

Marc Lachièze-Rey

Effets temporels dans les théories relativistes

Effets temporels

Je nommerai effet temporel relativiste (ETR) tout résultat d'une mesure faite par des horloges, qui diffère de celui prédit par la physique newtonienne tout en s'accordant avec les théories relativistes.

Ces effets peuvent être quantitatifs (par exemple les *décalages spectraux* ressemblent à l'effet Doppler usuel mais ils sont donnés par des formules différentes) ou qualitatifs (les *délais temporels* n'ont aucun équivalent en physique non relativiste). Ce sont des prédictions très précises des théories relativistes ; ils ont tous aujourd'hui été pleinement confirmés observationnellement et/ou expérimentalement, en parfait accord avec ces prédictions. Ils sont très bien évalués, aussi bien sur Terre que dans l'espace proche ou lointain (GPS), en astrophysique et en cosmologie. Passé le temps des confirmations de la relativité, ils sont maintenant utilisés comme outils d'exploration du cosmos en astrophysique et cosmologie, mais aussi sur Terre pour le repérage, l'altimétrie et la prospection, la géophysique, ...

On en distingue principalement deux types, *décalages* et *délais*. Pour chacun, une origine cinématique ou bien gravitationnelle est possible, les deux étant souvent coprésentes. Nous verrons un peu plus bas que les délais manifestent très directement le fait que les horloges ne mesurent pas le temps, ce qui met en question la pertinence de la notion dans notre monde physique.

Les *décalages cinématiques* peuvent être vus, au moins pour certains, comme une généralisation relativiste de l'*effet Doppler* bien connu, modifié par les théories relativistes. Les *décalages gravitationnels*, qualifiés d'"*effet Einstein*", n'ont aucune contrepartie en physique non relativiste car ils manifestent très directement la courbure de l'espace-temps.

Les *délais temporels*, quant à eux, correspondent à ce que certains qualifient improprement de *contraction des durées*, *dilatation du temps*, etc. Un tel délai se constitue de la différence entre les durées de deux histoires différentes, qui partagent cependant même fin et même commencement. Cette différence, évidemment absente en physique newtonienne, s'oppose à l'idée que les durées seraient une manifestation du temps. On se réfère surtout aux délais à travers l'expérience

de pensée des *jumeaux de Langevin*¹. Cette dernière est le plus souvent rapportée dans le cas purement cinématique mais comme pour les *décalages*, elle peut avoir aussi une origine gravitationnelle.

Tous ces effets découlent directement de la géométrie de l'espace-temps. Relativité restreinte et générale rendent compte de la même manière des effets cinématiques ; seule la relativité générale rend compte des effets gravitationnels, dus à la courbure de l'espace-temps. Nous verrons comment les *délais* peuvent s'analyser comme conséquence directe des *décalages* : le même phénomène est à l'œuvre, mais il se manifeste différemment selon les circonstances.

Préliminaires

Décalages et délais manifestent très directement les propriétés géométriques de l'espace-temps. Ils sont quelquefois (dans les vieux cours de physique relativiste) présentés comme des corrections à la situation newtonienne, et analysés en termes d'espace et de temps. Cela ne fonctionne cependant pas toujours, et mène le plus souvent à des contradictions, voire des absurdités.

Rappelons-nous que l'espace-temps relativiste se distingue de la conception newtonienne (espace et temps) par *l'invariance de Lorentz*. C'est elle qui implique l'absence de simultanéité et de chronologie objective ; historiquement, cette absence fut d'abord remarquée par Einstein et le conduisit à rejeter les notions d'espace et de temps, puis à construire sa théorie de la relativité restreinte. Hermann Minkowski put ensuite introduire le cadre de l'espace-temps dans lequel elle se décrit parfaitement de manière géométrique ; cadre que reprit ensuite Einstein (en le déformant) pour formuler sa relativité générale.

Les effets considérés ici concernent la notion fondamentale de *durée* (appelée plutôt *durée propre*). Il est important de comprendre que – en physique newtonienne comme einsteinienne – il s'agit de la seule quantité à caractère temporel qui soit mesurable². J'utilise le terme « horloge » pour qualifier n'importe quel dispositif de « mesure du temps » (une montre, une horloge atomique...), et *l'hypothèse des horloges* constitue l'un des premiers préceptes des théories relativistes : *une horloge mesure la durée propre de son histoire (et non pas le temps, ou du temps)*.

