Le contexte

- Fin novembre 1915, en plein conflit mondial, Einstein, professeur à Berlin, publie ses équations définitives de la relativité générale.
- La théorie d'Einstein remporte des succès : Avance du périhélie de Mercure (1915). Déviation de la lumière par le Soleil (1919).
- Première solution exacte en 1916 (Schwarzschild) pour le corps unique à symétrie sphérique (système solaire), mais ces équations divergent sur une surface à une certaine distance du centre: Signification physique ?
- Cela met dans l'embarras Einstein et les quelques partisans de sa théorie. On tente de circonscrire « la monstruosité » (sic Eddington) en la considérant comme un artefact mathématique.

La théorie d'Einstein, l'Académie des Sciences et Painlevé

- A cette époque Painlevé, scientifique et homme politique (il sera ministre de la guerre et président du conseil en 1917), est investi dans l'effort de guerre.
- Après la fin de la guerre, il va animer le débat qui s'amorce à l'Académie des sciences, dont il avait été élu président en 1918, par une proposition critique mais constructive en 1921, année où Einstein se voit décerner le prix Nobel pour « sa contribution à la physique, en particulier pour la théorie des quanta ».
- L'ouvrage de H. Weyl, « Raum, Zeit, Materie (1918) », mathématicien reconnu, dont l'édition 4 sera traduite en 1922 « Espace, Temps, Matière », qui consacre une part importante à la théorie d'Einstein, contribue à la crédibiliser.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 24 OCTOBRE 1921.

PRÉSIDENCE DE M. GEORGES LEMOINE.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

MÉCANIQUE. — *La Mécanique classique et la théorie de la relativité.* Note de M. PAUL PAINLEVÉ.

axes. Cette hypothèse admise, les einsteiniens parviennent au ds^2 (à quatre variables) aujourd'hui célèbre, dont les géodésiques définissent dans leur théorie le mouvement du point gravitant, à savoir

$$(1) \qquad ds^2 = dt^2\left(1 - \frac{a}{r}\right) - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2) - \frac{dr^2}{1 - \frac{a}{r}},$$

a désignant une constante arbitraire que déterminera la masse du centre matériel O.

Mais ce ds^2 n'est pas le seul qui réponde à toutes les conditions einsteiniennes. Il en est une infinité d'autres dépendant de deux fonctions de r et le choix de la formule (1) entre toutes ces formules est purement arbitraire. Parmi ces formules il en est d'aussi simples que la formule (1) et qui entraînent exactement les mêmes vérifications. Telle celle-ci :

$$(2) \qquad ds^2 = dt^2\left(1 - \frac{a}{r}\right) + 2\, dr\, dt\sqrt{\frac{a}{r}} - d\sigma^2,$$

avec

$$d\sigma^2 = dr^2 + r^2[d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2]$$

L'étreinte de l'espace et du temps dans l'espace-temps révélée par le terme non quadratique dr.dt.

- La forme de Schwarzschild sépare bien espace et temps.
- Celle de Painlevé, dont l'établissement sera explicité dans la note suivante, qui comporte un terme qui mélange les deux déroute la communauté scientifique de l'époque !
- Quelle peut être la signification physique d'un terme qui combine espace et temps de nature physique différentes dans une métrique, qui de surcroît oriente la métrique, en particulier l'espace : N'est ce pas inconcevable ?

L'étreinte de l'espace et du temps dans l'espace-temps révélée par le terme non quadratique dr.dt.

- Cette solution non singulière sur « l'horizon » laisse à penser qu'il n'est pas infranchissable, comme la solution de Schwarzschild le laissait supposer.
- On peut le traverser, compte tenu de l'orientation, mais dans un sens et pas dans l'autre, sans possibilité de retour. Aboutit à la fin du temps !

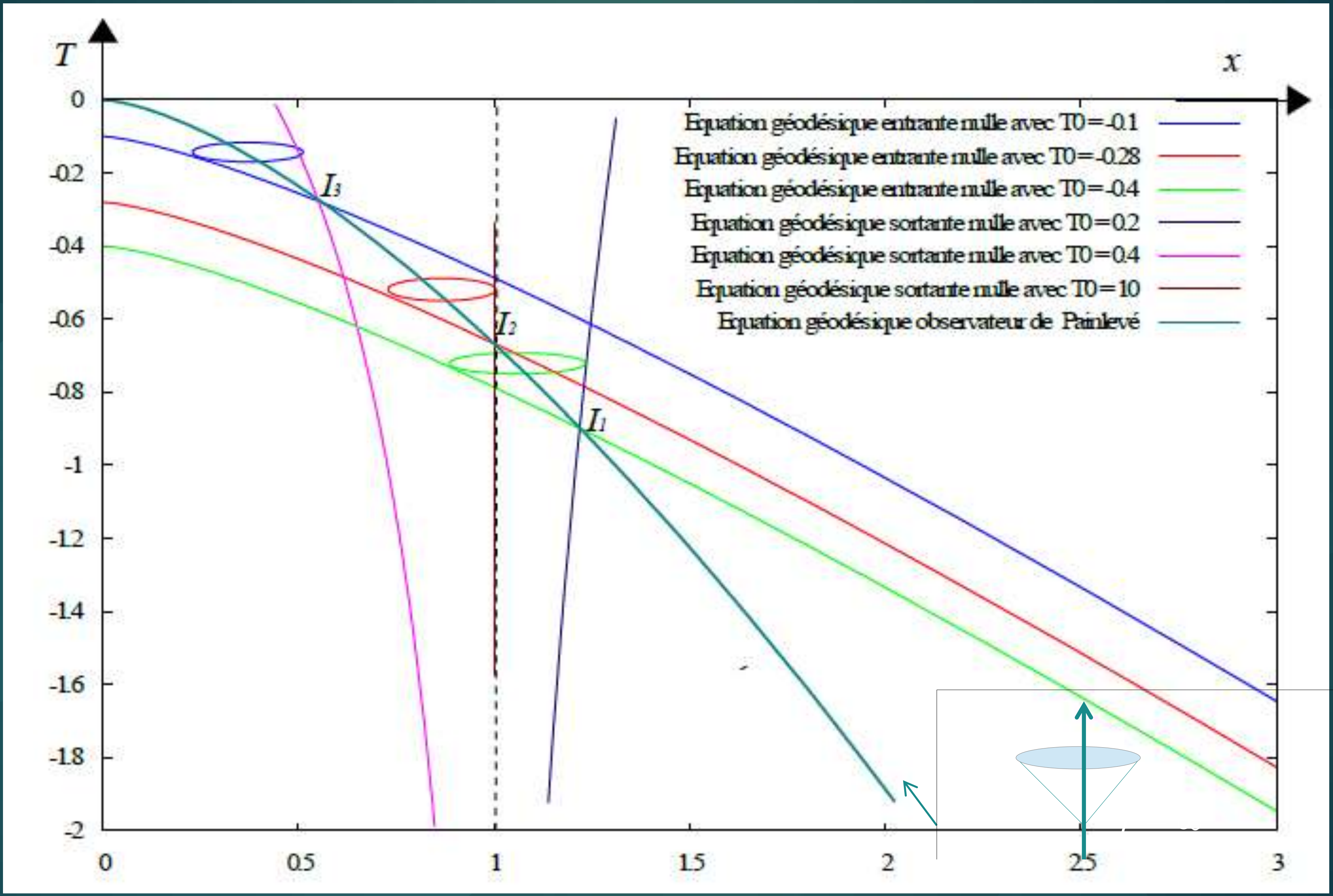
L'orientation spatio-temporelle permet de comprendre la structure physique de la solution

