

LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE

Vincent Bontems & Roland Lehoucq



LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE

Vincent Bortems & Roland Lehoucq



LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE

Vincent Bontems & Roland Lehoucq

Illustrations de Scott Pennor's

Les Belles Lettres
2016

© 2016, Société d'édition Les Belles Lettres
95 bd Raspail 75006 Paris.
www.lesbelleslettres.com

ISBN : 978-2-251-90219-7



LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE

Les noirs sont un monde.
Henri Michaux, *L'Infini turbulent*

Dans les idées noires de la physique, telles que le « ciel noir », le « corps noir », le « trou noir », la « matière noire » et « l'énergie noire », c'est le noir qui nous intrigue. Si nous nous sommes associés, le physicien et le philosophe, c'est parce que la noirceur des idées scientifiques est à la fois instructive et inspirante. Pourquoi les physiciens ont-ils ressenti le besoin de noircir ces idées ? Que signifie l'emprunt de cet adjectif au langage ordinaire ? Est-il anodin et sans conséquence pour l'élaboration du langage scientifique ? Ou bien quelque métaphore se glisse-t-elle subrepticement au cœur des raisonnements ? En somme, les idées noires de la physique ont-elles une particularité du fait de leur noirceur ? Et, alors, que signifie le mot « noir » pour qui pense et imagine les idées noires dans la culture scientifique de notre temps ?

En dépit de notre admiration pour le chef-d'œuvre d'humour noir que sont les *Idées noires* d'André Franquin (1924-1997), notre livre ne porte donc pas sur les sombres ruminations de physiciens neurasthéniques. Il s'agit d'une réflexion sur la spécificité des concepts physiques qualifiant certains phénomènes comme étant « noirs ». Leur noirceur signifie-t-elle que ces idées sont apparentées ? Fait remarquable qui justifierait, à lui seul, de leur consacrer un livre, ces idées ont toutes un rapport avec d'importantes énigmes scientifiques du passé ou du présent. Le problème du ciel noir a intrigué les astronomes et leur a résisté des siècles durant. L'énigme du rayonnement du corps noir fut à l'origine de la mécanique quantique. Les trous noirs furent des singularités théoriques excitant les astrophysiciens bien avant qu'on observe leurs effets. La matière noire est une solution hypothétique à l'anomalie de la dynamique des galaxies et des amas de galaxies. Et l'énergie noire expliquerait, quant à elle, l'accélération de l'expansion de l'Univers ! Il y a donc matière à réflexion au sujet des idées noires. Cela n'a toutefois peut-être pas de rapport direct avec leur noirceur.

Le noir, c'est évidemment l'absence totale de lumière. Mais, en physique, la noirceur a une signification particulière. Un corps noir n'est pas nécessairement de couleur noire. Un trou noir n'a pas à proprement parler de couleur : il ne peut être vu. Le noir est, d'ailleurs, attribué à des phénomènes physiques qui ne sont, en général, pas visibles à l'œil nu. Cette caractéristique varie d'un phénomène à l'autre – la noirceur du ciel n'est pas celle de l'énergie –, mais la difficulté de l'observation joue toujours un rôle crucial dans l'attribution. Une idée n'est donc pas noire par hasard. Quand il passe dans le langage scientifique, l'adjectif « noir » subit ce que Gaston Bachelard appelait une « révolution sémantique » : il *change de sens*. Sa signification d'origine est purifiée et redéfinie de manière à ne désigner que la propriété dont le physicien a besoin pour caractériser son objet. Le noir cesse d'être une couleur et devient un terme scientifique univoque.

Enfin... c'est l'idéal que le scientifique s'efforce de réaliser.

Parce qu'il faut bien admettre que, du fait même que les mots ont déjà un sens dans la langue ordinaire, il reste souvent quelque trace de cette origine qui contamine subrepticement l'expression scientifique et lui confère une charge métaphorique latente. Il y a comme un halo d'images noires qui accompagnent discrètement, comme son ombre, le discours du physicien sur les idées noires. Ces images, il lui faut les refouler le temps de ses raisonnements, afin que sa pensée ne s'appuie que sur des idées claires et distinctes, des équations et des mesures ultrafines, mais cela ne signifie pas qu'elles n'existent plus. Tout physicien qu'il est, il les retrouve inmanquablement s'il se laisse aller à la rêverie. Si bien que pour comprendre les idées noires, il faut non seulement analyser la manière dont la physique change radicalement la *dénotation* de l'adjectif « noir », c'est-à-dire son sens explicite, mais aussi exposer comment cet adjectif colore, pour ainsi dire, l'expression scientifique en retour, comment elle lui attribue certaines *connotations*. À chaque idée noire correspond ainsi une image noire qui en est comme l'ombre projetée par le langage dans l'imaginaire. Le physicien qui manipule les idées noires peut n'avoir aucunement conscience des images noires, mais cela prouve justement qu'il doit constamment les refouler – quand elles font obstacle à la pensée scientifique – ou les sublimer – quand elles peuvent aiguïser sa curiosité. Parce que l'on ne peut pas raisonner avec des images, mais l'on

ne peut pas non plus détacher définitivement la pensée de l'imagination. Sans les confondre ni les réduire à une fausse unité, nous avons décidé d'écrire ce livre en menant en parallèle l'analyse épistémologique et historique de la signification scientifique des idées noires et l'exploration du sens symbolique des images noires.

En procédant ainsi, nous nous inscrivons dans le sillage des travaux de Gaston Bachelard (1884-1962). Il fut le premier à pratiquer cette méthode duale qui conjugue l'analyse épistémologique avec une variante très particulière de psychanalyse. En 1938, il publia deux ouvrages dissemblables et complémentaires :

La Formation de l'esprit scientifique et *La Psychanalyse du feu*. Dans le premier, il expliquait comment l'esprit scientifique doit toujours commencer par surmonter des « obstacles épistémologiques » qui l'encombrent et l'empêchent de penser rigoureusement les phénomènes. Or, ce sont souvent justement des images suggérées par le langage ordinaire. Dans le second, il étudiait certaines images afférentes au feu pour montrer que leurs associations ne devaient rien au hasard : elles sont liées entre elles de façon précise quoique toute différente de celle que suggérerait la logique. Nous inspirant de cet illustre devancier, nous avons cherché à dégager, d'abord, le sens de chaque idée noire au sein de la physique, puis, celui de l'image noire correspondante, laissant au lecteur le soin de juger si ces sens savant et métaphorique divergent irrémédiablement, se complètent ou s'entrecroisent parfois. Mais, avant de commencer ce parcours, qui ira du ciel noir à l'énergie noire (en passant par le corps noir, le trou noir et la matière noire), essayons brièvement de cerner la signification générale que prend le mot « noir » en physique, dans l'esprit du chercheur, puis, ce qu'il évoque imaginativement dans l'esprit divagant du poète ou du rêveur.

*

Pourquoi la physique voit-elle certaines choses en noir ? Pour répondre à cette question, il faut saisir ce que veut dire « voir » en physique. Depuis fort longtemps, le physicien n'observe plus les phénomènes au moyen de ses seuls sens, il utilise des instruments : depuis la lunette astronomique de Galilée jusqu'au dernier des accélérateurs de particules, en passant par

la gamme des microscopes, spectroscopes, etc. Ces appareils de détection et de mesure permettent d'entrer en *interaction* avec des phénomènes qui autrement seraient imperceptibles. Celui qui voit en physique, le fameux *observateur*, est une machine. Le chercheur humain intervient avant, pour faire des prédictions, préparer l'expérience et calibrer les détecteurs, et après l'observation, pour interpréter les résultats, corriger ses hypothèses et tirer les conclusions qui s'imposent. Mais, pendant l'observation, c'est la technique qui compte. Pour insister sur la médiation technique, Bachelard forgea le néologisme « phénoménotechnique » (*Le Nouvel Esprit scientifique*, 1934). Ce mot-valise, qui unit les phénomènes à la technique, signifie que, dorénavant, contrairement à la définition classique du phénomène comme « ce qui se donne à voir », les phénomènes scientifiques ne sont pas *donnés*, ils sont *construits* expérimentalement. Pour Aristote, il n'était pas question de faire des expériences, car cela aurait été faire violence à la Nature. Au XIX^e siècle, les positivistes concevaient encore les expériences comme la mesure d'un phénomène préexistant que l'on tâchait ensuite de décrire par une loi mathématique. Dans la science contemporaine, « des phénomènes nouveaux sont, non pas simplement trouvés, mais inventés, mais construits de toutes pièces » (*Études*, p. 19). Le chercheur n'observe pas des *faits*, il produit des *effets* en se basant sur la structure mathématique de ses théories et en utilisant des techniques de haute précision. « Voir » signifie donc se baser sur une théorie physique pour construire la phénoménotechnique qui fera (peut-être) apparaître des phénomènes nouveaux, parfois imprévus.

Au premier abord, cette façon de voir ne correspond qu'aux seules sciences expérimentales, telles que la physique des particules, et non aux sciences observationnelles, comme l'astronomie, où l'on ne peut reproduire à son gré les phénomènes. Toutefois, la phénoménotechnique est présente dans les observatoires astronomiques comme dans les accélérateurs de particules. Les chercheurs observent l'Univers à travers des signaux parfois très faibles, à des longueurs d'onde hors du spectre visible, voire transmis par d'autres particules que les photons. Leurs instruments font voir des phénomènes invisibles à l'œil nu. Se fondant sur des hypothèses abstraites et des calculs complexes, les astronomes construisent des instruments sophistiqués pour recueillir de l'information dans d'autres longueurs d'onde. « Voir » signifie toujours « entrer en

interaction avec un phénomène et mesurer cette interaction afin d'en extraire de l'information sur ce phénomène ». Le premier vecteur de l'information ayant été la lumière, il est naturel que les scientifiques aient conservé le vocabulaire de la vision dans leur langage informel. Pourtant, les phénomènes étudiés n'interagissent pas, la plupart du temps, avec la lumière, mais avec d'autres fréquences des ondes électromagnétiques quand ce n'est pas avec une onde acoustique ou même des neutrinos. Même si la lumière n'entre plus en jeu, il faut toujours que la phénoménotechnique soit capable de capter et de mesurer l'information résultant d'une interaction avec le système observé.

Maintenant que nous avons cerné ce que signifie « voir » pour un physicien, nous pouvons deviner sans peine ce qu'il va qualifier de « noir » : en général, c'est ce qu'il ne voit pas ou qu'il voit mal. Le noir, en physique, désigne ce qui résiste à la détection, ce qui n'interagit pas avec les ondes électromagnétiques, ou ce qui interagit mais de telle manière que nous ne parvenons pas à capter les informations avec la phénoménotechnique dont nous disposons. L'énigme du ciel noir posait déjà, à sa façon, ce problème : Pourquoi ne percevons-nous pas la lumière des étoiles qui devrait nous parvenir de toutes les directions ? Le corps noir absorbe toutes les ondes électromagnétiques sans en réfléchir aucune. Tout le monde sait qu'un trou noir est un astre si massif qu'il empêche la lumière (*a fortiori* la matière) d'échapper à son emprise gravitationnelle. La matière noire est une hypothèse qui désigne une masse qui n'interagirait pas avec la lumière. Enfin, l'énergie noire est peut-être l'idée la plus obscure : non seulement elle est inobservable, mais elle serait, en outre, la cause d'une force qui s'oppose à la gravitation ordinaire.

Toutes ces idées noires, en dépit de leur hétérogénéité, ont donc bien une certaine parenté au niveau conceptuel liée à leur noirceur : elles s'appliquent à des phénomènes que les physiciens ne peuvent pas voir. Dans le registre figuré, on peut aussi souligner qu'elles soulèvent des questions qui ont résisté ou qui résistent encore à nos lumières. Leur statut est parfois difficile à éclaircir : s'agit-il de réalités, de possibilités théoriques encore invérifiables ou bien de chimères ?

En complément de l'analyse épistémologique des idées noires, nous nous proposons de réaliser une « psychanalyse des ténèbres ». Avec *La Psychanalyse du feu* – dont le titre complet aurait dû être « la psychanalyse de la connaissance objective du feu » –, Bachelard a inventé un genre nouveau et singulier de psychanalyse. Il ne s'agit point de recueillir les confidences d'une flamme allongée sur un divan, mais de recenser les images et les symboles du feu qui ont, depuis des temps immémoriaux, peuplé l'imaginaire des hommes et dont la vivacité fait obstacle à la connaissance. La psychanalyse bachelardienne vise à purifier l'esprit scientifique d'images qui l'entravent. Car les images archaïques du feu ne correspondent à aucune objectivité. Elles ne peuvent servir le développement de la connaissance des phénomènes de combustion. Pour s'en affranchir, l'esprit scientifique a dû, et doit encore, lutter contre son penchant naturel à attribuer, par exemple, une substance à la chaleur, à en faire un fluide subtil. Bachelard voulait soulager notre esprit de ces images qui nous entraînent à la divagation. Affirmé avec force dans l'introduction, ce programme iconoclaste laisse, toutefois, assez vite place à des analyses plus bienveillantes à l'égard des images, plus subtiles... Car, finalement, le philosophe de Bar-sur-Aube se laisse prendre aux charmes des métaphores qu'il étudie. Sous prétexte de nous libérer d'étranges « complexes » du feu, il prend plaisir à détailler les images flamboyantes qui en sont issues.

Nous avons voulu aussi travailler dans cet esprit, tâchant de conserver, autant que faire se peut, un équilibre entre le caractère savant des images noires – afin que chaque rêverie éclaire les déformations que l'imaginaire fait subir à l'idée qui lui donne naissance – et le caractère facétieux des associations libres – pour que la rêverie conserve sa spontanéité et ne soit pas un décalque factice d'idées mais le fruit de résonances au sein de notre culture.

On peut néanmoins se demander si le noir se prête à l'exercice. Selon Bachelard, le feu est un élément primordial de l'imaginaire collectif, en raison, notamment, de son rôle crucial dans le processus d'humanisation. En va-t-il de même pour le noir ? – Bachelard a écrit d'autres ouvrages sur la poétique des éléments, sur l'eau, l'air et la terre. Ce faisant, il accréditait l'idée que seuls les quatre éléments alchimiques (air, eau, feu et terre)

constituent les substances primordiales de l'imaginaire collectif. Or, à bien y réfléchir, cette thèse est arbitraire. Si les images du feu sont enracinées dans l'imaginaire collectif de l'humanité depuis la domestication du feu, que dire alors d'images, plus archaïques et plus puissantes encore, relatives à l'obscurité de la nuit qui nous enveloppait auparavant ?

En étudiant les images de « l'eau noire », dans *L'Eau et les Rêves*, Bachelard se fit lui-même cette réflexion : si les images de l'eau noire combinent les images de l'eau et de la nuit, alors, ne faut-il pas reconnaître à la nuit une substantialité imaginaire aussi primitive et profonde que celle de l'eau ?

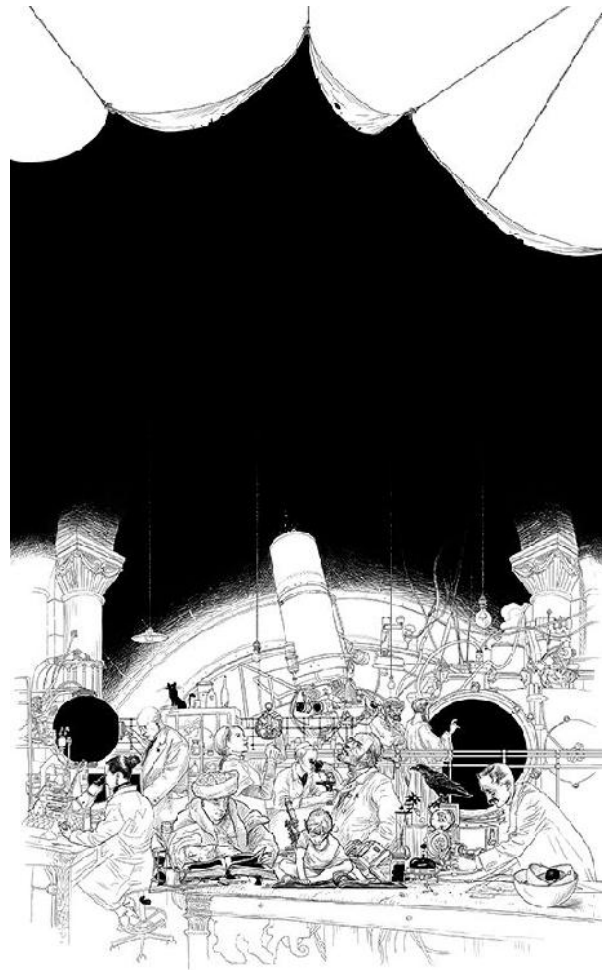
« En apportant maintenant quelques remarques sur les combinaisons de l'Eau et de la Nuit, nous semblons déroger à nos thèses générales sur le matérialisme imaginaire. [...] Cependant, la rêverie des matières est une rêverie si naturelle et si invincible que l'imagination accepte assez communément le rêve d'une nuit active, d'une nuit pénétrante, d'une nuit insinuante, d'une nuit qui entre dans la matière des choses. Alors la Nuit n'est plus une déesse drapée, elle n'est plus un voile qui s'étend sur la Terre et les Mers ; la Nuit est *de la nuit*, la nuit est une substance, la nuit est la matière nocturne. La nuit est saisie par l'imagination *matérielle*. Et comme l'eau est la substance qui s'offre le mieux aux mélanges, la nuit va pénétrer les eaux, elle va ternir le lac dans ses profondeurs, elle va imprégner l'étang. Parfois la pénétration est si profonde, si intime que, pour l'imagination, l'étang garde en plein jour un peu de cette matière nocturne, un peu de ces ténèbres substantielles » (*L'Eau et les Rêves*, p. 137).

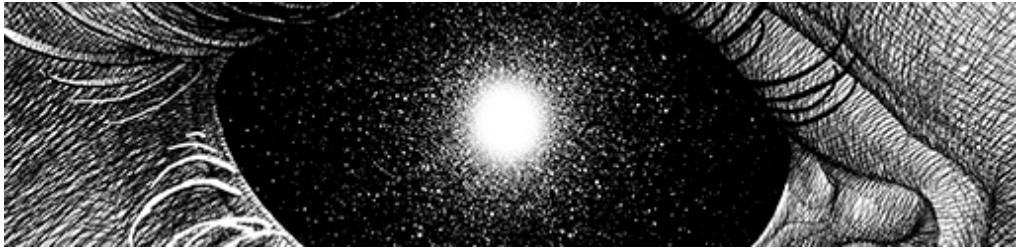
Nous retiendrons cette hypothèse : les images noires possèdent chacune leur spécificité, qui découle de la transposition dans l'imaginaire d'une idée noire, mais elles participent toutes du même élément imaginaire, c'est-à-dire de cette matière nocturne qui peut aussi s'appeler « la Ténèbre ».

Parce qu'il avait senti la puissance et la richesse de l'élément ténébreux, Bachelard a même formé le projet d'une étude systématique des images noires : « Si l'on pouvait réunir et classer toutes les *images noires*, les images substantiellement noires, on constituerait, croyons-nous, un bon matériel littéraire [...] »

(*La Terre et les Rêveries du repos*, 1948, p. 90). Alors même qu'il n'avait aucunement en vue les idées noires de la physique comme motif de rêveries, il a pourtant relevé la spécificité de nombreuses images noires qui peuvent leur correspondre : le noir *transparent* du ciel nocturne étoilé, la noirceur *intérieure* des corps, le noir *vertigineux* des gouffres, le noir

transmutable de l'œuvre au noir des alchimistes, et le noir *mystérieux* caché dans le noir. Son intuition devance nos recherches et nous avons trouvé bien des échos entre nos propres rêveries, élaborées à partir de la physique, et les siennes, élaborées à partir d'un matériau littéraire. Toutefois, il va sans dire que nous ne nous limiterons pas à ces résonances et que nous explorerons toutes les évocations pertinentes que nous suggère notre culture.





LE CIEL NOIR

*La nuit n'est nuit que pour nous,
ce sont nos yeux qui sont obscurs.*
René Barjavel, *Colomb de la lune*

Loin des grandes villes et de leur pollution lumineuse, le ciel nocturne apparaît d'un noir profond parsemé d'étoiles. Cela n'étonne personne : la nuit est noire, se dit-on, car le Soleil est couché. L'atmosphère terrestre perd alors la couleur bleue d'une journée sans nuages dont la luminosité noie l'éclat très faible des étoiles. Pourtant, constater que le ciel nocturne est noir soulève une question dont la portée cosmologique fut comprise pour la première fois par l'astronome Johannes Kepler (1571-1630). Kepler soutenait la théorie héliocentrique de Nicolas Copernic et, comme lui, imaginait l'Univers contenant un ensemble fini d'étoiles. L'astronome anglais Thomas Digges (1546-1595) s'était lui aussi rallié au système copernicien mais soutenait, au contraire, l'idée d'un Univers infini et uniformément rempli d'étoiles. Kepler s'opposa à cette hypothèse, car l'Univers aurait alors contenu toute la lumière rayonnée par une infinité d'étoiles depuis une éternité, soit une quantité infinie : le fond du ciel aurait dû nous apparaître infiniment brillant ! Constater qu'il ne l'est manifestement pas revient à accepter l'idée d'un Univers fini.

Le traitement de cette question prit une forme plus quantitative au XVIII^e siècle avec les travaux des astronomes anglais Edmund Halley (1656-1742) et suisse Jean-Philippe Loys de Cheseaux (1718-1751). En 1720, Halley calcula la luminosité résultant de la contribution de toutes les étoiles d'un Univers supposé infini et uniformément rempli d'étoiles. Pour cela, il découpa l'espace en une succession de coquilles sphériques concentriques et de même épaisseur centrées sur notre position. Sa stratégie de calcul consista à déterminer les luminosités apparentes des étoiles contenues dans chaque coquille, puis à les additionner pour obtenir la luminosité totale vue depuis la Terre. La contribution lumineuse d'une coquille est alors égale au produit du nombre d'étoiles – supposées identiques – qu'elle contient par l'éclat apparent de chaque étoile. Si les

étoiles sont uniformément réparties dans l'espace, le nombre contenu dans une coquille augmente comme le volume de la coquille, c'est-à-dire comme le carré de son rayon multiplié par l'épaisseur – constante – de celle-ci. Quant à l'éclat apparent d'une étoile, il est d'autant plus faible qu'elle est lointaine. Plus précisément, l'éclat d'une étoile décroît comme l'inverse du carré du rayon de la coquille qui la contient. Ainsi, le produit des deux quantités ne dépend pas de la distance : la baisse de luminosité des étoiles due à leur éloignement est exactement compensée par leur nombre croissant quand la distance augmente. Toutes les coquilles contribuent ainsi de la même façon à la lumière reçue sur la Terre et la somme de leur contribution donne un résultat infini. C'est la démonstration rigoureuse de l'intuition géniale de Kepler.

