

# L'HÉRITAGE D'EINSTEIN

Posons la question à un passant: quelle image garde-t-il aujourd'hui d'Einstein? Le savant un peu fou avec sa crinière blanche désordonnée, qui tire la langue au photographe? Le Génie par excellence, devenu un nom commun (on dit "Untel n'est pas un einstein...")? Certains contresens bien ancrés: "Comme l'a dit Einstein tout est relatif!", alors que la théorie de la relativité est au contraire une théorie des *invariants*, de ce qui *demeure* quand on change de point de vue? Que reste-t-il donc de son œuvre scientifique? Ses travaux de mécanique quantique, de mécanique statistique sont si bien intégrés dans les théories plus récentes que l'on oublie d'où elles viennent. Pour des milliers de physiciens, la relativité restreinte est un outil quotidien au même titre que le théorème de Pythagore. Reste le couronnement de son œuvre, la relativité générale, encore impressionnante aujourd'hui et entourée d'une aura qui remonte à l'époque où on disait que trois hommes seulement la comprenaient (Eddington se demandait, paraît-il, qui était le troisième...).

Restée un domaine un peu marginal de la physique, un luxe inutile, pendant plusieurs décennies, la relativité générale est brutalement revenue au centre des préoccupations très concrètes de physiciens très variés. Nous allons explorer les raisons de ce renouveau: progrès technologiques permettant de mieux la tester, percées conceptuelles

ouvrant toute grande la physique des trous noirs, développement de la cosmologie physique et du modèle du Big-Bang, découverte des mirages gravitationnels et espoirs suscités par les ondes gravitationnelles. Mais en a-t-on vraiment besoin dans la vie quotidienne? Eh oui! Les navires et les avions qui connaissent leur position sur Terre au mètre près, grâce au réseau de satellites du Global Positioning System (GPS), doivent en tenir compte pour ne pas commettre une erreur de plusieurs mètres.

### **D'abord les tests.**

Le premier renouveau de la relativité générale vient de ce qu'il est désormais possible de la départager d'autres théories rivales, grâce à une précision considérablement accrue des mesures depuis les années 60. Il y a plusieurs tests "classiques", mais ils ne testent pas tous la même chose.

La relativité générale est d'abord une théorie métrique de la gravitation. Cela veut simplement dire qu'elle juge que la gravitation n'est pas une force réelle mais une force fictive, tout comme la force centrifuge que l'on ressent sur un manège. Ces forces n'apparaissent que si l'on refuse décrire le mouvement dans un système de coordonnées adapté (on dit inertiel). Si on veut décrire un mouvement libre, qui est rectiligne, dans un espace-temps courbe en croyant être dans un espace-temps plat, on doit invoquer une force fictive, la gravitation, pour expliquer la courbure

apparente de la trajectoire dans cet espace-temps plat. Théorie métrique, la relativité générale décrit la façon dont la matière se déplace dans un espace-temps courbe. Mais il y a nécessairement un second volet, celui qui décrit la façon dont inversement la matière courbe l'espace-temps. Ces deux volets sont indépendants, et de nombreuses variantes et rivales de la relativité générale sont aussi des théories métriques, mais elles diffèrent sur la façon dont la matière courbe l'espace-temps.

Certains tests de la relativité générale ne testent que l'aspect métrique, c'est à dire en fait le principe d'équivalence, selon lequel deux corps se déplacent exactement de la même manière dans un champ de gravitation, quelque soit leur composition, leur structure, ou leur énergie interne. Sans remonter à Galilée lâchant des sphères du haut de la Tour de Pise, ce principe a été vérifié avec une grande précision ( $10^{-12}$ ) par Eötvös, puis par Dicke et par Braginsky. Une autre conséquence du principe d'équivalence est qu'une horloge dans un champ de gravitation intense semble ralentie pour un observateur placé dans un champ plus faible, et ce décalage gravitationnel est parfaitement mesurable (expérience de Pound et Rebka) et, nous l'avons dit, doit être pris en compte si on veut faire le point avec précision grâce au GPS.