- Sous cet horizon, l'espace et le temps montrent des propriétés étranges. Le temps physique ne peut exister que par le mouvement.
- Contrairement à notre conception « immédiate » l'orientation de l'espace crée une dissymétrie dans la structure de l'espace-temps.
- Elle induit, par ailleurs, deux régions symétriques, invoquant une dissociation du néant en deux espace-temps d'orientations opposées. Bien que Painlevé ne l'ait pas relevé, c'était évident !

L'orientation spatio-temporelle permet de comprendre la structure physique de la solution

- Cette proposition géniale n'a pas été comprise, en particulier l'orientation de la solution, clé qui permettait de comprendre comment traverser l'horizon, lui-même orienté, et ainsi unifier, par ce caractère et ses implications, les deux régions de Schwarzschild.
- Étonnamment, mais peut être dépassé par l'ampleur de sa découverte, Painlevé la reniera, à tort, 3 semaines après !

Un effet de l'orientation : Le basculement des cônes de lumière dans la forme de Painlevé.



Représentation duale : L'observateur local voit un espace-temps symétrique.

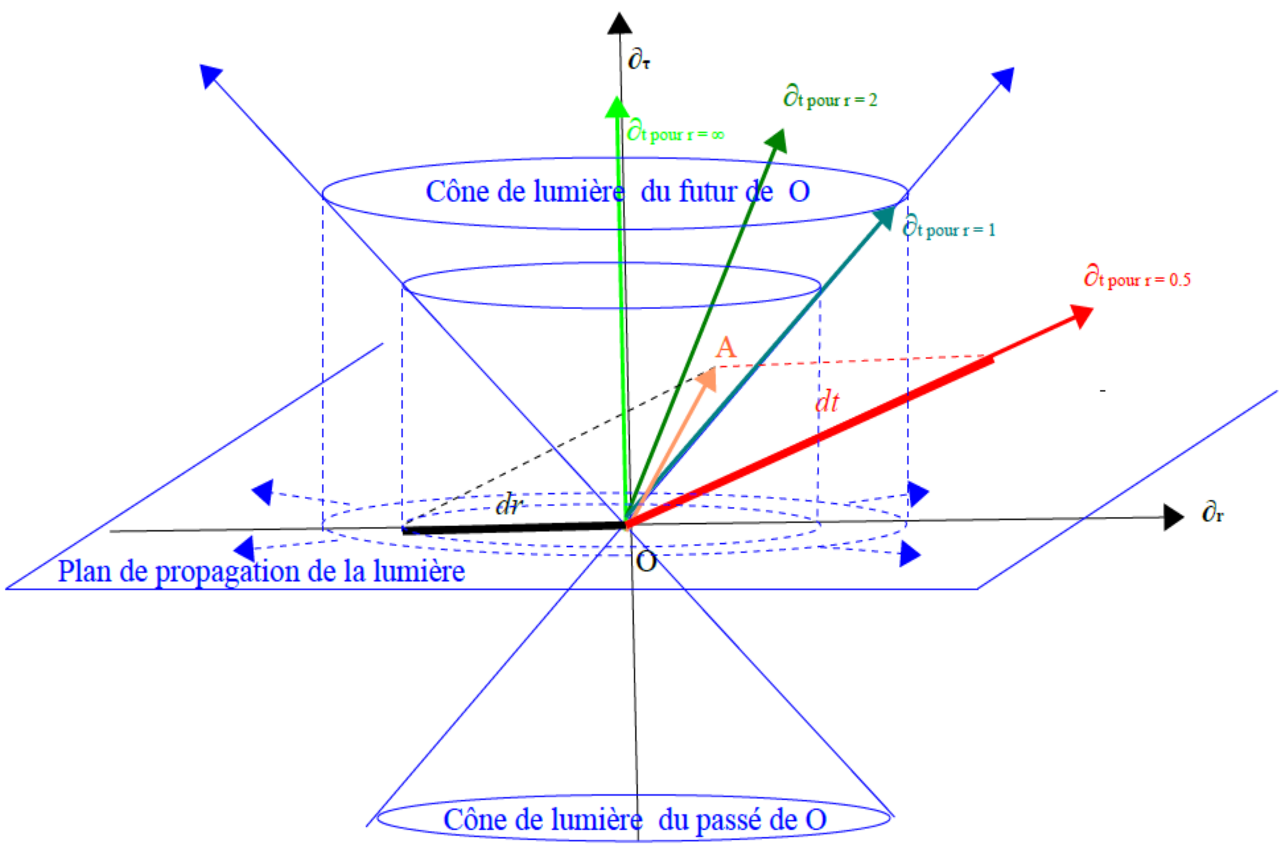


Figure 12-3. *Diagramme schématique[438] représentant les vecteurs de base des coordonnées de Painlevé pour 4 valeurs de r (∞, 2, 1, ½) dans la base locale inertielle de Lorentz (∂_r, ∂_τ).*