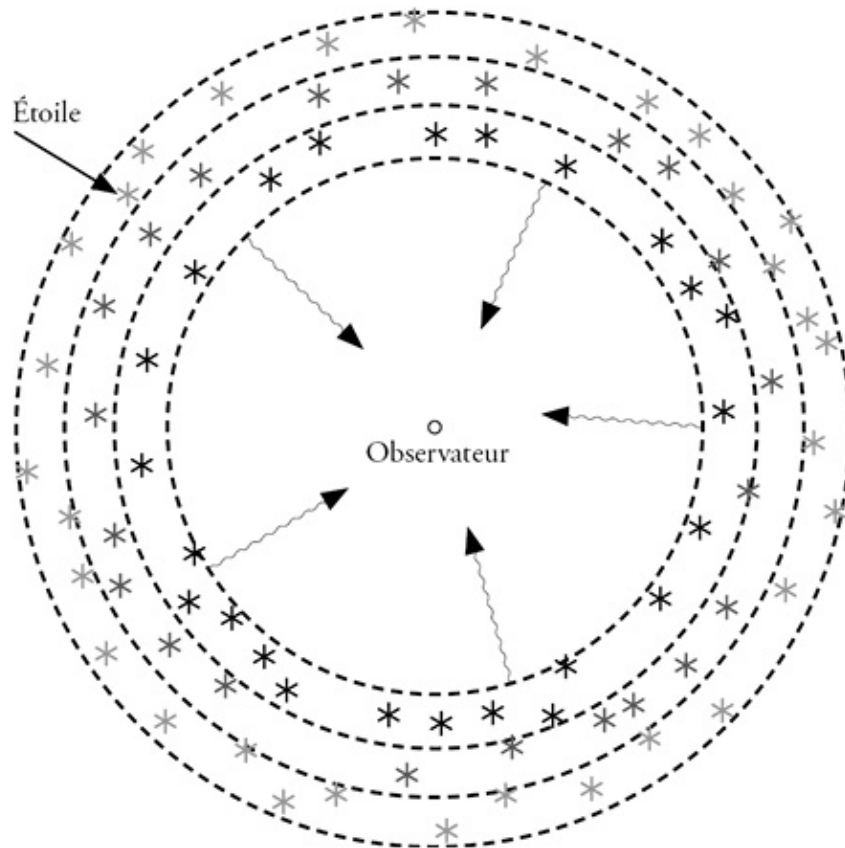


Figure 1. Découpons l'Univers en fines coquilles concentriques de même épaisseur. Le nombre d'étoiles dans chacune d'elles croît comme le carré du rayon, tandis que leur luminosité décroît d'un même facteur, si bien que chaque coquille contribue également à la luminosité totale. Si l'Univers est infini et uniformément peuplé, la luminosité de la voûte céleste devrait être infinie.

Pour éviter cette incandescence aveuglante, Halley supposa que la

luminosité apparente des étoiles diminue plus rapidement qu'en raison inverse du carré de leur distance, comme elle devrait le faire dans le vide. Cette plus grande atténuation de la luminosité avec la distance lui permit d'obtenir un résultat cohérent avec l'observation, en conservant l'hypothèse d'un Univers infini. En 1743, Loys de Cheseaux justifia physiquement cette conclusion en imaginant un Univers rempli d'un milieu légèrement opaque. La lumière des étoiles les plus lointaines ne peut alors nous parvenir, car elle est absorbée par le milieu occupant l'espace qui nous en sépare. Mais un siècle plus tard, l'astronome anglais John Herschel (1792-1871) critiqua cet argument : en absorbant la lumière des étoiles le milieu interstellaire doit s'échauffer et donc briller à son tour. Herschel montra que, si faible que soit l'opacité du milieu interstellaire, le fond du ciel devrait être aussi lumineux que la surface d'une étoile, le Soleil par exemple. Au terme de ce raisonnement, l'idée d'un rayonnement infini a bien été évacuée, mais la contradiction avec la réalité nocturne demeure flagrante si l'on reste dans le cadre d'un Univers infini...

En 1823, le médecin et astronome allemand Heinrich Olbers (1758-1840) se pencha à son tour sur la question de la luminosité du ciel nocturne. Il arriva à la même conclusion que Loys de Cheseaux, mais en usant d'un argument différent. Dans un article intitulé *La transparence de l'espace cosmique*, il écrit : « S'il y a réellement des soleils dans tout l'espace infini, qu'ils soient séparés par des distances à peu près égales, ou répartis dans des systèmes de Voies lactées, leur ensemble est infini et alors, le ciel tout entier devrait être aussi brillant que le Soleil. Car toute ligne que j'imagine tirée à partir de nos yeux rencontrera nécessairement une étoile fixe quelconque et par conséquent tout point du ciel devrait nous envoyer de la lumière stellaire, donc de la lumière solaire. » Dans son raisonnement Olbers soulignait un fait : les étoiles proches peuvent masquer des étoiles plus lointaines. Ce ne sont donc plus des myriades d'étoiles qui contribuent à la luminosité du ciel nocturne, mais seulement les premières sur chaque ligne de visée. Loin d'être infinie, la luminosité du fond du ciel nocturne serait donc identique à celle de la surface d'une étoile. Même si l'Univers est infini, l'argument d'Olbers montre qu'il existe une limite de visibilité : nous ne recevons nulle lumière au-delà de cette sorte d'horizon, car les sources les plus lointaines sont masquées par

les plus proches. Notre situation est alors analogue à celle d'un promeneur dans une grande forêt dont les arbres sont à peu près uniformément répartis : quelle que soit la direction dans laquelle il regarde, sa ligne de visée intercepte nécessairement le tronc d'un arbre l'empêchant ainsi de voir au travers de la forêt. Olbers n'a pas chiffré la distance de cette limite d'« encombrement », c'est-à-dire le rayon de la sphère jusqu'où porte notre regard. Mais nous pouvons l'estimer simplement en découpant encore une fois l'espace en coquilles sphériques concentriques d'épaisseur constante. Notre ligne de visée rencontrera la surface d'une étoile appartenant à une coquille avec une probabilité égale au rapport entre l'aire du disque de l'étoile (sa section géométrique) et celle de cette coquille. En tenant compte du nombre d'étoiles dans une coquille, cette probabilité par unité de longueur est égale au produit de la densité d'étoiles (nombre d'étoiles par unité de volume) multipliée par leur section géométrique. L'inverse de cette probabilité définit la distance typique au bout de laquelle une ligne de visée rencontre une étoile. Considérons des étoiles de même taille que le Soleil et réparties dans l'espace conformément à la densité moyenne de matière mesurée dans l'Univers observable. La distance limite est alors de l'ordre de 10^{22} années-lumière, très grande donc, mais pas infinie. Finalement, peu importe que l'Univers soit infini ou fini. S'il est plus grand que la limite de visibilité, le ciel devrait être aussi brillant que la surface d'une étoile.

D'où viendrait la solution ? De manière surprenante, de la poésie ! Avant même que Vincent n'évoque les rêveries poétiques du ciel nocturne au prochain chapitre, il faut en effet faire état des écrits d'Edgar Allan Poe (1809-1849). En 1848, il publia *Eureka. Essai sur l'univers matériel et spirituel*, un long poème en prose consacré à ses spéculations cosmologiques. Il y aborde le problème du ciel noir en reprenant l'argument d'Olbers (*Eureka*, chap. XI, p. 170-171) : « Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile. » Et il y apporte immédiatement une solution : « Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait

jamais pu parvenir jusqu'à nous. » Sachant que la lumière se propage à une vitesse finie, affirmer que la lumière des astres les plus lointains n'a pu nous parvenir revient à supposer qu'ils n'ont pas toujours existé. Il faut donc distinguer l'Univers, peut-être infini, où l'on trouve des étoiles dans toutes les directions, et l'univers observable regroupant les étoiles dont la lumière a eu le temps de nous atteindre. Si les étoiles ont une durée de vie limitée, la sphère incandescente qui devrait occuper le ciel nocturne ne peut jamais se constituer.

Dans un livre publié en 1861, l'astronome allemand Johann von Mädler (1794-1874) formalise la géniale intuition de Poe. Il commence par rappeler la finitude de la vitesse de la lumière, fait connu depuis les observations du mouvement des satellites de Jupiter que l'astronome danois Olaüs Rømer mena à l'observatoire de Paris en 1676. Puis, il considère un univers dont l'âge serait fini. La conclusion s'impose immédiatement : nous ne pouvons percevoir toutes les étoiles, mais seulement celles dont la distance est inférieure à la distance parcourue par la lumière pendant l'âge de l'Univers. Là encore, apparaît un horizon au-delà duquel nulle lumière ne nous est encore parvenue. En 1901, Lord Kelvin (1824-1907) complétera l'argument en estimant la durée de vie des étoiles grâce à ses recherches sur la cause physique de leur éclat. Selon lui les étoiles n'ont pas toujours existé et ne peuvent briller indéfiniment, car leurs ressources en énergie sont limitées. Il détermine alors la durée de vie d'une étoile comme le Soleil dont la seule source d'énergie est la contraction sous l'effet de sa gravité propre : de l'ordre d'une trentaine de millions d'années. Problème : cette estimation était en contradiction flagrante avec l'âge beaucoup plus grand que les géologues et les naturalistes, dont Charles Darwin (1809-1882), attribuaient à la Terre. Pour faire briller le Soleil *durablement*, les physiciens français Jean Perrin (1870-1942) et anglais Arthur Eddington (1882-1944) proposèrent dès le début des années 1920 que l'énergie des étoiles provienne du noyau des atomes. Le physicien allemand Hans Bethe (1906-2005) développa cette idée quelques années plus tard. Il décrit les réactions de fusion thermonucléaires se produisant au cœur du Soleil, seule région où température et densité sont suffisamment élevées pour qu'elles soient possibles. La réserve d'énergie nucléaire d'une étoile de la masse du Soleil est suffisante pour la faire briller pendant près de 10 milliards

d'années (une étoile plus massive a une durée de vie bien plus courte que le Soleil car la luminosité, et donc le rythme auquel elle consomme son énergie nucléaire, est proportionnelle au cube de sa masse). Ainsi, les étoiles situées au-delà d'une dizaine de milliards d'années-lumière nous sont invisibles, car leur lumière ne nous est pas encore parvenue. Cela diminue considérablement le nombre d'étoiles dont nous recevons la lumière maintenant. Comme le faisait remarquer Kelvin, « si toutes les étoiles de notre vaste sphère commencèrent à briller au même moment [...] la lumière atteignant la Terre ne peut venir que d'une proportion extrêmement faible de toutes les étoiles ». Cela résout-il le problème de la nuit noire ? Tout à fait ! Car si l'on suppose les étoiles uniformément réparties dans l'espace, toutes les coquilles apportent la même contribution à la luminosité du ciel nocturne. Avec un rayon d'observation de seulement 10 milliards (10^{10}) d'années-lumière, la luminosité du ciel calculée par Olbers est divisée par le facteur $10^{22}/10^{10} = 10^{12}$, faisant passer le ciel incandescent à un noir de bon aloi. À ce stade, le ciel est noir, car nous ne voyons que les étoiles suffisamment proches, celles dont la lumière a eu la possibilité de nous parvenir en un temps inférieur à leur durée de vie. Autrement dit, la finitude de la vitesse de la lumière et l'âge fini des étoiles se conjuguent de sorte à ne rendre directement observable qu'une petite partie d'un Univers supposé infini. Un horizon limite notre perception des lumières de l'Univers.

Un Univers en expansion

Cette explication est valide dans l'Univers infini et statique de la physique classique, contexte cosmologique où la question de la nuit noire fut posée. Mais qu'en est-il dans l'Univers relativiste *en expansion* qui sert de cadre au modèle cosmologique actuel ? Le premier effet de l'expansion est de diluer la lumière émise par les étoiles des galaxies lointaines. En pratique, cela revient à diminuer le nombre de sources lumineuses directement accessibles. Il faut aussi tenir compte d'un autre phénomène : l'expansion de l'Univers décale vers le rouge la lumière en provenance des galaxies lointaines. Ce second effet résulte d'une dilatation de la longueur d'onde de la lumière au fil de son voyage dans un espace en expansion. Or, à nombre égal de photons reçus, un astre est

d'autant moins lumineux que sa lumière est plus rouge. Les galaxies lointaines sont donc moins lumineuses qu'elles ne le seraient si elles étaient immobiles par rapport à nous. De ce fait, l'éclat des astres les plus lointains décroît très vite. C'est pour cette raison que les galaxies les plus lointaines sont extrêmement difficiles à observer : même avec les plus gigantesques télescopes il faut des temps d'observation très longs pour déceler leur faible éclat en utilisant des détecteurs sensibles à la lumière infrarouge.

Finalement, dans le cadre cosmologique actuel, deux effets se conjuguent pour expliquer pourquoi la nuit est noire. D'abord, la durée de vie finie des étoiles et des galaxies qui les rassemblent limite le nombre de photons émis dans l'Univers. Ensuite, l'expansion de l'Univers dilue les photons émis et le décalage vers le rouge diminue l'énergie de chaque photon. Le calcul détaillé montre que le premier facteur domine le second : l'expansion réduit au mieux d'un facteur 4 l'intensité du fond du ciel d'un Univers supposé statique. Notons cependant que dans le cadre du modèle cosmologique actuel où l'expansion est accélérée, les galaxies finiront par s'éloigner plus vite que leur lumière ne voyage vers nous. Elles plongeront dans l'oubli en sortant progressivement de notre Univers observable.

Quand fut émise la plus ancienne lumière ?

Le problème de la nuit noire amène à s'interroger sur le concept d'horizon cosmologique. Si le ciel nocturne n'est pas aussi brillant que la surface du Soleil, c'est essentiellement parce que la durée de vie finie des objets peuplant l'Univers ne nous permet d'en voir qu'une infime partie. Comme la vitesse de la lumière est elle aussi finie, il existe un horizon du passé, distance au-delà de laquelle aucune lumière ne nous est parvenue. On estime que la lumière de la plus ancienne galaxie jamais observée fut émise bien avant la formation du Soleil et de la Terre (qui remonte à 4,56 milliards d'années) : la mesure du décalage vers le rouge de sa lumière indique qu'elle fut émise il y a environ 13,2 milliards d'années.

Étoiles et galaxies ne sont pas les seules sources de lumière de l'Univers, car, si celui-ci a toujours été en expansion, il a émergé d'une phase

primitive pendant laquelle il était très dense et très chaud, mélange de protons, d'électrons et de photons. La lumière est alors intimement liée à la matière, car, sans cesse diffusée par les électrons libres, elle change constamment de direction. Tout se passe comme dans un brouillard où les gouttelettes d'eau diffusent la lumière et gênent sa propagation. Comme dans un gaz qui se détend, l'expansion de l'Univers refroidit et dilue la matière qu'il contient. En dessous d'une certaine température, l'agitation des protons et des électrons devient suffisamment faible. Ils peuvent alors se combiner pour former les premiers atomes d'hydrogène neutre. Cette transition change radicalement le paysage, car avec la disparition des électrons libres, la lumière n'a plus d'obstacles et se propage librement, en ligne droite. Le brouillard se lève et l'Univers est transparent.

Le paradoxe de la nuit noire prend alors un relief tout particulier, car la lumière libérée au moment de la formation de l'hydrogène baigne encore l'Univers. Elle fut émise à une température voisine de celle d'une étoile. Pourquoi ne la voit-on pas partout dans le ciel ? Tout simplement parce que ce rayonnement primitif – de la lumière visible initialement – a vu sa longueur d'onde augmenter à cause de l'expansion de l'Univers. Aujourd'hui, il est perceptible sous forme de micro-ondes invisibles à nos yeux. L'énergie moyenne de ces photons primitifs est mille fois plus faible que celle de la lumière visible et leur flux lumineux est des milliers de milliards de fois moins intense que celui des étoiles. Ce « rayonnement fossile » offre la plus vieille image de notre Univers. Il semble émis d'une surface bornant l'Univers observable, région de l'espace-temps au-delà de laquelle nulle lumière ne peut nous parvenir, car auparavant la matière était opaque. Les époques plus anciennes nous restent donc voilées par un horizon du passé dont la lumière a mis, selon l'estimation la plus récente, près de 13,8 milliards d'années pour nous parvenir.

Peut-on voir au-delà de l'horizon ?

Puisque l'horizon est défini par le moment où la lumière s'est pour la première fois propagée librement dans l'Univers, il semble paradoxal de se demander si l'on peut voir au-delà. Et pourtant, cela pourrait être possible. Il faudrait pour cela diversifier nos moyens d'investigation et abandonner la lumière pour se concentrer sur la plus évanescence des

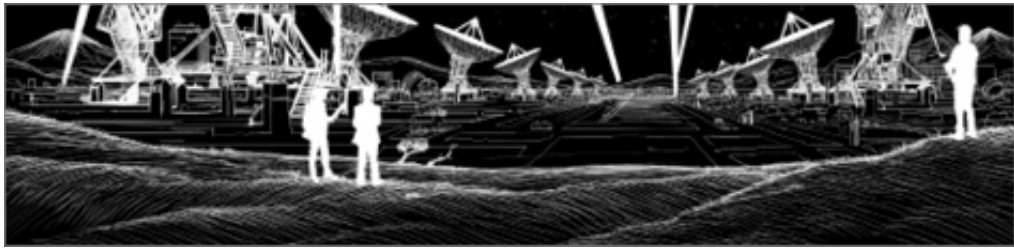
particules, le neutrino. Comprendre l'origine du rayonnement fossile implique de remonter à des époques où la température était de quelques milliers de degrés. Poursuivons ce voyage dans le passé pour considérer un Univers dont la température est supérieure à 10 milliards de degrés : dans ces conditions extrêmes, aucune structure atomique ou nucléaire ne peut subsister. Le fluide cosmique est un mélange de protons et de neutrons, parmi lesquels foisonnent électrons, positrons, neutrinos, antineutrinos et photons. Parmi eux, le neutron est particulier. C'est une particule instable qui, en un peu moins d'un quart d'heure, se transforme en proton en émettant un électron et un antineutrino. Si le neutron ne disparaît pas rapidement c'est qu'à ces températures élevées le proton peut effectuer le changement inverse, se transformant en neutron en absorbant soit un antineutrino, soit un électron. Un équilibre s'établit donc entre les populations de protons et de neutrons.

L'expansion de l'Univers aidant, la température décroît. Arrive alors un moment où elle devient trop faible pour que l'équilibre entre protons et neutrons soit maintenu, car les neutrinos cessent d'interagir avec la matière : ils se propagent librement au sein du plasma qui devient, pour eux, *transparent*. La situation ressemble tout à fait à celle qui prévaudra pour les photons quand la température aura suffisamment chuté pour que se forment les premiers atomes d'hydrogène. La forme de la distribution d'énergie des neutrinos est alors figée et leur température décroît au rythme de l'expansion de l'Univers. Il existe donc un « rayonnement fossile » de neutrinos, plus ancien, dont la température est estimée à 1,95 kelvin, qui porte témoignage des conditions qui régnaient dans l'Univers quand son contenu était encore opaque à la lumière, c'est-à-dire à des époques situées au-delà de l'horizon lumineux que nous avons défini précédemment.

Est-il possible d'observer ces neutrinos cosmologiques ? La réponse est malheureusement négative parce qu'ils ont une très faible énergie, comparable à celle des photons du fond diffus cosmologique et que les neutrinos interagissent extraordinairement peu avec la matière : il faudrait une épaisseur de plomb supérieure à une année-lumière pour arrêter les neutrinos, pourtant 10 milliards de fois plus énergétiques, émis par les réactions nucléaires qui se déroulent au cœur du Soleil ! Faute de progrès considérables dans la détection des neutrinos, nous n'avons aucune chance

de percer le voile de l'horizon cosmologique lumineux. Faute de mieux, seul notre esprit pourra rendre l'Univers primordial transparent.





POURQUOI LE CIEL EST-IL NOIR ?

*On éclaire le monde avec des bougies
Tout se tient trop loin et dans l'ombre.*

Pierre Reverdy, « *Ciel étoilé* »

De tous les noirs que nous allons étudier, celui du ciel noir paraît le moins étrange. Lorsque mon ami Roland évoque la noirceur du ciel nocturne, la signification de l'adjectif « noir » ne semble pas avoir subi sous sa plume la métamorphose sémantique du langage scientifique. Tout le monde comprend immédiatement de quoi il s'agit. Ce noir est, à première vue, banal. Lorsque l'astronome se demande « pourquoi le ciel est-il noir ? », il se réfère à l'expérience universelle de la contemplation du ciel nocturne.

Et pourtant... ce noir est tout de même très particulier. Il a toute une histoire et, sans qu'on s'en doute, son passage dans la langue des philosophes, des poètes et des savants lui a conféré un sens précis et paradoxal. Car l'astronome ne se demande pas pourquoi la panthère ou l'olive sont noires. Son noir n'est pas davantage celui des plumes du corbeau. Il n'est ni d'ébène, ni de charbon, ni de fumée. Il n'a aucun lien avec la noirceur qui enlaidit la marée, ni avec celle qui entache métaphoriquement les pensées de qui ourdit de « noirs desseins ». Depuis fort longtemps, la contemplation du ciel a purifié le noir de toutes ces références trop terre à terre. Ce n'est pas une teinte d'ici-bas, circonscrite à l'enveloppe d'une chose, mais la marque d'une absence de lumière astrale. La noirceur dont il s'agit ne s'applique qu'au fond du ciel, aux espaces immenses du cosmos. Elle désigne précisément *l'obscurité que la lumière des astres peut transpercer*. Par conséquent, le noir qu'a en vue l'astronome est limpide et non opaque. Il appartient en propre au vide intersidéral. C'est une noirceur qui témoigne paradoxalement de la transparence de l'espace qui permet à la lumière des étoiles de nous parvenir à travers des distances immenses.

Ce noir *transparent*, purifié de son équivocité habituelle comme des

métaphores convenues, est froid et net. Mais il n'est pas dépourvu de résonances affectives. L'image du ciel étoilé – de la nuit piquetée – est une grande image, une métaphore inépuisable pour le poète et un spectacle propice à la méditation pour chacun d'entre nous.

La transparence du noir : le diaphane

Le noir du ciel est une couleur paradoxale : elle désigne à la fois l'absence de couleur et la transparence qui laisse passer la lumière. Dès l'Antiquité, les philosophes ont identifié la singularité de cette obscure transparence. Aristote (384-322 av. J.-C.), le premier, lui a donné un nom : le « diaphane ».

