

Les trous noirs

Le trou noir de Laplace

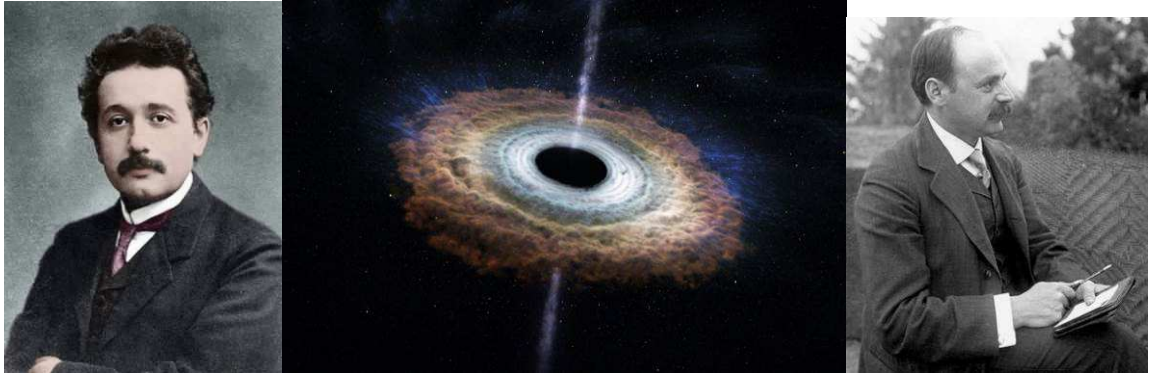
La première notion de *trou noir*, due à Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), est basée sur un raisonnement très simple à partir de la notion de vitesse de libération, c'est-à-dire la vitesse minimum qu'il faut communiquer à une masse pour qu'elle échappe à l'attraction gravitationnelle d'un astre. Cette vitesse croît avec la masse de l'astre et diminue avec son rayon. Dans son livre « *Exposition du système du monde* », paru en 1796, Laplace écrit : « *Un astre lumineux, de la même densité que la terre et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le soleil, ne permettrait, à aucun de ses rayons de venir à nous. Il est dès lors possible que les plus grands corps lumineux de l'Univers puissent, par cette cause être invisibles* ».



Pour ceux qu'une équation ne rebute pas, v , la vitesse de libération, est donnée par : $v^2 = 2 GM / R$, où G est la constante de gravitation universelle, M , la masse et R le rayon du corps céleste. Cette équation était bien connue du temps de Laplace. Si on l'applique à la terre, on trouve une vitesse de libération de 11,2 km/s tandis que si on l'applique au soleil, on trouve 619,0 km/s. Si on l'applique à l'objet imaginé par Laplace, un astre solide, de même densité que la terre, mais 250 fois plus grand que le soleil (soit 27300 fois le diamètre de la terre, donc $2,034 \times 10^{13}$ fois sa masse), on trouve une vitesse de libération égale à 306 000 km/s, soit à peu près la vitesse de la lumière, que l'on savait être voisine de 300 000 km/s au début du XIX^e siècle [Mes excuses à Laplace pour avoir eu l'outrecuidance de vérifier ses calculs, qui se sont révélés exacts]. Actuellement, on sait, grâce à Einstein, qu'un objet aussi massif ne peut pas être stable, mais comme Laplace ne connaissait pas Einstein, il peut être excusé de l'avoir imaginé. Naturellement, si un tel objet existait, il nous serait totalement invisible, puisqu'il ne pourrait pas rayonner ! Bon, pour être honnête, disons qu'un Anglais, John Mitchell avait aussi évoqué cette possibilité, indépendamment de Laplace. Aujourd'hui, avec la même formule, on calcule que si la masse du soleil était rassemblée dans un rayon de 3 km, le soleil serait un trou noir de Laplace.