Ceci illustre la défiance des scientifiques vis à vis d'un espace-temps orienté. D'où le « principe de réversibilité » de Painlevé ! L'apparente contradiction entre les deux représentations est la manifestation de la courbure de l'espace temps !

La forme de Painlevé montre que le paradoxe de l'horizon dans la forme de Schwarzschild est fictif !

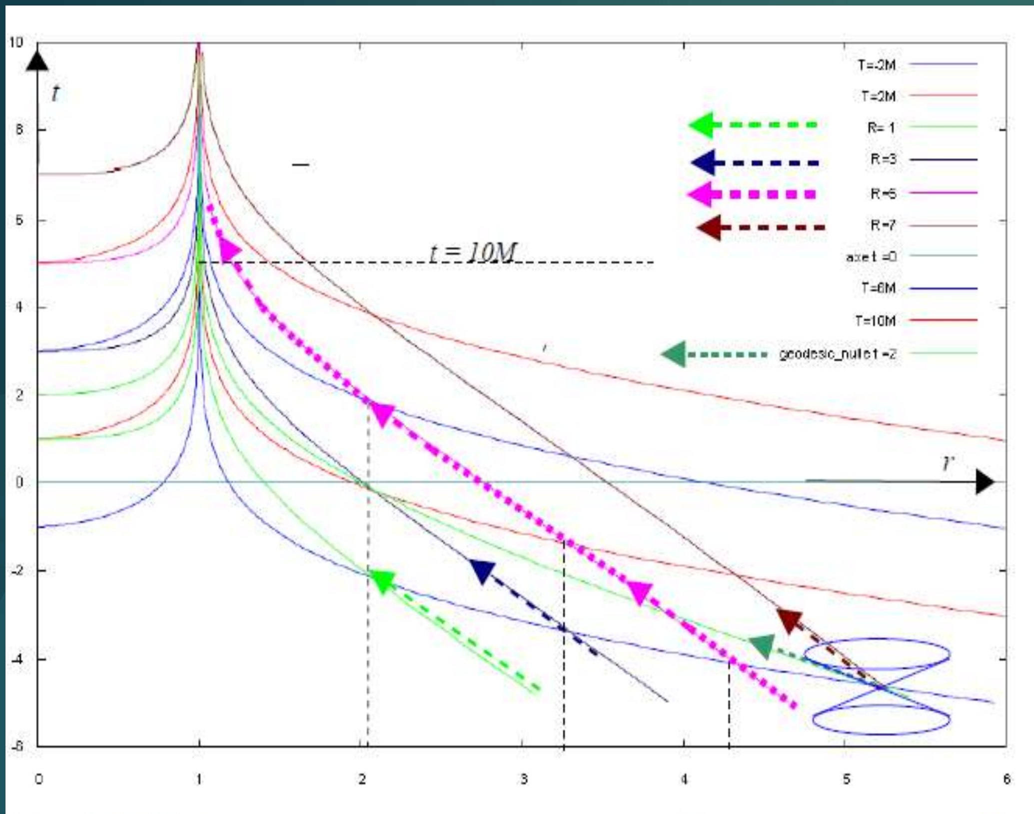


Figure 15-1[753]. *Systèmes de coordonnées représentées dans le plan r, t (Schwarzschild)*

