Texte de la 578 ^{e} conférence de l'Université de tous les savoirs prononcée le 21 juin2005

Par Nathalie Deruelle: « La gravitation »

la transcription de cette conférence a été réalisée par Pierre Nieradka

1. Le terme « gravitation » a une origine relativement récente puisqu'il date du XVIII^{ème} siècle : il a été inventé pour désigner une théorie, un cadre de pensée même, tout à fait nouveaux, qui jetaient pour la première fois un pont entre les phénomènes terrestres et célestes. Ce pont fut la physique de Newton, qui tint pendant 250 ans. Mais en 1916, ce « Pont-Neuf » s'avéra trop étroit pour canaliser les découvertes de la physique moderne ; il fut remplacé par un «*Golden Gate Bridge* » : la relativité générale d'Einstein.

I / Contexte historique :

2. La science grecque faisait une distinction très nette entre Ciel et Terre. Le monde des astres était la réalisation de la géométrie d'Euclide ; leurs mouvements, sans cause, étaient décrits en termes purement mathématiques. En revanche, c'étaient en termes quasi-animistes que l'on décrivait notre monde sublunaire. Par exemple, le mot « gravitas » a d'abord décrit une personne « pondérée » avant de désigner la cause de la chute des corps. Cette dichotomie dura presque 2000 ans.

3. Au XVI-XVII^{ème} siècles, deux révolutions résolurent cette dichotomie. La première fut celle de Nicolas Copernic qui eut l'idée, non évidente, de bâtir une nouvelle astronomie en plaçant le Soleil, et non la Terre, au centre du système solaire. Ce changement de point de vue permit d'abord une description plus économique et plus précise du mouvement des astres, comme le montra brillamment Kepler. Mais il permit aussi de considérer les autres étoiles comme le centre d'autres mondes. Ainsi la physique « sublunaire » se mit à étendre considérablement son champ d'application.

4. La deuxième grande révolution fut celle de Galilée, grand astronome, mais aussi et surtout le premier physicien moderne pour avoir dit que « Le livre de la Nature est écrit en termes mathématiques ». Cela signifiait que les mathématiques, et en particulier la reformulation de la géométrie d'Euclide (et de son théorème de Pythagore) par Descartes devaient s'appliquer à la fois au monde céleste et au monde terrestre. Grâce à ces deux révolutions un pont entre Ciel et Terre se dessinait.

$$\vec{F} = m\vec{a} \qquad \vec{F} = \frac{-GmM}{R^2}\vec{n}$$

5. C'est Newton qui bâtit réellement ce pont, en 1666, à l'âge de 24 ans, dans la maison de ses parents où il fuyait la peste qui sévissait à Cambridge. Il eut en effet l'idée géniale de considérer que la gravité (la cause de la chute des corps terrestres) devait AUSSI régir le mouvement des astres. Pour marquer ce gigantesque saut conceptuel un nouveau mot fut créé pour désigner cette cause commune, ce « champ de force » qui envahit l'espace de la Terre jusqu'à la Lune : le terme gravitation. Il fallut ensuite formuler cette idée en langage

mathématique, ce qui prit 20 ans de travail à Newton, travail que l'on résume aujourd'hui en deux équations :

$$\vec{F} = m\vec{a} \qquad \vec{F} = \frac{-GmM}{R^2}\vec{n}$$

La première équation dit que l'accélération d'un corps est proportionnelle à la force qui lui est appliquée. Ainsi si les forces extérieures sont nulles, si donc le mouvement est « libre », le corps a une accélération nulle, une vitesse constante : il est en « translation rectiligne uniforme ». C'est la loi d'inertie des corps libres, le « mouvement inertiel » trouvés par Galilée. Une pomme qui tombe d'un arbre en revanche n'a pas une vitesse constante, comme le montra Galilée ; pas plus que la Lune qui ne va pas en ligne droite puisqu'elle tourne autour de la Terre le long d'un cercle un peu déformé, l'ellipse de Kepler. La pomme et la Lune sont donc soumises à une force, la même avait compris Newton : la force de gravitation exercée par la Terre.

