

Mardi 22 janvier 2019

Texte de la communication de **Joseph REMILLIEUX**, membre titulaire émérite

LES ÉTOILES ONT-ELLES UN BRILLANT AVENIR ? **Ou l'art de recycler les déchets cosmiques**

Introduction

Cette communication a la prétention d'explorer le futur astral et énergétique du Cosmos, sur une échelle de temps inhabituellement longue, puisqu'à la fin de l'exposé nous évoquerons des temps où notre Univers aura atteint l'âge canonique de 10^{100} années ! Prétention probablement déraisonnable, si l'on en croit *Lao-Tseu* qui, au VI^e siècle, déclarait sagement que l'on « *peut faire des prévisions sur tout ... sauf sur l'avenir* ».

On découvrira qu'au cours de son évolution, le Cosmos sera amené à exploiter toutes ses sources potentielles d'énergies : d'abord son énergie nucléaire, via la fusion thermonucléaire de deux noyaux, puis son énergie gravitationnelle, via la coalescence de deux astres, un évènement émetteur d'ondes gravitationnelles et enfin l'énergie de son *vide quantique*, via le rayonnement de ses trous noirs. Ces cascades d'évènements permettent le recyclage intégral de tous les déchets que le Cosmos accumule au cours des temps.

Après un rapide état des lieux des outils actuels de l'astrophysique, on décrira l'évolution des étoiles, depuis leur naissance jusqu'à leur mort. On présentera enfin un scénario d'évolution de l'ensemble de l'Univers sous forme d'un drame cosmique, en trois actes, qui met en scène trois types d'acteurs successifs : d'abord le *Fer*, avec une extension de l'époque actuelle qui devrait perdurer encore 10^{12} ans ; puis les *Dégénérés*, une nouvelle époque cosmique qui devrait durer environ 10^{33} ans ; et enfin les *Trous Noirs*, en un dernier acte qui pourrait s'étendre sur des temps de l'ordre de 10^{100} ans.

Les bases physiques actuelles des prévisions cosmologiques

Du point de vue observationnel, on doit se contenter en astrophysique de la détection, sur Terre et dans le proche espace, de toutes les composantes de « *cette obscure clarté qui tombe des étoiles* », comme le disait si bien le Grand Corneille dans *Le Cid*.

Du point de vue théorique, on dispose, depuis le siècle dernier, d'une merveilleuse boîte à outils : la *Relativité Générale* d'Albert Einstein (1915) qui décrit les interactions gravitationnelles entre les astres et la *Théorie Quantique des Champs* (1970) qui est à la base du *Modèle Standard* de la physique actuelle.

En ce qui concerne la Relativité Générale, la base est la célèbre relation d'Einstein ($\mathbf{G}_{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 \cdot \mathbf{T}_{\mu\nu}$), une relation tensorielle qui permet de relier la courbure locale $\mathbf{G}_{\mu\nu}$ de l'espace-temps à la présence de masses et d'énergies $\mathbf{T}_{\mu\nu}$ dans l'environnement (les constantes G et c qui apparaissent dans cette relation sont, respectivement, la constante gravitationnelle et la vitesse de la lumière).

Quant à la Théorie Quantique des Champs, elle permet de décrire les interactions électromagnétiques, faibles et fortes qui interviennent aux échelles atomiques et subatomiques. Il y a d'une part l'*Electro-Dynamique-Quantique*, dédiée à la description des atomes et des rayonnements et d'autre part la *Chromodynamique-Quantique* dédiée à la description des quarks et gluons. La performance du *Modèle Standard* qui en découle, dans l'interprétation et la prédiction des expériences réalisées ces dernières décennies, est stupéfiante. C'est dans le cadre de ce modèle

que toutes les estimations numériques citées dans cet exposé ont été effectuées, la plupart d'entre elles proviennent des travaux de *Fred Adams*¹ de l'Université du Michigan.