Le terme “histoire” qualifie toute succession continue d'événements, entre un événement initial et un événement final ; et toute histoire a une durée propre bien définie, mesurable uniquement par une horloge qui suit cette histoire. *L'hypothèse des horloges* eut du mal à être comprise et acceptée à l'époque d'Einstein, notamment par certains philosophes. Mais il n'y a aucun espoir de comprendre

¹ Voir par exemple DURING, É., « Langevin ou le paradoxe introuvable », *Revue de métaphysique et de morale*, n° 84, 2014, pp. 513-527 ; ou l'article du même dans cet ouvrage.

² Notons par exemple qu'une vibration, un rythme, une oscillation, un rayonnement..., se caractérisent par leur *période* (inverse de la fréquence) qui n'est rien d'autre que la durée de l'histoire élémentaire que constitue un battement. Notons aussi que le *rythme* d'un processus vivant (respiration, battement de cœur, digestion, sommeil, pensée...) ou un “temps ressenti” se représente toujours par une durée.

les effets temporels relativistes sans l'avoir assimilée. J'insiste : il n'existe en physique aucun type de mesure à caractère temporel autre que celle de la durée propre d'une histoire³.

Les ETRs, décalages et délais, s'interprètent de manière très directe dans l'espace-temps, pour autant que l'on remarque qu'ils concernent toujours des situations impliquant *deux histoires différentes*, dont les durées diffèrent alors que l'on s'attendrait naïvement (c'est-à-dire dans le cadre de la physique newtonienne) à ce qu'elles coïncident.

Les décalages temporels

Toute histoire a une durée propre parfaitement définie, mesurable par une horloge qui décrit cette histoire : ma montre (ou toute horloge qui m'accompagne) mesure la durée propre de mon histoire personnelle, et rien d'autre ne peut la mesurer : la durée propre d'une histoire n'est définie que pour celui qui suit cette histoire, et mesurable uniquement par lui.

Je puis cependant *observer* une autre histoire. Par exemple une histoire H que vit mon amie Hélène depuis son commencement C jusqu'à sa fin F. Avec son horloge, Hélène peut en mesurer la durée propre $d(H)$. Je ne puis faire la même mesure car je ne vis pas cette histoire H, et mon horloge non plus. Mais rien ne m'empêche de l'observer, par exemple visuellement ou en recevant n'importe quel signal qui en provient. Mon observation de l'histoire H est une autre histoire H', différente de H, vécue par moi et non pas par Hélène. Elle commence avec mon observation C' de l'événement C ; elle se termine avec mon observation F' de l'événement F. Mon horloge peut en mesurer la durée propre $d(H')$. Elle diffère de $d(H)$ et le *décalage temporel* est défini comme $z = d(H') / d(H) - 1$.

Le décalage (*temporel*) mesure la différence entre la durée propre d'une histoire et la durée propre de l'observation de cette histoire!

Pour le dire autrement, si l'horloge (d'Hélène) m'envoie un bip (un signal) chaque seconde, je reçois un bip chaque $1+z$ seconde. Deux origines sont possibles pour un décalage.

Le décalage cinématique

Il est causé par la vitesse relative V entre source et observateur, comptée positivement ou négativement selon qu'ils s'éloignent ou se rapprochent. J'exprime toujours V en unité de la vitesse de la lumière c ; cela revient à mesurer les longueurs en secondes (on dit plutôt en général secondes-lumière), ce qui correspond à la définition légale du mètre. Le décalage s'exprime par la formule $1+z = \sqrt{(1+V)/}$

³ Puisque ce que l'on mesure est toujours une durée [propre], il vaudrait mieux qualifier la seconde d'unité de durée (plutôt que de temps), tout comme le mètre n'est pas une unité d'espace, mais de longueur.