D'autres tests vérifient au contraire la relation entre présence de matière et courbure de l'espace-temps. Par exemple, dans la généralisation de la relativité générale proposée par Brans et Dicke, le lien entre matière

et courbure est plus complexe et fait intervenir un champ additionnel, le "scalaire de Brans et Dicke". Si on connaît indépendamment la quantité de matière (par exemple, la masse du Soleil) et la courbure de l'espace (par exemple, par la déviation d'un rayon lumineux passant à proximité du Soleil), on peut départager les théories rivales qui prévoient des déformations différentes de l'espace pour une même masse.

Historiquement, la première vérification de la relativité générale est de ce type: la mesure par Eddington du déplacement angulaire apparent des étoiles au voisinage du disque solaire, effectuée lors de l'éclipse de Soleil de 1919. Malgré la précision très médiocre des mesures (0.5"), le résultat annoncé était plus proche de la valeur prédite par Einstein (1.75") que de celle de Newton (0.87"), et cela valut instantanément à Einstein une gloire immense (mais pas le prix Nobel...). La mesure est depuis faite en mesurant la position de quasars par interférométrie radio (pas besoin d'éclipse!) et la précision de 0,001", atteinte de façon routinière, non seulement ne laisse plus de doute sur la supériorité de la relativité générale comparée à la théorie de Newton, mais exclut aussi de nombreuses rivales. La déflexion des rayons lumineux conduit aussi à de remarquables effets de lentilles gravitationnelles, dont nous parlerons plus loin. Variante de ce décalage spatial, le décalage temporel d'un signal passant à proximité d'une masse (effet Shapiro) atteint 200  $\mu$ s pour un aller-retour Terre-Mars quand le Soleil s'approche de la ligne de visée, ce qui est parfaitement détectable.

L'orbite de Mercure autour du Soleil se décale de 5601" par siècle, dont 5558" sont imputables aux perturbations des planètes. Le reliquat de 43" a été attribué à une planète inconnue très proche du Soleil, Vulcain, ou à un aplatissement du Soleil, avant que la relativité générale ne l'explique parfaitement. Mais il est bien possible que le Soleil soit assez aplati pour contribuer de 3" au décalage, ce qui ferait réapparaître une divergence entre théorie et observation...

### **Mirages gravitationnels**

Admettons donc (jusqu'à preuve du contraire!) que la relativité générale soit une bonne théorie de la gravitation. Mais est-elle vraiment utile à l'astrophysicien "moyen"? Mais oui! La déviation des rayons lumineux par la présence de masses est un outil remarquable pour détecter la présence de ces masses, même invisibles. Les premiers calculs d'Einstein (encore lui!) dans les années 30 montrèrent qu'une étoile pouvait jouer un rôle de lentille gravitationnelle: une source placée derrière elle serait vue comme un mince anneau autour de l'étoile. Seulement le rayon de cet anneau est bien plus petit que la tache de lumière de l'étoile-lentille au foyer d'un télescope, et l'effet est donc invisible. Le sujet en est resté là plusieurs décennies, puis on a réalisé que si la lentille était une galaxie, voire un amas de galaxies, au lieu d'une étoile, l'anneau d'Einstein serait beaucoup plus grand, et pouvait être visible. De fait, on en voit en radioastronomie (où la résolution angulaire est très supérieure à ce que l'on peut obtenir en optique). Si la

lentille n'est pas exactement alignée avec la source, l'anneau est fragmenté et plusieurs images de la source apparaissent: on a ainsi pu observer des images multiples de certains quasars provoquées par une galaxie intermédiaire (en hommage, l'un des plus beaux exemples a été baptisé la "Croix d'Einstein"). On a également découvert plusieurs exemples d'arcs lumineux, qui sont les fragments de l'anneau d'Einstein d'une galaxie lointaine dû à un amas de galaxies en avant-plan. Ces observations ont plusieurs intérêts:

- elles nous renseignent sur la géométrie de la lentille (par exemple la distribution de matière dans l'amas, et confirment ainsi les estimations d'autres origines sur l'abondance étonnante de matière noire).
- elles nous renseignent sur la source dont la lumière est amplifiée par la lentille, et ce véritable télescope gravitationnel permet de voir des objets beaucoup plus faibles ou plus lointains.
- enfin elles nous renseignent sur le milieu intergalactique traversé par la lumière, en particulier sur la géométrie de l'espace, ce qui permettra à terme de contrôler plus précisément le modèle du Big-Bang.