Néanmoins, en ce début du XXI^e, toute l'attention des physiciens est attirée vers ce que pourrait être une nouvelle théorie, « *au-delà du Modèle Standard* », capable d'unifier le *Quantique* et la *Gravitation*. Cela permettrait notamment de décrire deux états fondamentaux dans la compréhension de notre Univers et pour lesquels le Modèle Standard est par nature inopérant : le *Big Bang* et l'intérieur des *trous noirs*.

Inventaire des principaux objets célestes actuellement visibles ou invisibles

A l'œil nu, ou même avec des instruments d'optiques très modestes, on peut dénombrer dans le ciel nocturne, en l'absence de nuages et de pollution lumineuse, une multitude d'objets facilement identifiables à des étoiles, ou à des planètes avec leurs satellites (Jupiter) ou leurs anneaux (Saturne). En ce qui concerne les étoiles, le développement des télescopes permit aux astronomes de les classer à partir de leur rayonnement, en étoiles *naines* (brunes, rouges ou blanches), étoiles *géantes* et étoiles *supergéantes*. On observa plus tard que ces objets se regroupaient en grandes structures, les *galaxies* et en immenses superstructures, les *amas* et *superamas* de galaxies.

Les astronomes disposent actuellement de moyens d'observation de plus en plus sophistiqués et diversifiés, en particulier sur toute la gamme du spectre électromagnétique : des ondes radio aux rayons gammas, en passant par le visible. Tout récemment ont été inaugurées deux nouvelles astronomies : celle par *neutrinos* et celle par *ondes gravitationnelles*. Il y a cependant aujourd'hui des matières et objets célestes qui restent plus ou moins invisibles aux observations directes, en particulier la *matière noire* et les *trous noirs*.

La matière noire, que l'on suspecte former des halos autour des galaxies, aurait une masse totale bien supérieure à celle de la matière visible. Elle n'a pas encore été observée et la nature des particules qui pourraient la composer reste encore inconnue. Dans le cadre de cet exposé, l'avenir à long terme de cette matière noire dépendra en particulier de sa capacité ou non à s'annihiler par des réactions d'interaction faible.

Quant aux trous noirs, ces objets étaient longtemps restés hypothétiques, provenant d'une solution mathématique de la relation d'Einstein qui avait été trouvée dès 1915 par *Karl Schwarzschild* (1873-1916). Ces objets mathématiques viennent d'occuper le devant de la scène scientifique en confirmant qu'ils étaient bien des astres réels : d'abord par la détection, en 2015, de trains d'*ondes gravitationnelles* émis par la coalescence de deux trous noirs², puis, plus récemment encore, en 2019, en délivrant une image optique du proche environnement d'un trou noir³. Aujourd'hui les astrophysiciens reconnaissent deux classes de trous noirs. D'une part, les *trous noirs stellaires*, issus de l'explosion de supernovæ, ils ont des masses modestes, de l'ordre de 10 à 100 fois la masse du Soleil (notée M_{\odot}) et ont été détectés par les ondes gravitationnelles émises au cours de leur coalescence². D'autre part, les *trous noirs super-massifs*, tapis aux centres des galaxies et d'origine encore inconnue, ils sont dotés de masses énormes : de 10^6 à $10^{11} M_{\odot}$. Ils sont désormais observables, bien que noirs, par la récente méthode photographique citée plus haut³.

Il ne faut pas oublier, par ailleurs, que sont aujourd'hui invisibles tous les objets cosmiques qui ont déjà franchi l'*horizon cosmique* de notre Univers en expansion. En effet, la lumière que pourrait émettre ces objets, étant de vitesse finie, ne pourra plus jamais nous atteindre. Rappelons que l'expansion de l'univers est aujourd'hui en phase d'accélération, sous l'effet d'une **énergie sombre** ... une grandeur encore bien mystérieuse. Quoi qu'il en soit, on peut prévoir que d'ici seulement 10 à 20 milliards d'années, sous le seul effet de l'expansion de l'Univers, ne resteront visibles dans le ciel que les étoiles de notre *Groupe Local* de galaxies : toutes les autres seront au-delà de l'horizon cosmique de cette époque.