(1-V)), qui se développe approximativement selon $z = V + V^2/2 + \dots$, où les termes supplémentaires sont en général négligeables (sauf pour des vitesses extrêmes). La différence avec le décalage Doppler *non relativiste* apparaît puisque ce dernier, $z_{\text{Doppler}} = V$, se réduit à la contribution linéaire ; cette différence est cruciale car elle est à l'origine du phénomène de délai temporel (décrit plus bas) inexistant en physique newtonienne. La différence se manifeste également par le fait que la composante tangentielle (et non pas seulement radiale comme pour l'effet Doppler) de la vitesse relative intervient également.

[Encadré :

La formulation dans l'espace-temps suggère (plus commode et plus naturel) d'utiliser une notion géométrique plus fondamentale que celle de vitesse relative : la *rapidité* θ , qui géométriquement s'identifie à l'*angle hyperbolique* entre lignes d'univers. La rapidité remplace avantageusement la vitesse qui s'exprime par la fonction *tangente hyperbolique* comme $V = \tanh \theta$. Notons que ni l'angle θ ni la vitesse (toujours exprimée en unité de c) n'ont ici de dimension).

La trigonométrie hyperbolique, qui a cours dans l'espace-temps, indique que lorsque la rapidité θ varie de moins l'infini à plus l'infini, la vitesse v varie entre -1 et 1. Cela fait apparaître que la valeur limite (ce que l'on appelle vitesse de la lumière) vaut l'unité dans le bon système de coordonnées ; mais surtout que cette limite est totalement artificielle car elle ne fait que transcrire l'usage d'une grandeur mal adaptée : la vitesse plutôt que de la rapidité qui, elle, varie bien sans limite. Le décalage cinématique s'écrit $1+z = \exp \theta = 1 + \theta + \theta^2/2 + \dots$, ce qui se développe bien comme $z = v + v^2/2 + \dots$]

L'existence et les propriétés de ces décalages temporels ont été largement confirmées et mesurées. Un cas particulier est celui du décalage spectral.

Le décalage spectral

Un décalage temporel est dit « décalage spectral » lorsque l'histoire observée se constitue d'une unique oscillation du rayonnement (par exemple lumineux ou électromagnétique) émis par la source. Sa durée propre constitue par définition la période émise T_e , telle que la mesure l'horloge émettrice, celle de la source. L'observateur-récepteur reçoit le signal avec une période *reçue* T_r , qu'il mesure avec son horloge. Le décalage temporel (entre ces deux durées propres) $z = (T_r - T_e) / T_e$ est qualifié de *décalage spectral*. C'est une notion relativement familière puisqu'il se manifeste en physique classique (non relativiste) sous forme de l'effet Doppler habituel. On invoque souvent, pour le décrire, la sirène de l'ambulance : lorsqu'elle s'éloigne (*resp.* se rapproche), nous percevons son signal sonore avec une période (soit l'inverse de sa fréquence qui elle-même s'identifie à la « hauteur » du son) supérieure (*resp.* inférieure) à celle du signal émis. Ici le décalage (période reçue / période émise) est donné par la formule *non relativiste* $z_{\text{nr}} = v / v_{\text{son}}$, où la vitesse v de l'ambulance est rapportée à celle du son v_{son} .

Les décalages gravitationnels

Qualifié d'*effet Einstein*, il est engendré par la courbure de l'espace-temps. Dans les conditions de gravitation faible (par exemple sur Terre ou dans le Système Solaire), il est commode de la décrire par le potentiel gravitationnel ϕ (en unités de c^2). Le décalage s'écrit alors simplement $\Delta z = \delta\phi$, où $\delta\phi$ représente la différence entre les valeurs du potentiel aux positions de la source et de l'observateur.

Dans le potentiel gravitationnel terrestre par exemple, il se manifeste entre horloges à des altitudes différentes : pour une différence d'altitude δh , la relativité générale prévoit $\Delta z = g \delta h$ (où g est l'accélération de la pesanteur terrestre), soit environ 10^{-16} par mètre : une horloge à haute altitude semble battre plus rapidement que celle à plus basse altitude (rappelons qu'une horloge bat toujours au même rythme quoi qu'il arrive).