Le trou noir d'Einstein

Si aucune lumière ne peut s'échapper du trou noir de Laplace, rien n'interdit à un objet d'échapper à l'attraction gravitationnelle d'un tel astre. [Après tout, une masse de 1 kg sur la terre ne pèserait « que » 2×10^{17} kg sur l'astre de Laplace, ce qui n'est jamais que la masse de *Desdémone*, petit satellite d'*Uranus*, de 64 km de diamètre]. Il suffit en effet d'appliquer une poussée supérieure à 2×10^{17} kg pour extraire cette masse de l'attraction de l'astre. De même, il n'est pas nécessaire, sur la terre, de lancer une fusée à une vitesse supérieure à 11,2 km/s pour la faire échapper à l'attraction terrestre. Une poussée continue, supérieure à son poids suffit. En revanche, si l'on veut lancer une fusée avec un canon (comme l'a imaginé Jules Verne dans son roman « *De la terre à la lune* »), il faut lui communiquer une vitesse supérieure à 11,2 km/s pour la voir échapper à l'attraction terrestre. Cela impliquerait que les astronautes subissent une accélération de 1000 g pendant leur traversée du canon, accélération à laquelle ils ne résisteraient pas !



Un *trou noir* déduit de calculs effectués dans le cadre de la *relativité générale*, ne ressemble pas à celui de *Laplace*. Si, en comprimant très fort [vraiment très fort] un astre de manière à ce que la vitesse de libération à sa surface atteigne la vitesse de la lumière, on atteindrait le stade où les forces gravitationnelles l'emporteraient sur toutes les autres forces naturelles et la compression de l'objet se poursuivrait indéfiniment. On obtiendrait alors une *singularité gravitationnelle*, c'est-à-dire un point de l'espace dans lequel se concentre toute la masse de l'astre. Autour de ce point se situe un *horizon des évènements*. À la surface de cet horizon, la vitesse de libération engendrée par l'attraction gravitationnelle de la singularité est égale à la vitesse de la lumière. Celui qui pénètre à l'intérieur de l'horizon peut ne pas s'en apercevoir (surtout si le trou noir est massif), mais une fois qu'il y a pénétré, il ne peut plus en sortir et s'écrase inéluctablement contre la singularité. À partir des travaux d'*Einstein*, *Karl Schwarzschild* a développé le concept, et depuis, on a appelé *Rayon de Schwarzschild* le rayon de la sphère à l'intérieur de laquelle rien ne peut sortir. [*Schwarzschild* développa ses calculs début 1916 et mourut en Juin 1916 d'une maladie contractée sur le front russe où il officiait en tant qu'artilleur]. *Einstein*, qui présenta les travaux de *Schwarzschild* à l'académie des sciences de Prusse admettait l'existence théorique des trous noirs [issue de ses équations : il ne pouvait tout de même pas renier ses enfants !] mais ne croyait pas en leur existence pratique, tant la singularité gravitationnelle lui semblait irréaliste.

Existence des trous noirs

Durant 50 ans, le *trou noir* a été réduit au niveau de monstre de la physique théorique, n'existant guère que dans la tête de savants fous, tout juste bons à exciter l'imagination des auteurs de science-fiction, mais, petit à petit, le doute s'est installé : et si jamais les *trous noirs* existaient vraiment ? Les travaux fondamentaux remontent aux années 1960, précédant de peu les premières observations solides en faveur de leur existence. Le mot est d'abord apparu dans les années 1964 (auparavant, on ne parlait que de *singularités*), et les observations astronomiques actuelles ne laissent que très peu de place au doute.