Naissance et fin de vie des étoiles

À quelque époque que ce soit, la formation d'une étoile a toujours lieu par un processus d'accrétion, au sein d'un nuage dense d'Hydrogène moléculaire. Nous allons voir que c'est la valeur de la masse à la naissance de l'étoile qui va entièrement conditionner son espérance de vie.

Dans environ 25% des cas, les étoiles naissent très chétives, par rapport à la masse M_0 de notre Soleil : leurs masses M sont inférieures à $0,07 M_0$. La température atteinte en leur cœur par compression gravitationnelle, reste en dessous du seuil d'amorçage de la *fusion thermonucléaire* des noyaux d'Hydrogène. Ces avortons d'étoiles resteront des astres éteints, appelés **naines brunes**. On reparlera pourtant d'eux plus loin, car ce sont des réservoirs d'hydrogène natif que le Cosmos réussira plus tard à exploiter. Il faut noter que la compression gravitationnelle de l'Hydrogène de ces naines brunes s'arrête dès qu'elles atteignent un rayon de l'ordre de celui de la planète Jupiter. En effet, à ce stade, les forces classiques compressives de la gravitation sont contrecarrées par des forces quantiques, dites de *dégénérescence* qui apparaissent au sein du gaz d'électrons qui s'est formé au cœur de l'étoile : ce gaz d'électrons devient incompressible, en raison du *principe d'exclusion de Pauli*, un principe traduisant l'impossibilité que, dans un objet donné, deux électrons occupent le même état quantique.

En fait, dans la plupart des cas, les étoiles naissent moins chétives, leur masse étant comprise entre $0,07 M_0$ et $0,4 M_0$, on les appelle les **naines rouges**. Elles ont alors toutes un brillant avenir, car la température de leur cœur va permettre l'amorçage de la fusion thermonucléaire de l'Hydrogène. Elles brilleront cependant beaucoup plus modestement que notre Soleil, car la puissance rayonnée par une étoile en fusion nucléaire varie comme le cube de sa masse. Leur masse est en revanche assez faible pour que s'établisse un fort courant convectif qui, en brassant le gaz, alimente le cœur de l'étoile et lui permet de brûler l'intégralité de son carburant (nous verrons plus loin que le Soleil, lui, ne parviendra à brûler que 10% de son Hydrogène). La caractéristique principale de la fusion de l'Hydrogène au cœur d'une étoile est son extrême lenteur (au contraire de la combustion explosive d'une *bombe H*) : il faudra typiquement de 10 à 1000 milliards d'années pour qu'une naine rouge épuise l'intégralité de son carburant Hydrogène. La raison de cette lenteur est que le principe d'exclusion de Pauli (encore lui) interdit la fusion directe de deux particules identiques (ici deux protons). Il faut ainsi attendre l'intervention de réactions d'*interactions faibles* (« faibles » donc très lentes) pour créer, à partir de deux protons (p), un noyau d'Hydrogène lourd, appelé deuton (d) : $p + p \rightarrow d + e^+ + \text{neutrino}$. Ensuite, une cascade de réactions d'*interactions fortes* (« fortes » donc très rapides) pourront réaliser la fusion des noyaux d'Hydrogène en Hélium léger (^3He) par des réactions de fusion (d,p) $\rightarrow ^3\text{He}$, et pour, finalement, produire de l'Hélium lourd (^4He), par la réaction de fusion ($^3\text{He}, ^3\text{He}$) $\rightarrow ^4\text{He}$. Après avoir brûlé tout son Hydrogène, la naine rouge s'effondrera, car la gravitation ne sera plus contrecarrée par les forces répulsives dues à l'énergie de fusion. Le résidu d'étoile formé, appelé **naine blanche**, ne sera cependant pas assez massif pour que la température au sein de son cœur effondré atteigne la température de fusion des « cendres » des fusions précédentes (l'Hélium).