La deuxième équation est l'expression mathématique donnée par Newton à cette force de gravitation : elle est proportionnelle à chacune des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance (Terre/Lune ou Terre/pomme). Les petites flèches qui surmontent certaines lettres désignent des objets mathématiques, des « vecteurs » qui représentent la direction de la force dans l'espace. Cette direction n'est pas repérée par rapport aux murs de la salle par exemple, mais par rapport à l'ensemble des étoiles lointaines, quasiment fixes, qui définissent un repère, appelé le « repère absolu de Newton ».

6. Ce pont, construit par Newton, ouvrit une ère nouvelle à la physique qui connut deux siècles d'or.

Deux siècles, marqués d'abord par une formulation mathématique de plus en plus performante des équations de Newton, en particulier par Laplace.

Deux siècles marqués aussi par de spectaculaires découvertes. Ainsi l'astronome britannique Herschel découvrit à la fin du XVIII$^{\text{ème}}$ siècle que la trajectoire de la planète Uranus était anormale dans le sens où elle ne respectait pas rigoureusement les deux lois de Newton. Adams, en Grande-Bretagne, et Le Verrier, en France, parièrent pour les équations de Newton et émirent l'hypothèse que la trajectoire d'Uranus devait être perturbée par une autre planète, baptisée Neptune. Ils calculèrent la trajectoire de cette planète postulée et deux mois plus tard, elle fut découverte, par l'astronome allemand Gall, à l'endroit prédit ! Cette magnifique confirmation de la théorie de Newton valut à Le Verrier une réception triomphale à l'Académie des sciences, Arago s'exclamant : « Monsieur le Verrier a découvert un astre nouveau au bout de sa plume ».

Enfin, d'autres forces que l'on découvrait peu à peu, notamment la force électrique de Coulomb, pouvaient être décrites par les mêmes équations, en remplaçant les masses des corps par leurs charges.

7. Le tableau avait cependant quelques ombres qui pendant longtemps furent considérées comme de simples curiosités ou alors tout simplement ignorées.

Par exemple, le coefficient de proportionnalité m de la première loi est une masse dite inerte qui mesure la résistance d'un corps au mouvement. Tandis que dans la deuxième loi, le coefficient m est une masse dite grave qui mesure l'ampleur de la réponse à l'attraction gravitationnelle du corps M. Il n'y a à priori aucune raison que ces deux masses m soient égales mais il se trouve que c'est le cas. Ceci a pour conséquence que le mouvement d'un corps en chute « libre » (c'est à dire soumis seulement à un champ de gravitation) ne dépend pas de sa masse, puisque, en égalant les deux équations, m se simplifie. Newton, étonné de cette égalité, voulut la vérifier avec précision expérimentalement et obtint une précision du millième. La relativité générale se base sur cette égalité comme nous le verrons, d'où l'importance de la vérifier expérimentalement : la précision actuelle est de 10^{-12} !

Une autre énigme était la trajectoire de Mercure autour du soleil. En effet, malgré les efforts des astronomes, Le Verrier en particulier, pour la faire « rentrer dans le rang » l'ellipse de sa trajectoire tournait autour du soleil un peu plus que ce que la théorie newtonienne prévoyait.

Une autre question enfin concernait le repère « absolu » des étoiles fixes par rapport auquel s'orientent les directions des forces. On remarqua d'abord qu'on pouvait en fait utiliser tout une série d'autres repères pour décrire les mouvements : les repères dits libres, inertiels, ou galiléens, en translation uniforme quelconque par rapport au repère absolu, dans lesquels les deux lois de Newton restent les mêmes. L'utilité du repère absolu était donc limitée. Par ailleurs, les étoiles fixes, censées incarner ce repère absolu, ne peuvent en fait rester fixes car aussi loin soient elles les unes des autres, la force de gravitation les attire.

Ces différentes questions pouvaient laisser penser que le pont de Newton, était peut-être bâti sur du sable.

8. Le premier coup de butoir à l'édifice newtonien vint d'un côté inattendu de la physique, à savoir des propriétés électriques et magnétiques de la matière, plus spécifiquement des propriétés de la lumière, qui est l'agent de transmission de l'interaction électromagnétique entre les corps chargés, propriétés magistralement résumées par Maxwell.