### **Étoiles à neutrons, trous noirs**

La relativité générale est-elle utile à l'astrophysicien? Autour d'une masse, la différence entre Newton et Einstein ne devient sensible qu'à une distance de l'ordre du rayon de Schwarzschild. Mais ce rayon est en général beaucoup plus petit que la taille du corps (3 km pour le Soleil,

par exemple, à comparer aux 700 000 km du rayon solaire), et la correction relativiste est alors parfaitement négligeable. Il n'en est plus de même pour les astres denses comme les naines blanches, et plus encore les étoiles à neutrons ou les trous noirs: une étoile à neutrons de masse voisine de celle du Soleil a un rayon de quelques kilomètres. La correction relativiste devient importante, et cela a une conséquence observable: la masse maximale d'une étoile à neutrons est fixée par l'équilibre entre pression des neutrons et gravitation. Une gravité plus forte implique une masse maximale plus faible, qui ne dépasse alors pas 2 fois la masse du Soleil. Au-delà de cette limite, l'étoile est instable, implose et devient un trou noir. Les compagnons obscurs de certaines étoiles binaires dépassant (de peu, il est vrai) cette limite sont ainsi de bons "candidats trou noir", objets dont la masse est contenue dans leur rayon de Schwarzschild.

Le trou noir est l'objet de toutes les attentions des astrophysiciens relativistes. Mais cela n'a pas toujours été le cas: la bizarrerie de son comportement ont longtemps incité les chercheurs à trouver une échappatoire. On l'a cherchée du côté des mathématiques: le modèle originel d'Oppenheimer et Snyder en 1939 supposait une implosion d'étoile parfaitement uniforme et sphérique, et une implosion asymétrique aurait permis, espérait-on, de faire rebondir l'étoile avant qu'elle ne devienne un trou noir. Mais cela n'a pas donné le résultat escompté! On l'a cherchée du côté de l'astrophysique: une étoile massive s'évaporerait sûrement avant l'implosion pour passer en dessous

de la masse critique! Effectivement, certaines étoiles émettent un vent stellaire intense qui emporte une large fraction de leur masse. Mais nous avons dit que certains compagnons sombres d'étoiles binaires sont très massifs: le vent stellaire ne suffit donc pas toujours. Il faut donc se résigner à vivre avec les trous noirs.

Mais une preuve plus directe est souhaitable! Dans les années 60, Zeldovich a exploré les signatures possibles d'un trou noir. Aucune lumière ne peut s'échapper du trou noir, donc il n'est pas directement visible. Il déforme l'espace autour de lui, et perturbe ainsi le trajet des rayons lumineux qui passent à proximité: des effets optiques sont donc possibles (comme une lentille parfaitement transparente est visible par la déformation qu'elle impose aux images d'arrière-plan). Mais pour que ce soit visible, il faut être très près d'un trou noir, éclairé de plus! La meilleure signature semble plutôt venir de la matière qui entoure un trou noir: attirée par lui, elle est comprimée, chauffée et rayonne. la température est si haute, des millions de degrés, que le rayonnement est surtout composé de rayons X. Mais l'atmosphère terrestre les absorbe, et il a donc fallu attendre les premiers satellites d'observation en rayons X pour chercher des trous noirs dans le ciel. Mais il ne suffit évidemment pas d'avoir une source X compacte pour affirmer qu'on tient un trou noir! Il faut éliminer les autres possibilités, et c'est donc un travail long et minutieux. Plusieurs candidats ont été trouvés, l'un des plus convaincants étant Cyg X-1, une source X dans la constellation du Cygne. L'objet obscur au centre ayant une masse supérieure à 6

masses solaires, on ne voit pas de quoi d'autre d'un trou noir il peut s'agir.