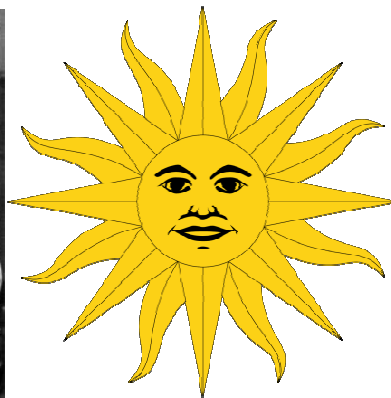
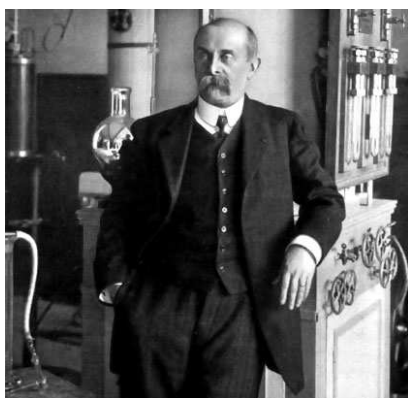
Si un *trou noir* isolé est par nature invisible, il n'en a pas moins une influence considérable sur son environnement, influence qui est bien visible : la matière qui tombe à l'intérieur d'un *trou noir* est chauffée à des millions de degrés et émet des rayons X. Toutes les galaxies ont un trou noir central dont la masse est comprise entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires. Notre galaxie ne comporte qu'un « petit » trou noir central dont la masse n'est que de 3,6 millions de masses solaires (excusez du peu !). Le trou noir galactique est facilement (c'est vite dit !) repérable en observant le mouvement des étoiles qui tournent autour. La simple application des lois de *Képler* montre que l'objet autour duquel tournent ces étoiles ne peut être qu'un objet massif compris dans un tout petit volume.

C'est ainsi que le trou noir galactique a un *rayon de Schwarzschild* de 11 millions de km (18 fois le rayon du soleil). Un trou noir mille fois plus massif aurait un *rayon de Schwarzschild* de 11 milliards de km (Une sphère de 11 milliard de km, centrée sur le soleil irait au-delà de la ceinture de *Kuiper*, dont les limites sont à 9 milliards de km)

Un trou noir est de plus un objet dont la description est extrêmement simple : il ne suffit que de trois paramètres pour le décrire alors que la description d'une planète nécessite des centaines de paramètres. Ces paramètres sont la masse, le moment cinétique (le trou noir tourne-t-il ou ne tourne-t-il pas ? S'il tourne, c'est un trou noir de *Kerr* ; s'il ne tourne pas, c'est un trou noir de *Schwarzschild*) et enfin sa charge électrique. Et encore ! Si un trou noir possédait une charge électrique, il se déchargerait très rapidement, ce qui fait qu'un trou noir chargé est un objet très théorique ! Bref, le *trou noir* est un bonheur pour les astrophysiciens, qui décrivent cette simplicité par en disant joliment qu'*un trou noir n'a pas de cheveux* !

Vers le trou noir : l'étape naine blanche

Le trou noir provient de l'effondrement du cœur d'une étoile arrivée en fin de vie. C'est bien sûr exact, mais c'est tout de même un peu court ! C'est un peu comme si on résumait la vie d'un illustre personnage par cette épitaphe : « Il naquit, il vécut, il mourut ! ». Décrivons d'abord le comportement du soleil, que nous connaissons bien : Le soleil est une boule de gaz (ou, pour être plus précis, une boule de *plasma*, c'est-à-dire de gaz ionisé), caractérisée à sa surface par une pression de 1 atmosphère, une température de 5500°C (Tiens ... Merci *d'Arsonval* !) et une densité voisine de celle de l'air, de l'ordre de 1 mg/cm³. Lorsque l'on pénètre à l'intérieur du soleil, ces chiffres augmentent, mais restent tout de même accessibles à l'esprit humain et l'état dans lequel se trouve le soleil ne change pas. Au centre du soleil, la température atteint 15 millions de degrés, la pression 230 milliards d'atmosphères et la densité 150 g/cm³, ce qui équivaut à environ 8 fois celle du plomb. Évidemment, vous allez me dire que l'on ne rencontre pas de telles grandeurs au coin d'un bois, mais je vous dirai que ces chiffres s'obtiennent grâce à des calculs accessibles à un étudiant de licence très moyen (faut quand même pas qu'il soit nul !) en utilisant entre autres la loi de *Gay-Lussac* (saluons au passage un autre savant limousin !) relatifs aux gaz parfaits (eh oui, le soleil est un gaz parfait). Le soleil lié à deux illustres limousins, quel bonheur !