Dans son traité sur l'âme (que l'on désigne souvent sous son nom latin : *De Anima*), il explique au sujet de la vision qu'elle est avant tout une perception des couleurs et que la transmission de celles-ci suppose un médium invisible capable de se colorer : le diaphane. Lorsqu'il s'actualise, le diaphane devient lumineux et transmet la couleur : « Par diaphane, j'entends ce qui est visible sans être visible par soi absolument, mais grâce à une couleur d'emprunt » (*De Anima*, II, 7). On pense alors que le diaphane est invisible et, de fait, Aristote donne en exemples des fluides transparents tels que l'air et l'eau. Mais le point qui nous intéresse est qu'il précise aussi que seul le diaphane activé par la lumière, ce qu'il appelle le diaphane *en acte*, est transparent (et prend la couleur de la lumière qui le traverse), alors que le diaphane qui demeure *en puissance*, celui que nulle couleur ne met en mouvement, est obscur : « là où le diaphane n'est qu'en puissance se trouve aussi l'obscurité » (*De Anima*, II, 7). Or, cette indication au sujet de l'obscurité du diaphane en puissance provient certainement de l'observation du ciel nocturne, car Aristote précise : « La lumière est en quelque sorte la couleur du diaphane, quand le diaphane est en entéléchie [c'est-à-dire quand il actualise sa puissance] grâce à l'action du feu ou d'un élément semblable aux corps de la région supérieure » (*De Anima*, II, 7). Cette expression, « les corps de la région supérieure », désigne les astres. Cela signifie que l'obscurité du ciel nocturne est justement le diaphane en puissance. Le ciel noir est diaphane puisque la lumière des étoiles peut le traverser. Aristote ne confond pas cette noirceur avec celle des corps terrestres. On pourrait alors traduire la

question « pourquoi le ciel est-il noir ? » en « pourquoi le diaphane du ciel nocturne n'est-il qu'en puissance ? ». Néanmoins, à parler comme les péripatéticiens, on ne gagnerait en précision qu'au risque de ne pas être compris, puisque le mot « diaphane » n'a gardé dans notre langue que le sens de « translucide ».

La nuit en couleurs

Alors, pourquoi la nuit est-elle noire ? Le poète pourrait répondre qu'elle ne l'a pas toujours été. Il fut un temps où la nuit était *bleue*. Toutes les enluminures en témoignent. Les peintres en gardent encore le souvenir avec leur « bleu nuit ». Ce ne fut qu'à la Renaissance que le ciel nocturne devint noir : « Dans l'image, en effet, la nuit est bien plus souvent bleue que noire. C'était déjà le cas dans l'enluminure et dans la peinture du Moyen Âge » (Michel Pastoureau, *Dictionnaire des couleurs de notre temps*, 1992, p. 135). En fait, le bleu et le noir ont eu une longue histoire commune avant que le noir ne règne sans partage sur la nuit. Des poètes s'en souviennent : « Dessus était le ciel, nuancé d'étoiles diverses, dans sa belle couleur bleu-noir » (Charles Ferdinand Ramuz, *Aimé Pache, peintre vaudois*, 1911, p. 289).

Cette couleur équivoque de la nuit est aussi ancienne et précise que le diaphane. Poétiquement, la nuit demeure bleu-noir parce que les Anciens n'usaient que d'un seul et même adjectif pour désigner la nuance hybride de ces deux couleurs qui s'applique au ciel. Les Grecs disaient *kuanos*, que les Latins ont traduit par *caeruleus* (« de la couleur du ciel »), ce qui a donné « céruléen » en français, c'est-à-dire « bleu ciel ». Si bien que l'adjectif qui désignait avant tout la couleur nocturne en est venu, finalement, tel le diaphane, à perdre son obscurité primitive et à exprimer la couleur du jour. Toutefois, l'affaire de la couleur de la nuit n'est pas close. Les artistes le savent qui n'hésitent pas à lui redonner des couleurs dans leurs poèmes ou leurs peintures. Ainsi Arthur Rimbaud (1854-1891) s'émerveille d'aurores boréales qu'il n'a pas encore vues : « J'ai rêvé la nuit verte aux neiges éblouies », dans son magnifique « Bateau ivre ». Plus tard, il évoquera aussi « les dix mois de la nuit rouge » dans les *lluminations*, probablement en référence à la teinte rougeoyante du ciel contemplé au-delà du cercle polaire, quand le Soleil ne se lève jamais et

que de l'horizon sourd une aube permanente. Du fond de la nuit peuvent rejaillir toutes les couleurs.

Parmi les peintres contemporains, celui que j'admire le plus est Germain Caminade (1973), en particulier pour ses *Galactic 572* dans lesquels s'entrecroisent des nébuleuses colorées qui émergent de la noirceur primordiale. Face à ses vastes tableaux, le regard expérimente le déphasage vers l'infiniment grand : sa peinture étend notre perception aux échelles sidérales. Des forces insensées sont à l'œuvre dans les nuages de gaz où chaotiquement naissent les étoiles. Par la superposition et l'entrelacement des couleurs, l'incommensurable fraternité des astres en formation se révèle au spectateur qui se laisse prendre au vertige d'une ivresse cosmique. En les contemplant, il me semble assister au commencement des mondes, stupéfié comme devant ces images issues des télescopes spatiaux qui nous donnent à voir l'Univers en « fausses couleurs » (ce sont des images de rayonnement imperceptibles à l'œil auxquelles on attribue certaines teintes). Pareil aux astrophysiciens, Caminade scrute avec ses instruments oniriques la réalité dans des fréquences situées au-delà du spectre de la lumière ordinaire.

La profusion fabuleuse de ces couleurs réinventées se détache sur un fond d'obscurité intense. Le sortilège est lucide, presque effrayant... C'est le déferlement sauvage de la puissance inassouvie de l'Univers en rut qui outrepassa nos repères. Ardente et baveuse, la beauté de ces toiles galactiques demeure aussi convulsive que chez les surréalistes, mais, comme chez les classiques, elle est aussi sereine, surplombante, tant son dynamisme formidable réduit au néant l'agitation vaine de nos destinées trop individuelles. « Oublions-nous, un instant ou l'éternité, pour profiter des vraies splendeurs », voici le message de ses astres proliférants.

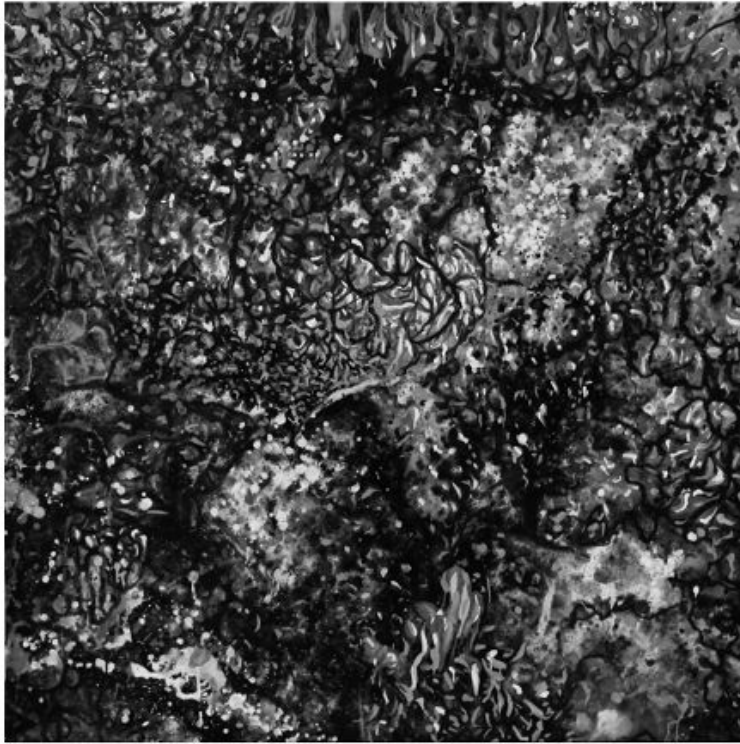


Figure 2. *Galactic 572*. Germain Caminade, 2011. 2x130x130. Huile sur toile. Collection privée.

L'écrin noir des constellations

La noirceur du ciel manifeste les dimensions incommensurables de l'Univers. Elle nous fait ressentir la distance formidable qui sépare les étoiles de la Terre. Ce noir est la couleur de la seule nuit d'en haut, la transparence diaphane du fond de l'espace, et non l'obscurité qui descend sur les paysages et qui fait trébucher au détour d'un chemin. Quand il est tombé du ciel, le noir n'est plus assez absolu. Il finit par s'affaiblir pour laisser place aux nuances de la pénombre. Même les aériens nuages sont par trop épais, trop proches et opaques pour rester fidèles à la noirceur du ciel. Ils la troublent. Ils frustrant l'astronome de la contemplation des étoiles. Ils font dégénérer le noir parfait en simple grisaille :



« Un vent léger tomba du ciel noir qu'il agitait comme à plis funèbres dans toute l'épaisseur de ce qui sembla d'abord la matière même, inconnue et innommable, du chaos primitif, mais se révéla enfin être, et planant sur tout ce paysage de cauchemar, une lourde couverture de nuages gris » (Julien Gracq, *Au Château d'Argol*, 1938, p. 146).

Seul le vaste océan peut, à la limite, recueillir une part considérable de la noirceur de la nuit sans la trahir, lorsque le navigateur isolé au large voit trembler sur les flots le reflet des constellations. Mais cela reste un reflet de la véritable splendeur.

Bachelard a évoqué la poésie des constellations dans quelques belles pages de *L'Air et les Songes*.

Il y explique que seul le rêve confère une existence aux signes du zodiaque, car les points lumineux que les anciens astronomes ont reliés entre eux en esquissant la silhouette de quelque créature mythologique ne sont, en réalité, nullement associés :

« Sur cet immense tableau d'une nuit céruleenne, la rêverie mathématicienne a écrit des épures. Elles sont toutes fausses, délicieusement fausses, ces constellations ! Elles unissent, dans une même figure, des astres totalement étrangers. Entre des points réels, entre des étoiles isolées comme des diamants solitaires, le rêve constellant tire des lignes imaginaires » (Bachelard, *L'Air et les Songes*, p. 202).

Il n'y a aucune relation réelle entre l'étoile et la galaxie bien plus lointaine. Il faut un délire amoureux pour que l'espace soit aboli et que se dessinent des constellations au travers du noir insondable. Bachelard l'illustre en imaginant une scène romantique, un berger et sa compagne qui se donnent à voir des merveilles dans la nuit :

« Ce bélier, jeune berger, que ta main caresse en rêvant, le voici donc là-haut, tournant doucement dans la nuit immense ! Le retrouveras-tu demain ? Désigne-le à ta compagne. Mettez-vous deux à le dessiner, pour le reconnaître, pour le tutoyer. Tous deux, vous allez vous prouver que vous avez la même vision, le même désir et que dans la nuit même, dans la solitude nocturne, vous voyez passer les mêmes fantômes. Comme la vie s'agrandit quand les rêves se fiancent ! » (Bachelard, *L'Air et les Songes*, p. 203).

Toutefois, l'image de la nuit, comme toute grande image, peut se renverser. Le noir est le refuge des rêves amoureux, mais aussi, et surtout, le piège de l'angoisse la plus profonde. La nuit noire est ambivalente, capable de se changer en son contraire, à la fois cruelle et douce, tour à tour dangereuse et festive, tendre mère de rêves chatoyants ou licencieux comme pourvoyeuse de cauchemars glauques et innommables.

Le choix du noir

Cette ambivalence concerne avant tout la nuit rêvée. Pour apprécier le noir de la nuit vraie, de la nuit vécue, à sa juste valeur, il faut, par temps limpide, loin des villes, lever les yeux vers un ciel inaccessible, vers la nuit intimidante, et se laisser prendre par sa lente dérive. Paradoxe bien connu : pour faire l'expérience de la nuit noire, il faut commencer par passer une nuit blanche, renoncer au sommeil, contempler le ciel en méditant. Bien que privé alors des innombrables textures qu'il prend à travers les choses, le noir n'est ni neutre ni pauvre. Il est insondable. La nuit rappelle inévitablement à la conscience l'insignifiance de notre existence individuelle. Sa noirceur est terrible et intense, comme une absence.

Ce noir terrible, qui nous assaille et nous remplit parfois d'effroi comme Blaise Pascal (1623-1662), c'est l'absence de la lumière, évidemment, mais aussi l'absence de l'être aimé. Le ciel nocturne est plein de solitude. Son poids devient écrasant s'il s'agit d'une nuit sans lune. Dans la nuit noire, la solitude devient absolue et le noir étouffant, qui isole chaque étoile. Elles ont beau être innombrables, chacune est esseulée. Faire face à

la nuit noire, c'est affronter l'image de la mort, éprouver le deuil des êtres chers. Bien des poètes ont évoqué les analogies qui relient le noir de la nuit au silence, au froid, au vide et aux autres métaphores de l'absence. Victor Hugo (1802-1885) a déclamé l'angoisse qui étirent à la pensée d'une nuit sans retour : « Où sont-ils, les marins sombrés dans la nuit noire ? » (Victor Hugo, « Oceano Nox », 1836). En revanche, si la Lune est là, à veiller sur nos songes, le noir nous invite à une mélancolie plus douce, comme s'il n'était que l'écrin d'une rêverie, comme si la nuit était l'étoffe des rêves tendres. C'est que le clair de lune est un reflet affaibli du Soleil. Il altère le noir tandis que la brillance des étoiles l'exalte.

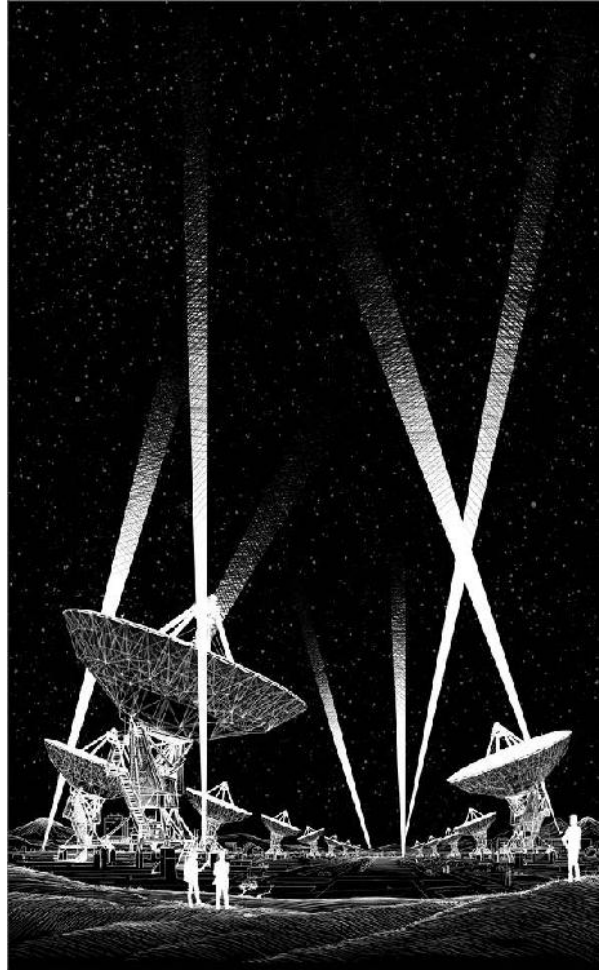
La noirceur du ciel nocturne ne connaît finalement qu'un bémol : le voile de la Voie lactée, qui traverse la voûte céleste. Selon Ératosthène (276-194 av. J.-C.), Hermès fit téter le sein d'Héra à Héraclès pour qu'il devienne immortel, mais, lorsque la déesse s'en aperçut, elle rejeta le fils illégitime de Zeus et le surplus de lait s'échappa de sa bouche. Plus tard, selon d'autres légendes, Héra se réconcilia avec Héraclès et finit par l'adopter. Ainsi, pour l'astronome, le cercle lacté indique le plan de notre Galaxie, tandis que pour le poète érudit il constitue la promesse que la tendresse maternelle de quelque déesse n'a pas complètement déserté les étendues infinies de l'espace obscur.

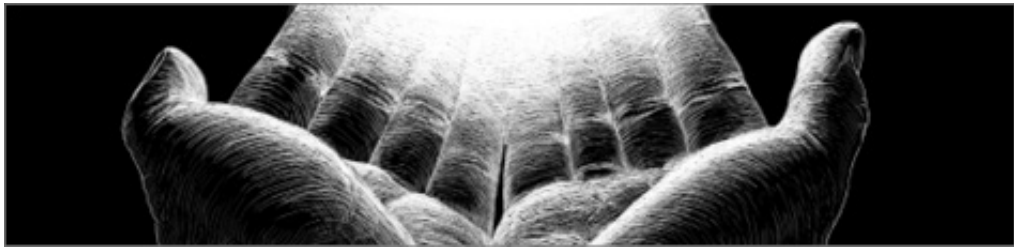
Enfin, celui qui médite pressent qu'il y a quelque lâcheté à esquiver l'obscurité totale. Comme l'écrit encore Hugo, « l'homme qui ne médite pas vit dans l'aveuglement. Celui qui médite vit dans l'obscurité. Nous n'avons que le choix du noir » (*William Shakespeare*, Livre V). En un sens, *il fallait que la nuit soit noire*. Il le fallait pour qu'elle reçoive en elle, dans l'insurpassable profondeur du ciel noir, l'angoisse, la terreur peut-être, et aussi l'apaisement, le recueillement, l'oubli des tracasseries journalières. On y devinerait presque une nécessité morale. En se faisant noire, la nuit libère des piètres apparences. Elle nous livre aux heures où chacun se retrouve seul avec sa conscience pour juger de sa conduite et trouver un sens à son existence : « Deux choses remplissent mon esprit d'une admiration et d'un respect incessants : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi », écrit Emmanuel Kant (1724-1804) dans ce qui demeure l'un des monuments de la philosophie morale, sa *Critique de la raison pratique* (1788). En rappelant l'inéluctabilité de la mort environnante, le ciel noir nous montre qu'il est possible de faire rayonner

la vie comme une étoile, c'est-à-dire de donner sens à notre fragile existence par la liberté. Si la nuit n'était pas si noire, nous serions privés d'une expérience esthétique fascinante, intime et sentimentalement inestimable, mais aussi d'une expérience existentielle fondamentale.

À la question « pourquoi le ciel nocturne est-il noir ? », le philosophe aurait tendance à répondre d'une manière finaliste qui fera sourire l'astrophysicien : « Le ciel est noir pour qu'on puisse y voir les étoiles. » C'est qu'une telle réponse appartient justement au règne des fins, au domaine moral. Si angoissante que soit la contemplation du ciel noir, cette angoisse est celle de la liberté qui prend conscience d'elle-même, et cette certitude d'être libre, même seul face aux ténèbres, est d'un grand réconfort quand la marche des affaires du monde paraît compromise, voire désespérée. C'est, à peu de chose près, ce que rappela un grand moraliste peu de temps avant d'être assassiné :

« Le pays est malade. La violence ravage nos contrées ; la confusion est partout. C'est une chose étrange à dire. Mais je sais que, d'une certaine façon, ce n'est que quand il fait assez sombre que l'on peut voir les étoiles » (Martin Luther King, « J'ai été au sommet de la montagne », 1968).





LE CORPS NOIR

Pour voir qu'il fait noir, on n'a pas besoin d'être une lumière.

Philippe Geluck, *L'avenir du Chat*

À la toute fin du ^{xix}^e siècle, le physicien britannique William Thomson (1824-1907), plus connu sous le nom de Lord Kelvin, estimait qu'il n'y avait plus rien à découvrir en physique. Seuls deux nuages assombrissaient le ciel de sa discipline. Or l'un d'eux concernait la question du spectre de la lumière émise par la matière chauffée. Les savants étaient parvenus à un modèle mathématique du phénomène s'ajustant raisonnablement bien à la courbe expérimentale pour les petites fréquences lumineuses, vers le rouge et l'infrarouge. En revanche, il y avait un désaccord important entre le modèle et l'expérience pour les grandes fréquences (bleu et violet) où les valeurs expérimentales étaient beaucoup plus faibles que les valeurs prévues par le modèle. En fait de nuage, ce problème fut à l'origine d'un véritable cyclone puisque les développements théoriques et expérimentaux nécessaires à sa résolution donnèrent naissance à la théorie quantique !

Reprenons l'histoire à ses débuts, dans le Berlin de la fin du ^{xix}^e siècle. La capitale du nouveau Reich hébergeait alors certains des meilleurs physiciens expérimentateurs et théoriciens du monde. La physique semblait à son apogée et reposait sur trois piliers : la mécanique, incluant la théorie de la gravitation introduite par Isaac Newton (1642-1727) ; la théorie de l'électromagnétisme, développée notamment par James Clerk Maxwell (1831-1879) ; la thermodynamique, plus récente, qui traitait des différentes formes d'énergie et de la façon dont elles s'échangeaient et se transformaient. Née sous l'impulsion du physicien français Sadi Carnot (1796-1832) et de l'étude des machines à vapeur par des physiciens anglais, la thermodynamique reposait sur deux principes :

– la conservation de l'énergie, selon laquelle la variation d'énergie interne d'un système fermé est égale aux quantités de chaleur et de travail échangées avec l'extérieur ;

– l'augmentation de l'entropie, traduisant le fait que la chaleur s'écoule toujours d'un corps chaud vers un corps froid et jamais dans le sens

contraire.

Cette discipline était scindée en deux branches. La première, la thermodynamique « phénoménologique », s'intéressait à la description macroscopique des phénomènes calorifiques sans se prononcer sur leur nature ou leur cause microscopique. Sous l'impulsion du physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906), la seconde, la thermodynamique statistique tentait, elle, de comprendre les transformations thermiques à partir d'une description microscopique de la matière en faisant l'hypothèse de l'existence de molécules ou d'atomes (les deux termes étant encore équivalents à l'époque).

Un des problèmes préoccupant les physiciens du domaine concernait le rayonnement émis par un corps chauffé qui, d'abord rougeâtre, devient rouge vif puis blanc au fur et à mesure que sa température augmente. Il s'agissait d'expliquer les caractéristiques détaillées de ce rayonnement à partir des propriétés de la matière qui l'émet. En 1859, le physicien allemand Gustav Kirchhoff (1824-1887) énonça le premier résultat important sur ce sujet en appliquant le second principe de la thermodynamique à un corps à l'équilibre thermique. Il prouva que le rapport entre l'émissivité d'un corps – sa capacité à émettre de la lumière – et son coefficient d'absorption – qui mesure la façon dont il absorbe la lumière – est une fonction universelle de la fréquence lumineuse : elle est indépendante du corps et ne dépend que de sa température. Cette universalité confère à la fonction de Kirchhoff un caractère fondamental. En pratique, elle signifie qu'un corps capable d'absorber fortement la lumière à une certaine fréquence est aussi un bon émetteur à cette fréquence, et *vice versa*. Cela entraîna la naissance du concept de « corps noir ». Forgé par Kirchhoff en 1862, le corps noir est l'objet idéal capable d'absorber l'intégralité de l'énergie lumineuse qu'il reçoit. Pour demeurer à l'équilibre, il en rayonne donc une quantité exactement égale. Le corps noir fournit l'étalon idéal du rayonnement des corps matériels, tous plus ou moins noirs, mais jamais de façon absolue.

Un deuxième résultat très important fut obtenu en 1879 par le physicien austro-hongrois (slovène) Josef Stefan (1835-1893). Il établit expérimentalement que le flux lumineux émis par unité de surface d'un corps noir est proportionnel à la puissance quatrième de sa température. Grâce à sa loi, il parvint à déterminer la température du Soleil (environ

5 500 °C) en rapportant la mesure de son rayonnement total à sa surface présumée. Car, aussi bizarre que cela puisse paraître eu égard au sens ordinaire de l'adjectif « noir », le Soleil est un corps noir. Comme le montrera Vincent, cette assimilation du Soleil à un corps noir est un paradoxe profondément perturbant pour l'imaginaire qui oppose l'incandescence de l'astre à la cendre et à la suie, mais c'est aussi source d'ambivalences fécondes.