La découverte des quasars a entraîné beaucoup de spéculations sur la nature d'une source de lumière aussi intense (dans l'hypothèse généralement admise qu'ils sont bien à la distance indiquée par leur décalage vers le rouge et la loi de Hubble). L'hypothèse la plus répandue aujourd'hui est que le "moteur" des quasars est un trou noir géant, de plusieurs milliards de masses solaires (représentant quelques pour cents de la masse de la galaxie hôte), aspirant la matière environnante qui est comprimée et chauffée avant d'être absorbée. Le calcul montre en effet qu'un trou noir est beaucoup plus efficace que les réactions nucléaires pour transformer la matière en rayonnement (le rendement peut atteindre 40% au lieu de quelques %), et est donc l'instrument idéal pour produire de grandes quantités d'énergie. De nombreuses galaxies ont aussi un noyau actif, pour lequel l'hypothèse du trou noir semble sérieuse. Peut-être toutes les galaxies en hébergent-elles un, parfois actif et dévorant, parfois plus calme et assoupi.

Parallèlement, la théorie mathématique des trous noirs a été reprise avec succès dans les années 60 et 70, et de très jolis théorèmes démontrés: la présence d'une singularité est inévitable au centre du trou noir, et seules la masse, la charge électrique et la vitesse de rotation sont mesurables de l'extérieur ("un trou noir n'a pas de cheveu" dit-on de façon imagée). En utilisant un mélange de théorie classique de la

gravitation et de théorie quantique du rayonnement, Hawking a montré qu'un trou noir se comportait comme un corps noir, et émettait de la lumière comme un corps chaud. Mais la température correspondante est ridiculement faible pour un trou noir de masse stellaire, et n'aurait d'importance que pour des mini-trous noirs hypothétiques de quelques grammes. Eh oui, ce n'est pas la masse mais la densité qui fait le trou noir, et un trou noir peut être très léger (mais il ne vient pas alors de l'implosion d'une étoile!). Il est amusant de remarquer qu'aucun de ces résultats théoriques sur les trous noirs n'a d'utilité pour les détecter, et qu'inversement les méthodes de détection employées font plus appel à la physique des plasmas qu'à la relativité générale.

### **Cosmologie**

Le Big-Bang est sans doute la prédiction la plus spectaculaire de la relativité générale. Il n'y avait guère eu de cosmologie newtonienne, essentiellement parce qu'en 1917 encore il n'était pas clair qu'il y avait autre chose dans l'univers que notre Galaxie, la Voie Lactée, et que les autres galaxies, alors appelées nébuleuses, étaient réellement d'autres "univers-îles" comme Kant l'avait suggéré. Einstein ne cherchait pas tellement à reproduire les observations de son époque, mais plutôt à construire un univers élégant et parfait. Pour des raisons autant esthétiques que philosophiques, il supposa audacieusement que l'univers était fermé et uniformément rempli de matière. Mais l'univers auquel il aboutit n'était pas statique, mais en contraction ou en dilatation.

Pour le stabiliser, Einstein modifia les équations de la relativité générale en introduisant la célèbre "constante cosmologique", et il espéra un moment que sa solution finale était la seule cohérente. Mais de Sitter en construisit une autre, un univers également statique et courbe, mais ouvert et vide de matière. Découragé, Einstein n'a guère prêté attention aux solutions non-statiques proposées ensuite par Friedmann puis par Lemaître, un univers en expansion. La découverte par Hubble que l'univers à grande échelle était réellement en expansion conduisit au modèle actuel du Big-Bang.

Mais il se heurta à des difficultés apparemment insurmontables. Un univers plus dense dans le passé avait aussi dû être plus chaud. Gamow pensait qu'il avait été assez chaud pour déclencher des réactions thermonucléaires et produire tous les noyaux atomiques à partir du plus simple, l'hydrogène. Mais Hoyle et d'autres montrèrent vite qu'il était difficile de fabriquer autre chose que l'hélium, et que les noyaux plus complexes ne pouvaient être synthétisés que dans les étoiles. Donc le Big-Bang n'était pas nécessaire. Second inconvénient, la vitesse d'expansion alors mesurée conduisait à un univers très jeune de 2 milliards d'années, alors qu'on savait déjà que la Terre était vieille de 4 à 5 milliards d'années! Bondi, Gold et Hoyle résolurent le problème en postulant un univers éternel et stationnaire. Pour que l'expansion observée n'entraîne pas une diminution continue de la densité, ils durent supposer que de la matière était continuellement créée, à partir de rien, en compensation.