Il y a aussi le cas, assez rare, des étoiles dont la masse à la naissance est de l'ordre de celle du Soleil (de masse $M_0 = 2 \cdot 10^{30}$ Kg, soit 10^{57} noyaux d'Hydrogène). Dans ce cas, l'étoile est trop massive pour que les courants de convection parviennent à alimenter correctement le cœur à partir des couches de gaz périphériques. D'où un épuisement précoce du combustible, alors qu'il reste encore près de 90% de la masse initiale d'Hydrogène disponible dans les couches périphériques. L'étoile amorcera dès lors sa transition vers l'état de **géante rouge**, avec une forte augmentation du diamètre de ses couches extérieures. Le Soleil, en particulier, va absorber ses plus proches planètes : Mercure et Vénus. Il y aura simultanément une forte perte de masse, due à l'émission de vents solaires très violents. Ainsi, dans environ 10 milliards d'années, le Soleil s'effondrera en une nébuleuse planétaire (éjection de l'enveloppe) et finalement deviendra une *naine blanche* qui sera environ un million de fois plus dense que le Soleil actuel.

Il y a, enfin, le cas des étoiles qui naissent beaucoup plus massives que le Soleil. Ces très grosses étoiles, atteignent des températures de cœur beaucoup plus élevées que celles des naines rouges et du Soleil. Elles auront ainsi la capacité de se ranimer, plutôt que de s'éteindre, après que

tout l'Hydrogène de leur cœur aura été brûlé. En effet, leur température de cœur, après effondrement, excèdera le seuil d'amorçage de la fusion des noyaux d'Hélium qui étaient les cendres de la première étape. A la fin de cette étape de fusion de l'Hélium en noyaux de Béryllium, le même scénario se reproduira avec la fusion des noyaux des nouvelles cendres (Béryllium). Cette *nucléosynthèse* au cœur de l'étoile va ensuite se poursuivre par paliers successifs... jusqu'à ce que la cendre produite soit du *Fer*. En effet, au-delà du Fer, la fusion nucléaire ne produirait plus aucune énergie, elle en consommerait. L'étoile devient alors une **supergéante rouge**, dont l'effondrement est limité par des forces quantiques de dégénérescence, déjà rencontrées dans le cas des électrons, mais elles s'exercent ici entre les *neutrons* qui sont apparus dans le cœur surcomprimé, grâce à la réaction : $\text{proton} + e^- \rightarrow \text{neutron} + \text{neutrino}$. Le résultat de cet effondrement est un astre surcomprimé et instable, une **supernova**, qui va immédiatement exploser en **trous noirs** et/ou **étoiles à neutrons**. Les étoiles à neutrons sont de très petits astres, leur rayon n'excède pas quelques dizaines de Km, assez peu massifs, leurs masses sont comprises entre 1,4 M_{\odot} et 3,2 M_{\odot} . Ils sont tellement comprimés qu'en leur sein les protons sont majoritairement transformés en neutrons. On pense que les étoiles à neutrons sont en fait constituées d'une croûte solide, de seulement quelques Km d'épaisseur, enfermant un cœur liquide de matière nucléaire très exotique, encore largement inconnue : sans doute un mélange de neutrons et de particules fondamentales.

Histoires de couples, entre étoiles et entre galaxies

Les astronomes ont depuis longtemps constaté que, hormis notre Soleil, la plupart des astres ont une vie de couple, on parle alors d'**étoiles binaires**, et que ces couples ont un destin commun. La formation des couples intervient soit aux lieux de naissances proches des étoiles, en des zones particulièrement denses du nuage moléculaire d'Hydrogène, soit, plus tard, aux sites d'explosions de supernovæ, où naissent étoiles à neutrons et trous noirs. Il se peut aussi que certains couples d'étoiles se forment au hasard de collisions interstellaires.