Les délais

Le délai *temporel* s'applique à la situation particulière où source et observateur décrivent bien deux histoires différentes, mais deux histoires qui partagent le même commencement et la même fin ; typiquement l'histoire des *jumeaux de Langevin* qui se séparent (commencement commun) puis se retrouvent (fin commune), après que l'un ait voyagé, mais pas l'autre. En physique newtonienne, les deux histoires auraient bien évidemment la même durée. L'hypothèse de l'existence du temps implique en effet que chacune des deux durées serait égale au laps de temps écoulé entre la fin et le début. Le calcul *non relativiste* montre en effet que les décalages cinématiques (négatifs) du voyage retour compensent ceux (positifs) du voyage aller.

Il n'en est rien dans l'espace-temps : les décalages cinématiques d'éloignement et ceux de rapprochement ne se compensent pas comme ils le feraient dans le cas newtonien ; les composantes linéaires (seules présentes, rappelons-le, dans le cas newtonien) se compensent bien ; mais pas les contributions non linéaires (qui marquent la différence avec la formule non relativiste), toujours positives à l'aller comme au retour.

Temps et vitesse du temps

Et le temps ? Comment définir une notion que l'on pourrait baptiser ainsi ? Il pourrait venir à l'esprit de choisir une collection d'horloges réparties en chaque point de la Terre (ou même de l'univers) : en supposant qu'elles aient été mises à zéro "ensemble" (après avoir défini ce que cela veut dire), la valeur du temps en un point serait *définie* comme l'indication de l'horloge résidant en ce point. C'est sans doute à une telle procédure qu'avait pensé Einstein avant de s'apercevoir que ces horloges seraient impossibles à conserver synchronisées⁴.

⁴ Au début du XX^e siècle, le mathématicien Hermann Weyl avait suggéré une proposition de ce genre pour définir le temps cosmique dans le cadre d'un modèle d'univers relativiste ; voir par exemple M. Lachièze-Rey, *L'Âge de l'Univers*, HumenSciences, 2021.

Une telle définition “naïve” ne pouvant opérer, c’est donc autrement que l’on doit “fabriquer” une grandeur que l’on va qualifier de “temps” ; ou plutôt de “temps-quelque chose” (temps universel, temps sidéral, temps cosmique, temps des éphémérides, temps atomique...) puisqu’une multitude d’options se présente et qu’il faudra préciser laquelle a été choisie. Précisons que, quelle que soit celle choisie, aucune horloge (sauf très rares exceptions) ne pourra être considérée comme indiquant (ou mesurant) ce temps⁵.

La fabrication d’un temps (je supprime désormais les guillemets) résulte du choix d’une horloge particulière, dans une localisation particulière ; dans la pratique plutôt un ensemble d’horloges bien choisies (selon l’usage auquel elles sont destinées) dont on moyennera les indications, mais je simplifierai le raisonnement en supposant, par exemple, un “temps parisien” t_p donné par l’unique horloge H_p de l’Observatoire de Paris.

Le “temps parisien” t_p , ainsi défini comme l’indication de l’horloge parisienne H_p , ne peut bien entendu être lu que sur place, par H_p . Aucune autre horloge (sauf coïncidence fortuite et passagère) n’indique sa valeur. En revanche il est parfaitement possible de transmettre l’indication de l’horloge H_p (par fibres optiques, ondes électromagnétiques...), à la manière de l’antique horloge parlante : sous forme de l’émission, par H_p d’un bip chaque seconde de son temps propre parisien t_p .

Où que je sois (disons à Rome par exemple) je puis recevoir ces bips, et mesurer grâce à mon horloge la durée propre qui les sépare, soit $1+z$ seconde comme indiqué précédemment. Le décalage peut provenir de ma différence d’altitude avec Paris (dans le potentiel gravitationnel terrestre) ; ou de ma vitesse relative induite par la différence en longitude et latitude⁶. La durée de la “seconde de temps” transmise diffère ainsi de la seconde *physique*, celle que mesure une horloge⁷ ; si bien qu’il est commode de qualifier $1/(1+z)$ de “vitesse du temps” (du temps t_p que j’ai choisi) à la position où je le “mesure”⁸.

⁵ Précisons encore qu’il ne s’agit pas d’un simple retard ou avance, mais que deux horloges synchronisées à un instant (la mise à l’heure) ne le restent pas.