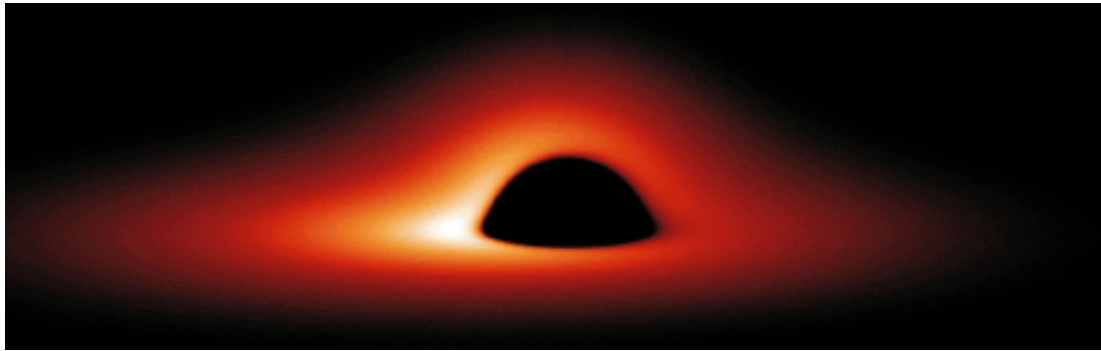


Donc, le soleil se présente comme la matière que nous rencontrons sur la terre, c'est-à-dire, comme quelque chose d'essentiellement rempli de vide. Un atome a 0,1 nanomètre de diamètre (10^{-10} m) tandis que le noyau, qui contient l'essentiel de la masse de l'atome a un diamètre de l'ordre du femtomètre (10^{-15} m). Tout ce joli monde tient en équilibre parce que l'agitation thermique entretenue par les réactions atomiques contrebalance l'influence de la pesanteur. Lorsque le soleil aura épuisé son combustible, il ne fournira plus l'agitation thermique nécessaire pour contrebalancer l'effet de la pesanteur. Le soleil dispersera son enveloppe donnant lieu à une *supernova* et son cœur s'effondrera sous la seule influence de la gravitation. Cet effondrement s'arrêtera lorsqu'une autre force, prévue par la mécanique quantique viendra contrebalancer les forces gravitationnelles. Cette force a pour nom la *dégénérescence des électrons* et, lorsque les deux forces s'équilibreront le soleil aura atteint l'état de *naine blanche*. Une naine *blanche* de la masse du soleil a un rayon de l'ordre de grandeur de celui de la terre, une température de cœur comprise entre 5 et 20 millions de degrés et une densité de l'ordre de la tonne par cm^3 [Il est facile de s'en convaincre : le soleil et la terre ont à peu près la même densité, de l'ordre du g/cm^3 . Comme le soleil est un million de fois plus volumineux que la terre, si le soleil était compressé dans le volume de la terre sa densité serait un million de fois plus grande, de l'ordre de la tonne par cm^3 !] Malgré cette densité (le poids d'une voiture dans un volume de 1 cm^3), il y a encore beaucoup de vide à l'intérieur d'une naine blanche et les noyaux atomiques ainsi que les électrons peuvent se balader librement. Les étoiles dont le cœur ne dépasse pas 1,4 masse solaire finissent leur carrière en naines blanches.