Quelles que soient leurs origines, les astres de ces couples orbitent plus ou moins rapidement l'un autour de l'autre sous l'effet de la gravitation. L'issue de cette danse orbitale, dont le tempo s'accélère avec le temps, est, *in fine*, la **coalescence** du binôme. L'avenir qui était promis à chaque partenaire du couple pris isolément est évidemment différent de l'avenir de l'étoile née de la fusion. Ces catastrophes cosmiques que sont les coalescences d'étoiles ont été remarquablement observées depuis 2015 par la détection des ondes gravitationnelles qu'elles émettent. À ce jour, dix fusions de trous noirs et une fusion d'étoiles à neutrons ont été rapportées par la collaboration LIGO-VIRGO⁴.

À une bien plus large échelle de distances, les astronomes ont aussi observé que la dynamique des galaxies d'étoiles révèle l'existence de **couples intergalactiques**. L'issue de l'attraction gravitationnelle entre les partenaires du couple est, dans ce cas aussi, la coalescence en une nouvelle galaxie. Cet événement cosmique est moins violent que celui de la coalescence de deux astres. Cependant la galaxie fusionnée aura une structure très différente de chacune des galaxies avant fusion. Par ailleurs le destin individuel des étoiles au sein des galaxies concernées, peut être fortement perturbé par cette coalescence. Par exemple, dans notre proche environnement, il est prévu que, dans environ 15 milliards d'années, notre galaxie, la *Voie Lactée*, fusionne avec sa plus proche voisine, *Andromède*. Pendant le million d'années que devrait durer cette collision, il est prévu que la Voie Lactée devienne deux fois plus lumineuse qu'avant la collision. Quant à notre Soleil, il devrait, au cours de la fusion, être éjecté très au loin de son site galactique actuel. La galaxie fusionnée aura par ailleurs perdu la subtile structure spiralée des deux galaxies d'origine.

Remarquons enfin que si l'expansion de l'Univers et l'accélération de cette expansion n'affecte pratiquement pas la vie sociale des étoiles binaires, elle pourrait en revanche fortement perturber la vie entre certains amas de galaxies, allant même jusqu'à interrompre leur possibilité d'interactions mutuelles.

À partir de cette rapide revue de l'évolution des différents types d'astres et de leurs galaxies, il est possible maintenant d'essayer d'échafauder un scénario chronologique de l'évolution du Cosmos. Nous le faisons en identifiant trois phases successives, un drame en trois actes.

ACTE I

Le Fer, ou la brillante époque

Durant cet acte le Cosmos est très brillant, car il brûle presque sans modération au sein de ses étoiles, la plus grande partie du stock d'Hydrogène reçu au *Big Bang*. La seule modération étant que l'étoile concernée doit être assez massive pour pouvoir atteindre en son cœur la température de seuil de la fusion de l'Hydrogène. Il n'y a en fait que les petites *naines brunes* qui ne participent pas à ce grand feu d'artifices. Cependant, au fil du temps, deux phénomènes vont apparaître : d'une part, la chute du taux de natalité des étoiles au sein des galaxies, et, d'autre part, l'inéluctable arrivée d'une panne de carburant au sein des étoiles vieillissantes. Nous avons vu qu'après la panne, les plus légères passeront directement au stade de *naine blanche*, alors que les plus massives réussiront à brûler leurs *cendres* successives jusqu'au Fer. Après combustion de ces cendres, les étoiles les moins massives deviendront elles aussi des *naines blanches*, alors que les plus massives se transformeront en supernovæ explosives, dont les résidus seront des trous noirs et des étoiles à neutrons.