⁶ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^6 c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

⁷ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^6 c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

⁸ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^6 c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

Ainsi mon horloge ne m'indique pas le temps t fabriqué, quel qu'il soit (sauf si j'occupe précisément la position de son horloge de définition) : elle m'indique une vraie grandeur physique, la durée propre de mon histoire, en conformité avec l'hypothèse des horloges. Et la réception des bips (venus de Paris) m'indique alors la *vitesse du temps* t (par exemple parisien) en ma position⁹. A la précision de la vie courante (inférieure à quelques millièmes), cette dernière est toujours suffisamment proche de l'unité pour que je puisse considérer que ma montre m'indique le temps t .

Avec la précision des horloges modernes (qui peut atteindre 10^{-18}) il n'en n'est rien : on doit sans arrêt corriger leur indication pour la ramener (à la précision requise) à celle du "temps t " (c'est l'objet de plusieurs autres communications de ce colloque). Mais on peut d'autre part s'intéresser plus précisément à cette vitesse du temps parfaitement mesurable aujourd'hui¹⁰. C'est elle qui rend nécessaires les corrections des horloges de référence pour la définition du temps, du temps universel par exemple¹¹. Mais sa mesure fournit des renseignements directement utilisables pour l'altimétrie ou la gravimétrie¹² : après avoir défini un temps, le protocole consiste à faire envoyer, par l'horloge de définition du temps, qui le mesure, un signal périodique. La mesure du décalage du signal reçu, par votre horloge, fournit la vitesse de ce temps là où vous êtes, dont vous pouvez déduire votre altitude ou les renseignements gravimétriques recherchés.

Je détaille maintenant quelques situations, terrestres ou astronomiques, où ces effets sont en cause ; pour plus de détails voir par exemple « Time and Durations in Relativistic Physics », ou *Gravitation*, déjà cités

Mesures sur Terre

Sur terre, les vitesses (toujours estimées en unités de c) dépassent rarement celle du son, soit environ 10^{-6} ; c'est aussi l'ordre de grandeur de la vitesse de révolution de la Terre à sa surface à l'équateur. On trouvera donc aisément des décalages de cet ordre, avec une composante quadratique de l'ordre de 10^{-12} ; en même temps, tous les points de la planète sont entraînés à 10^{-4} environ par le mouvement orbital autour du Soleil.

⁹ Si mes amis romains ont choisi de définir Réciproquement un « temps romain », mon horloge parisienne me permet de mesurer la vitesse de ce temps à Paris.

¹⁰ Elle est par exemple à l'œuvre dans le GPS ; voir par exemple Lachièze-Rey, M., « Time and Durations in Relativistic Physics », in *Time and Science Vol 3: Physical Sciences and Cosmology*, World Scientific 2023 (<https://doi.org/10.1142/q0405-vol3>).

¹¹ Le temps choisi t est en général défini à partir de plusieurs horloges « de base » et non pas d'une seule. Leurs désynchronisations mutuelles accumulées doivent être de temps en temps compensées, en ajoutant ou retranchant une seconde de manière adéquate.

¹² Voir plus bas ; et Lachièze-Rey, M., *Gravitation*, Flammarion, Paris 2024.

L'expérience Hafele-Keating : décalages et délais

Cette expérience, réalisée en 1971 par le physicien Joseph C. Hafele et l'astronome Richard E. Keating, reproduit pour la première fois la situation virtuelle des jumeaux de Langevin, remplacés par des horloges atomiques embarquées à bord d'avions de ligne (altitude 9km environ).

Une première horloge effectue un tour du monde en volant vers l'ouest. Sa vitesse de 830 km/h compense à peu près celle de la rotation terrestre, ce qui la rend proche du repos par rapport aux étoiles fixes. Une deuxième décrit un périple semblable vers l'est, ce qui lui confère deux fois la vitesse de rotation terrestre. Et la troisième demeure immobile par rapport à l'*Observatoire Naval des Etats-Unis*.

Les trois horloges sont parfaitement synchronisées à l'embarquement, qui constitue l'événement initial commun. Elles décrivent trois histoires différentes, et leur rassemblement constitue l'événement final commun F. Une fois réunies, les horloges apparaissent désynchronisées ; les délais observés, de l'ordre de la centaine de nanosecondes, correspondent parfaitement aux prédictions relativistes à la précision des mesures. La situation mélange effets cinématique et gravitationnel.