L'énigme du rayonnement du corps noir

À cette époque, la manière de reproduire le plus fidèlement les caractéristiques d'un corps noir consistait à percer un très petit trou dans un four. Tout rayonnement traversant cette ouverture subit de multiples diffusions sur les parois internes. Finalement absorbée dans le four, la lumière entrante n'en ressort jamais. La surface immatérielle du trou est donc parfaitement absorbante comme le serait un corps noir. Par ailleurs, les parois internes du four émettent un rayonnement à toutes les fréquences à cause de l'agitation thermique de leurs atomes. Les physiciens étudiaient la lumière qui émerge du trou, résultant de l'équilibre thermique entre émission et absorption. C'est d'ailleurs un four qui fut utilisé par le physicien allemand Wilhelm Wien (1864-1928) pour déterminer expérimentalement la forme du spectre lumineux en fonction de la température. En 1893, Wien franchit une étape décisive. Il calcula la forme générale du spectre du corps noir en fonction de la fréquence ν de la lumière et de la température T du corps à partir d'arguments purement thermodynamiques. Ce spectre devait nécessairement être de la forme $u(\nu, T) = \nu^3 F(\nu/T)$ où F est une fonction inconnue ne dépendant que du rapport entre fréquence et température. En sommant, à température fixée, les contributions de toutes les fréquences, l'expression de Wien permet de démontrer la loi de Stefan, qui était ainsi justifiée théoriquement. En 1896, le même Wien proposa une fonction F particulière qui aboutissait à un spectre en bon accord avec ses mesures pour les fréquences élevées : $u(\nu, T) = a (\nu/c)^3 / \exp(b \nu/T)$, où a et b sont des constantes déterminées par l'expérience et c est la vitesse de la lumière.

L'un des amis proches de Wien, le physicien allemand Max Planck

(1858-1947), s'était aussi intéressé au problème du corps noir dès 1894, avec un objectif un peu différent. Fasciné par le second principe de la thermodynamique auquel il avait consacré sa thèse de doctorat, Planck refusait, par ailleurs, l'hypothèse des atomes soutenue par Boltzmann. En étudiant le corps noir, il espérait aboutir à une compréhension nouvelle de l'irréversibilité en thermodynamique qui ne serait pas fondée sur cette hypothèse. Il l'imaginait plutôt liée à l'interaction entre matière et rayonnement, supposée continue à cette époque, et non à des effets de statistique microscopique comme le soutenait Boltzmann.

Dès 1895, Planck eut l'idée de décrire le corps noir par un ensemble de résonateurs (oscillateurs) parfaits placés dans une cavité aux parois parfaitement réfléchissantes. Ces résonateurs sont des dipôles électriques oscillant sous l'effet d'un champ électromagnétique. D'après le résultat de Kirchhoff, le spectre final du rayonnement émis et diffusé par ces résonateurs devait permettre de retrouver la loi du corps noir. Planck choisit ce modèle, car la diffusion d'une onde électromagnétique par un résonateur est un processus irréversible même si le résonateur est parfait, c'est-à-dire dépourvu de tout frottement ou de toute résistance. Boltzmann critiqua cette modélisation, car les équations de Maxwell de l'électromagnétisme sont invariantes par renversement du temps. Réversibles temporellement, elles ne peuvent par conséquent mener à l'apparition d'irréversibilité. Une controverse s'engagea entre les deux savants et Planck dut finalement admettre que Boltzmann avait raison. Toutefois, ce dernier accompagna ces critiques d'une suggestion constructive : pour obtenir un comportement irréversible, il faut procéder comme dans sa démonstration de l'irréversibilité de l'évolution d'un gaz où il avait introduit un désordre moléculaire. Cela revient à ajouter au modèle de Planck l'hypothèse d'un mouvement désordonné des résonateurs.

L'électromagnétisme étant exclu comme possible source de l'irréversibilité, c'est sur la thermodynamique que Planck concentra ses efforts. Désirant avant toute autre chose mettre au jour les causes véritables qui fondent les lois physiques, la formule empirique de Wien ne le satisfaisait pas. Planck caressa donc l'espoir de déterminer le spectre du corps noir en n'utilisant que des principes fondamentaux. Il développa un nouveau modèle dans lequel les vibrations du rayonnement

électromagnétique et celles des résonateurs sont complètement incohérentes entre elles. Il en tire deux conclusions : à grande échelle l'évolution du système est irréversible ; le rayonnement finit par devenir homogène et isotrope. Il avait progressé sans parvenir cependant à un modèle satisfaisant.

Telle était la situation à la veille de l'année charnière de 1900 durant laquelle deux équipes d'expérimentateurs étudièrent le comportement du spectre du corps noir dans le régime des basses fréquences. Ils arrivèrent à la même conclusion : dans cette gamme de fréquences la formule de Wien est complètement fautive et ne rend pas compte des données expérimentales.

Le 7 octobre 1900, le physicien allemand Heinrich Rubens (1865-1922), expérimentateur à l'Institut impérial de physique et de technologie de Charlottenburg, rendit visite à Planck dans sa villa de la banlieue berlinoise. Les deux physiciens abordèrent évidemment la question du corps noir et Rubens décrivit à Planck ses dernières avancées sur la mesure de la queue infrarouge du spectre : la densité d'énergie y est proportionnelle à la température. Après le départ de Rubens, Planck se mit immédiatement au travail et lui envoya, dès le lendemain, une carte postale proposant une nouvelle formule pour le spectre du corps noir : $u(\nu, T) = a (\nu/c)^3 / [\exp(b\nu/T) - 1]$. Cette formule a le mérite de respecter la contrainte de la proportionnalité de l'énergie et de la température à basse fréquence (dans l'infrarouge donc) tout en se confondant avec la formule de Wien pour les hautes fréquences. La nuit même, Rubens et son collègue Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) firent d'autres mesures qui s'accordaient parfaitement avec la nouvelle formule de Planck à toutes les fréquences. Quelques jours plus tard, le 19 octobre, Planck présenta son calcul à ses collègues de la Société allemande de physique, à Berlin.

Si Planck a obtenu son résultat si rapidement, ce n'est ni par hasard ni par un caprice de l'inspiration. Il possédait déjà tous les outils conceptuels et mathématiques, publiés dans ses articles précédents. Avec sa nouvelle formule, il ne faisait que conjecturer une interpolation entre la formule de Wien et une autre, due au physicien anglais John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919). En juin 1900, ce dernier avait proposé que le spectre à basse fréquence s'écrive $u(\nu, T) = 8\pi (\nu^2/c^3) kT$. La formule de Rayleigh souffrait cependant d'un mal récurrent en physique : en sommant

les contributions à toutes les fréquences, elle conduisait à une énergie totale infinie. En 1911, le physicien autrichien Paul Ehrenfest (1880-1933) nommera cette conclusion « catastrophe ultraviolette ». Dans sa présentation, Planck ne fit aucune mention de cet inconvénient, ni même du résultat de Rayleigh, dont il n'acceptait pas les hypothèses atomistiques. Toutefois, Planck ne se contenta pas de ce résultat, car il entendait toujours le déduire de principes premiers. Il s'en expliqua dans son discours de remise du prix Nobel de physique, en 1920 : « Même si la formule du rayonnement s'était avérée parfaitement correcte, elle n'aurait pu n'être qu'une formule d'interpolation trouvée grâce à une conjecture heureuse, et cela m'aurait laissé insatisfait. Dès sa découverte, je m'efforçai donc de lui donner une réelle interprétation physique, ce qui m'amena à réfléchir aux rapports entre probabilité et entropie, suivant les idées de Boltzmann. »

Pour obtenir cette justification plus fondamentale qu'il appelait de ses vœux, Planck ne trouva pas d'autre solution que d'avoir recours aux méthodes statistiques développées par Boltzmann même s'il demeurait résolument opposé à l'hypothèse atomistique. Il introduisit l'idée que l'énergie totale des résonateurs est divisée en portions d'énergie ε , proportionnelle à leur fréquence ν ($\varepsilon = h\nu$). Du coup, bien que les résonateurs et le rayonnement aient des énergies qui varient continûment, leurs échanges se font par petits paquets quantifiés. Le facteur de proportionnalité h qui apparaît dans cette expression est une nouvelle constante de la physique qui n'est pas tout de suite reconnue comme une constante fondamentale. En effet, Planck se refusa catégoriquement à l'interpréter de manière réaliste comme Boltzmann l'avait fait avec sa constante k justifiée par l'existence des atomes. C'est malgré lui, dans un « acte de désespoir » (« car je me suis éloigné de la nature en toute conscience », disait Planck), qu'il introduisit la constante liant énergie et fréquence et l'appela « h », car c'était l'initiale de « Hilfe ! » (« À l'aide ! » en allemand). Cela lui permit de démontrer sa formule et de préciser les valeurs des constantes $a = 8\pi h$ et $b = h/k$ introduites empiriquement. Il obtint le spectre suivant : $u(\nu, T) = 8\pi h(\nu/c)^3 / [\exp(h\nu/kT) - 1]$. Planck présentera cette formule à l'Académie de Berlin quelques semaines plus tard, le 14 décembre 1900. La comparaison avec la première formule proposée par Planck pourrait faire

penser que son action se résumait à un simple changement de notation. Il s'agit pourtant d'un réel saut conceptuel.

La constante h n'allait pas tarder à devenir l'emblème de la physique quantique dont l'émergence suivit rapidement les travaux de Planck. Au cours de l'année 1905, le jeune Albert Einstein (1879-1955) rédigea plusieurs articles révolutionnaires. Le premier prenait au sérieux les idées de Planck, à vrai dire plus au sérieux que Planck ne les prenait lui-même. Pour Einstein la lumière n'est pas un phénomène continu mais est véhiculée par des sortes de grains d'énergie, qui seront plus tard baptisés « photons ». Cela lui permet d'interpréter naturellement l'effet photoélectrique découvert par Heinrich Hertz (1857-1894) en 1887. La lumière a donc, dans certaines circonstances, une structure corpusculaire et non pas ondulatoire, au sens où elle est composée de petits paquets insécables transportant une énergie qui dépend de sa fréquence. Cette découverte, ainsi que d'autres comme la preuve expérimentale de l'existence de l'atome, fut à l'origine de la révolution quantique du début du xx^e siècle.

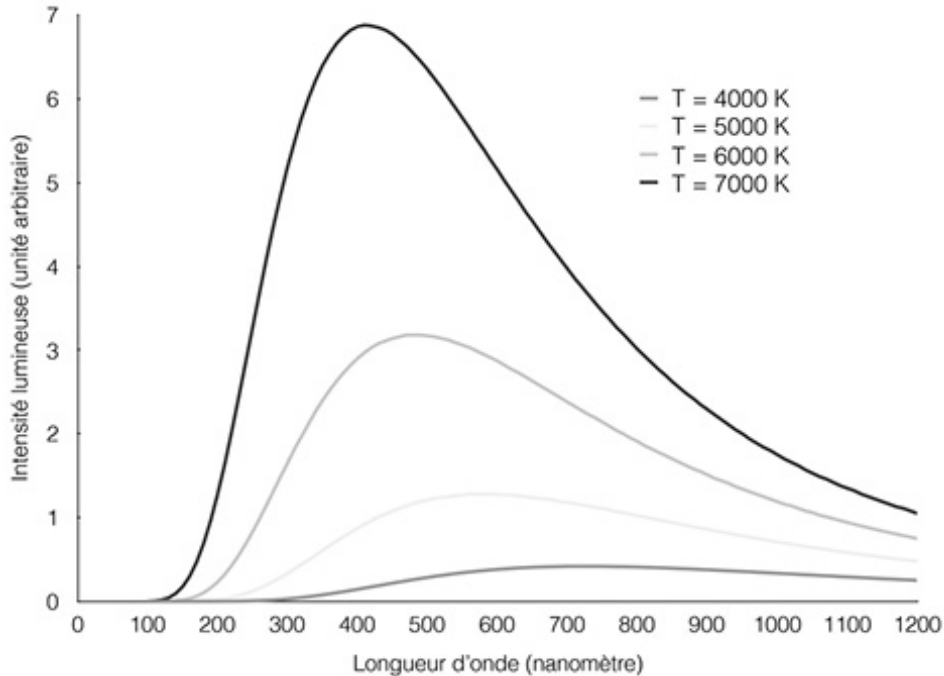


Figure 3. Le spectre du corps noir a une forme qui ne dépend que de la température de la source. Quand la température augmente l'aire sous la courbe augmente et le maximum de la courbe se déplace vers les courtes longueurs d'onde.

La résolution de l'énigme du rayonnement du corps noir fut donc l'aventure qui fit basculer la physique du domaine classique, presque achevé, vers l'horizon quantique insoupçonné et surprenant. Pour Lord Kelvin, il ne s'agissait que d'un petit nuage qui serait vite dissipé. Pour Planck, ce fut une obsession qui l'amena à travailler contre ses propres convictions. Et pour Einstein, ce fut l'instrument de la plus fantastique découverte jamais faite au sujet de la lumière, la fusion des notions de corpuscule et d'onde.

Le corps noir existe-t-il vraiment dans la nature ?

La métrologie a besoin de dispositifs simulant le plus parfaitement possible l'émission d'un corps noir idéal, défini comme un objet ayant une émissivité très proche de 1. Le *super-black* est un exemple d'un tel matériau. Il est fabriqué en attaquant chimiquement la surface d'un alliage nickel-phosphore et ne réfléchit que 0,4 % de la lumière incidente. Une autre solution consiste à arranger verticalement des nanotubes de carbone sur une surface de silicium : le matériau résultant absorbe 99 % de la lumière incidente, des ultraviolets à l'infrarouge. Enfin, la société Surrey NanoSystems commercialise le Vantablack, un pigment pulvérisable capable d'absorber 99,8 % de la lumière incidente. L'artiste britannique Anish Kapoor (1954) a d'ailleurs obtenu l'usage exclusif de ce revêtement pour des œuvres artistiques.

Comme on l'a signalé à propos du Soleil, la partie continue du spectre de certaines étoiles est quasiment identique au spectre d'un corps noir. Pourtant, l'effet combiné de l'émission et de l'absorption à l'intérieur de l'étoile impose au spectre émis par la surface d'être, en première approximation, une superposition de corps noirs associés aux différentes couches internes. Plus chaudes, les couches profondes sont donc plus lumineuses que les couches superficielles, mais elles sont aussi plus absorbées. Le spectre émis par chaque couche doit donc être pondéré par un facteur tenant compte de cette absorption. Le spectre observé, somme de toutes ces contributions, n'a donc *a priori* aucune raison de ressembler à un spectre de corps noir. Mais, pour le Soleil, l'épaisseur de la région dont semble émis le rayonnement que nous recevons est d'environ

500 kilomètres, bien plus petite que le rayon solaire de 696 000 kilomètres. La température de cette photosphère est donc relativement uniforme faisant du spectre du corps noir une approximation raisonnable pour le spectre solaire. On définit ainsi la température effective d'une étoile comme celle qu'aurait un corps noir rayonnant autant d'énergie que l'astre. Dans le cas du Soleil, elle vaut 5 770 kelvins, soit environ 5 500 °C.

Le corps noir le plus froid

Au milieu des années 1960, deux radioastronomes américains, Arno Penzias (1933) et Robert Wilson (1936), découvrent un rayonnement semblant provenir de toutes les directions du ciel.

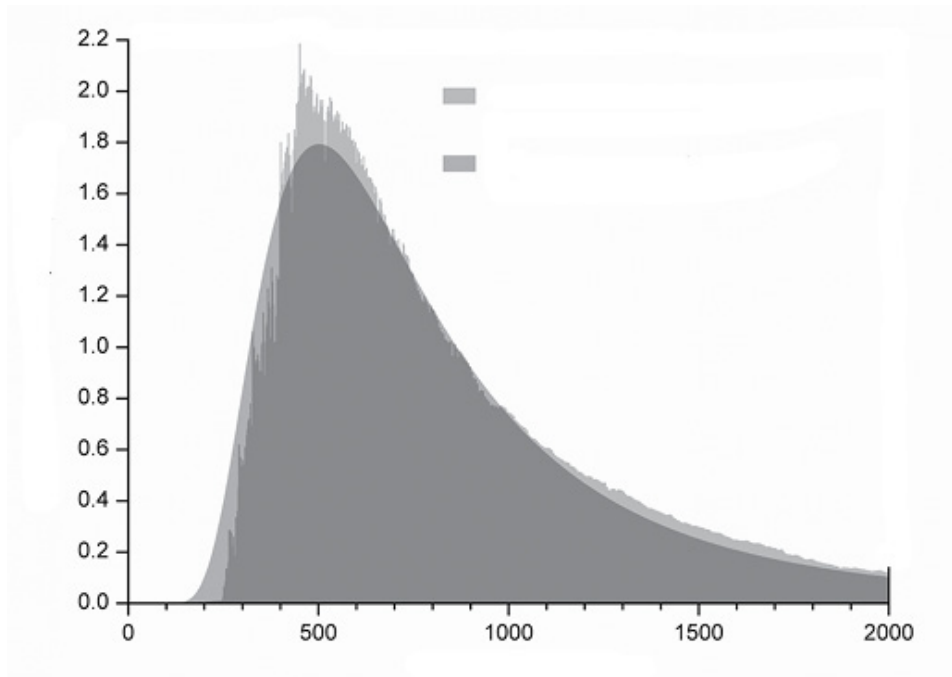


Figure 4. Le spectre du Soleil est assez proche de celui d'un corps noir à 5770 kelvins.

Surprenante à leurs yeux, l'existence de ce rayonnement avait été prédite en 1948 par le physicien américain d'origine russe George Gamow (1904-1968). Étant donné l'expansion de l'Univers, Gamow conjectura qu'il avait dû émerger d'une phase pendant laquelle il avait été beaucoup plus dense et plus chaud que maintenant. Si la température de l'Univers a atteint plusieurs milliers de kelvins dans le passé, alors la matière était totalement ionisée et la lumière diffusait incessamment sur les électrons

libres. La propagation de la lumière se faisait alors en zigzag plutôt qu'en ligne droite. Comme un gaz qui se détend, l'expansion dilue et refroidit le contenu de l'Univers.

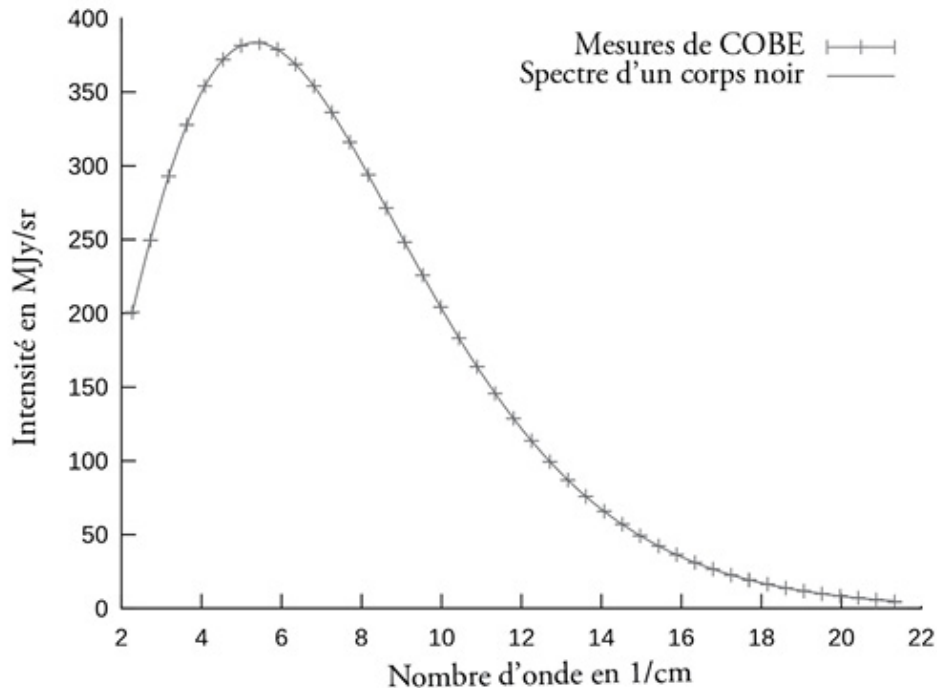
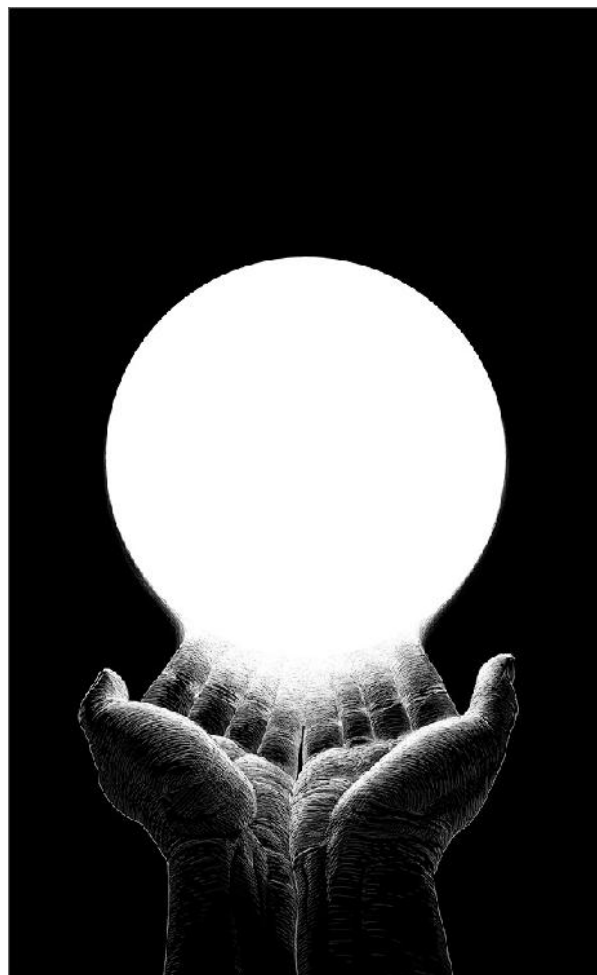


Figure 5. Spectre du fond diffus cosmologique obtenu par le satellite COBE en 1992. C'est presque exactement celui d'un corps noir dont la température est de 2,725 kelvins.

Quand la température descend à environ 3 000 kelvins les électrons peuvent s'associer aux protons pour former les premiers atomes d'hydrogène neutre. L'Univers était alors âgé d'environ 380 000 ans. À ce moment, la lumière peut se propager librement, en ligne droite, dans un Univers devenu transparent. En imaginant ce scénario, Gamow prédit que le rayonnement qui prévalait au moment où l'Univers est devenu transparent continuerait aujourd'hui à le remplir. Toutefois, l'énergie de ce rayonnement est actuellement plus faible qu'à ses débuts car en même temps l'Univers se dilatait, se diluait et se refroidissait. Le rayonnement observé par Penzias et Wilson s'interprétait aisément dans ce cadre et cette découverte leur valut le prix Nobel de physique, car elle renforçait la cohérence des modèles d'Univers en expansion. Émis par un corps chaud à environ 3 000 kelvins, ce rayonnement primitif est maintenant perceptible sous forme de micro-ondes dont la température ne vaut plus que 2,725 kelvins. Presque aussi vieux que notre Univers, il est appelé « fond

diffus cosmologique » et nous donne une image fossile de notre Univers au moment de la formation des atomes d'hydrogène neutre. La première observation précise du fond diffus cosmologique fut réalisée par le satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) en 1992, suivi par WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) en 2005 puis par Planck en 2013. Le spectre de ce rayonnement suit presque parfaitement celui d'un corps noir, avec une déviation maximale de l'ordre de 0,005 %. Par définition, cela fait du fond diffus cosmologique le plus parfait corps noir jamais observé, mais aussi le plus grand et, très probablement, l'un des plus froids.





LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

No colors anymore I want them to turn black.

The Rolling Stones, *Paint it black*

Dans l'expression scientifique « corps noir », le sens de l'adjectif « noir » ne semble pas très problématique : ne désignerait-il pas tout simplement la coloration d'un objet physique ? En fait, cette noirceur ne renvoie que par analogie à la couleur noire. La couleur d'une chose correspond à une longueur d'onde réfléchiée ou diffusée par sa surface (elle peut dépendre aussi de la structure microscopique de l'objet), tandis que les autres composantes de la lumière sont absorbées. Un objet blanc réfléchit l'ensemble des longueurs d'onde de la lumière visible, tandis que noir il les absorbe toutes. Un corps de couleur noire chauffe donc davantage au soleil qu'un corps de couleur blanche. Il y a cependant une différence de taille entre ce comportement bien connu et celui du corps noir des physiciens. Si ce corps est dit « noir », c'est parce qu'il absorbe toutes les fréquences du spectre électromagnétique, pas seulement celles qui correspondent aux couleurs de l'arc-en-ciel : il absorbe l'intégralité du spectre, y compris des fréquences imperceptibles à l'œil telles que l'ultraviolet, les micro-ondes, etc. Le corps noir désigne l'absorbant parfait. Sa noirceur n'est plus superficielle, une teinte qui varie selon l'éclairage, mais sa propriété essentielle, sa définition. À celle-ci, il faut ajouter une autre caractéristique du corps noir : pour rester à l'équilibre, il doit restituer sous forme de rayonnement ce qu'il a absorbé.

Le corps noir n'appartient plus au monde empirique des choses colorées, mais aux idées de la théorie physique : c'est un modèle pour approximer le comportement d'objets réels qui sont toujours un peu *gris*, c'est-à-dire qui réfléchissent tout de même une partie des ondes électromagnétiques reçues. *Le corps noir est un idéal et sa noirceur est transcendante.* Les physiciens anglophones ont forgé un néologisme pour le désigner sans équivocité : *blackbody*, qui, en contractant l'adjectif et le substantif, les a

arrachés à la langue ordinaire. Notre langue se prête moins bien à cet artifice (« corps-noir » ?) sans que la rupture sémantique avec le langage ordinaire soit moins indispensable. Pour explorer l'imaginaire de ce noir, il ne suffira pas de filer des métaphores visuelles. Il ne faudra pas davantage céder aux jeux de mots faciles : le noir dont il s'agit ne saurait être celui d'un épiderme. La psychanalyse bachelardienne de la connaissance objective du corps noir exige d'approfondir les images qui dérivent des caractéristiques physiques du corps noir, c'est-à-dire avant tout de sa capacité d'absorption totale et de son rayonnement.

Comme Roland l'a rappelé, une des réalisations les moins imparfaites d'un corps noir est un four, c'est-à-dire une enceinte percée d'un petit trou qui piège la lumière. L'expression « il fait noir comme dans un four » est attestée dès le premier *Dictionnaire de l'Académie française* (1694). Elle désigne la noirceur d'un four aux parois recouvertes de suie. Or, cela correspond à une intuition assez juste du corps noir. C'est le vide de l'ouverture d'un four qui est la réalisation la moins imparfaite du corps noir. Mais ce n'est encore qu'une approximation et, même, par certains côtés, une image trompeuse, car comment comprendre avec l'image du four aux parois recouvertes de suie que *le Soleil est un corps noir* ? La première image s'oppose à la seconde comme la légère cendre à l'épais magma, comme le sens commun à la pensée scientifique. Le Soleil absorbe pourtant bien l'intégralité du rayonnement et le restitue sous forme de chaleur. Il n'est pas noir, mais c'est un corps noir. Voilà un exemple frappant des distorsions de l'image écartelée entre le sens commun et la pensée rationnelle.

Pourtant, l'expression « noir comme dans un four » redevient très pertinente, et même parfaitement juste, quand on réalise que l'on distingue encore moins ce qui se trouve dans un four quand celui-ci n'est pas à l'arrêt (obscur), mais allumé et en plein régime (incandescent). Non seulement sa luminosité est aveuglante, mais ce qui s'y trouve se comporte précisément comme un corps noir, ce qui signifie que l'intérieur du four absorbe et rejette la lumière de façon intégrale si bien que rien ne peut y être distingué. Jean Perrin (1870-1942) expliquait ainsi dans son livre visionnaire sur *Les Atomes* (1913) :

« Si donc on regarde au travers de l'ouverture, on ne pourra distinguer dans l'enceinte aucun détail et on aura l'impression singulière d'un gouffre lumineux qui ne laisse rien

apercevoir. Si par exemple on regarde par une petite ouverture dans un creuset incandescent contenant du métal en fusion, il est impossible de voir le niveau du liquide. Ce n'est pas seulement aux basses températures qu'on ne peut rien distinguer dans un four » (*Les Atomes*, p. 151).

Le corps noir n'est plus alors la béance obscure mais un abîme aveuglant, un « gouffre lumineux ». Dans tous les cas, cependant, il dévore la lumière. Il se définit par ce qu'il absorbe et par son refus de se laisser voir. Cette présence abyssale paraît dissoudre l'image de la matière, elle n'est, toutefois, pas dénuée de matérialité, car il faut bien qu'il y ait une matière pour que la lumière y soit absorbée. Mais c'est comme si le noir constituait sa propre matière. Bachelard observe que, de toutes les couleurs, le noir est imaginativement la plus substantielle, la seule à faire vraiment preuve de consistance : « Toute couleur méditée par un poète des substances trouve le noir comme solidité substantielle, comme négation substantielle de tout ce qui atteint la lumière » (*La Terre et les Rêveries du repos*, 1948, p. 35). Le noir figure le retrait de la substance en elle-même. En approfondissant cette intuition, on s'aperçoit que cette noirceur est imaginativement au cœur de toutes choses, qu'elle symbolise leur essence cachée. La substance close sur elle-même.

La noirceur secrète des corps

Toutefois, l'opacité profonde des choses ne signifie pas leur indifférence à la lumière. Le corps noir absorbe la lumière. Il est affecté par cet apport d'énergie. Sa température augmente. Alors, il doit rayonner pour se libérer de l'excès d'énergie qui menace son équilibre. Ainsi, le corps noir accueille toute la lumière, quelque métamorphose s'opère en son for intérieur, puis il la restitue sous forme de rayonnement invisible. C'est une sorte de miroir très étrange qui digère et transforme ce qu'il a reçu avant de le renvoyer. Les autres couleurs n'ont pas cette sombre puissance. Ce ne sont, au fond, que des reflets, des qualités superficielles, atours dénués de profondeur. Leurs réflexions partielles dissimulent l'activité sous-jacente du noir parfait. Bachelard souligne que cette intuition est très ancienne. On la trouve déjà exprimée par Anaxagore : « La neige composée d'eau est noire malgré nos yeux. » Elle s'appuie sur un plaisir de l'imagination, celui de renverser une valeur en son contraire. Les hommes du Moyen Âge aimaient à croire que le cygne, blanc à l'extérieur, était noir à l'intérieur.

Cette dialectique fut partagée par nombre d'écrivains qui ont eu l'obsession de découvrir la noirceur intime des choses dissimulée sous de fausses apparences colorées. La blancheur du lait serait la forme exacerbée de cette tromperie : « Comment mieux dire la noirceur intime, le péché intime d'une substance hypocritement blanche ! [...] L'eau laiteuse sous la lune a la noirceur intime de la mort, l'eau balsamique a un arrière-goût d'encre, l'âcreté d'un breuvage de suicide » (*La Terre et les Rêveries du repos*, p. 31). La crainte d'être trahi par des couleurs évanescentes n'est cependant qu'une tonalité particulière de l'imaginaire de la noirceur secrète. Le corps noir entretient une relation plus neutre, mais non moins paradoxale entre l'être et le paraître : il refuse de se manifester à travers les reflets de la lumière, et rayonne, pourtant, autour de lui de toute sa puissance.

Le rayon noir

Certains phénomènes hallucinatoires, comme les « visions noires » d'Henri Michaux (1899-1984), ou quelques délires oniriques expriment cette propension de la noirceur intime des choses à rayonner. Dans sa *Phénoménologie de la perception*, Maurice Merleau-Ponty (1908-1961) a analysé une pareille intuition dans un passage fort intrigant (car absolument pas phénoménologique et ne renvoyant, en définitive, à aucune perception réelle) :

« Je dis que mon stylo est noir et je le vois noir sous les rayons du soleil. Mais ce noir est beaucoup moins la qualité sensible du noir qu'une puissance ténébreuse qui rayonne de l'objet, même quand il est recouvert par des reflets, et ce noir-là n'est visible qu'au sens où l'est la noirceur morale. La couleur réelle demeure sous les apparences comme le fond se continue sous la figure, c'est-à-dire non pas à titre de qualité vue ou pensée, mais dans une présence non sensorielle » (Maurice Merleau-Ponty, *Phénoménologie de la perception*, 1945, p. 352).

Selon cette étrange description, où la noirceur transcende la perception, un corps qui est vraiment noir se doit de rayonner obscurément. Pour qu'un philosophe aussi rigoureux que Merleau-Ponty se laisse entraîner à pareille divagation, il faut que l'image du « corps noir rayonnant » soit très puissante, et que sa « puissance ténébreuse » réponde à une nécessité inconsciente profonde. Une phénoménologie fourvoyée de la perception devient alors une psychanalyse très juste de l'imaginaire du corps noir : parce qu'il *est* noir, son stylo noir échappe aux jeux de la lumière et

rayonne de noirceur. L'imagination procède à l'inversion des rôles entre la lumière et les ténèbres : dans nos pires cauchemars, n'est-ce pas l'obscurité qui rayonne et dissipe la lumière ? Ce fantasme angoissant est magnifié dans le cycle de *L'Incal*, la formidable bande dessinée scénarisée par Alejandro Jodorowsky (1929) et dessinée par Mœbius (Jean Giraud, 1938-2012) : un « œuf d'ombre » y dévore les étoiles et propage un étrange rayonnement noir et visqueux au travers des galaxies, une sorte de marée noire qui menace de plonger l'Univers dans les ténèbres.

Le rayonnement du corps noir n'est donc pas seulement une énigme pour le physicien. Il l'est tout autant pour le philosophe qui cherche à comprendre comment une image aussi contre-naturelle peut s'élaborer, s'amplifier et posséder un esprit au point de l'obscurcir ou de l'effrayer. Peut-être est-ce un effet analogue au « choc noir » qui affecte les sujets qui contemplent pour la première fois les taches d'encre de Chine du test de Rorschach ? La subjectivité s'y projette avec une facilité déconcertante et y révèle ses névroses. Le rayon noir imaginaire inquiète pour des raisons analogues : en envahissant l'espace psychique, il force la conscience à contempler les choses informes qui s'agitent dans l'abîme de l'inconscient. Bachelard souligne qu'un peintre qui utilise la dilatation intime du noir est capable, avec une très grande économie de moyen, de susciter des émotions vives et profondes : « Ainsi, une seule tache noire, intimement complexe, dès qu'elle est révélée dans ses profondeurs, suffit à nous mettre en situation de ténèbres » (*La Terre et les Rêveries du repos*, p. 90). Séduisante et mystérieuse expression qui sied à notre propos : un corps noir rayonnant nous plonge « en situation de ténèbres ». Les images noires présentes chez tant de peintres et de dessinateurs (on songe à Francisco de Goya, à Hugo, à Odilon Redon, à Franquin, etc.) possèdent en effet cette élasticité spectaculaire, une capacité prodigieuse à faire surgir les figures d'un passé refoulé et à se dilater pour hanter notre esprit. Ce dynamisme les rend à la fois fascinantes et menaçantes. Elles tirent leur force de leur enracinement au sein de cet élément imaginaire aussi puissant et primitif que le feu, l'eau, l'air ou la terre : elles se déploient à travers *les ténèbres*. L'élément ténébreux est une matière dynamique, une force expansive et remuante : « Toute ténèbre est fluente, donc toute ténèbre est matérielle. Ainsi vont les songes de la matière nocturne. Et pour un authentique rêveur de l'intérieur des substances, un coin d'ombre

peut évoquer toutes les terreurs de la vaste nuit » (*La Terre et les Rêveries du repos*, p. 91). Dans le cas du corps noir, ce dynamisme est précis : les ténèbres intérieures sont à la fois *absorbantes* et *rayonnantes*. Elles ne s'opposent pas à la lumière comme l'obscurité ordinaire le fait, elles la dévorent, elles la digèrent, et elles finissent par s'approprier sa capacité de rayonnement.

Ce rayonnement ne se propage pas dans l'espace physique mais dans un espace *psychique*. Dès lors, l'image du corps noir cesse d'être caractérisée par sa dialectique avec la lumière extérieure pour devenir la source d'un noir rayon qui pénètre la conscience *de l'intérieur*. Dans une double page à la fois ironique et métaphysique, le regretté Gébé (Georges Blondeaux, 1929-2004) décrivait ce « rayon noir » qu'émet notre conscience quand elle se libère des pensées contingentes. La chute de ce gag (qui se trouve dans la bande dessinée *Qu'est-ce que je fous là ?*) était que le rayon noir du plus grand génie de l'humanité avait failli percer le mystère de l'Univers mais avait été intercepté, au dernier moment, par un lapin sur lequel était écrit « $E = mc^2$ ». Einstein s'est contenté d'une pensée lumineuse plutôt que d'approfondir encore son intuition aveugle. Qui aurait le courage de s'enfoncer encore plus loin dans le noir ?

L'évolution de la peinture de Pierre Soulages (1919) illustre cette dynamique expansive du noir rayonnement qui réclame l'engloutissement de la conscience. Dès 1954 s'annonce l'envahissement de la surface de la toile par la noirceur. Toutefois, le peintre semble avoir voulu longtemps y résister, notamment par la technique du raclage, qui retire à la noirceur une partie de la surface conquise tout en laissant deviner la trace de son passage. Il ne pouvait, semble-t-il, se résoudre à la domination sans partage du noir intégral. Son rayonnement inquiétant provoquait sans doute en lui comme un regret de la lumière. Il considérait encore le noir comme une absence de lumière valant par contraste avec les autres couleurs : « Il est l'absence de couleur la plus intense, la plus violente, qui confère une présence intense et violente aux autres couleurs, même au blanc » (Propos de Pierre Soulages à Pierre Schneider en 1963). Ce n'est qu'en 1979 qu'il réalisa son premier monochrome noir. Pierre Encrevé (1939) explique qu'il fallait pour cela qu'il ait dépassé le point de vue classique qui oppose le noir à la lumière : « Aussi longtemps que règne le contraste, la dynamique à l'œuvre dans sa peinture qui mène à

l'envahissement de la toile par le noir menace le noir, puisqu'il ne réalise son pouvoir pictural que dans son rapport à la lumière » (Pierre Encrevé, « Parce que », 2009). Pour certains critiques ce changement tient à ce qu'il aurait finalement admis que le noir est une couleur et, surtout, qu'il ne chasse pas la lumière, mais la révèle à travers ses textures et ses brillances. Cette réflexion de surface n'explique cependant pas le ravalement définitif de l'espace de la toile par le noir. Le rayonnement authentique des monochromes tient à la transcendance intime du noir, qui se révèle lorsqu'il a envahi toute la toile et rend indistinctes les formes. Quand le peintre a cessé de craindre d'y perdre sa personnalité, il a réalisé des noirs qui ne s'adressent plus à la conscience perceptive du spectateur mais aux gouffres obscurs de son inconscient. Pour se convertir à la splendeur du noir intégral, il faut que la conscience s'abandonne à l'élément ténébreux et qu'elle comprenne qu'elle *s'annule ainsi dans sa différence avec ce dont elle est conscience*. Voilà une formule assez obscure pour une intuition philosophique elle-même très subtile. Elle n'est pas plus facile à formuler que ne le fut le quantum d'action pour les physiciens étudiant le rayonnement du corps noir.

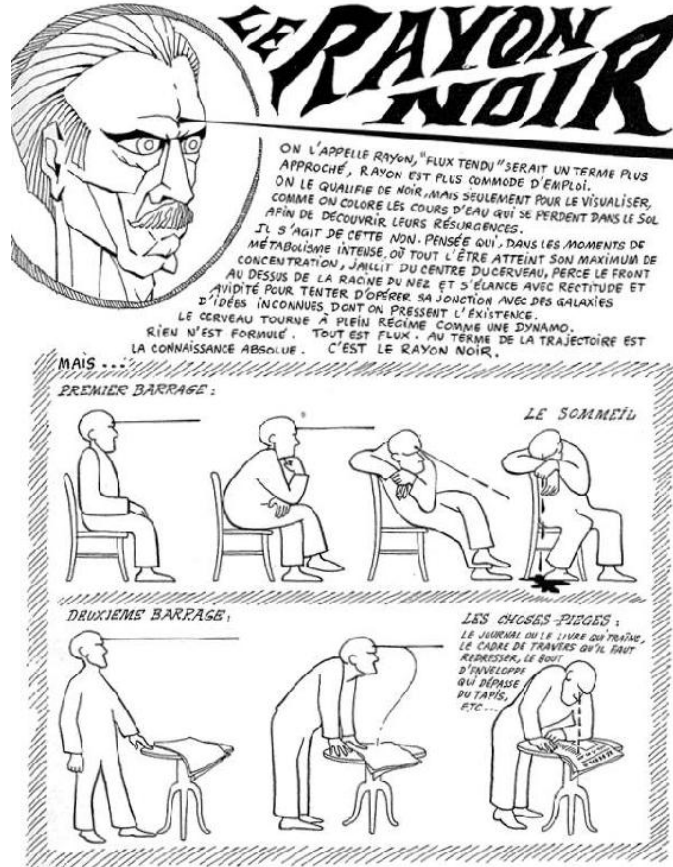
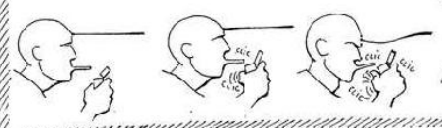


Figure 6. Gébé, « Le rayon noir », *Qu'est-ce que je fous là ?*
Paris, Dargaud, 1983, p. 50-51.

TRISIEME BARRAGE



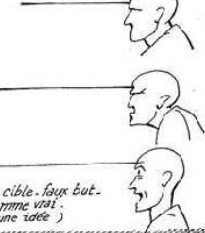
L'INCIDENT
 TANGUE DE BRICOLET, SOMMEUR EN
 TELEPHONE, L'ORVILLE QUI
 DEMANGE, ET...

MERDE!
 PLUS DE
 PIERRE

QUATRIEME BARRAGE : L'EMISSION DE PEISSERS PARASITES

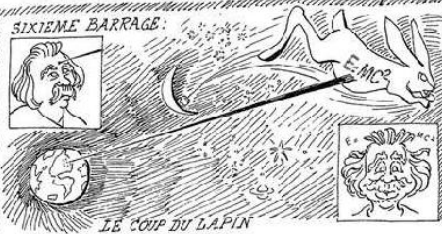


CINGUIEME BARRAGE :



L'INSPIRATION (fausse cible - faux but.
 faux objet / mais accablé comme vrai
 renoncement en échange d'une idée)

SIXIEME BARRAGE :



VOUS AVEZ BIEN
 UNE IDEE

tu cherches
 un thème de
 ROMAN
 une idée de
 FILM
 une connaissance
 une merveille
 un phénomène
 de connaissance
 une situation
 une situation
 une situation
 une situation
 une situation
 une situation

IL EST BIEN EVIDENT QU'EINSTEIN, ESPRIT COSMIQUE, CHERCHAIT AUTRE CHOSE QUE CE QU'IL A TROUVE. SA FURIEUSE NOIE ALLAIT SAUF VOITE TOUCHER AU BUT, C'EST AINSI QUE LE LAPIN A INTERCEPTE SON RAYON. E-N-C-CA NE SE REFUSE PAS. CONTRE CETTE REVELATION, CETTE ILLUMINATION, CETTE MIETTE DE CONNAISSANCE, EINSTEIN A STOPPE SA QUETE. D'UN COTE, L'INCERTITUDE DE LA DECOUVERTE, DE L'AUTRE, CETTE MIETTE GIGANTESQUE. IL A PRIE LA MIETTE ET ETEINT SON RAYON. ET QUELQUE PART, QUELQUE CHOSE A POUSSÉ UN GRAND 'OUE' AU MOMENT OU LUI FUT DONNEE LA THEORIE DE LA RELATIVITE. QU'ALLAIT DECOUVRIR EINSTEIN? VOUS LE SAUREZ EN LISANT LE MOIS PROCHAIN.

LES FORCEURS DE BARRAGES

Conscience obscure de l'inconscient

En 1894, l'année où Max Planck fit la troublante découverte de la discontinuité du rayonnement du corps noir, Paul Valéry (1871-1945) écrivit son *Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*. Dans ce texte de jeunesse, il prétendait se mettre à la place du génial Léonardo da Vinci (1452-1519). Vingt-cinq ans plus tard, il y ajouta quelques commentaires moins présomptueux mais tout aussi pénétrants. Son ambition initiale de percer le secret de la conception des œuvres de Léonard était supplantée par le désir d'élucider en quoi consiste la conscience impersonnelle qui donne sens à ces œuvres. Il estimait que l'énigme de la conscience est précisément d'être un « corps noir ». Car la conscience est ce qui absorbe tout mais ne peut se révéler à sa propre lumière. Elle est *intentionnalité*, c'est-à-dire, pour reprendre les mots de Jean-Paul Sartre (1905-1980), « conscience *de* quelque chose » : nous n'avons de contact psychique avec les choses qu'à travers elle, mais elle se tient en même temps dans un écart avec ces choses ; elle est donc toujours capable de se distinguer de ce qu'elle éclaire sans pouvoir s'éclairer elle-même. La conscience *de* soi coïnciderait avec elle-même tout en s'en distinguant, ce qui est impossible. Il y a comme un « quantum d'attention » qui sépare toujours la conscience de ce dont elle est conscience. Discontinuité irréductible. Si bien que la conscience peut nous livrer toute chose sauf elle-même : « Ce n'est plus qu'un corps noir qui tout absorbe et ne rend rien » (*Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, p. 102).