La relativité générale ne surmonta ces échecs que lorsqu'on découvrit d'une part que la vitesse d'expansion était fortement surestimée (et l'âge estimé de l'univers remonta vers 10 à 20 milliards d'années), et d'autre part que les galaxies lointaines différaient en abondance et en aspect des galaxies proches: une évolution était perceptible, l'univers n'avait pas toujours été comme aujourd'hui. Par ailleurs, les étoiles fabriquent bien de l'hélium, mais bien trop lentement pour en expliquer la forte abondance, et surtout l'uniformité de répartition, alors que les éléments plus lourds ont des abondances très variables d'un endroit à un autre. Une phase chaude du Big-Bang rend au contraire très bien compte de cette abondance et de son uniformité, ainsi d'ailleurs que de celles d'autres éléments légers plus rares (deutérium, lithium).

Ce grand succès du Big-Bang fut renforcé par la découverte accidentelle par Penzias et Wilson d'un rayonnement uniforme correspondant exactement à un corps noir de température 2,735 K (-270°C) indique très probablement que l'univers a bien connu une période très chaude où matière et rayonnement étaient en équilibre thermique (d'où le corps noir), et que l'expansion a depuis refroidi ce rayonnement.

### **Ondes gravitationnelles**

L'existence d'ondes gravitationnelles est une prédiction de la relativité générale: dès 1916, Einstein avait montré que ses équations possédaient des solutions du type ondes, analogues aux ondes

électromagnétiques. Il n'existe rien de tel dans la théorie de Newton, où la gravitation ne se propage pas, mais s'exerce instantanément à travers l'espace. Pendant 40 ans, le sujet est resté académique pour deux raisons. D'une part, les physiciens n'étaient pas convaincus que ces ondes étaient matérielles. Les calculs ne sont en effet simples que dans certaines coordonnées, et beaucoup pensaient que la solution "ondes" n'apparaissait que pour ces choix de coordonnées. N'oublions pas que l'axiome de base de la relativité générale est "N'a de sens physique que ce qui est indépendant du choix des coordonnées" . Ce n'est que dans les années 60 que Bondi a pu démontrer que ces ondes étaient réelles, et en particulier qu'elles transportaient de l'énergie. C'est précisément là la seconde raison du purgatoire des ondes gravitationnelles: l'énergie transportée est extrêmement faible.

Les ondes électromagnétiques sont produites par des charges électriques accélérées, les ondes gravitationnelles par des masses accélérées, mais la faiblesse de la gravitation comparée à l'électromagnétisme rend ces ondes à la fois plus difficiles à produire et plus difficiles à détecter. Comment les détecter? Au passage d'une onde de gravitation, les distances changent (n'oublions pas que la gravitation est une déformation de l'espace-temps). Il suffit donc de mesurer la distance entre deux objets, et de constater la variation de distance due au passage de l'onde. De quelle ampleur, cette variation? L'explosion d'une supernova pas trop loin dans notre Galaxie induirait une variation relative inférieure à  $10^{-18}$ , ce qui correspond à mesurer la distance de la

Terre à la Lune à l'épaisseur d'un atome près. Comme les supernovae sont plutôt rares (la dernière dans notre Galaxie remonte à 1604), pour ne pas attendre trop longtemps, il vaut mieux rechercher les ondes venant de supernovae explosant dans un amas riche de galaxies. Mais l'amplitude de l'onde varie comme l'inverse de la distance, et la précision requise augmente d'un facteur 10000 pour le plus proche amas, celui de la Vierge. Une autre source possible est l'effondrement de deux étoiles binaires l'une sur l'autre: l'onde prévue est nettement plus intense, mais la fréquence du phénomène est difficile à estimer.

Weber, physicien hors pair, n'a pas reculé: il a construit un cylindre d'aluminium, entouré de quartz piézo-électriques qui en mesuraient la déformation. La sensibilité, qui ne dépassait pas  $10^{-15}$  en 1965, atteint maintenant  $10^{-18}$  mais nous avons vu que ce tour de force technologique est encore insuffisant. Aussi projette-t-on maintenant de construire des interféromètres formés de deux bras perpendiculaires. la variation de longueur des bras au passage d'une onde gravitationnelle décale les franges d'interférences. Si tout va bien, ces projets (LIGO aux États-Unis, VIRGO en Europe) atteindront une sensibilité de  $10^{-22}$  vers la fin du siècle.