Une variante de l'expérience où les vitesses sont réduites a permis de se focaliser sur le délai gravitationnel qui apparaît voisin de 50 ns. L'envoi d'impulsions laser périodiques, ensuite reçues au sol après réflexion par les avions, a permis de tester les décalages pendant le vol, et de confirmer ainsi leur non-compensation à l'origine des délais¹³.

L'expérience de Pound et Rebka

La première mesure de décalage gravitationnel (alias effet Einstein) fut menée en 1959 à la tour de l'université de Harvard, par les physiciens américains Robert Vivian Pound (1919-2010) et son étudiant Glen Anderson Rebka, Jr (1931-2015). Ce *Harvard Tower Test*, considéré comme le troisième test classique de la relativité générale, exploite la différence de potentiel gravitationnel terrestre sur les 22.6 m qui séparent le récepteur (au sol) et le sommet de la tour.

La valeur mesurée du décalage (quelques 10^{-15}) fut bien conforme aux prévisions de la relativité générale. La précision fut améliorée en 1976 par l'expérience américaine *Gravity Probe A* (alias expérience de Vessot et Levine) ; puis encore davantage en 2014 par une fusée soviétique. Aujourd'hui, la précision des horloges atomiques (10^{-18} pour une horloge optique) permet de mesurer l'effet Einstein sur des différences d'altitude aussi faibles que le cm, avec une précision de 10^{-5} .

Il en résulte évidemment que deux horloges, même terrestres, ne peuvent rester synchronisées, en particulier si elles ne résident pas à la même altitude : le décalage atteint 3 microsecondes par an pour une différence d'altitude de 1km. Cette manifes-

¹³ Avec des vitesses (toujours en unités de c) de l'ordre de 10^6 , la composante quadratique est de l'ordre de 10^{-12} . Compte tenu de la durée des vols (une quarantaine d'heures), cela correspond bien aux valeurs mesurées.

tation directe de l'hypothèse des horloges interdit de soutenir l'idée que ces horloges mesureraient la même grandeur, un « temps » par exemple. On peut considérer décalages et délais gravitationnels comme des manifestations de la *vitesse du temps*.

Décalages et GPS

La manifestation la plus familière des ETRs est sans doute celle qui affecte le *Global Positioning System* (GPS) : les 24 satellites de la constellation NAVSTAR décrivent des orbites circulaires (période 12 h, altitude 20 200 kilomètres). Chacun emporte une horloge atomique au césium et envoie des signaux radio incorporant des informations concernant sa position.

Leurs vitesses ($1.3 \cdot 10^{-5} c$) leur confèrent des décalages cinématiques relativistes. La composante non linéaire, de l'ordre de $8.3 \cdot 10^{-11}$, se cumule à des délais de 7 microsecondes/jour. Cela se combine aux 45 microsecondes/jour de délai gravitationnel pour aboutir à 38 microsecondes/jour. Il en résulte que négliger la “vitesse du temps” (c'est-à-dire négliger les “effets relativistes”) conduirait à une erreur de positionnement voisine de 15 km/jour (une différence de 1 microseconde correspondant à 300m en position).

Décalages gravitationnels

En 2020, un groupe de l'Université de Tokyo a utilisé des horloges optiques connectées par fibres optiques pour mesurer le décalage gravitationnel $z \approx 5 \times 10^{-15}$ correspondant aux 450 m de la tour de Tokyo. Il s'agissait essentiellement de montrer la sensibilité, la précision et la robustesse de ces mesures.

Aujourd'hui, les mesures, de plus en plus précises, de ces ETRs commencent à être utilisées comme outils pratiques en altimétrie et en gravimétrie. Il s'agit de détecter des changements de courbure spatiotemporelle causés par la présence de masses enfouies, ou des activités volcaniques ou sismiques, avec la potentialité de prévoir de tous ces effets¹⁴. S'il se révèle trop compliqué de relier deux horloges par fibre optique on pourra le faire par l'intermédiaire de ACES (Atomic Clock Ensemble in Space). Ce projet de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) prévoit d'installer un ensemble d'horloges atomiques sur la Station Spatiale Internationale. La comparaison de leurs indications avec celles d'horloges au sol (“vitesse du temps”) fournira la différence entre les potentiels gravitationnels et permettra par exemple de déterminer le géoïde terrestre (géodésie relativiste) avec une sensibilité de quelques centimètres en altitude¹⁵.