Pour saisir la conscience en elle-même, Valéry effectue, au cours de sa méditation, une opération analogue à ce que le phénoménologue Edmund Husserl (1859-1938) appelle l'épochè, c'est-à-dire la suspension de l'attitude réaliste naturelle. Cela consiste pour la conscience à cesser de se fier à l'existence extérieure de ce dont elle est conscience afin de pouvoir déterminer en quoi elle consiste elle-même. Le phénoménologue débute, comme autrefois Descartes, en révoquant tous les contenus *mondains* dont il peut prendre conscience. En se dépouillant de tout contenu, la conscience découvre la structure de son intentionnalité, c'est-à-dire qu'elle n'est rien d'autre que la corrélation entre un contenu de pensée (le « noème ») et la visée d'un objet (la « noèse »). Sans y prendre garde,

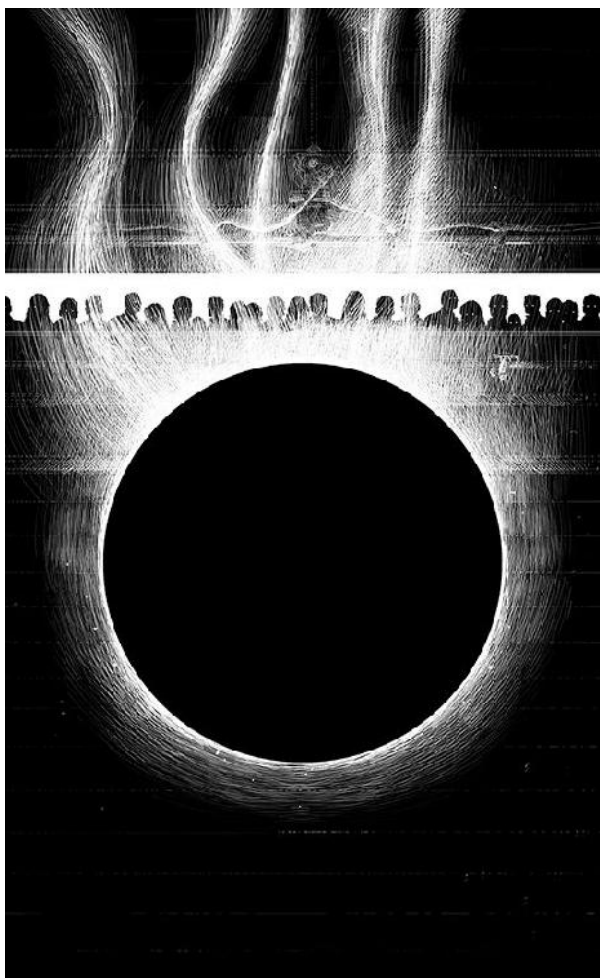
Valéry accomplit une époque pour dévoiler la structure de l'intentionnalité. La conscience ne compte finalement comme existence nécessaire « que deux entités essentiellement inconnues : Soi et X » (*Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, p. 102). Il découvre du même coup la « nudité » de sa conscience, interface fragile entre le monde et son corps. Et, retournant l'attention de la conscience vers elle-même, vers le corps noir qu'elle est, il constate que transparaissent à travers elle les ténèbres corporelles qui l'habitent :

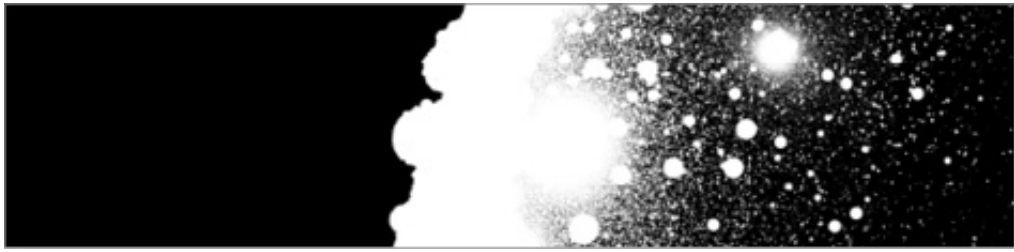
« Présence qui ne peut pas se contempler, condamnée au spectacle adverse, et qui sent toutefois qu'elle compose toute cette nuit haletante, invinciblement orientée. Nuit complète, nuit très avide, nuit secrètement organisée, toute construite d'organismes qui se limitent et se compriment ; nuit compacte aux ténèbres bourrées d'organes, qui battent, qui soufflent, qui s'échauffent, et qui défendent, chacun selon sa nature, leur emplacement et leur fonction » (*Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, p. 105).

Autrement dit, la conscience qui s'aveugle ne s'anéantit pas. Elle comprend pourquoi elle ne se trouve ni hors d'elle-même ni à l'intérieur d'elle-même. C'est parce qu'elle est une *membrane* : en même temps que conscience du monde externe, elle devient conscience de la présence inconsciente de ce corps qui la fait exister. La conscience de soi valéryenne est moins idéaliste que celle du phénoménologue : elle prend conscience qu'elle est le point de contact d'un corps avec le monde. Elle accepte momentanément de s'aveugler, de perdre conscience, de dissoudre sa visée dans le noir indistinct et de revenir ainsi à l'indistinction ténébreuse et primordiale d'avec le corps. Dans la vie de tous les jours, c'est une expérience enfantine (plus tard érotique) dont chacun garde le souvenir : plongé dans le noir, notre conscience cesse de flotter au-dessus de notre corps, d'être éthérée, pour n'être plus que la conscience du corps, de ses frayeurs et de ses désirs. Peut-être que l'intuition remonte encore à plus loin, au séjour dans le ventre de la mère, à l'obscur chaleur primordiale.

Quoi qu'il en soit, le sens profond de l'expérience imaginaire du rayonnement du corps noir semble être de provoquer une conscience de soi paradoxale : au lieu de s'oublier dans la conscience des choses, elle redevient consciente d'elle-même parce qu'elle ne distingue plus rien, et prend alors conscience d'être l'émanation d'un corps avant que d'être conscience de quoi que ce soit d'autre. L'« outrenoir » de Soulages s'adresse à l'inconscient du spectateur qui s'arrête devant ses toiles et se

laisse captiver par leur noirceur. De sa communion avec les ténèbres, du plaisir sensuel d'être plongé dans le noir, de la chaleur éprouvée grâce à son rayonnement, la conscience tire un nouvel équilibre avec les forces obscures qui émanent des tréfonds de l'inconscient. Avec leurs *(Re)présentations* ludiques et réflexives, Jean-Claude Ferry et John Clyde Ferrow exploitent justement le fait que la peinture monochromatique met en présence deux corps noirs, la toile et son spectateur.





LE TROU NOIR

*Les trous noirs ne sont ni trous, ni noirs,
mais gris sur les bords.*

Michel Cassé, *Les trous noirs en pleine lumière*

En 1783, le révérend John Michell (1724-1793), physicien et astronome britannique, écrit une lettre à la Royal Society. Il y propose l'existence de corps d'une masse telle que même la lumière ne puisse s'en échapper. Il imagine aussi un principe de détection pour repérer de tels astres : « S'il arrivait que quelque autre corps lumineux tourne autour d'eux, des mouvements de ces corps tournants, nous pourrions peut-être encore déduire l'existence du corps central avec quelque degré de probabilité [...]. » Quelques années plus tard, en 1796, dans l'*Exposition du système du monde*, Pierre Simon de Laplace (1749-1827) formule indépendamment la même conjecture : « Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait, en vertu de son attraction, à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. » Son idée eut aussi peu de succès que celle de son prédécesseur, car entre-temps, les expériences sur les interférences lumineuses de Thomas Young (1773-1829) et Augustin Fresnel (1788-1827) avaient montré que la lumière était une onde dépourvue de masse et par conséquent insensible à la gravité. Pourtant le concept d'« astre occlus », tel qu'on le nommait à la fin du XVIII^e siècle, fut appelé à une immense notoriété au XX^e siècle sous le nom de « trou noir ».

Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Nous savons tous qu'une balle lancée vers le haut finit par retomber sur le sol après avoir atteint une altitude maximale, d'autant plus élevée que la balle a été jetée avec plus de force. Il s'agit là d'une des manifestations de la gravité de la Terre qui attire tout objet vers son centre. Cette hauteur augmente comme le carré de la vitesse initiale : lancée 2 fois plus vite, la balle ira 4 fois plus haut. Si la balle est lancée suffisamment vite, au-delà de 11,2 kilomètres par seconde (à peu près 40 000 kilomètres par heure),

elle ne retombera pas sur Terre et échappera définitivement à son attraction. Cette vitesse de libération doit être atteinte par les lanceurs des sondes interplanétaires parties visiter notre Système solaire. La vitesse de libération est proportionnelle à la racine carrée du quotient de la masse et du rayon de la planète. Une planète 4 fois plus massive ou 4 fois plus petite que la Terre aura une vitesse de libération 2 fois plus grande. La lumière voyageant à environ 300 000 kilomètres par seconde, Laplace calcula quel devrait être le rayon d'un astre aussi dense que la Terre pour que la lumière ne puisse s'en échapper : 250 fois le rayon du Soleil. Évidemment, la formule de Laplace n'est valable qu'en physique classique pour un projectile matériel et ne peut, *a priori*, pas s'appliquer à la lumière dont les corpuscules – les photons – ont une masse nulle.

L'étude rigoureuse de l'influence de la gravitation sur la lumière doit être menée dans le cadre de la théorie de la relativité générale, publiée par Albert Einstein en 1915. Cette théorie stipule que la force de gravitation est, en réalité, la manifestation de la géométrie de l'espace-temps, elle-même imposée par la répartition de matière et d'énergie ; l'espace-temps est déformé, courbé par leurs présences. Une particule en mouvement libre est astreinte à se déplacer selon les lignes de plus court chemin – les géodésiques – de la nouvelle géométrie. Ainsi, contrairement à la théorie classique, la lumière, même si elle est dépourvue de masse, est sensible à la gravitation, ou plutôt à la courbure de l'espace-temps. Sa trajectoire est donc déviée au voisinage d'un corps massif. Cet effet fut vérifié pour la première fois par l'astronome anglais Arthur Eddington (1882-1944) lors d'une éclipse totale de Soleil, en 1919. La minuscule différence entre la position d'une étoile observée dans une direction voisine de celle du Soleil pendant l'éclipse et la position de la même étoile mesurée quelque temps plus tard était tout à fait en accord avec les calculs d'Einstein. Ce fut une éclatante confirmation de sa nouvelle théorie de la gravitation. On sait aujourd'hui que les instruments utilisés par Eddington étaient trop imprécis pour que cette observation fût réellement probante, mais au-delà de cet heureux hasard cette expérience a été maintes fois répétée depuis et confirme sans ambiguïté les prédictions d'Einstein.

Si la courbure de l'espace-temps affecte la lumière, il redevient possible, dans le cadre de la relativité générale, de calculer à quelle condition un astre ne laisse pas échapper sa lumière. La théorie d'Einstein confirme

l'existence d'un rayon en dessous duquel la lumière ne peut s'échapper d'un astre et, contre toute attente, la formule obtenue est exactement identique à celle déduite par Laplace grâce à la théorie classique. Ce rayon de Schwarzschild, ainsi nommé en l'honneur du physicien allemand Karl Schwarzschild (1873-1916) qui le calcula en 1915, est proportionnel à la masse de l'objet. Par exemple, pour transformer le Soleil en trou noir il faudrait, selon la formule de Schwarzschild, concentrer toute sa masse dans un rayon ridiculement petit de seulement 3 kilomètres !

La surface sphérique qui délimite la région d'où ni la lumière ni la matière ne peuvent s'échapper s'appelle l'« horizon » du trou noir. C'est une surface géométrique, sans réalité matérielle, nommée ainsi par analogie avec l'horizon terrestre qui limite la portée du regard. Si la position de l'horizon terrestre dépend de la position de l'observateur, l'horizon du trou noir est, lui, en revanche, *absolu*. C'est une frontière de l'espace-temps, indépendante de tout observateur et elle partage les événements en deux catégories. À l'extérieur de l'horizon il est possible de communiquer à des distances arbitrairement grandes grâce à des signaux lumineux. C'est l'Univers ordinaire dans lequel nous évoluons. À l'intérieur de l'horizon, les rayons lumineux ne sont plus libres de voyager entre n'importe quels points, car ils sont focalisés vers le centre. La communication devient soumise à de sévères contraintes. Par exemple, la matière et le rayonnement peuvent passer du domaine extérieur au domaine intérieur, mais pas l'inverse. C'est même la justification du terme « trou noir », proposé en 1967 par le théoricien américain John Archibald Wheeler (1911-2008) pour ce qui n'était alors encore qu'une possibilité théorique. Wheeler était un théoricien à l'imagination féconde et à l'esprit ouvert aux spéculations les plus audacieuses. Outre le « trou noir », il popularisa de nombreux concepts extrêmement originaux tels que les « mondes multiples », les « trous de ver », les « particules qui remontent le temps », ou le parallélisme entre matière et information (« it for bit »). Ces concepts sont parfois demeurés des vues de l'esprit, mais, pour le trou noir la preuve de l'existence de ce monstre théorique arriva en 1971 : les astrophysiciens détectèrent Cygnus X-1, un système binaire dont les caractéristiques suggéraient qu'il s'agissait d'un couple formé d'un trou noir et d'une étoile géante. Désormais, une vingtaine de trous noirs ont été identifiés dans notre Galaxie, dont le plus imposant – sa

masse atteint 4 millions de masses solaires – est tapi au centre de la Voie lactée. Comme le remarque Vincent au chapitre suivant, la présence d'un trou noir au cœur de notre Galaxie frappe l'imagination, mais il n'a rien de maléfique : au contraire, elle participe à sa stabilité et contribue à son évolution. Sa présence a été démontrée en 2002 par l'observation des orbites d'étoiles proches du centre de notre Galaxie. En 2022, le projet Event Horizon Telescope entend faire des images du voisinage de l'horizon de ce trou noir central en combinant les données de radiotélescopes répartis sur toute la surface de la Terre. Les observations ont aussi montré que le centre de certaines galaxies actives, comme Messier 87, abrite un trou noir supermassif qui peut allègrement dépasser le milliard de masses solaires !

Si les trous noirs semblent bel et bien exister, encore faut-il exhiber un mécanisme à même de rendre compte de leur formation. Les trous noirs stellaires – dont la masse est d'au moins quelques masses solaires – naissent à la suite de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive (environ 10 masses solaires et plus). En effet, lorsque l'étoile atteint la phase de combustion thermonucléaire du silicium, la masse de son cœur de fer augmente jusqu'à devenir instable. Le cœur s'effondre alors sur lui-même et produit une étoile à neutrons, tandis que l'enveloppe de l'étoile est soufflée par une explosion titanesque nommée « supernova ». En 1939, le physicien américain Robert Oppenheimer (1904-1967) a montré que si la masse de l'étoile à neutrons dépasse 3 masses solaires (la limite de Landau-Oppenheimer-Volkoff) la gravitation propre de l'astre l'emporte définitivement sur toutes les autres interactions et un trou noir se forme. Désormais, les trous noirs font donc partie du bestiaire cosmique même si les astrophysiciens ont longtemps dû se contenter, en termes d'observations, de détecter les seuls effets indirects de leur présence. La situation a changé en octobre 2015 avec la première détection d'ondes gravitationnelles par l'expérience américaine LIGO. Les physiciens ont vu dans les vibrations enregistrées la preuve d'une gigantesque sarabande. À 1,3 milliard d'années-lumière, deux trous noirs, respectivement 36 et 29 fois plus massifs que le Soleil, spiralant autour de leur centre de gravité commun au rythme de 250 tours par seconde, ont fini par fusionner pour ne plus faire qu'un unique et énorme trou noir de 62 masses solaires. La différence de 3 masses solaires a été

rayonnée sous la forme d'ondes gravitationnelles.

Sur le fil du rasoir

Le trou noir est-il réellement l'ogre cosmique habituellement dépeint ? Eh bien, non ! À une distance du trou noir bien supérieure à son rayon de Schwarzschild, l'espace-temps ne se distingue pas de celui d'un astre *normal* de même masse. Ainsi, transformer notre Soleil en un trou noir ne changerait rien au mouvement des planètes et imaginer un trou noir comme une sorte d'aspirateur cosmique avalant tout sur son passage est pour le moins exagéré. Ce n'est qu'au voisinage de l'horizon que se manifestent les distorsions spatio-temporelles caractéristiques du trou noir.

Que ressentirait-on au voisinage de l'horizon d'un trou noir ? Une étrange et intense sensation d'étirement, par les pieds et par la tête. Votre corps ayant une certaine extension spatiale, ses différentes parties explorent des régions de différentes courbures, interprétées comme des différences du champ de gravité. Nous subissons aussi cette force de marée à la surface de la Terre où nous pouvons facilement observer leur plus spectaculaire conséquence : le flux et le reflux des océans dus aux effets conjugués de la Lune et du Soleil. En physique classique, l'intensité de la force de gravité dépend de la distance entre les corps. Ainsi, les régions de la Terre proches de la Lune sont plus attirées par celle-ci que celles situées aux antipodes. Dans le référentiel de la Terre, il en résulte une déformation très sensible sur les masses océaniques fluides. Nos pieds, plus proches du centre de la Terre que notre tête, sont aussi plus fortement attirés par celle-ci ; cela se traduit, de notre point de vue, par un étirement dont l'intensité à la surface de la Terre est complètement insensible, inférieur au millionième de votre poids. Au voisinage de l'horizon d'un trou noir, la différence entre la gravité ressentie par votre tête et celle subie par vos pieds serait beaucoup plus sensible. Pour un trou noir de 10 masses solaires, vous subiriez la même traction que si, suspendu à une barre, la population de la région parisienne était accrochée à vos chevilles ! Curieusement, cet effet est d'autant plus fort que la masse du trou noir est faible. Ce paradoxe apparent a une explication simple :

l'intensité de la force de marée est proportionnelle à la densité de l'astre qui l'engendre. Comme le rayon d'un trou noir est proportionnel à sa masse, sa densité (proportionnelle au quotient de la masse divisée par le cube du rayon) décroît comme l'inverse du carré de sa masse. Ainsi, un trou noir d'un million de masses solaires engendre une force de marée 10 milliards de fois inférieure à celle d'un trou noir de 10 masses solaires. Par conséquent, les abords immédiats d'un trou noir supermassif deviennent plus fréquentables : c'est sans doute la grande masse du trou noir Gargantua qui permet au héros du film *Interstellar* de pénétrer à l'intérieur.

Autre effet des distorsions spatio-temporelles engendrées par la présence du trou noir, des signaux d'horloge émis vers un observateur lointain lui sembleront avoir une fréquence plus faible. Ce dernier aura donc l'impression que l'horloge proche du trou noir ralentit par rapport à la sienne. Cette diminution de la fréquence de l'horloge se traduit aussi par une diminution de la fréquence de la lumière émise : elle apparaîtra plus rouge qu'à son émission.

Que se passe-t-il, maintenant, si vous décidez de franchir l'horizon et d'envoyer à votre collègue les images de votre exploit ? Pour vous, rien de spécial ne se produit au cours de cette traversée : la frontière du trou noir n'a rien de magique. En revanche, votre ami demeuré à l'extérieur ne vous voit jamais franchir l'horizon ! Au fur et à mesure que vous vous approchez de l'horizon, le film émis semble ralentir, car la durée qui sépare la réception de deux images consécutives est de plus en plus grande. La dilatation du temps est telle que les images se succèdent, pratiquement identiques, vous montrant éternellement figé dans la position que vous aviez au moment de la traversée de l'horizon. De plus, à cause du rougissement de la lumière et de la diminution de son intensité, les images reçues deviennent rapidement trop faibles pour être captées. Pour le spectateur lointain, toute la partie du voyage se déroulant à l'intérieur du trou noir est perdue. L'image transmise juste au moment de la traversée de l'horizon ne sera reçue qu'au bout d'un temps infini et aucune des images suivantes ne pourra jamais franchir l'horizon du trou noir.

Dans les entrailles du monstre

Au centre du trou noir se trouve une région dans laquelle la courbure de l'espace-temps tend vers l'infini, car toute la masse y converge. La description de cette « singularité » est un vrai casse-tête théorique, encore non résolu, car elle doit tenir compte d'effets quantiques non inclus dans la relativité générale. Néanmoins, comme cette singularité ne saurait influencer l'espace-temps extérieur à l'horizon, notre incapacité à la décrire correctement ne remet pas en cause l'aspect du trou noir considéré depuis notre côté de l'horizon. Il y a juste une « zone obscure », du point de vue théorique, au cœur du trou noir.

Explorons quand même la région qui entoure la singularité. Celle-là est, pour ainsi dire, un mouvement : elle n'est pas seulement en mouvement, elle impose le mouvement de tout ce qui s'y trouve puisque sa géométrie s'effondre vers le centre. Conséquence : il est impossible de rester immobile à l'intérieur d'un trou noir, les seules trajectoires permises sont inéluctablement focalisées vers le centre de l'astre – on parle, pour qualifier l'intérieur d'un trou noir, de monde ou d'espace-temps « à l'envers ». Dans l'espace-temps habituel, nous pouvons nous déplacer dans n'importe quelle direction spatiale. En revanche, le temps, lui, s'écoule inexorablement du passé vers le futur : c'est une coordonnée directrice. À l'intérieur d'un trou noir, les rôles sont inversés : c'est la distance au centre du trou noir qui devient la coordonnée directrice. L'espace devient « inexorable » à la place du temps dans la mesure où toute matière est condamnée à voir diminuer sa distance au centre. Cette situation rappelle l'incipit de l'excellent roman de science-fiction de Christopher Priest (1943), *Le Monde inversé* : « J'avais atteint l'âge de mille kilomètres. » Mais attention, le changement de statut de la coordonnée temporelle à l'intérieur du trou noir ne permet pas pour autant de remonter le temps et de violer la causalité ! En fait, la coordonnée temps ne représente plus un temps physique. Le seul temps conservant un sens dans cet environnement est le temps propre, celui mesuré par l'horloge en chute libre avec vous vers le centre du trou noir. Et, dans le trou noir, ce temps propre dépend seulement de la coordonnée de distance, augmentant quand celle-ci diminue. Donc, comme à l'extérieur, le temps propre d'un voyageur en chute libre continue à s'écouler vers le futur. Une différence notable est tout de même que ce futur à une fin programmée : la singularité située au centre du trou noir, au-delà de laquelle *il n'y a plus*

d'avenir. Un intervalle de temps propre fini s'écoule entre le franchissement de l'horizon et le moment où le voyageur est agrégé à la singularité centrale. Ce répit est d'autant plus long que le trou noir est massif. Pour un trou noir de 10 masses solaires, il est d'un dix-millième de seconde, mais pour un trou noir supermassif, tels ceux qui se trouvent au cœur des galaxies, l'exploration peut durer une heure.

Un trou pas si noir que ça...

Dans les années 1970, le physicien anglais Stephen Hawking (1942) a établi un résultat fondamental et inattendu à propos des trous noirs. En leur appliquant les lois de la physique quantique, il a montré qu'un trou noir peut rayonner de la lumière et même de la matière ! Résultat en apparence contradictoire avec la définition même d'un trou noir. Pour comprendre la raison de cet étonnant rayonnement, il faut d'abord se rappeler qu'en physique quantique contemporaine les notions d'ondes et de particules disparaissent. Elles sont remplacées par des champs, concepts physico-mathématiques capables de décrire tous les états possibles de la matière, quels que soient le nombre de particules mises en jeu et leurs énergies. Dans ce cadre théorique, le vide n'est plus défini comme ce qui reste quand on a tout enlevé, mais comme l'état des champs dont l'énergie est minimale – et pas forcément nulle. Par ailleurs, le repos absolu n'existe pas dans le monde microscopique et l'énergie d'un système y fluctue en permanence. Dans le cas du vide, ces fluctuations se manifestent par l'apparition fugitive de particules, dites « virtuelles », qui peuvent émerger du vide à condition d'y replonger très rapidement. Dans l'infiniment petit, il est pour ainsi dire possible d'emprunter une quantité d'énergie quelconque – et donc de violer la loi de conservation de la masse-énergie – à condition de rembourser cette énergie assez vite. Bien qu'inobservables directement, ces fugaces particules virtuelles peuvent interagir avec les particules réelles et, par exemple, modifier leur charge électrique apparente.