Toutes les expériences montraient en effet que la vitesse de la lumière, c, était la même dans tous les repères libres. Ceci venait évidemment en contradiction avec la loi de composition des mouvements galiléenne qui implique que si je marche à 3km/h dans un TGV qui lui-même traverse une gare à 300km/h, je me déplace à 303 km/h par rapport au quai. Et bien cela n'est plus vrai si je suis un rayon de lumière : je vais à 300 000 km /sec par rapport au TGV ET au quai ! Lorentz et Poincaré essayèrent de réconcilier cette invariance de la vitesse de la lumière et la loi de composition des vitesses. Techniquement, ils réussirent.

9. Prenons par exemple, l'équation de Maxwell $\vec{F} = m\vec{a}$

A est une fonction du temps et de l'espace qui repère la position d'un photon (ou rayon de lumière) à un instant donné. Le Carré (ou D'Alembertien) est un opérateur qui agit sur la fonction A et la transforme selon des opérations bien définies. Cette équation est vraie dans un repère R donné, assimilé au repère absolu de Newton. Lorentz et Poincaré remarquèrent qu'on pouvait l'écrire de la même façon dans un autre repère R' allant à la vitesse V par rapport au premier, mais qu'il fallait pour cela introduire de nouvelles variables, auxiliaires, « fictives », x' et t', liées à la position du photon x dans R et au temps t, non pas par les relations prédites par la physique newtonienne, à savoir x'=x-Vt et t'=t, mais par des transformations mathématiques plus compliquées, dites de Lorentz. Et il se trouve que ces transformations sont telles que si la vitesse d'un objet, v=x/t, vaut c, la vitesse de la lumière, dans R, alors sa vitesse « fictive » v' =x'/t' est aussi c dans R'. Ils étaient donc tout près du but.

Il restait cependant un pas à franchir : donner une réalité à cette vitesse « fictive » v'.

C'est Einstein qui en 1905 franchit ce pas et donna son véritable sens aux transformations de Lorentz-Poincaré, par une illumination géniale, qui fut de dire que la variable « auxiliaire, fictive » t' n'était autre que le temps, le temps « pur et simple » mesuré par une horloge liée à R'. Ce fut une véritable révolution car c'était postuler, contrairement à Newton, que le temps ne s'écoule pas de la même façon pour tout le monde. « Le temps est affaire de perspective », dépend du repère, de l' « angle » sous lequel on le mesure (comme le dit joliment Jean-Marc Levy-Leblond), et se retrouve donc sur le même pied que la largeur, la hauteur et la profondeur. Bientôt, avec le mathématicien Minkowski, on parla non plus d'espace à trois dimensions mais d'espace-temps à quatre dimensions.

Les lois de Newton étaient formulées comme nous l'avons vu, en termes de vecteurs définis dans un espace à 3 dimensions où s'appliquait le théorème de Pythagore. Puisque le temps était devenu une dimension il fallut, avec le mathématicien Minkowski, reformuler les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme en termes de « quadrivecteurs » dans un espace-temps à quatre dimensions où la « distance d'espace-temps » entre deux événements (deux flashs lumineux par exemple) est donnée par un théorème de Pythagore généralisé.

10. En 1905, la gravitation restait cependant décrite par les lois de Newton, alors qu'Einstein venait de montrer que le cadre mathématique dans lequel s'exprimaient ces lois était trop restreint pour rendre compte des phénomènes électromagnétiques. Le pont reliant Ciel et Terre était donc rompu. Einstein considéra cette reconstruction comme prioritaire devant la physique quantique et y consacra dix ans de travail acharné entre 1905 et 1915.

Il trouva la solution grâce à une autre illumination. Supposez que vous tombiez d'un toit en même temps que votre pomme. Comme tous les corps tombent de la même façon la pomme doit rester immobile par rapport à vous, exactement comme si vous étiez dans un astronef, loin de tout champ de gravitation. Vous pouvez donc considérer votre mouvement et celui de la pomme comme libres, et les décrire comme si votre chute avait effacé la gravitation. Vous ne pouvez cependant pas dire que votre mouvement « est comme rien » trop longtemps. Car au bout d'un certain temps vous allez vous apercevoir que la pomme se rapproche lentement de vous. En effet deux objets qui chutent se rapprochent car ils sont attirés par le centre de la Terre. Comment réconcilier cela avec l'idée que ces objets sont censés avoir des mouvements libres l'un par rapport et donc des trajectoires parallèles ?

