravitationnel à la surface du Soleil permet d'obtenir une courbure de la lumière d'à peine un millième d'un degré. Imaginez les immenses champs gravitationnels qu'il faudrait générer à proximité d'un vaisseau spatial pour fléchir de 90° un rayon de phaseur fonçant droit sur eux. (C'est l'une des nombreuses raisons pour lesquelles le fameux « effet de fronde », qui fit son apparition dans l'épisode classique « Demain est hier » pour donner à l'Entreprise l'impulsion nécessaire à lui faire remonter le temps, qu'on revit dans Star Trek IV: Retour à la maison, et qui fut enfin mentionné dans l'épisode de la Nouvelle génération, « Le temps au carré », est entièrement impossible. Le champ gravitationnel à la surface du Soleil est dérisoire comparé aux forces de gravitation nécessaires pour produire les perturbations spatio-temporelles déjà mentionnées.) Pour estimer la quantité d'énergie nécessaire, il faut imaginer la production d'un trou noir de la taille de l'Entreprise, qui produirait un champ gravitationnel, lequel pourrait à son tour exercer une courbure importante sur tout rayon de lumière passant à proximité. La masse d'un tel trou noir représenterait environ 10 % de celle du Soleil. Convertie en unités d'énergie, elle indique qu'il faudrait générer, pour produire un trou noir, une énergie supérieure à celle produite par le Soleil pendant son existence tout entière.

Où en sommes-nous à l'issue de cette partie? Nous en savons assez sur la nature de l'espace-temps pour décrire explicitement comment il serait, en principe, possible d'utiliser l'espace courbe afin d'obtenir les caractéristiques essentielles des voyages dans l'espace interstellaire (style Star Trek). Nous savons que, sans ces hypothèses originales, nous avons peu de chances de traverser jamais la galaxie. D'un autre côté, nous ignorons si les conditions physiques nécessaires peuvent être réalisées en pratique, ou même simplement permises par la théorie. Enfin, quand bien même elles le seraient, il est clair qu'une civilisation mettant ces principes en pratique devra mobiliser des énergies qui dépassent largement tout ce qu'on peut concevoir aujourd'hui.

Je suppose que l'on pourrait se montrer optimiste et dire que ces merveilles entre les merveilles du moins ne sont pas impossibles a priori. Elles ne dépendent que d'une possibilité lointaine: celle de créer et de nourrir une matière et une énergie originales. Il y a encore de l'espoir, mais franchement, je demeure sceptique. Comme mon collègue Stephen Hawking, je crois que les paradoxes propres aux allers-et-retours dans le temps les rendent inconcevables pour toute théorie physique raisonnable. Puisque, a priori, les mêmes conditions énergétiques et matérielles sont requises pour le voyage en distorsion et les boucliers défecteurs, je ne crois pas à leur concrétisation - mais il m'est arrivé de me tromper.

Néanmoins, je persiste dans mon optimisme. Ce qui me paraît réellement digne d'hommage, c'est la somme remarquable de connaissances qui nous a menés jusqu'à ce seuil fascinant. Nous vivons dans un coin reculé de l'une des cent milliards de galaxies de l'univers observable. Comme le petit insecte sur sa feuille de caoutchouc, nous vivons dans un univers dont la véritable forme échappe au regard. Et pourtant, en moins de vingt générations - de Newton à nos jours-, nous avons exploité les lois fondamentales de la physique pour éclairer les profondeurs de l'espace et du temps. Il est probable que nous ne réussirons jamais à monter à bord de vaisseaux avec pour destination ultime les étoiles, mais, même en restant prisonniers de cette minuscule planète bleue, nous avons réussi à pénétrer le ciel nocturne et à y trouver des merveilles - il en reste d'ailleurs sûrement beaucoup d'autres à découvrir. Si la physique ne peut nous donner ce dont nous aurions besoin pour courir la galaxie, du moins nous offre-t-elle toutes les données requises pour la mettre à notre portée.