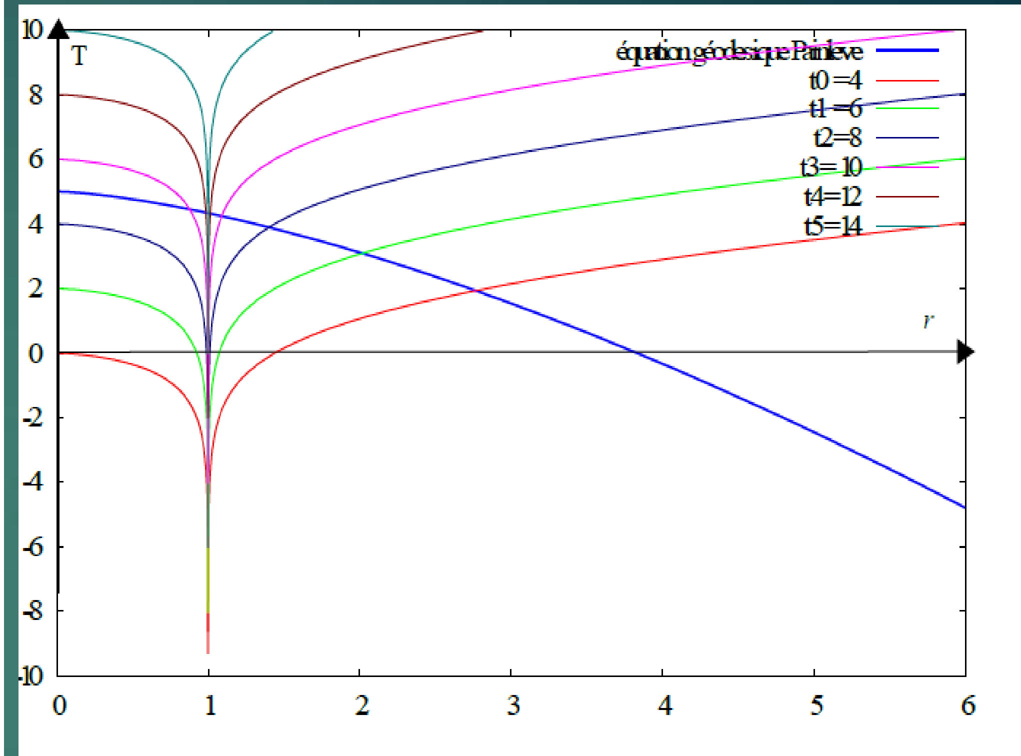


Figure 15-2[754]. *Toutes les isochrones du temps t d'un observateur de Schwarzschild, viennent "tangenter" l'horizon en r =1. L'isochrone t = + ∞ est une droite verticale à r =1.*

On a représenté 4 isochrones de temps propre (***T*** **=** ***τ*** = constante) en trait fin de couleur et repérées par ***T = n.2M*** sur la légende du dessin. On a représenté 4 géodésiques parcourues par les observateurs de Painlevé (ou de Lemaître) en traits fins de couleur surmontés d'une flèche en trait épais interrompu de la même couleur pour indiquer la direction. Elles sont étiquetées, sur la légende, par la coordonnée de Lemaître χ, égale à la constante d'intégration τ_0 de Painlevé, notée ***R*** sur la figure (***R = 1, 3, 5, 7***).

ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 14 NOVEMBRE 1921.

PRÉSIDENCE DE M. GEORGES LEMOINE.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

MÉCANIQUE. — *La gravitation dans la Mécanique de Newton et dans la Mécanique d'Einstein*. Note de M. PAUL PAINLEVÉ.

Il suit de là, comme on voit, qu'on peut donner à la théorie de la gravitation newtonienne la forme suivante (principe de la moindre action) : *Les trajectoires du point* P *sont les géodésiques du* ds^2

$$ds^2 = (U + h)(dx^2 + dy^2 + dz^2), \qquad (h \text{ constante arbitraire}),$$

où U *est une fonction de* x, y, z *qui s'annule à l'infini dont le* ΔU *est nul à l'extérieur de la sphère* S *et est égal à une constante négative dans* S.

Une propriété inattendue mais édifiante émerge de l'équation proposée par Painlevé

- Pour comparer les deux théories dans cette solution, Painlevé propose une formulation géométrique covariante, comme en relativité générale, de la mécanique classique, mais purement spatiale sans le temps newtonien.
- En mécanique classique la longueur d'une courbe plane, définie par $r = f(\varphi)$ en coordonnées polaires, est calculée en métrique euclidienne. L'équation du mouvement est donnée indépendamment.

Une propriété inattendue mais édifiante émerge de l'équation proposée par Painlevé

- On peut aussi considérer cette longueur comme le paramètre affine *(λ)* de cette courbe. Dans ce cas, la courbe est définie par deux fonctions : $r(\lambda)$ et $\varphi(\lambda)$. Comme λ n'est pas utilisé dans l'équation $r = f(\varphi)$, il est possible d'appliquer une transformation de jauge (d'échelle) sans modifier cette équation.
- Ceci va représenter l'effet du potentiel gravitationnel newtonien.

La forme géométrique de la mécanique classique produit un temps physique. Fin du temps absolu!

- En considérant ce paramètre affine comme le paramètre dynamique, on unifie le formalisme.
- C'est le sens de la proposition de Painlevé qui définit ce paramètre en utilisant la liberté de jauge, conformément aux idées de H. Weyl.
- Ce paramètre dynamique, est issu du mouvement géodésique, dépendant de la géométrie spatiale de courbure déterminée par la seule gravitation, ce qui lui confère nativement un statut physique et scelle ses relations avec l'espace et la physique.

La forme géométrique de la mécanique classique produit un temps physique. Fin du temps absolu!

- Le temps ainsi défini, paramètre λ de la géodésique purement spatiale, est équivalent, en posant $t = i\lambda$, au temps newtonien absolu t.
- Ceci induit le $-dt^2 + d\sigma^2$, des formes relativistes.
- Le temps absolu est éliminé de la mécanique newtonienne dans ces solutions.
- La formulation hybride devient une formulation homogène et révéle la nature relationnelle du temps.

La différence de nature entre le temps et l'espace sont formellement spécifiées

- Le nombre imaginaire *i*, qui s'introduit dans ces équations , caractérise la différence de nature physique entre le temps et l'espace qu'on retrouvera dans la forme qui les unit en relativité générale.
- Mais à la différence de la relativité où un temps formellement imaginaire, qui est une coordonnée, entre dans un invariant géométrique (ds^2) qui peut lui même être physiquement de type temps (temps propre), ici comme aucune coordonnée temps n'existe, c'est le paramètre affine qui hérite, via ce formalisme, de cette nature temporelle issue de contraintes physiques.
- Dans ce formalisme le temps perd son caractère métaphysique a priori.

La relativité générale à l'Académie des Sciences (1921-1924

- Vis-à-vis de cette nouvelle théorie, l'Académie des Sciences va montrer une grande défiance qui va cependant évoluer dans le temps.
- Paul Langevin, convaincu que le temps de la réconciliation était venu, du moins entre scientifiques, est le premier, en novembre 1921, à prendre la défense de la théorie de la relativité générale.
- Un débat plutôt vif, mais non stérile, se développe, avec 12 contributions sur la relativité générale en 1921, 19 en 1922 et 9 en 1923.
- Langevin, ambassadeur compétent et efficace, continuera à créer progressivement un courant favorable aux idées d'Einstein au sein de l'Académie.

Painlevé détaille, dans cet article du 14/11/1921, son calcul de sa forme de métrique du 1er article.