Les calculs de Fred Adams¹ montrent qu'à la fin de ce premier acte, à l'extinction des feux de la brillante époque, l'Univers aura environ mille milliards d'années. Et après ? Le ciel va-t-il rester définitivement sombre, ou restera-t-il encore quelques traces de cette *obscure clarté*, chère au Grand Corneille ?

ACTE II

Les dégénérés sauvent la situation

Dans ce noir absolu de la fin du premier acte, l'Univers va, çà et là, réussir à ranimer quelques sources d'énergie encore inexploitées, car elles impliquent des processus très improbables, tels que des collisions interaérales.

Le rôle le plus important va être joué par les résidus d'astres ayant survécu au premier acte, que nous avons plus haut qualifiés de *dégénérés*. Nous avons vu que ce qualificatif, *a priori* peu flatteur, fait en fait référence à la taille du rayon de l'astre qui est alors déterminé par les *forces quantiques répulsives de dégénérescence* s'exerçant entre leurs électrons, ou même pour certains astres, entre leurs neutrons.

La situation la plus aisément calculable, concerne la probabilité pour que **deux naines brunes entrent en collision**. Rappelons que ces avortons d'étoiles n'ont pas assez d'Hydrogène à la naissance pour amorcer la combustion de leur cœur. Après la coalescence des deux naines, l'astre résiduel peut en revanche être assez massif pour se comporter comme une *naine rouge* et donc rayonner. Dans certains cas la collision entre deux naines blanches pourrait donner naissance à une *supernova* et donc à la création explosive de trous noirs et d'étoiles à neutrons.

Beaucoup plus difficile à évaluer, au stade actuel des connaissances sur la matière noire, est le rôle à très long terme, durant donc ce second acte, que pourrait jouer cette énigmatique matière dans la réanimation du Cosmos. D'une part, certains astres, notamment les naines blanches, pourraient progressivement capturer leur halo de matière noire. D'autre part, l'interaction faible pourrait permettre l'annihilation de cette matière, soit par collision directe soit après capture par des résidus d'étoiles.

Une autre source d'énergie pourrait provenir aussi, pendant cet acte, de l'instabilité à très long terme des protons eux-mêmes. Il est en effet plausible que les protons puissent se désintégrer, par exemple par le canal : $p^+ + e^- \rightarrow e^+ + \pi^0 + e^- \rightarrow 4 \text{ photons}$. Expérimentateurs et théoriciens travaillent intensément depuis plusieurs années, soit à l'observation de cette désintégration, soit à l'évaluation théorique de sa durée de vie. Les expérimentateurs n'ont à ce jour pas trouvé trace de cette désintégration, mais le fait qu'ils n'aient rien observé prouve que, si le proton est instable, sa durée de vie doit être supérieure à 10^{33} ans. Quant aux théoriciens, leurs modèles montrent que cette durée de vie doit être inférieure à environ 10^{45} ans.

On peut prendre cette limite de 10^{33} ans pour clore cet acte, sous un ciel dépourvu de galaxies : elles se sont toutes évaporées. Il ne reste plus que des débris d'étoiles éteintes qui ont perdu la plus large fraction de leur masse. À la fin de cet acte, même les protons sont en fin de vie.