Pour réconcilier l'idée de mouvement libre avec le fait que les trajectoires convergent, Einstein supposa que les mouvements s'effectuent, non pas dans l'espace euclidien de Newton mais dans un espace courbe où les parallèles peuvent se couper. Pour la mathématisation de ces idées, Einstein fit appel à son ami Marcel Grossman qui lui expliqua les travaux de Riemann, alors récents, sur la géométrie des espaces courbes.

11. Dans un espace-temps courbe le théorème de Pythagore se généralise une nouvelle fois :

$$ds^2 = g_{11}(t,x,y,z)dt^2 + g_{12}(t,x,y,z)\ldots$$

La distance ds entre 2 flashs lumineux dépend de 10 fonctions de l'espace et du temps $g_{ij}(t,x,y,z)$, appelées la « métrique » de l'espace-temps. Ainsi, grâce à une formidable intuition physique guidée par les mathématiques, Einstein aboutit en 1915-1916 aux nouvelles équations de la gravitation :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Le « tenseur » $G_{\mu\nu}$ représente la courbure de l'espace temps ; c'est un opérateur, un « programme de manipulation » qui agit sur les 10 fonctions g_i.$T_{\mu\nu}$ représente la masse énergie des objets qui courbent l'espace temps. Enfin, le coefficient $8\pi G/c^4$ assure que pour des espaces faiblement courbés, la théorie newtonienne rejoint celle d'Einstein.

Ces équations sont donc le « *Golden Gate Bridge* » qui remplace le « Pont Neuf » de Newton.

II / Les succès de la relativité générale :

12. Commençons par passer rapidement en revue quelques tests de la relativité générale, quelques exemples, qui démontrent la puissance de cette théorie.

Nous avons vu précédemment que Le Verrier avait échoué dans ses tentatives d'explications de l'avance du périhélie de Mercure dans le cadre de la théorie newtonienne. Einstein, qui pourtant avait basé sa théorie sur une base très conceptuelle, calcula cette avance dans le cadre de la relativité générale et obtint 43 secondes d'arc par siècle, exactement la valeur observée ! Ce fut dit-il la plus grande émotion scientifique de sa vie.

En 1916, Einstein fit cette fois ci une prédiction : la lumière ne devait pas se propager en ligne droite comme le supposait Newton mais devait être déviée par les champs de gravitation des astres. Eddington vérifia cette prédiction en 1919 ; on la vérifie maintenant avec une grande précision, récemment grâce aux signaux radio émis par la sonde Cassini lors de son voyage vers Saturne. Grâce à cette propriété de la lumière d'être déviée par les corps massifs on peut ainsi maintenant calculer la masse (en particulier la masse invisible des galaxies) présente entre un astre lumineux, un quasar par exemple, et nous en étudiant le trajet que prend la lumière entre lui et nous.

En relativité générale l'écoulement du temps dépend du mouvement mais aussi du champ gravitationnel dans lequel l'horloge se trouve. Ce 3ème effet est appelé le « *redshift* gravitationnel ». Il a été mesuré pour la première fois en 1963 et aujourd'hui la précision des horloges est telle qu'il est indispensable d'en tenir compte dans les routines du programme du *Global Positionning System*, sans quoi ce système ne fonctionnerait pas !

Mentionnons enfin, l'effet Shapiro : si on envoie de la Terre un signal laser ou radar sur la lune ou sur une sonde et si ce signal revient, on calcule que le temps que met ce signal pour faire l'aller retour est différent de ce que prévoit la physique newtonienne. C'est aussi la sonde Cassini qui a permis de vérifier cet effet avec la plus grande précision.

Après ce bref survol des tests de la relativité générale, concentrons-nous sur une autre facette de la relativité générale : les ondes gravitationnelles.