¹⁴ Voir plus de détails sur *Gravitation*, op.cit. ; et aussi la prospective sur <http://arxiv.org/abs/2010.11156>.

¹⁵ https://www.researchgate.net/publication/340467276_Test_of_general_relativity_by_a_pair_of_transportable_optical_lattice_clocks.

Inutile sans doute de rappeler que les vitesses élevées des particules dans les accélérateurs et les rayons cosmiques engendrent des décalages cinématiques intenses. Cependant la composante relativiste, quadratique, reste en général masquée par la composante non relativiste.

Décalages gravitationnels astrophysiques

Naines blanches

En astrophysique, une première tentative de mesure de décalage gravitationnel eut lieu en 1925 : celle de Sirius B. Ce compagnon invisible de l'étoile Sirius fut reconnu en 1915 comme une naine blanche, étoile compacte et très peu brillante. Le signal se révéla inexploitable mais il fut mesuré plus tard par le *Hubble Space Telescope* (HST) à la valeur $z = c = 80 \text{ km/s}$ ¹⁶. D'autres décalages de naines blanches (du même ordre) furent mesurés par la suite.

Le décalage gravitationnel du Soleil

Einstein avait prévu dès 1908 que la différence de potentiel gravitationnel entre la surface du Soleil et celle de notre planète devait engendrer un décalage gravitationnel z de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$. La confirmation la plus précise est récente et confirme la prédiction de la relativité générale avec une précision du pourcent¹⁷.

Autres objets compacts

Une étoile à neutrons, objet très compact, engendre donc un effet Einstein important. D'autre part un *pulsar*, étoile à neutrons en rotation très rapide, émet un rayonnement très régulier, ce qui lui confère les propriétés d'une excellente horloge naturelle. La situation est idéale pour mettre en évidence des ETRs.

Plusieurs décalages ont ainsi été mesurés depuis le début du siècle, avec des précisions diverses. Le cas d'un système binaire (un pulsar et un autre astre compact en orbite mutuelle) est exemplaire : le signal émis par le pulsar (qui se comporte ici exactement comme une horloge) passe à proximité de son compagnon compact avant de nous atteindre, et ressent la courbure spatiotemporelle qu'il engendre. Le délai dans l'arrivée du signal du pulsar peut atteindre la dizaine de microsecondes.

¹⁶ Adams, W.S., « *The Relativity Displacement of the Spectral Lines in the Companion of Sirius* », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1925, 11, 382-387.

¹⁷ González Hernández, J. I., Rebolo, R., Pasquini, L., et al., « *The solar gravitational redshift from HARPS-LFC Moon spectra. A test of the General Theory of Relativity.* » *A&A*, 2020: arXiv_2009.10558.

Les résultats récents¹⁸ (détaillés dans *Gravitation*) représentent un bel exemple d'*astronomie gravitationnelle* où la pure gravitation (relativiste) fournit des renseignements sur le comportement de la matière.

TROU NOIR

Enfin, les manifestations les plus extrêmes de ces effets se rencontrent naturellement à proximité des trous noirs. Le prix Nobel de physique 2020 fut attribué pour les observations d'étoiles orbitant autour de *SagX**, le trou noir central de notre galaxie. Leurs vitesses atteignent des centièmes de c .

L'étoile So-2, l'une des plus proches du trou noir, subit une gravitation intense. Son observation à une centaine d'unités astronomiques de l'horizon du trou noir, avec une vitesse de $0.03 c$, put mettre en évidence décalages cinématique non linéaire et composante gravitationnelle.

Le retard Shapiro

Je finirai en mentionnant un effet plus original de la courbure spatio-temporelle : le *retard Shapiro* (parfois qualifié de *quatrième test de la relativité générale*¹⁹) advient dans une situation de lentille gravitationnelle, lorsqu'un rayon lumineux émis par une source astronomique (une planète) se propage jusqu'à l'observateur terrestre en rasant un objet massif comme le Soleil. La courbure spatio-temporelle locale imprimée par ce dernier retarde l'arrivée du signal à l'observateur.