ACTE III Les trous noirs rayonnent

Nous avons vu que la relation d'Einstein, grâce aux travaux de *Karl Schwarzschild*, a permis de prévoir les principales caractéristiques d'un trou noir « vu de l'extérieur ». On peut en particulier localiser le bord du trou, car son rayon R est simplement lié à sa masse M par la relation $R = (2 G/c^2) M$. Dans les années 70, *Stephen Hawking* (1942-2018) imagina un processus quantique par lequel un trou noir pourrait rayonner des particules et donc perdre de l'énergie. Ce *rayonnement de Hawking*⁴ est fondé sur les propriétés locales du *vide quantique* en présence d'un champ gravitationnel exceptionnellement intense : celui qui règne aux bords d'un trou noir. Ce champ très intense crée au bord du trou noir un violent *effet de marée* qui tend à disloquer tout objet situé dans ce champ. Dans le vide quantique usuel (sans gravitation), il y a sans cesse des créations de paires (*particule-antiparticule*), que l'on qualifie de *virtuelles* dans la mesure où elles se recombinent aussitôt. En revanche, dans le vide quantique situé au bord d'un trou noir, l'effet de marée peut être assez fort pour disloquer, c'est-à-dire rendre réelles, ces paires (particule-antiparticule). Une paire devenue réelle se sépare aussitôt : l'une des particules « tombe » dans le trou noir, tandis que l'autre est éjectée vers l'extérieur. Ce sont l'énergie et la masse emportées par la particule fuyant le trou noir qui constitue le *rayonnement de Hawking*. Bien que ce rayonnement n'ait pas encore été expérimentalement détecté, on peut théoriquement affecter, à partir de ce rayonnement, à tout trou noir, d'une part une *température* qui est inversement proportionnelle à sa masse M (cette température est extrêmement basse : de l'ordre de 10^{-7} °K pour un trou noir de masse $M = M_0$) et d'autre part une *durée de vie*, qui est proportionnelle à M^3 (durées de vie extrêmement longues : depuis 10^{68} ans pour un trou noir stellaire de masse $M = 10 M_0$, jusqu'à 10^{92} ans pour un trou noir super-massif de masse $M = 10^9 M_0$).

Nous prendrons cet âge canonique de l'ordre de 10^{100} ans, correspondant sans doute à l'évaporation des trous noirs les plus massifs de l'Univers, pour clore ce dernier acte... sous un ciel devenu d'un noir absolu. Le Cosmos aura alors définitivement épuisé ses dernières sources d'énergies, sa température sera extrêmement basse et il ne sera plus constitué que de particules : électrons, neutrinos, matière noire...

Depuis son *Big Bang* initial, l'Univers aura, dans ce scénario, évolué *de poussières en poussières*, ou plutôt de particules en particules, tout en explorant les deux extrêmes les plus absolus de son échelle des températures.

Post-scriptum

*Nous n'avons pas envisagé ici la possibilité que des trous noirs puissent devenir des **trous blancs**, comme le prévoit certaines ébauches de théories de gravitation quantique, fondées sur une discrétisation de l'espace-temps. Nous sommes en effet restés ici dans le cadre du Modèle Standard, qui est, rappelons-le, inopérant pour décrire l'intérieur des trous noirs. La gravitation quantique prévoit, quant à elle, qu'au sein d'un trou noir l'espace-temps puisse, par un effet tunnel, se transformer en l'espace-temps d'un trou blanc. Ce trou blanc peut expulser de la matière, sans jamais pouvoir en absorber : c'est un sosie du trou noir, par inversement du temps. Si l'avenir d'un trou noir était vraiment de devenir un trou blanc, cela perturberait bien sûr le déroulement de notre Acte III. Pour les lecteurs intéressés, je signale qu'un des promoteurs de la gravitation quantique, Carlo Rovelli, de l'Université d'Aix-Marseille, vient d'écrire un article de vulgarisation (en français) sur les trous blancs⁶.*

Références

- 1) Fred Adams, *The Future History of the Universe*, in « *Cosmic Update* », ed. Springer 2011, pages 71-118.
- 2) B.P. Abbott et al, (*collaboration LIGO-VIRGO*), *Phys. Rev. Lett.* 116, 061 102 (2016).
- 3) *Event Horizon Telescope*, un réseau de huit radiotélescopes, publie (avril 2019) la première image d'un trou noir super-massif (celui situé au centre de la galaxie M87).
- 4) Dossier « *Au cœur de la traque des ondes gravitationnelles* » publié par *La Recherche* N° 55, page 28 (septembre 2019).
- 5) S.W. Hawking, *Nature* 248, 30 (1974).
- 6) C. Rovelli, *Pour la Science*, N° 502, page 26 (Août 2019).