Nous venons de parler de sources transitoires, mais il existe aussi des sources continues. Par exemple deux masses en rotation l'une autour de l'autre produisent un rayonnement gravitationnel. Mais même dans le cas d'un système binaire serré de 2 étoiles proches, l'amplitude reste au

mieux de l'ordre de  $10^{-20}$  à  $10^{-22}$ . Par contre, ce rayonnement gravitationnel emporte de l'énergie, et de ce fait l'orbite des étoiles se resserre. Une première conséquence est que les étoiles finissent par se rejoindre, provoquant comme nous l'avons dit, une violente bouffée d'ondes gravitationnelles. Mais une seconde conséquence est que la période orbitale diminue. Or, en 1976, Hulse et Taylor ont découvert un pulsar, membre d'un système binaire: la fréquence des pulses est extrêmement stable, ce qui permet de calculer la période orbitale avec une très grande précision. Cette période diminue régulièrement, de 75 micro-secondes par an, en parfait accord avec les prédictions de la relativité générale (mais en désaccord avec d'autres théories relativistes de la gravitation). Aucune autre explication de la diminution de la période orbitale n'ayant été avancée, on peut dire d'une certaine façon que l'existence d'ondes gravitationnelles a été démontrée, à défaut de les avoir détectées directement.

### **Au delà de la relativité générale?**

La relativité générale semble donc aujourd'hui une théorie bien établie, prévoyant une foule de phénomènes passionnants, discrets ou spectaculaires, mais on sait bien que ce n'est pas le dernier mot de l'histoire et qu'il faudra aller plus loin, la remettre en cause. Mais par où pèche-t-elle? Nous n'avons guère d'éléments, seulement des indices qui suggère qu'il faudra peut-être la modifier par les deux bouts, quand la gravitation est très intense et quand elle est très faible. La relativité

générale prévoit l'existence de singularités, de régions infiniment petites de l'espace-temps où la gravitation devient infinie. Mais tout porte à penser que ces singularités signalent simplement que la théorie cesse d'être valable dans ces conditions, qu'il faut la modifier. Les mêmes infinis apparaissaient dans la théorie classique de l'électron, et la théorie quantique y a mis bon ordre. Oui, mais voilà, la théorie quantique de la gravitation n'existe pas, malgré des décennies d'efforts des plus brillants physiciens. Le mieux que l'on sache faire est un hybride peu satisfaisant, où la gravitation est traitée classiquement et la matière quantiquement (ce qu'a fait Hawking pour le rayonnement d'un trou noir), ou bien l'univers est bien décrit quantiquement, par une fonction d'onde, mais dans des modèles à ce point simplifiés qu'ils n'ont qu'un très vague rapport avec la réalité.

Autre extrême où la relativité générale est peut-être à revoir, une gravitation très faible. Si beaucoup de généralisations de la relativité générale ont été proposées, ce fut essentiellement pour des motifs théoriques (et peu ont survécu aux tests précis mentionnés plus haut). Mais peut-être cela va-t-il changer. Les astronomes sont aujourd'hui convaincus que 90 à 99% de la matière de l'univers est invisible. Ou plus exactement, les estimations de matière basées sur la dynamique des étoiles et des galaxies, donc sur la loi de la gravitation de Newton-Einstein, conduisent à des valeurs 10 à 100 fois supérieures à la quantité de matière visible (étoiles, gaz, poussières...). La majorité des astronomes y voit l'indice qu'une grande part de la matière est sombre,

mais une minorité estime que cela montre plutôt qu'il faut modifier la loi de la gravitation. Dérivée dans le Système Solaire où la gravitation est relativement forte, cette loi dévie peut-être à l'échelle d'une galaxie, et a fortiori d'un amas de galaxies, où la gravitation est beaucoup plus faible. Bekenstein, Milgrom, et bien d'autres ont montré que la dynamique des galaxies était bien mieux expliquée par une modification simple de cette loi (l'ajout à l'accélération de Newton en  $1/r^2$  d'un terme en  $1/r$ , qui ne devient sensible que pour des accélérations faibles), modification parfaitement compatible bien sûr avec tous les tests actuels. En terme de courbure de l'espace-temps, ceci est équivalent à généraliser la relativité générale en ajoutant une nouvelle source de courbure, un peu à la manière de Brans et Dicke.