Partant de la forme générique : $ds^2 = A(r)\,dt^2 - 2B(r)\,dt\,dr - C(r)[r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi)] - D(r)\,dr^2$.[95] ([3])

- Il enchaîne :

IV. *Conditions einsteiniennes invariantes.* — Quelles que soient d'ailleurs les fonctions A, B, C, D de r que l'expérience nous conduirait à adopter, il serait toujours possible de former des conditions invariantes auxquelles devraient satisfaire les coefficients de ds^2 quand on y remplace r, θ, φ et t en fonction de quatre variables entièrement quelconques. Mais Einstein veut *a priori* que ces conditions invariantes soient des équations aux dérivées partielles du deuxième ordre d'une forme spéciale, qui s'inspirent à la fois des théories de la gravité newtonienne en coordonnées curvilignes, et de la théorie de la courbure des surfaces ordinaires.

Ce sont ces restrictions capitales, et non le truisme pur et simple de l'invariance, qui parmi les ds^2 de la forme (3) ne laissent subsister que les suivants :

$$(4)\qquad ds^2 = \left[1 - \frac{2\mu}{f(r)}\right][dt - \chi(r)\,dr]^2 - f^2(r)[d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2] - \frac{f'^2(r)\,dr^2}{1 - \frac{2\mu}{f(r)}},$$

où μ est une constante et où f et χ sont deux fonctions arbitraires de r telles seulement que $\chi(r)$ tende vers zéro et $f'(r)$ (toujours positif) tende vers 1, quand r tend vers l'infini.

Cette équation (4) est remarquable, elle vérifie l'équation d'Einstein (dans le vide) quelles que soient les fonctions $f(r)$ et $\chi(r)$, définissant ainsi une classe doublement infinie de solutions. Pour $f(r) = r$ avec $\chi(r) = 0$ on obtient Schwarzschild, avec $\chi(r) = (2M/r)^{1/2}/(1-2M/r)$, on obtient Painlevé.

La relativité générale et l'Académie des sciences

- Ce premier article, assez critique, mais constructif est une annonce de son travail qu'il va présenter de manière plus détaillée dans un deuxième article, peu de temps après, le 14 novembre 1921 .
- Il en fera un troisième en mai 1922, après un débat avec Einstein et ses collègues, au Collège de France, pendant la visite d'Einstein à Paris (30 Mars - 7 avril 1922).
- Rappelé par sa carrière politique, il se retirera du débat après le 1er Mai 1922.

Einstein au Collège de France, 5 avril 1922

- En novembre 1921, Painlevé écrit à Einstein pour lui présenter ses critiques et sa solution et l'inviter à en débattre avec lui et ses collègues de l'Académie des Sciences. Dans une lettre du 7 décembre, Einstein répond aux critiques mais ayant des engagements explique qu'il ne peut pas se rendre à Paris rapidement.
- Il viendra au printemps 1922 et fera une série de conférences-débats du 31 mars au 7 avril. Charles Nordmann fera un compte-rendu des discussions : « Einstein expose et discute sa théorie » publié dans la *Revue des Deux Mondes*.

Einstein au Collège de France, 5 avril 1922

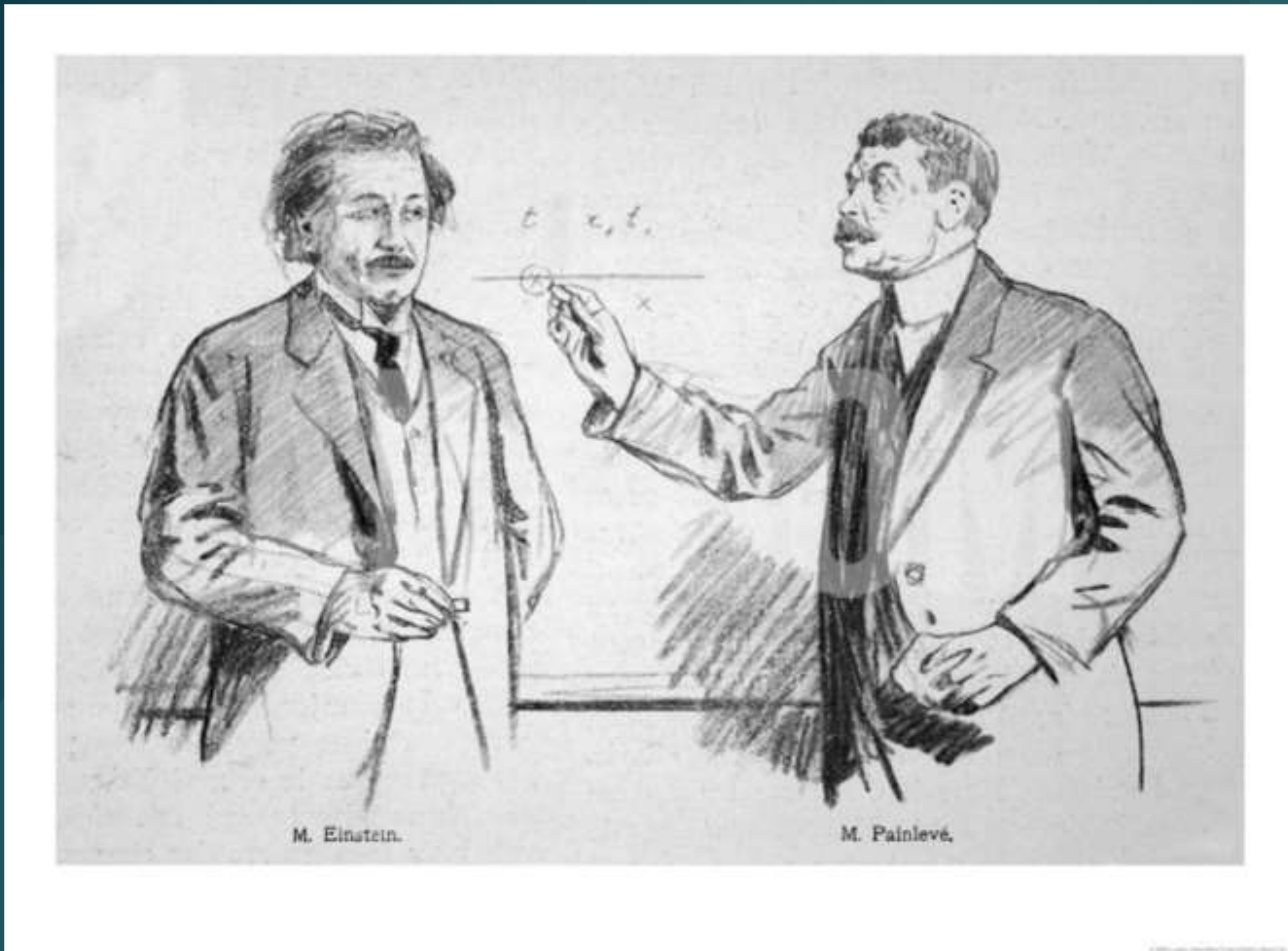
- Charles Nordmann commence par souligner que la prestation d'Einstein au Collège de France, à l'invitation de Paul Langevin, a été un évènement sans précédent.
- Aux États-Unis, à Londres, en Italie où Einstein avait été reçu dans les mois précédents, il s'était contenté de faire un exposé *ex cathedra* sous forme d'un monologue non contradictoire.