Un signal radar réfléchi par une planète et rasant le Soleil subit ainsi un retard d'environ 200 microsecondes (inexistant en physique newtonienne). L'effet fut confirmé dès les années 1960, puis sa précision améliorée quelques décennies plus tard grâce aux sondes Viking et Cassini²⁰.

Puisqu'il s'agit d'une déformation de l'espace-temps, l'effet Shapiro s'applique aussi aux neutrinos. C'est ainsi que, lors de l'explosion de la supernova SN1987A, l'arrivée simultanée des photons et des neutrinos émis a indiqué qu'ils avaient bien subi le même délai gravitationnel (estimé entre 1 et 6 mois), ce qui confirme le principe d'équivalence la relativité générale.

Il en est de même pour les ondes gravitationnelles. Celles de différences fréquences en provenance de la source GW150914 sont arrivées simultanément : elles

¹⁸ Measurement of Relativistic Orbital Decay in the PSR B1534+12 Binary System I. H. Stairs¹, Z. Arzoumanian, F. Camilo, A. G. Lyne, D. J. Nice¹, J. H. Taylor¹, S. E. Thorsett¹, A. Wolszczan <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9712296> ; RELATIVISTIC MEASUREMENTS FROM TIMING THE BINARY PULSAR PSR B1913+16, J. M. Weisberg et Y. Huang, 2016, *The Astrophysical Journal*, Volume 829, Number 1.

¹⁹ Irwin I. Shapiro 1964, « Fourth Test of General Relativity », *Physical Review Letters* 13, no 26: 789-91, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

²⁰ Bertotti, B., Iess, L., Tortora, P., « A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft », *Nature*, Vol. 425, 2003, pp. 374-376.

ont subi le même délai Shapiro causé par la distribution de masse le long de la ligne de visée. Ces délais (autour de 1800 jours sur un trajet d'environ un milliard d'années) sont identiques à 0.2 seconde près ! Autre confirmation du principe d'équivalence.

Conclusion : Que faire du temps ?

Marc Lachièze-Rey

Tous ces effets soulignent l'originalité du monde réel, que décrivent parfaitement nos théories relativistes. Ils ne peuvent rester sans conséquences sur les interrogations méta physiques ou philosophiques à propos du temps, de la temporalité.

En manifestant l'impossibilité de synchroniser des horloges, les délais montrent très directement que ces dernières ne mesurent pas une grandeur commune, ce qui est pourtant la caractéristique du temps : n'est-il pas temps de bannir cette notion périmée dans la philosophie moderne de la nature ?

Il est certes important de débattre du *temps personnel* (physiologique, psychologique) de chacun. Mais ce dernier ne fait que manifester l'écoulement de la *durée propre* (malheureusement souvent baptisée *temps propre*), qui n'a de pertinence que pour le seul individu (ou objet) qu'elle concerne. Il est non moins important – et c'est en grande partie le sujet de ce colloque – de débattre des diverses propositions de “temps ceci ou cela” à finalité économique et sociale, telles celles discutées dans ce colloque.

Mais si l'on peut en définir arbitrairement autant que l'on veut, ce sont toujours des conventions qui n'ont pas vraiment de pertinence, voire de réalité, dans le monde physique. Aucun de ces “temps-quelque chose” ne sera *en réalité* mesurable par une horloge, même si l'on s'arrange pour que telle ou telle famille choisie d'horloges en donne une valeur approximative suffisante pour un usage prédéfini (social par exemple). Les vitesses de tous ces temps les uns par rapport aux autres sont en revanche mesurables, ce qui donne déjà lieu à de nombreuses applications pratiques.

Le physicien s'étonne de voir encore souvent débattre comme si l'on pouvait encore soutenir l'image d'un temps qui s'écoule dans le monde, un temps qui rythmerait les phénomènes qui nous entourent, un temps que mesureraient nos horloges. Il s'étonne de voir souvent encore discutés à ce propos des questions largement obsolètes. Même si l'“illusion du temps” fonctionne parfaitement dans la vie de tous les jours, elle est largement périmée pour les réflexions sur la constitution du monde réel, et il me semble que la réflexion philosophique devrait davantage en tenir compte.

Marc Lachièze-Rey

CNRS, Laboratoire Astroparticule et Cosmologie APC – Paris
mlr@apc.univ-paris7.fr