Si la conservation de l'énergie est temporairement violée, la conservation de la charge électrique est maintenue : les particules virtuelles apparaissent toujours par paires particule-antiparticule. Cela concerne notre sujet quand la paire virtuelle se matérialise au voisinage

immédiat de l'horizon d'un trou noir. L'une des particules peut tomber dans le trou noir, tandis que l'autre s'échappe à l'infini. Du point de vue d'un observateur lointain, il s'agit donc d'une matérialisation spontanée d'une particule, à partir de rien, semble-t-il. Bien sûr, les particules émises (essentiellement des photons, des électrons et des antiélectrons – les positrons –, des neutrinos et des antineutrinos) n'ont pas toutes la même énergie. Hawking a montré que la distribution en énergie des photons a une forme identique à celle de la lumière rayonnée par un corps noir ! Il a ainsi pu attribuer au trou noir une grandeur analogue à la température du corps noir et montrer qu'elle est inversement proportionnelle à la masse de celui-ci. En pratique, un trou noir de quelques masses solaires a une température qui se chiffre en milliardième de kelvin, mais un minuscule trou noir d'un milliard de tonnes rayonne avec une température de l'ordre de 100 milliards de kelvins. Nous l'avons dit, du point de vue extérieur tout se passe comme si de la masse-énergie avait été créée à partir de rien. En réalité, la masse-énergie rayonnée provient de la conversion d'une partie de la masse du trou noir. Celui-ci doit donc diminuer en masse et en taille au fur et à mesure qu'il rayonne : les astrophysiciens disent qu'il « s'évapore ». Il s'agit là d'un processus divergent, car la température augmentant quand la masse diminue, la puissance rayonnée augmente aussi sans cesse, accélérant en retour la diminution de masse du trou noir. Finalement, quand la puissance rayonnée devient trop grande, on dit que le trou noir « explose ».

Certains physiciens ont imaginé d'utiliser le rayonnement de micro-trous noirs comme source d'énergie. Il suffirait de le piéger, en le mettant en orbite par exemple, et d'empêcher la divergence en compensant sa perte de masse par une accrétion régulière de matière. On montre que le rendement énergétique d'un trou noir de Schwarzschild est au mieux de 5,7 % et monte à 42 % pour un trou noir en rotation rapide, dans les deux cas bien meilleur que le 0,7 % obtenu par fusion thermonucléaire. Dans son roman *Les Chroniques de McAndrew*, l'auteur de science-fiction Charles Sheffield (1935-2002) met justement en scène un physicien réalisant le premier vaisseau interstellaire propulsé grâce à la fabuleuse énergie tirée d'un trou noir.

Tourbillon cosmique

Comme les planètes et les étoiles, les trous noirs peuvent être en rotation. La situation diffère pourtant, car un trou noir en rotation ne se comporte pas comme une toupie tournant dans un espace extérieur immobile. Le trou noir entraîne l'espace-temps autour de lui, dans une sorte d'irrésistible mouvement en tourbillon. Qu'observerait un vaisseau évoluant dans son voisinage ?

Pour le comprendre, poursuivons l'analogie avec le tourbillon que l'on peut observer lors de la vidange d'une baignoire. Dans cette situation, l'eau suit un mouvement en spirale qui se décompose en un mouvement circulaire, autour de la bonde, et un mouvement radial, de chute vers la bonde. Imaginons maintenant un bateau évoluant près du tourbillon de vidange d'un lac-baignoire. Ce bateau est doté d'un moteur lui permettant d'atteindre une vitesse maximale de 20 kilomètres par heure. Loin du tourbillon, là où l'eau est encore assez calme, il est évident que le pilote peut naviguer à son gré, car, grâce au moteur, il peut compenser le lent mouvement d'entraînement de l'eau. Le pilote peut donc maintenir son embarcation fixe par rapport à la rive sans avoir à jeter l'ancre, il peut se rapprocher ou s'éloigner du tourbillon ou encore naviguer en sens contraire du courant. S'approchant du centre du tourbillon, il finit par atteindre une région où la vitesse circulaire du courant est égale à la vitesse maximale du bateau. En deçà de cette distance critique, le bateau n'est plus en mesure de garder une position fixe, même en faisant tourner son moteur à plein régime en sens contraire du tourbillon. Il est irrésistiblement entraîné dans le sens de rotation du tourbillon. Ses possibilités de manœuvres s'en trouvent réduites et les directions possibles de navigation ne sont plus quelconques : le bateau ne peut plus se diriger que vers l'avant, à l'intérieur d'un secteur d'autant plus restreint que le tourbillon est rapide. Le pilote peut habilement se sortir de cette situation embarrassante en mettant pleins gaz et en orientant convenablement sa trajectoire selon une spirale sortante, en orientant son bateau de sorte à toujours s'éloigner du centre. Si le bateau s'aventure plus près du centre du tourbillon, il arrive aussi un moment où la vitesse radiale du courant atteint à son tour 20 kilomètres par heure, la vitesse limite du bateau. C'est là que commencent les véritables ennuis : les possibilités de navigation sont tellement réduites que le bateau n'a d'autres choix que d'être entraîné vers l'œil du tourbillon...

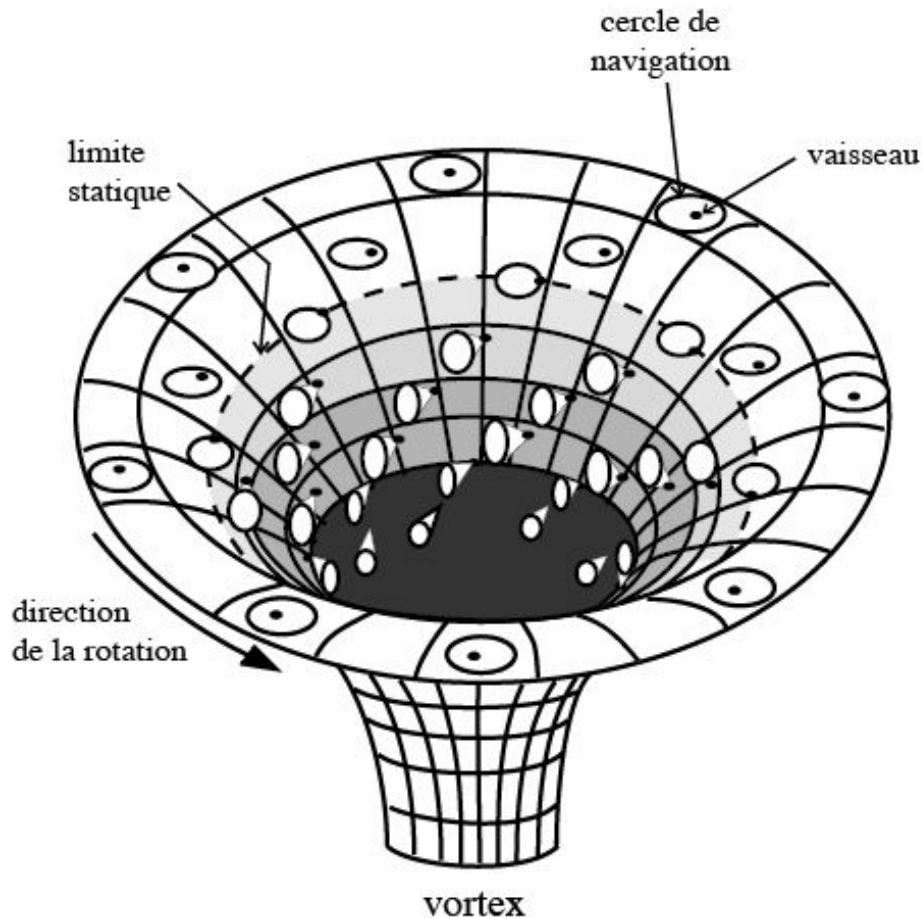


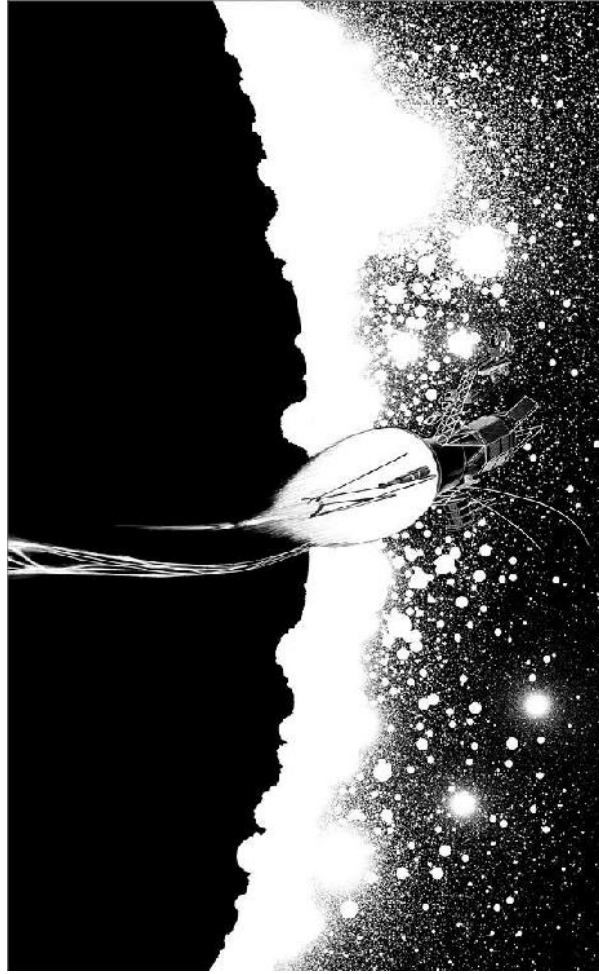
Figure 7. Mouvement d'un vaisseau autour d'un trou noir en rotation : au bout d'une seconde il aboutit forcément dans le cercle de navigation, quelle que soit la direction et la vitesse choisie. (© Jean-Pierre Luminet)

Aux abords d'un trou noir en rotation, la situation est analogue. Un vaisseau qui s'en approche subit lui aussi l'entraînement de l'espace-temps imposé par la ronde du trou noir. Ce mouvement devient inexorable à l'intérieur d'une surface nommée « limite statique ». Dans cette région, le vaisseau spatial ne peut plus rester fixe par rapport aux étoiles lointaines, même si sa vitesse pouvait atteindre celle de la lumière ! En s'approchant encore du trou noir, on retrouve l'horizon dont nous parlions au début, véritable frontière du trou noir, limite à partir de laquelle plus rien ne peut lui échapper. L'horizon d'un trou noir en rotation est entièrement contenu à l'intérieur de sa limite statique. Pour un trou noir en rotation, c'est à la limite statique que le temps apparent « gèle » et que le rayonnement émis est reçu avec un décalage vers le rouge infini. Mais c'est à l'horizon des événements que matière et rayonnement sont définitivement emprisonnés. La région d'espace-temps située entre la

limite statique et l'horizon se nomme ergosphère (du grec *ergos* signifiant « travail »), car ses propriétés permettent d'en extraire de l'énergie.

Le physicien anglais Roger Penrose (1931) a imaginé l'ingénieux mécanisme suivant : à une position éloignée de la limite statique du trou noir, tirons un projectile en direction de l'ergosphère. Ce projectile est conçu de sorte qu'il puisse se diviser en deux fragments à un moment fixé par l'opérateur. Si la trajectoire initiale est soigneusement choisie, l'un des fragments sera définitivement capturé par le trou noir, tandis que l'autre ressortira de l'ergosphère et pourra être récupéré. Penrose a démontré que le projectile pouvait être envoyé de façon que l'énergie du fragment renvoyé soit supérieure à celle du projectile initial. Cela impose au fragment capturé de tomber sur le trou noir selon une orbite tournant en sens contraire de sa rotation. D'où vient l'énergie récupérée par le fragment qui s'échappe ? Du trou noir ! Pour lui, le résultat net de l'opération est une augmentation de sa masse et une diminution de son énergie de rotation. Le trou noir en rotation joue donc le rôle d'un gigantesque stock d'énergie dans lequel il est possible de puiser si l'on est assez habile...

On l'aura compris, les propriétés étonnantes du trou noir en font naturellement l'un des thèmes le plus souvent utilisés par les auteurs de science-fiction. Ces astres fascinants, capables de chambouler l'espace-temps dans leur voisinage, sont souvent utilisés comme des « portes » vers d'autres Univers, comme si le nôtre n'était pas déjà assez grand ! Ainsi, dans la série télévisée *Babylon 5*, le voyage spatial se fait en passant par des trous noirs créés artificiellement. Dans ses romans *Ilium* et *Olympos*, l'auteur Dan Simmons (1948) donne aux Moravecs la capacité de se déplacer dans le Système solaire grâce à des ponts entre trous noirs. On retrouve des idées similaires dans *La Grande Porte* de Frederick Pohl (1919-2013) et dans *Contact*, roman de Carl Sagan (1934-1996) adapté au cinéma en 1997. Le trou noir a donc beaucoup voyagé : ce concept est passé de la spéculation chimérique à l'état de réalité astronomique avant que ses propriétés extraordinaires n'en fassent un motif central de la science-fiction.





LA GRAVITÉ DU TROU NOIR

Là, nous pourrions prendre de longs bains de ténèbres...
Charles Baudelaire, *Anywhere out of the world*

Comme l'a expliqué Roland, un « trou noir » est un astre si dense et massif que les rayons lumineux ne peuvent s'en échapper. Le ciel nocturne purifie la couleur noire de ses attachements terrestres ; la noirceur du corps noir transcende le spectre des couleurs ; avec le trou noir, un autre cap obscur est franchi : le noir prend une terrible gravité. Non seulement nulle lumière ne peut dissiper cette noirceur, mais elle ne lui survit pas. L'adjectif « noir » subit une telle intensification qu'il ne se contente plus de s'opposer à la lumière, il la menace. Il ne signale plus une dérobaface face à la lumière, mais que le trou noir la *dévore*... Comme l'écrit Pascal Quignard, « l'appétit gravitationnel d'un trou noir rivalise avec la vitesse de la lumière » (*Critique du jugement*, 2015, p. 92). Dans le cadre de la relativité générale, cela signifie que la masse du trou noir courbe l'espace-temps en un puits sans fond : tout peut y tomber, rien n'en émergera plus. C'est l'implosion suprême. Parce qu'il s'est ainsi effondré sur lui-même, cet astre est appelé « trou ». Parce qu'il aspire matière et lumière, il est dit « noir ». La charge métaphorique des deux termes laisse pourtant à désirer.

N'est-il pas paradoxal d'appeler « trou » la concentration la plus forte de matière dans l'Univers ? Un trou, ordinairement, est un vide, pas un trop-plein. Quant à la noirceur, Roland a rappelé qu'elle n'était pas si absolue : les trous noirs sont tous un peu *gris* sur les bords... Toutefois, notre rêverie se doit de commencer par explorer les connotations de l'adjectif « noir » en s'inspirant des déterminations idéales du trou noir plutôt qu'à partir de ses franges réelles. En théorie, le noir du trou noir est si intense qu'il aspire les rayons lumineux et ne les laisse jamais repartir. Sa noirceur, transposée dans l'imaginaire, est pourvue d'une dynamique tout opposée à celle, expansive, du corps noir. Le trou noir, par sa gravité insurpassable, concentre tout l'espace-temps en un point singulier,

interdisant toute communication vers l'extérieur. Il devient un symbole d'anéantissement.

Une dépression cosmique

Pour saisir les implications imaginaires de cette irrésistible attraction obscure, il faut s'élever au niveau d'une conscience non plus humaine mais véritablement cosmique : les trous noirs résultent de la mort des plus massives étoiles. En tant que singularité de l'espace-temps, le trou noir représente un traumatisme à l'échelle de l'Univers. Il y a, dans sa noirceur, quelque chose qui affecte la structure et le rythme mêmes de l'Univers, qui blesse ce que les néoplatoniciens appelaient « l'Âme du monde ». Ce traumatisme entraîne un travail de deuil éternel : les trous noirs symbolisent la capture irréversible de la lumière qu'on croyait insaisissable, libre par essence, immortelle. Dans l'existence de l'Univers, il se produit des événements irréversibles, des catastrophes insurmontables.

On s'imagine souvent les trous noirs comme des siphons aspirant ce qui les entoure. Comme si tout l'Univers était condamné à s'y résorber. Pourtant, hors de leur horizon, au-delà duquel plus aucune communication avec l'extérieur n'est possible, ils ne courbent pas l'espace différemment d'autres masses. Le destin inéluctable du trou noir ne menace que les êtres de lumière et de matière qui se risquent imprudemment à franchir un horizon fatal : l'intensité des effets de marée les étirera démesurément avant de les amalgamer à sa masse à la densité monstrueuse. Le trou noir ne cherche pas à nous perdre, il règne solitairement, autiste. Ceux qui se tiennent au-delà de la « surface statique » continuent leur existence ordinaire, mais ceux qui s'en approchent, même s'ils résistent à son attraction, ont le sentiment de graviter désormais sur une orbite menacée par l'effondrement. Et ils sauront qu'ils ne peuvent rien pour ceux qui se sont fait prendre.

Le trou noir est ainsi le plus puissant symbole de la *dépression* : rien ne peut soulager cette affliction, car tout ce qui s'en approche trop près y est aspiré définitivement. La structure de l'espace et du temps semble se dérober pour ceux qui s'y laissent entraîner. Ils n'ont plus la force de bouger ni de se lever. L'Univers s'obscurcit quand le corps s'effondre sur

lui-même dans une chute immobile. La gravité de ce noir est terrifiante et absolument sans pareille. Il y a quelque chose d'effrayant à songer qu'au cœur de notre Galaxie se niche une présence aussi monstrueusement obscure, avide et pesante.

Les ténèbres enfouies au cœur du corps noir résistaient à la lumière mais n'étaient pas sinistres, elles recélaient même une certaine chaleur. Avec le trou noir, la noirceur prend une connotation négative et acquiert une dynamique de concentration inquiétante. Bachelard a insisté à propos de l'imagination aérienne sur l'opposition entre la rêverie ascensionnelle et libératrice et la chute vertigineuse dans les noires profondeurs de la culpabilité. L'obscurité est ce qui nous aspire dans le gouffre, ce qui nous attend au fond de l'abîme. Toute chute onirique allant à son terme s'achève au cœur des ténèbres :

« Il semble que le *noir d'abîme* efface tout et que finalement la chute n'ait qu'une couleur : le noir » (*La Terre et les Rêveries de la volonté*, p. 400). La rêverie savante qui s'empare de nous à l'évocation du trou noir gravite inmanquablement dans l'Univers sémantique de ce « noir d'abîme » auquel rien ne semble devoir résister. Et celui qui cède à la fascination qu'exerce cette couleur est promis à un destin funeste. Bachelard achève son évocation de la nuit souterraine sur ces mots qui résonnent de manière lugubre : « Elle est un espace-temps du gouffre-chute. Plus loin, dans une chute accomplie, le poète trouvera le *noir*. Alors "le noir et le vide" sont inséparablement unis. La chute est finie. La Mort commence » (*La Terre et les Rêveries de la volonté*, p. 402). Extraordinaire formule que « la Mort commence » ! Elle correspond parfaitement à celle, non moins évocatrice, des astrophysiciens : « franchir l'horizon des événements ». Il n'est plus de retour, il n'y a plus que l'attraction inexorable de l'astre noir. Une fascination pour l'inéluctable anéantissement que de nombreux poètes romantiques ont magnifié.

L'astre de la mélancolie

Pour préciser la nuance d'un noir si terrifiant, l'on songe au « soleil noir » qui hante la poésie et les gravures romantiques. Nul ne l'a mieux décrit que Victor Hugo :

« Là, tout flotte et s'en va dans un naufrage obscur ;
Dans ce gouffre sans bord, sans soupirail, sans mur,

De tout ce qui vécut pleut sans cesse la cendre ;
Et l'on voit tout au fond, quand l'œil ose y descendre,
Au-delà de la vie, et du souffle et du bruit,
Un affreux soleil noir d'où rayonne la nuit ! »
(Victor Hugo, *Les Contemplations*, VI.26, « Ce que dit la Bouche d'Ombre »)

Chaque vers semble illustrer par avance le voyage si périlleux auquel nous a conviés Roland : il y a naufrage dès qu'on s'approche trop près de l'astre des ténèbres ; une fois capturés, il est impossible de se raccrocher à quoi que ce soit ; tout est entraîné vers le centre obscur, là où se trouve le soleil noir qui ruine tous nos espoirs.

Cet astre funeste s'apercevait déjà sur l'admirable gravure d'Albrecht Dürer (1471-1528) *Melencolia I* (1514). Elle représente une belle femme aux ailes d'ange, entourée des symboles du pouvoir, de la richesse et du savoir, et pourtant indifférente à eux, absorbée dans quelque pensée morbide. Son expression est plus pensive que triste. À ses côtés, un chien sommeille, un angelot s'ennuie. Mais dans le ciel nocturne, un petit démon vole et triomphe en déployant la bannière de la mélancolie, sous un astre qui semble *attirer à lui tous les rais de lumière* plutôt que rayonner. La dynamique de la concentration est bien dominante : comme l'esprit se concentre en une sombre ruminant, la lumière se fige en un astre noir.

Gérard de Nerval (1808-1855) a lui aussi anticipé sur l'astrophysique en attribuant justement à la mort d'une étoile la naissance de cet astre obscur qui endeuille sa poésie : « Ma seule Étoile est morte, – et mon luth constellé / Porte le Soleil noir de la Mélancolie » (Gérard de Nerval, « El Desdichado », 1854). Ses tristes songes finiront par le pousser au suicide. De nos jours, la belle et perturbante bande dessinée *Black Hole* de Charles Burns (1955) ravive ce mythe de la fatalité romantique : un étrange mal entraîne d'horribles mutations chez les adolescents pubères. Le trou noir symbolise le mal de vivre d'une génération, la hantise d'une sexualité à risque et la fascination pour la mort qu'éprouvent ces jeunes gens mal dans leur peau. Le trou noir est sans doute l'épreuve suprême de l'individuation au sens de Carl Gustav Jung (1875-1961), c'est-à-dire la prise de conscience que l'échec est possible, probable, peut-être inéluctable.