On arrive au trou noir

Oui, mais si le cœur de l'étoile qui s'effondre suite à l'épuisement de son combustible a une masse qui dépasse 1,4 masse solaires, que se passe-t-il ? La *force de dégénérescence des électrons* n'est alors plus capable de contrebalancer la force de gravitation et l'effondrement continue. Mais il ne se poursuit pas indéfiniment, car apparaît une autre force, toujours prévue par la mécanique quantique, force que l'on appelle la *force de dégénérescence des neutrons*. Cette dernière parvient à équilibrer la force de pesanteur et l'effondrement de l'étoile s'arrête. L'étoile atteint alors le stade d'*étoile à neutrons*. Le rayon d'une étoile à neutrons est d'autant plus petit que l'étoile est plus lourde : il varie de 16 km pour une étoile de 1 masse solaire à 11 km pour une étoile de 3 masses solaires. Cela correspond à une densité de 10^{21} à $10^{22} \text{ kg}/\text{cm}^3$, (1 cm^3 de matière prélevé à la surface d'un tel astre pèserait non pas le poids d'une voiture, mais celui de la lune). Alors là, du coup, on commence à excéder la densité nucléaire. L'étoile n'est composée que de neutrons et il n'y a plus beaucoup de vide entre les neutrons qui commencent à se sentir serrés comme dans une boîte de sardines ! Comme je viens de dire que le rayon de l'étoile diminuait avec sa masse, il doit bien arriver un moment où ce rayon devient nul. Ce moment se produit, d'après les calculs, vers 3,2 masses solaires. D'ailleurs, si nous utilisons la formule ci-dessus pour calculer la vitesse de libération à la surface d'une étoile à neutrons, nous trouverions 90 % de la vitesse de la lumière pour une étoile de 3 masses solaires. Dans la pratique, les étoiles à neutrons connues ont une masse comprise entre 1 et 3 masses solaires. Nous ne sommes plus très loin du trou noir.

Et si la masse du cœur qui s'effondre dépasse 3 masses solaires ? Alors, la *force de dégénérescence des neutrons* n'est plus capable de s'opposer à la gravitation et l'effondrement de poursuit indéfiniment jusqu'à ce que l'on atteigne la singularité gravitationnelle. On atteint le stade du trou noir.



Voici la photo la plus réaliste possible de ce que l'on voit lorsque l'on s'approche d'un trou noir. Il est entouré d'un disque d'accrétion (s'il était isolé, on ne verrait rien !) qui tourne dans le sens contraire de celui des aiguilles d'une montre (ce que les matheux traduisent par : le sens trigonométrique). Il semble plus éclairé sur sa gauche à cause de l'effet *Doppler* : les particules s'approchent de l'observateur (les longueurs d'onde qu'elles émettent sont décalées vers le bleu) tandis que celles situées sur la droite s'en éloignent (les longueurs d'onde sont décalées vers le rouge). L'observateur peut également voir les particules qui se trouvent derrière le trou noir en raison de la courbure des rayons lumineux provoquée par la masse du trou noir. Si l'on se rapprochait de *Saturne* et de son anneau, l'observateur ne pourrait pas voir la partie de l'anneau située derrière *Saturne*, car sa masse est bien trop faible pour courber les rayons lumineux d'une manière sensible.

À l'intérieur d'un trou noir

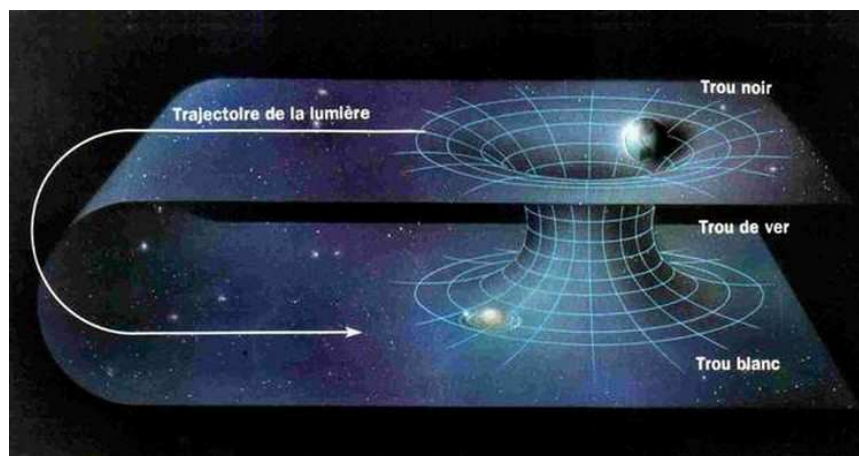
Maintenant que se passe-t-il si une fusée traverse l'*horizon des évènements* ? Cela dépend de la taille du trou noir. Pour un trou noir stellaire, l'effet de *marée* (c'est-à-dire la différence entre les forces gravitationnelles exercées sur le haut et sur le bas de la fusée) est telle que la fusée (et leurs occupants) sera « spaghettifiée » bien avant d'atteindre le trou noir. Une fois dans cet état, il sera difficile aux astronautes de revenir en arrière. En revanche, si le trou noir est de taille galactique, l'effet de *marée* est insensible et les astronautes peuvent franchir l'*horizon des évènements* sans s'en rendre compte. Une fois dans le trou noir, ils ne pourront bien sûr plus sortir et il leur faudra le même temps que celui parcouru par la lumière avant d'atteindre la *singularité gravitationnelle*. Ils auront intérêt à couper les moteurs dès leur entrée dans le trou noir parce que, dans ces conditions, le temps avant l'écrasement final leur paraîtra plus long. Encore une des bizarreries de la *relativité générale*.