13. Commençons par présenter les « pulsars binaires » grâce auxquels les ondes gravitationnelles ont été détectées. Un « pulsar » est une étoile à neutrons, c'est à dire dont la densité est celle de la matière nucléaire, qui peut donc peser 2 ou 3 masses solaires pour seulement quelques kilomètres de rayon. Ces pulsars produisent, par des mécanismes encore mal connus, des champs magnétiques très intenses. De plus, ces étoiles tournent sur elles-mêmes parfois avec une période de rotation de 1 milliseconde (à comparer au 24 h pour la

Terre !). Le champ magnétique tourne alors autour de l'axe de rotation. Ce pulsar émet donc un « pinceau de magnétisme », un faisceau lumineux (radio), qui balaie l'espace comme un gyrophare et qui peut être détecté par des radiotélescopes si la Terre se trouve dans sa trajectoire.

Un pulsar « binaire » est une étoile à neutrons qui gravite autour d'un autre objet, qui peut lui-même être une autre étoile à neutrons. L'intervalle de temps entre l'arrivée sur Terre de deux flashs, 2 « bips » consécutifs du « gyrophare » n'est alors pas constant du fait que pulsar s'éloigne et se rapproche périodiquement de l'observateur, lors de ses révolutions autour de son compagnon. On peut ainsi reconstituer, par cet « effet Doppler », la trajectoire de ce pulsar binaire.

14-15. Enfin, en tournant l'un autour de l'autre, les deux étoiles déforment périodiquement l'espace-temps et ces déformations de la métrique se propagent jusqu'à l'infini : ce sont les ondes gravitationnelles.

16. Il s'agit de mettre en équations ces ondes...

La phase du pulsar, qui donne le rythme auquel le gyrophare tourne, est donné en fonction du temps par l'équation suivante :

$$\phi = \phi_0 + \nu(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 + \dots$$

Le temps t qui apparaît dans cette équation est celui d'une horloge liée au pulsar. Ce temps n'est pas le même dans le laboratoire qui détecte le signal (la Terre), en raison notamment du ralentissement des horloges. Appelons T le temps du laboratoire. On montre à partir des équations d'Einstein de la relativité générale que les temps t et T sont liés par la relation suivante :

$$t = T - \frac{D}{f^2} + \Delta R_\odot + \Delta E_\odot + \Delta S_\odot - \Delta R - \Delta E - \Delta S$$

Le premier terme correctif Delta R est une correction simplement newtonienne, qui tient compte du fait que la distance entre le pulsar et le laboratoire est variable et que la lumière a une vitesse finie.

Les termes suivants sont des corrections relativistes.

Plus précisément, ΔE, appelé effet Einstein, est une correction qui combine les effets de retard dus au mouvement du pulsar et au champ de gravitation de son compagnon (c'est de ce même effet qu'il faut tenir compte pour faire fonctionner le système GPS). Il s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta E = \gamma \sin u$$

Enfin, le dernier terme ΔS, est l'effet Shapiro. Il s'agit de l'effet dû au retard que prend la lumière dans le champ de gravitation des étoiles à neutrons :

$$\Delta S = -2r.\ln\left\{1-\cos u - s\left[\sin\omega(\cos u - e) + \sqrt{1-e^2}\cos\omega\sin u\right]\right\}$$

Les différents paramètres, delta, γ, r, s, etc, intervenant dans ces différentes équations sont des paramètres dits « post-képlériens », dont les valeurs sont nulles en théorie newtonienne. En ajustant cette « formule de chronométrage » $\Phi=\Phi(T)$ avec la phase phi observée, on obtient les valeurs numériques de ces différents paramètres.

17. Par exemple, pour le pulsar binaire récemment observé par Kramer et al, on trouve que l'avance du périastre est de 16,9 degrés/an (à comparer aux 43 secondes d'arcs par siècle pour Mercure !). De même la période orbitale est de 0,1 jour contre 365 jours pour la Terre. Enfin, l'ellipse de la trajectoire du pulsar rétrécit peu à peu au cours du temps. Le système perd de l'énergie lors de ce rétrécissement et cette énergie est dissipée sous forme d'ondes gravitationnelles. Il s'agit d'un effet extrêmement faible : il faut compter une centaine de millions d'années pour qu'ils deviennent notable.