Einstein au Collège de France, 5 avril 1922

La foule se pressant aux portes du Collège de France pour assister à une conférence d'Einstein. À droite de la grille, on devine Painlevé filtrant les entrées (image Gallica BnF)

Les séances les plus techniques se dérouleront devant un public restreint, mais très spécialisé dans le domaine et s'apparenteront plutôt à des groupes de travail. C'est ainsi qu'il faut considérer le débat avec Painlevé, en présence notamment de H.Becquerel, M. Brillouin, E. Cartan, T. DE Donder, J. Hadamard, p. Langevin et C. Nordmann.

La rencontre du 5 avril 1922 à Paris



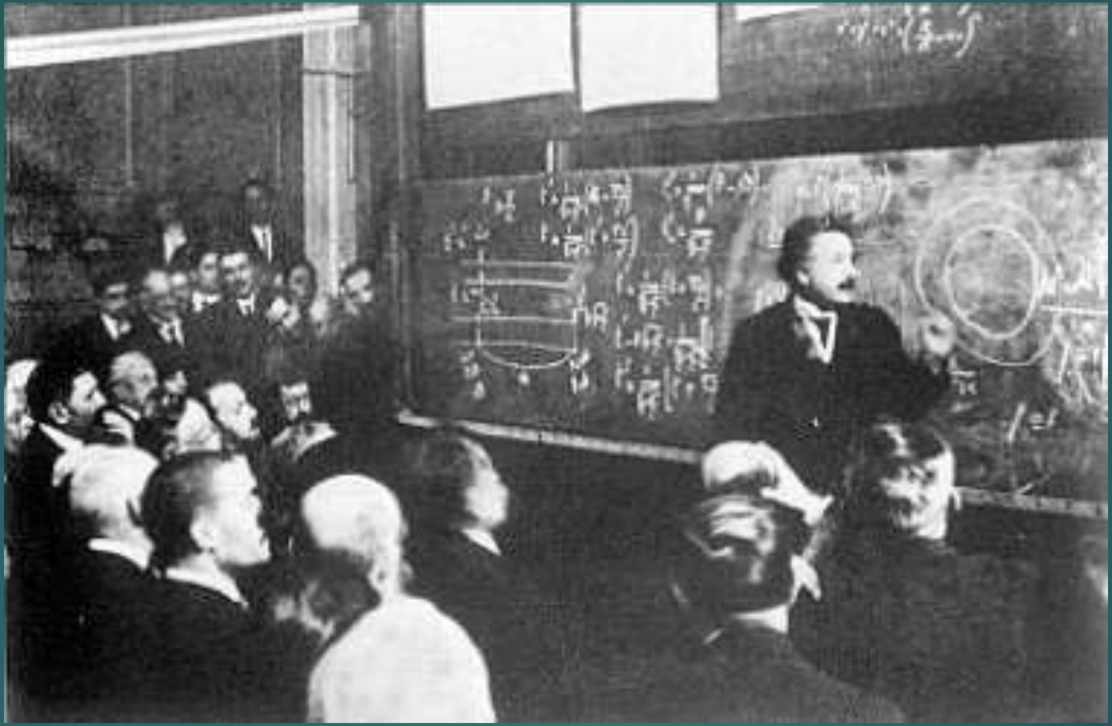
Langevin et Einstein (Avril 1922)

Le point culminant de ce différend sur la meilleure solution possible des équations d'Einstein a lieu pendant le voyage d'Einstein à Paris le 5 avril 1922. Painlevé aidé de son collègue mathématicien J. Hadamard ouvre le débat sur la singularité de Schwarzschild, que les participants français à ce débat appelaient « la catastrophe d'Hadamard ». Au cours du débat, Einstein, rejetant la solution de Painlevé, prend le dessus, et celui-ci se rallie à la relativité. Cela sonne le glas de sa proposition ! D'après : « Einstein un siècle contre lui » p. 101 de A. Moatti.

Painlevé en 1923

Einstein au Collège de France, 5 avril 1922

LE PROBLÈME DE L'HORIZON DANS LA SOLUTION DU CORPS UNIQUE À SYMÉTRIE SPHÉRIQUE



Einstein exposant le problème de l'horizon devant une audience restreinte attentive. Painlevé est assis à côté de l'extrémité gauche du tableau.