En revanche, si une étoile s'approche d'un trou noir, il faut que le trou noir pèse plus de 3 millions de masses solaires (estimation de *Jean-Pierre Luminet*) pour que l'effet de marée ne se fasse pas trop sentir entre les deux extrémités de l'étoile. Dans ce cas, l'étoile va tourner autour de trou noir, s'en rapprocher, freinée par les particules du disque d'accrétion, puis disparaître derrière le trou noir. Ce processus peut prendre plusieurs millions d'années. Si le trou noir a une masse inférieure à 3 millions de masses solaires, les forces de marée seront telles que l'étoile sera déchiquetée avant d'atteindre le trou noir. Les résidus de l'étoile tourneront avec le disque d'accrétion avant de tomber dans le trou noir.

Que se passe-t-il pour un observateur extérieur ? Lorsqu'un objet s'approche d'un trou noir, la vitesse de libération d'approche de la vitesse de la lumière aussi la lumière met-elle de plus en plus de temps pour atteindre l'observateur. De son point de vue, l'objet s'approche de plus en plus lentement du trou noir, devient de moins en moins visible et ne disparaît définitivement à ses yeux qu'au bout d'un temps infini. Donc, pour un observateur extérieur, plus aucune information ne peut provenir de l'intérieur d'un trou noir.

Et maintenant, spéculons !

On a beaucoup parlé de trous noirs, et maintenant on va rentrer dans le domaine de la spéculation qui fait le bonheur des auteurs de science fiction. Qu'est ce qu'un *trou blanc* ? Eh bien, un trou blanc, c'est l'inverse d'un trou noir ! Vous n'avez pas compris, je vais vous expliquer : un *trou blanc*, c'est un point de l'espace qui ne peut rien avaler. Il ne peut que sortir de la matière d'un trou blanc. Bon, admettons, mais on ne voit pas très bien d'où peut sortir la matière recrachée par un trou blanc. Ben voyons : d'un trou noir. Par où passe-t-elle ? Par un *trou de ver* et la boucle est bouclée ! Là, on rentre dans le pas très clair. Comme rien ne peut sortir d'un trou noir et que rien ne peut rentrer dans un trou blanc, on ne voit pas très bien à quoi peut servir un *trou de ver* ! Mais enfin, ne chipotons pas sur si peu, car la réponse est toute trouvée : un trou de ver sert à voyager d'un bout à l'autre de l'univers en faisant abstraction de la vitesse de la lumière. Comment ? Mais bien sûr, en passant par la 4^e dimension. Comme elle est invisible, cela arrange bien les choses ! Bon, les scientifiques sont bien sûr un peu coincés devant ce tour de passe-passe, mais cela n'arrête pas les auteurs de science-fiction, qui, charmants, ont au moins l'intérêt de nous faire rêver. Vous me direz que c'est de l'enfumage, mais je vous répondrai que vous en demandez beaucoup d'autant plus qu'il n'est pas interdit de rêver et que la figure ci-dessous explique tout, surtout si vous êtes prêt à tout avaler !



Pierre Perrot
perrot9@gmail.com

.....