18. Ces paramètres post-képlériens, comme nous l'avons dit, devraient être nuls en théorie newtonienne. Le fait qu'on observe qu'ils ne le sont pas montre déjà que la théorie newtonienne est inapte à décrire le mouvement d'un tel pulsar binaire. La relativité générale quant à elle, non seulement prédit une valeur non nulle pour ces paramètres mais les exprime en fonction des masses des deux objets M_A et M_B, selon des formules plus ou moins compliquées extraites des équations d'Einstein.

19. On peut ainsi tracer sur un diagramme l'avance du périastre, la variation de la période orbitale, etc, en fonction des masses M_A et M_B. Si ces courbes ne se recoupaient pas en un seul point cela signifierait un désaccord entre théorie et expérience car on obtiendrait des valeurs contradictoires pour les masses MA et MB du pulsar et de son compagnon. Mais il se trouve qu'elles se coupent toutes, avec une très grande précision ! L'intersection de deux courbes (l'avance du périastre omega dot et de l'effet Einstein gamma par exemple) donne les masses Ma et MB. Chaque courbe supplémentaire, à condition qu'elle passe au même point, représente un test de la relativité générale ; ainsi le pulsar binaire de Kramer et al fournit trois tests indépendants !

Grâce donc à un système d'étoiles situé à plusieurs milliers d'années-lumière de la Terre on vérifie actuellement une théorie construite en 1915 sur une base surtout conceptuelle avec une précision supérieure au millième.

20. Le test consistant à mesurer le rétrécissement de l'orbite d'un pulsar binaire dû à l'émission d'ondes gravitationnelles et vérifier qu'il coïncide avec la valeur prédite par la relativité générale, a été effectué pour la première fois par Hulse et Taylor à l'aide du premier pulsar binaire qu'ils avaient découvert en 1974. Pendant 30 ans, ils ont monitoré ce système pour mesurer avec un précision de plus en plus grande l'effet cumulatif de retard au périastre dû à ce rétrécissement et ont obtenu un accord entre observation et prédiction supérieur à 2 millièmes. Ces travaux ont valu à Hulse et Taylor le premier prix Nobel de relativité générale en 1993.

III/ Une nouvelle fenêtre sur l'univers :

22-23. Les ondes gravitationnelles ont donc été détectées par l'intermédiaire du rétrécissement de l'ellipse tracée par deux étoiles en orbite l'une autour de l'autre mais pas « directement », c'est à dire par l'intermédiaire de télescopes « gravitationnels » placés sur Terre sensibles aux « frémissements » de la géométrie de l'espace-temps. Tant que les étoiles sont éloignées l'une de l'autre, les ondes gravitationnelles sont beaucoup trop faibles pour être détectées par de tels « télescopes ». En revanche, on peut espérer les détecter lorsque les deux étoiles se rapprochent l'une de l'autre et fusionnent pour donner par exemple un trou noir car alors une énorme « bouffée » d'ondes est émise.

24. Un effort international important est par conséquent mené pour essayer d'observer directement ces ondes. Les Etats-Unis, l'Europe et le Japon construisent actuellement des détecteurs gigantesques, sous forme d'interféromètres constitués de deux bras perpendiculaires d'environ 3 km de long, dans lesquels un faisceau laser se propage et se réfléchit des centaines de fois. Ces différents rayons lumineux se combinent en fin de course en un « creux de lumière », une frange noire. Si une onde gravitationnelle arrive sur Terre, la géométrie d'espace-temps entre les miroirs va être très légèrement perturbée, les miroirs aux extrémités des bras vont très légèrement bouger et une frange de lumière va apparaître puis disparaître.

25. Il s'agit là encore d'expliquer ce mouvement des miroirs en « faisant parler » les équations d'Einstein. L'accélération du pulsar qui va déterminer le mouvement et donc la courbure de l'espace-temps dont les frémissements vont atteindre le détecteur s'exprime de la manière suivante :

$$\vec{a} = \frac{-Gm_2}{r_{12}^2}\overrightarrow{n_{12}} + \frac{1}{c^2}A^{1PN} + \frac{1}{c^4}A^{2PN} + \frac{1}{c^5}A^{2.5PN} + \frac{1}{c^5}A^{3PN} + \frac{1}{c^7}A^{3.5PN} + O\left(\frac{1}{c^8}\right)$$

Le premier terme est celui de Newton, inversement proportionnel au carré de la distance entre le pulsar et son compagnon.