Narration de Charles Nordmann (Extraits)

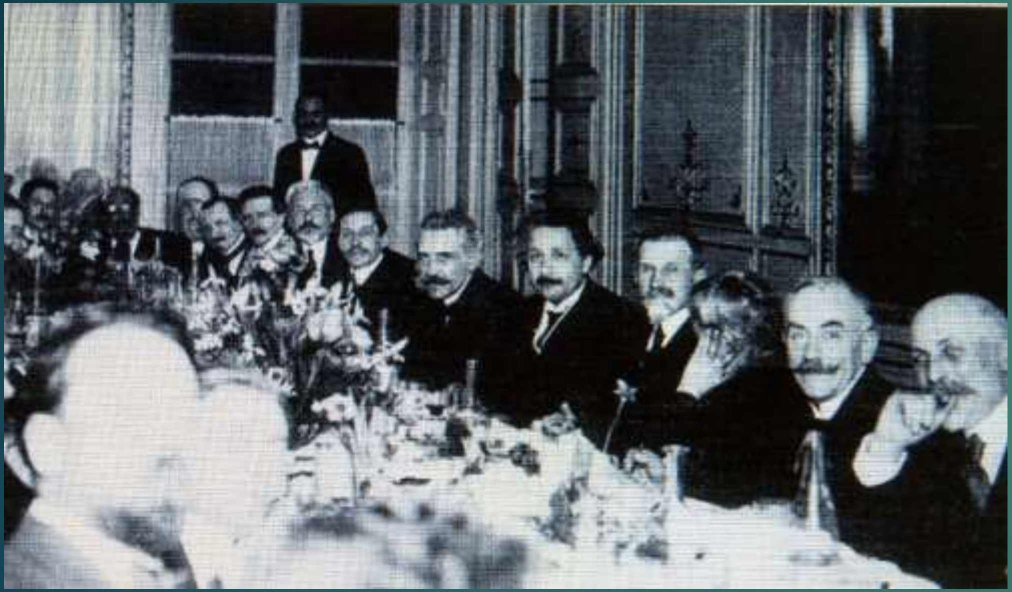
- *C'est Monsieur Hadamard qui est professeur de mécanique céleste au Collège de France qui ouvre le débat avec une question relative à la formule avec laquelle Einstein exprime la nouvelle loi de la gravitation universelle.*
- *Dans cette formule, en utilisant la forme simple que Schwarzschild lui a donnée et qui répond aux besoins pratiques de l'astronomie, il existe un certain terme qui intrigue Monsieur Hadamard, du fait que le dénominateur de ce terme peut devenir nul, ceci signifiant que ce terme devient infini et que cette formule devient singulière et, du moins, on peut se demander quel peut bien être cette signification physique et comment cela pourrait-il se produire dans la nature. Ce n'est pas le cas du Soleil mais ce serait peut-être le cas d'une étoile qui pourrait être beaucoup plus massive que lui.*

Narration de Charles Nordmann, (Extraits)

- *Einstein ne cache pas le fait que cette question profonde est quelque chose qu'il trouve très embarrassant et il confirme que, si ce terme peut effectivement devenir nul quelque part dans l'univers, ce serait un désastre inimaginable pour la théorie et qu'il serait difficile de dire a priori ce qui pourrait advenir du point de vue physique car cette formule cesserait d'être valable.*
- *Ce serait une catastrophe qu'Einstein, en plaisantant, appelle la « catastrophe d'Hadamard » et dans ce cas on se demande quels pourraient bien en être les effets physiques.*
- *Un débat animé s'engage et Einstein, qui écoutait silencieusement, indifférent au tumulte, demanda poliment la parole.*
- *Ceci détendit l'atmosphère, et le silence revenu, il ne lui fallut que quelques minutes, pour convaincre les intervenants et réduire les principales objections…*

Einstein au Collège de France, 5 avril 1922

Tradition française oblige, le débat se termine par un banquet!



Banquet à la maison des polytechniciens en l'honneur d'Einstein, lors de sa visite d'avril 1922. (photo droits réservés ESPCI).

Cette photo a fait l'objet d'une « Énigme polytechnicienne » proposée par Pierre Boulesteix (qu'il en soit ici remercié) dans *La Jaune et la Rouge*, n° 631 (2008), où il faisait deviner les autres convives. À la droite de Langevin, Charles Fabry (1867-1945), Charles-Édouard Guillaume (1861-1938 prix Nobel de physique 1920), puis deux personnes non identifiées puis Paul Appell (1855-1930). À la gauche d'Einstein, Louis Lapicque (1866-1952), Marie Curie, une personne non identifiée, Émile Picard (1856-1941). En bas à gauche de la photo, sous un fort éclairage, Émile Borel (1871-1956, gendre d'Appell), et Jean Becquerel (1878-1953, fils d'Henri Becquerel).

ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 1er MAI 1922.

PRÉSIDENCE DE M. ÉMILE BERTIN.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE

MÉCANIQUE. — *La théorie classique et la théorie einsteinienne de la gravitation.* Note (¹) de M. PAUL PAINLEVÉ.

Le ds^2 est alors nécessairement de la forme

$$ds^2 = \frac{dt^2}{U(x_1, x_2, x_3)} - d\sigma^2 \qquad (U > 0), \tag{6}$$

où $d\sigma^2$ est de la forme (3), mais n'est plus euclidien (à 3 variables).

On sait (de par la corrélation entre le principe d'Hamilton et le principe de la moindre action) que les trajectoires de P sont alors données par les géodésiques du ds_1^2 à trois variables $ds_1^2 = (U + h)\,d\sigma^2$, h constante arbitraire, et t par $dt = \frac{U\,d\sigma}{\sqrt{U+h}}$. Les trajectoires de la lumière s'obtiennent en faisant $h = 0$, d'où alors $dt = \sqrt{U}\,d\sigma$.