Les termes suivants sont les corrections relativistes obtenues en résolvant, avec une précision croissante (« itérativement ») l'équation d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$1/c^2.A^{1PN}$ est le terme donnant en particulier l'avance du périastre.

$1/c^5A^{2.5PN}$ représente la force qui provoque le rétrécissement de l'ellipse observé par Hulse et Taylor (son expression a été obtenue en 1982).

Enfin, le terme $1/c^7.A^{3.5PN}$ a été obtenu au début des années 2000.

26. Mais ce travail n'est qu'une étape pour décrire correctement l'onde gravitationnelle qui va faire bouger les miroirs et qu'on puisse un jour, à partir de ce mouvement, vérifier si la relativité générale décrit correctement le début de la coalescence des deux étoiles : il faut prédire plus précisément encore la phase de l'orbite (liée au temps mis par le pulsar à faire un tour : $\Phi=\Omega.t$ pour un mouvement circulaire newtonien). Dans son expression obtenue très récemment dans le cadre de la relativité générale, le premier terme décrit le rétrécissement de l'orbite dû au seul terme $1/c^5.A^{2.5PN}$. Les corrections suivantes nécessitent la connaissance du champ de gravitation et de la luminosité (puissance rayonnée par ce champ) très loin du pulsar

binaire. Ces calculs on représenté un travail de très longue haleine, où l'école française, pilotée notamment par Thibault Damour, s'est distinguée.

27. Cependant, ces corrections de plus en plus fines à la physique newtonienne ne suffisent plus lorsque les deux étoiles coalescent. Pour décrire cette phase ultime il faut résoudre exactement les équations d'Einstein, ce que l'on ne peut faire que numériquement dans ce cas. La relativité numérique est donc en plein essor, en particulier à l'Observatoire de Meudon. Parmi les succès récents de cette discipline citons le calcul de la coalescence de deux étoiles à neutrons et celle de deux trous noirs ---qu'on ne peut pas voir car les trous noirs ne rayonnent pas de lumière mais qui doivent produire, si ils coalescent, une énorme bouffée d'ondes gravitationnelles.

28. La détection d'ondes gravitationnelles ouvrira une nouvelle fenêtre sur l'univers dans la mesure où il s'agit d'un signal non lumineux, de « friselures » de l'espace-temps. L'observation de ces ondes permettrait d'en savoir plus sur les étoiles à neutrons car le signal gravitationnel émis dépend de leur structure interne. Grâce aux ondes gravitationnelles on devrait donc mieux connaître les propriétés nucléaires de la matière, la structure des trous noirs, voire même les débuts de l'univers dans lequel les ondes gravitationnelles se sont propagées librement bien avant la lumière.

IV / Les défis à relever :

Les succès de la relativité générale sont donc nombreux mais il reste des défis à relever.

29. Le premier est celui de la cosmologie. En effet, toutes les mesures actuelles tendent à montrer que la matière qui compose l'univers est, quasiment en totalité, totalement inconnue (30 % de « matière noire », 70 % d' « énergie noire »). Ainsi la matière dont les étoiles sont constituées ne représenterait qu'une infime partie de la masse totale. L'hypothèse optimiste est de parier sur les équations d'Einstein et de les utiliser pour mieux connaître les caractéristiques de l'univers, la nature de la matière et l'énergie noires ou la valeur de l'accélération de son expansion par exemple. Mais il n'est pas exclu, hypothèse pessimiste que la Relativité Générale trouve ses limites en cosmologie.

30. Le second défi est celui de la quantification de la gravitation : le pont entre Ciel et Terre dressé par Einstein ignore en effet la mécanique quantique dont les lois régissent pourtant superbement le monde microscopique. Bien qu'aucune évidence expérimentale ne l'impose actuellement (sauf peut-être les mystères de la cosmologie ?), réconcilier les principes et cadres conceptuels de la relativité générale et de la mécanique quantique est un programme majeur de la physique du XXI^{ème} siècle. Des théories sont en chantier pour tenter de répondre à ces interrogations, parmi elles la théorie des supercordes sur laquelle beaucoup de physiciens fondent leurs espoirs depuis déjà une trentaine d'années.