La forme de Painlevé newtonienne généralisée à la solution de Schwarzschild en relativité générale

- Cette propriété de description par une forme spatiale seulement les géodésiques d'un tel espace-temps, s'appuie sur le fait que l'énergie (associée au temps) est conservée sur les géodésiques.
- La portée de la relativité générale se limite-t-elle aux géodésiques?
- Remarquons qu'un mouvement non géodésique invoque un phénomène non gravitationnel.

La solution de Painlevé ignorée

- On voit que l'enthousiasme des participants a généré une certaine confusion dans ces débats, et que les problèmes sur l'horizon, que la forme de Painlevé permettait de supprimer, n'ont pas été traités en profondeur, mais éludés au motif que la formation d'un horizon n'était pas possible physiquement.
- Cette forme, dont le terme non quadratique implique une orientation de l'espace-temps, nécessaire dans ce type de coordonnées, pour être non singulière sur l'horizon puisque celui-ci se comporte comme une membrane unidirectionnelle (peut être franchi dans le sens entrant mais pas sortant), n'a pas été comprise à l'époque.
- Elle offre pourtant une description naturelle de la solution du champ du corps unique à symétrie sphérique, et en révèle les symétries profondes et certains attributs qu'elle partage avec la mécanique newtonienne sans s'y confondre pour autant. À ce titre, la forme de Painlevé peut être considérée comme une passerelle entre la mécanique classique et la relativité générale. Cette opportunité a été manquée et la forme géniale de Painlevé sera mise aux oubliettes de l'histoire pour 80 ans environ.

Des contributions de haut niveau à l'Académie des Sciences qui seront oubliées !

- A partir de 1921 jusqu'à 1924, un débat, courtois mais âpre, fait rage entre partisans et opposants de la relativité, avec d'un côté Le Roux, défenseur le plus actif de la mécanique classique et de l'autre Brillouin, chef de file des défenseurs de la théorie d'Einstein.
- En marge de ce débat farouche, citons trois contributions magistrales qui ont également sombré dans l'oubli.

Des contributions de haut niveau à l'Académie des Sciences qui seront oubliées !

- Sauger (1922) dérive la solution à partir de la relativité restreinte, l'espace-temps en tout point se déduisant de celui à l'infini par un boost égal à la vitesse newtonienne : ceci a-t-il pu inspirer Painlevé ?
- Cartan établit (1922) les directions principales nulles d' un tel espace-temps, préfigurant la classification de Petrov (1954)-Pirani (1956).
- Chazy établit, en 1922, la solution de Schwarzschild avec constante cosmologique qui sera retrouvée par Lemaître (1932).

Difficultés conceptuelles de la relativité générale

- Le concept intégré d'espace-temps est en totale opposition avec nos acquis d'espace et de temps perçus comme des entités indépendantes.
- Le concept de courbure intrinsèque (qui n'est pas le concept de courbure usuel) de l'espace-temps à quatre dimensions et de l'espace à trois dimensions est difficile à représenter.
- L'absence d'un espace de fond absolu, ne facilite pas la compréhension d'orientation et d'espace en mouvement.

Difficultés conceptuelles de la relativité générale

- Le caractère hyperbolique de l'espace temps est conceptuellement difficile à se représenter et par ailleurs implique qu'on raisonne en général sur des diagrammes géométriquement faux.
- Le caractère physique d'une représentation géométrique de la gravitation, alors propriété de l'espace-temps, n'est pas admis par tous.
- Les scientifiques ont peut être été induits en erreur par la symétrie de l'équation d'Einstein pensant qu'elle impliquait la « réversibilité » invoquée par Painlevé) !

La difficile émergence des nouvelles idées

- L'exemple de Painlevé montre comment une solution géniale, peut résulter d'une mauvaise interprétation.
- Cela souligne le phénomène de l'émergence des théories de rupture, qui ne peuvent pas naturellement découler des existantes. Il ne faut pas alors s'étonner que leurs auteurs puissent être des scientifiques « hors de leur domaine d'excellence » .
- L'histoire de la relativité montre que les « découvreurs » n'ont pas toujours eu conscience de ce qu'ils avaient trouvé et que, au cas où, ils n'en ont que rarement mesuré l'importance et toute la portée.
- A partir de ce qui semble être un détail, (généralisation de la géodésique minkowskienne), Einstein a construit, sur cet argument à *caractère phénoménologique*, un monument. Cela montre la puissance heuristique de certains arguments!

Au delà des propos contestés de Painlevé

- L'ostracisme dont Painlevé avait été victime repose sur un malentendu. Il paraît totalement invraisemblable qu'il ait pu se perpétuer tant il était simple de s'expliquer.
- Le contexte de « frilosité » des tenants de la nouvelle théorie encore très contestée et en proie à des difficultés internes (problème des « potentiels infinis sur l'horizon ») ne prêtait pas à une réflexion apaisée.
- Cela a conduit à un désastre scientifique pour la communauté internationale et pire pour la communauté scientifique française qui s'était brillamment illustrée à ce propos et qui sera la grande absente par la suite !
- Quelles leçons en tirer pour améliorer la pérennité de tels travaux ?

Conclusion : Painlevé un cas exemplaire montrant la difficile émergence de nouveaux paradigmes

- Il est surprenant que ce soit Painlevé, un scientifique éduqué dans un pur formalisme newtonien, qui ouvre un débat innovant sur le fondement et les implications épistémologiques de la relativité générale, dont les bases étaient encore chancelantes à l'époque.
- On a dit que Painlevé était un piètre relativiste. Sa contribution révèle effectivement une incompréhension profonde de cette théorie.
- Malgré cela, il a contribué magistralement à sa consolidation en proposant une forme de métrique si innovante qu'elle n'a pas été comprise par les scientifiques de l'époque, y compris Einstein.
- Est-ce une heureuse coïncidence ou est-ce le fruit d'une réflexion formelle d'un mathématicien, libre de connaissances établies sur la théorie, qui lui a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives balayant certains concepts considérés (indûment) comme établis.