Le mythe romantique de la mélancolie repose aussi sur l'idée que la personnalité des créateurs conjugue le génie inspiré avec une morosité d'autant plus implacable qu'elle naît d'un regard lucide sur la condition

humaine. L'idée n'est point neuve. Depuis que la médecine hippocratique a décrit le tempérament *atrabilaire*, c'est-à-dire qui résulte de l'excès de *bile noire*, comme celui de l'humeur grave et sérieuse, les philosophes et les médecins n'ont cessé de spéculer sur les liens secrets censés unir le génie à la mélancolie. Le petit traité *Problème XXX*, longtemps attribué à Aristote, insiste sur le grand nombre d'épileptiques – le haut mal étant supposé être causé par l'excès de la bile noire – parmi les hommes de génie. Plus près de nous, Sir Isaac Newton, dont la loi de la gravitation universelle rend concevable l'existence d'un « astre occlus » dont même la lumière ne peut s'échapper, préfiguration classique du trou noir relativiste, n'était-il pas lui-même épileptique ?

Il ne s'agit, évidemment, que de billevesées et de superstitions : ni John Michell, ni Pierre Simon de Laplace, inventeurs de l'occlusion, ni Einstein, à qui l'on doit la théorie de la relativité générale, ni Karl Schwarzschild (dont le patronyme signifie « bouclier noir »), qui conjectura l'existence du trou noir relativiste, ni John Wheeler, qui baptisa, enfin, cette singularité du nom inquiétant de « trou noir », n'étaient sujets à de telles crises d'épilepsie. Une rêverie savante ne peut plus fantasmer ainsi sur l'influence des astres sur l'humeur des génies. En revanche, on ne chasse pas aisément de l'imaginaire collectif l'intuition confuse qu'une trop grande intelligence mène inexorablement à de terribles découvertes. La légende noire attire. Elle possède une séduction à laquelle il est difficile de résister : puisque l'imbécile est heureux, le sage et le savant ne doivent-ils pas être enclins à la mélancolie ? Leurs pensées sont si graves qu'elles doivent forcément leur faire broyer du noir.

On en vient ainsi spontanément à soupçonner que les êtres estimés les plus brillants dissimulent tous une tristesse insondable. Or, un trou noir se détecte indirectement, comme une sombre folie se dissimule sous les dehors de la froide intelligence. Il faut observer, pour en deviner l'existence, la rotation sans cela inexplicable d'autres astres autour d'un apparent néant, comme on observe chez certains individus des gestes méticuleux répétés sans raison manifeste. Lorsque des rayonnements lointains transmettent une image déformée après être passés dans une zone de l'espace apparemment vide, lorsqu'un raisonnement, qui semblait, de prime abord, rigoureux, déforme la réalité au point de la rendre méconnaissable, l'on devine l'existence d'une gigantesque dépression qui

modifie la perception de l'espace et du temps. N'est-il pas horrible que les blanches galaxies scintillent autour de pareils gouffres ? N'est-il pas désespérant de songer que certaines étoiles chéries, d'avoir trop brillé, finissent par s'effondrer sur elles-mêmes et emprisonnent la lumière qu'elles étaient censées dispenser au cosmos ? Le désespoir efface jusqu'au souvenir qu'il existe un monde en dehors de nous.

Le trou noir serait un symbole funèbre entre tous s'il était cet abîme dans lequel un grand esprit s'enfonce infiniment pour ne jamais en ressortir. Il est cependant réducteur de prendre le trou noir pour la métaphore magnifiée de la seule dépression. Car, rappelons-le encore une fois, une grande et belle image, une image vraie, dotée d'un dynamisme psychique authentique, est toujours ambivalente.

La brillance du trou noir

Ainsi, dans son excellente histoire de la couleur noire (*Noir. Histoire d'une couleur*, 2008), Michel Pastoureau (1947) rappelle qu'il existait, à l'origine, deux adjectifs distincts pour désigner la couleur noire dans les langues indo-européennes. Les Latins distinguaient *ater*, le noir mat et éteint, qui est sale et laid, et qui a donné en français l'adjectif « atroce » ainsi que le suffixe « -âtre » (qui connote péjorativement toute couleur assombrie : « bleuâtre », « verdâtre », etc.), et *niger*, le noir beau et brillant, d'où provient tout le vocabulaire de la négritude (ce qui suggère que cette couleur de peau a été enviée pour sa beauté avant d'être *dénigrée* par les préjugés racistes). La langue mère des langues anglo-saxonnes possédait, elle aussi, deux adjectifs : *swarz* pour désigner le noir mat, terne et mauvais, qui a été conservé dans l'allemand *schwarz*, et *blaek* pour le noir brillant, lumineux et bon, qui s'est conservé dans l'anglais *black*. Cette distinction par l'éclat nous rappelle qu'aux yeux des anciens peuples le degré de luminosité était un critère plus pertinent que celui de la coloration pour distinguer visuellement les objets. Elle montre surtout que, depuis toujours, la symbolique du noir est polarisée, ambivalente.

En ce qui regarde l'imaginaire du trou noir, cela signifie qu'il n'est pas condamné à incarner la seule valeur négative du deuil de la lumière. Le trou noir semble un astre de mort tant que nous le concevons terne et inerte ; il devient plus excitant, et parfois même positif, dès que nous

l'imaginons brillant et actif. On invoquera l'image d'un trou noir tournoyant sur lui-même, avec son disque s'illuminant au fur et à mesure de son accréation, avec des étoiles proches résistant à sa formidable gravité par la grâce de l'inertie, voire avec toute une galaxie faisant la ronde autour de lui. C'est un trou noir qui assure la cohésion de notre Galaxie, un cœur obscur qui maintient l'essaim des étoiles. On pourrait aussi évoquer les « cheveux » et l'« évaporation » des trous noirs, ce rayonnement analogue à celui des corps noirs conjecturé par Stephen Hawking, pour adoucir la noirceur en grisaille et retrouver de l'énergie (au travers des fluctuations du vide sous forme de paires particule-antiparticule virtuelles). Mais, au-delà des concepts astrophysiques sérieux, aventurons-nous au sein de l'exubérance de la science-fiction, dont Roland est un si grand amateur, pour découvrir la valeur éminemment positive de la noirceur de ces astres.

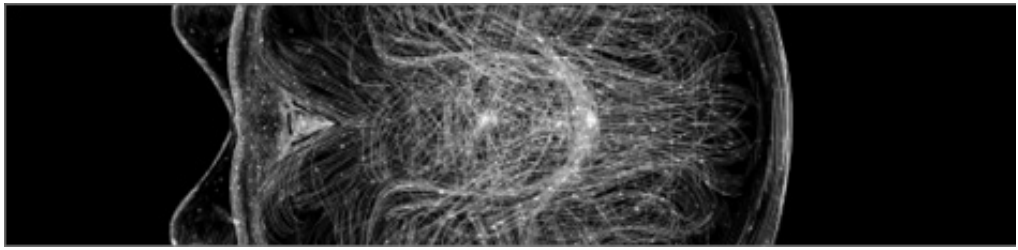
Dans *Les Chroniques de McAndrew*, un grand auteur de cette variété de science-fiction qu'on appelle la *hard science*, Charles Sheffield, imagine ce qu'il adviendrait si l'humanité parvenait à maîtriser la source d'énergie quasi inépuisable que représente la rotation de mini-trous noirs. Il y voit la source d'énergie idoine pour se propulser dans l'espace. Le noir brillant et tournoyant devient le moyen de libérer l'humanité de sa planète d'origine, de son système solaire, puis de sa galaxie.

Un pas plus loin dans l'imaginaire, le trou noir peut devenir le moyen de s'évader du monde, d'aller « n'importe où en dehors du monde » comme en rêvait Charles Baudelaire (1821-1867). L'image du trou noir brillant renverse l'imaginaire de l'emprisonnement : la gravité du trou noir, qui déchire la trame de l'espace et du temps, devient l'occasion des plus grandes évasions imaginaires. Dans le film *Le Trou noir* de 1979, un vaisseau spatial est attiré dans un trou noir. Au lieu d'y être, comme il se doit, disloqué et réduit à l'état de plasma, l'astronef est projeté à travers l'espace et le temps. Le trou noir est devenu une sorte de portail cosmique scintillant. L'idée a été reprise dans le film *Contact* (1997) et, encore plus récemment dans *Interstellar* (2014). On pourrait y voir le signe de l'indigence de l'information scientifique des scénaristes, voire un simple jeu de mot autour du « trou » en tant que passage secret, mais il s'agit en fait d'une science-fiction à l'inspiration plutôt *hard*, ou du moins assez proche des spéculations de certains théoriciens de la physique.

En 1935, Einstein et Nathan Rosen (1909-1995) découvrirent que les équations de la relativité générale permettaient des solutions connectant une région de l'espace-temps à une autre. On nomma ces singularités les « ponts d'Einstein-Rosen ». Dans les années 1960, Wheeler les nomma « trou de ver », par analogie avec les tunnels que creusent les lombrics dans le sol. Il s'agit de raccourcis spatio-temporels entre, d'un côté, un trou noir absorbant la matière et la lumière et, de l'autre, une « fontaine blanche » d'où elles rejailliraient. Wheeler établit aussi leur instabilité. En 1988, Kip Thorne (1940) et Mike Morris montrèrent qu'il était théoriquement possible de stabiliser les trous de ver à condition qu'une partie de la matière impliquée ait une masse négative. Un trou de ver serait-il traversable ? La matière à la masse négative n'existe, à notre connaissance, nulle part dans l'Univers (et on n'a jamais observé non plus de fontaines blanches). Toutefois, pour l'imagination (y compris celle des astrophysiciens), il y a toujours un plaisir psychique à contrebalancer une image intense par l'image symétrique : le trou noir implique la fontaine blanche comme la geôle appelle le passage secret.

C'est pourquoi le trou noir n'est pas qu'un astre grave et attirant dont on ne peut se libérer. Il recèle aussi une forme d'exubérance quand il incite l'imagination à transgresser les limites et à s'évader du monde tel qu'il est. La dépression n'est que la ligne de pente des images trop paresseuses. Une imagination inventive, voire géniale comme celles des grands physiciens théoriciens ou des meilleurs auteurs de *hard science*, y trouve au contraire un stimulant pour se libérer des contraintes de l'espace et du temps.





MATIÈRE NOIRE

*Quand les mystères sont très malins,
ils se cachent dans la lumière.*

Jean Giono, *Ennemonde et autres caractères*

Il est arrivé qu'un astre soit découvert non par observation directe de sa lumière mais par le calcul. Ainsi, en 1844, l'astronome allemand Friedrich Bessel (1784-1846) attribua les anomalies du mouvement propre de l'étoile Sirius à la présence d'un compagnon invisible ; dix-huit ans plus tard, la qualité des lunettes astronomiques ayant progressé, une étoile naine blanche accompagnant Sirius fut découverte. En 1846, les astronomes Urbain Le Verrier (1811-1877) et John Adams (1819-1892) attribuèrent les anomalies du mouvement de la planète Uranus – qui semblait ne pas tout à fait respecter la gravitation de Newton – à une planète encore inconnue ; l'astronome Johann Galle (1812-1910), suivant les indications de Le Verrier, observa une planète – finalement baptisée Neptune – à moins d'un degré de la position calculée. En 1932, l'astronome néerlandais Jan Oort (1900-1992) tenta de déterminer le champ gravitationnel galactique au voisinage du Soleil en étudiant la distribution des vitesses des étoiles proches : il en conclut que celles-ci ne contribuent que pour moitié à la quantité de matière nécessaire pour expliquer leurs mouvements. Parallèlement, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky (1898-1974) étudia la distribution des vitesses des galaxies dans le grand amas de la constellation boréale Coma Berenices (la Chevelure de Bérénice). En 1933, il montra que la masse nécessaire pour expliquer les vitesses mesurées est dix fois supérieure à celle des galaxies de l'amas. L'énigme de la « masse manquante » était née. La question est cependant restée en suspens durant près de cinquante ans. Elle est revenue au premier plan en raison de l'accumulation de données suggérant qu'une fraction importante de la masse de l'Univers est peu ou pas lumineuse et échappe donc à l'observation directe. De plus, cette matière noire semble se manifester à plusieurs échelles de taille : localement, à l'échelle des galaxies entières, mais aussi à celle des amas de galaxies et, enfin, à celle

de l'Univers observable dans son ensemble.

Matière noire locale

Une galaxie spirale comme la nôtre – la Voie lactée – contient près de 200 milliards d'étoiles rassemblées dans un disque renflé au centre, d'environ 100 000 années-lumière de diamètre pour un millier d'épaisseur (l'année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. Elle vaut environ 9 460 milliards de kilomètres). Entre les étoiles se trouve aussi du gaz plus ou moins dense et chaud qui constitue le milieu interstellaire à partir duquel de nouvelles étoiles se forment. La dynamique de ce disque d'étoiles et de gaz résulte d'un équilibre entre la force centrifuge due à la rotation de la galaxie et la gravité propre du disque de matière. L'orbite de la plupart des étoiles peut approximativement se décomposer en un mouvement de rotation dans le plan du disque et une oscillation perpendiculaire à ce plan. Cette dernière est sensible à la densité locale de matière dont l'attraction gravitationnelle agit comme une force de rappel, similaire à celle d'un ressort. La méthode de Oort se fondait justement sur l'analyse des oscillations perpendiculaires au plan du disque. Il en déduisait le champ gravitationnel du disque et donc sa distribution de masse. Il suffisait ensuite de la comparer à celle obtenue à partir du recensement local des étoiles. Pour expliquer les mouvements locaux, Oort pensait nécessaire d'invoquer une densité de matière deux fois supérieure à celle qu'il observait. Aujourd'hui, la question de la matière noire du disque galactique semble réglée grâce aux observations astrométriques du satellite Hipparcos. Celui-ci a fourni un échantillon non biaisé, plus précis et plus complet d'environ 120 000 étoiles dont Oort ne disposait pas. Finalement, la densité dynamique du disque s'accorde bien avec la densité stellaire observée et il semble qu'il n'y ait guère besoin de matière noire dans le disque. Le satellite astrométrique Gaia, lancé en décembre 2013, mène la même étude, mais sur un échantillon d'étoiles 8 000 fois plus important qu'Hipparcos. En revanche, la compréhension de la dynamique stellaire se pose encore à l'échelle d'une galaxie tout entière, bien plus étendue que son seul disque d'étoiles.

Matière noire dans les galaxies

L'astronome américaine Vera Rubin (1928) fut la première à étudier la rotation des galaxies spirales grâce à la spectroscopie. L'observation du décalage Doppler de la lumière des étoiles du disque permet de mesurer sa vitesse de rotation en fonction de la distance au centre de la galaxie. Cette méthode ne permet pas d'aller plus loin que le bord lumineux, situé à quelques dizaines de milliers d'années-lumière du centre. Mais l'observation en ondes radio des nuages d'hydrogène neutre permet de pousser deux fois plus loin. La mesure de la vitesse de rotation en fonction de la distance au centre de la galaxie permet de déduire le champ de gravité de l'ensemble du disque et donc sa distribution de masse. On peut alors comparer ce résultat à une détermination fondée sur la luminosité des étoiles. Cette luminosité diminuant exponentiellement avec la distance au centre, l'essentiel de la masse devrait se situer dans les régions proches du centre. Si cette hypothèse est correcte, la vitesse de rotation devrait d'abord augmenter en s'éloignant du centre galactique, puis décroître rapidement à plus grande distance. Or les observations sont très différentes : la vitesse de rotation du disque commence bien par augmenter quand on s'éloigne du centre, mais elle ne décroît pas ensuite et reste à peu près constante. Cela suggère qu'une importante quantité de matière se trouve dans les régions de luminosité faible ou nulle, et en dehors du disque. Des études systématiques portant sur des milliers de galaxies montrent que cette anomalie est Universelle : expliquer la dynamique de presque toutes les galaxies spirales nécessite un excédent de matière « noire », c'est-à-dire, en fait, invisible. Une façon de rendre compte de cette anomalie est d'invoquer la présence d'un halo massif grossièrement sphérique s'étendant dix à vingt fois plus loin que le disque d'étoiles.

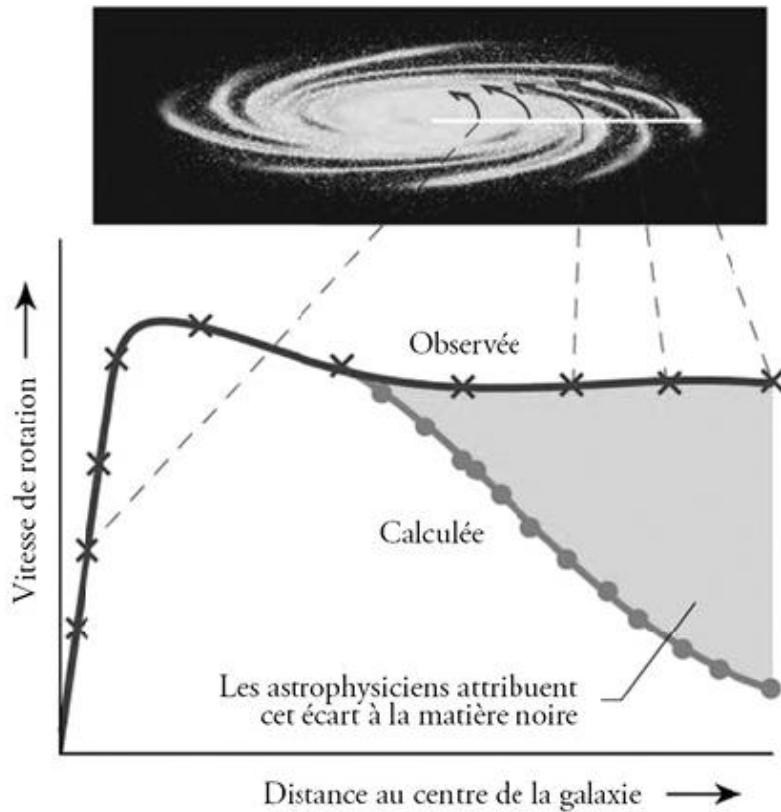


Figure 8. La courbe de rotation d'une galaxie mesurée directement diffère de celle déduite de sa distribution de matière lumineuse (étoile et gaz). Cette constatation est à l'origine de l'hypothèse de la matière noire.

Or, pour sonder le potentiel gravitationnel à plus grande distance, il faut recourir à des observations sur des objets plus éloignés, comme les amas globulaires ou les galaxies satellites, comme les deux Nuages de Magellan dans le cas de la Voie lactée. Le halo de notre Galaxie semble s'étendre jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années-lumière, une fraction appréciable de la distance qui la sépare de notre plus proche voisine, la galaxie d'Andromède, ayant elle aussi son propre halo massif. S'il en est ainsi, que se passe-t-il dans un amas rassemblant des centaines, voire des milliers de galaxies dans un rayon de l'ordre de quelques dizaines de millions d'années-lumière ?

Matière noire dans les amas de galaxies

Les soupçons d'existence de matière noire dans les amas de galaxies remontent à Fritz Zwicky qui avait observé une anomalie dynamique dans

l'amas de Coma. L'anomalie disparaissait si l'on tenait compte d'une matière noire invisible en quantité supérieure à celle de la matière lumineuse. Pour sa démonstration initiale Zwicky s'appuya sur un résultat de mécanique classique, le théorème du viriel. Celui-ci stipule que, dans un système autogravitant en équilibre dynamique, l'énergie potentielle est, en valeur absolue, égale au double de l'énergie cinétique. Ce théorème permet d'estimer la masse d'un amas en fonction de deux quantités mesurées : la vitesse moyenne des galaxies qui le composent, déterminée par spectroscopie, et la taille de l'amas. Il est désormais confirmé que la masse nécessaire pour lier les grands amas est très nettement supérieure à la somme des masses que l'on peut attribuer individuellement aux galaxies, même en tenant compte de la matière noire déduite de l'étude des courbes de rotation.

La méthode du viriel reste cependant incertaine. D'abord, il faut être sûr de correctement dénombrer les galaxies de l'amas, en évitant de compter des galaxies qui lui sont extérieures et sans oublier des galaxies de luminosité très faible. Ensuite, l'amas n'est pas forcément en équilibre dynamique – condition d'application du théorème du viriel –, le temps de mise à l'équilibre pouvant dépasser l'âge de l'Univers. Enfin, notre vision de l'amas est biaisée, car toutes les distances et les vitesses sont mesurées en projection sur la ligne de visée. Pourtant, les résultats ainsi obtenus sont confirmés par les observations des amas en rayons X réalisées grâce à des satellites dédiés comme ROSAT (acronyme de l'allemand *Röntgensatellit*), XMM-Newton (acronyme de *X-ray Multi-Mirror*) et Chandra (dont le nom honore la mémoire du prix Nobel de physique Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910-1995). La forte émission des amas dans cette gamme lumineuse provient d'un gaz très chaud, porté à plus d'un million de degrés, dans lequel baignent les galaxies de l'amas. L'analyse de l'émission X du gaz intergalactique permet de déterminer simultanément les masses totales de l'amas et du gaz. L'ensemble de ces informations indique que les étoiles ne représentent qu'entre 2 et 4 % de la masse totale exigée par la dynamique de l'amas et que le gaz chaud n'en représente guère que de 12 à 16 %. Cela signifie qu'il manque entre 80 et 86 % de la masse nécessaire à expliquer la dynamique de l'amas. Ces résultats ont été confirmés par une méthode plus récente, fondée sur l'analyse des distorsions gravitationnelles de la lumière des galaxies

situées au-delà des amas.

Mirages cosmiques

Depuis 1986, de nombreuses images d'amas de galaxies font apparaître des galaxies déformées. Les plus spectaculaires montrent des arcs lumineux immenses, interprétés comme les images déformées de galaxies situées derrière l'amas. Il s'agit là d'un effet de « mirage gravitationnel » prédit par la relativité générale d'Einstein. Comme nous l'avons déjà vu, cette théorie décrit l'espace-temps comme une trame élastique déformée par la présence de matière. La lumière se déplace en suivant les lignes de plus court chemin (les géodésiques) de l'espace-temps courbe. La trajectoire de la lumière est donc déviée par la présence de matière. Par analogie avec la déviation des rayons lumineux par des lentilles de verre, les masses jouent donc le rôle de « lentilles gravitationnelles ».

L'interprétation des arcs lumineux observés en termes de mirages gravitationnels a été confirmée par l'analyse spectrale des images distordues. En effet, la lumière d'un objet lointain subit un décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers. Toujours bien supérieurs à ceux de l'amas perturbateur, les décalages vers le rouge des sources déformées les situaient nettement en arrière de l'amas. Plus fréquents que les arcs, les *arclets* sont de petites images de galaxies d'arrière-plan, légèrement tordues par le champ de l'amas. La répartition, l'orientation et l'intensité de ces distorsions permettent de reconstituer avec une remarquable précision, et quelques ambiguïtés, la distribution de masse de l'amas qui en est responsable. Toutes ces études convergent vers des masses élevées, confirmant d'une façon totalement indépendante les résultats obtenus par l'étude des distributions de vitesses et par l'émission de rayonnement X.

Matière noire à l'échelle de l'Univers

La méthode des mirages gravitationnels peut être étendue à l'ensemble du ciel. La lumière des galaxies lointaines étant déviée par la matière présente entre celles-ci et la Terre, les images que nous en recevons, très légèrement déformées, permettent de reconstituer la distribution de masse à l'échelle de l'Univers. En 1996, l'astrophysicien français Yannick

Mellier (1958) a entrepris avec son équipe de mesurer la quantité de matière noire dans tout l'Univers et de dresser une carte de sa distribution entre les amas de galaxies.

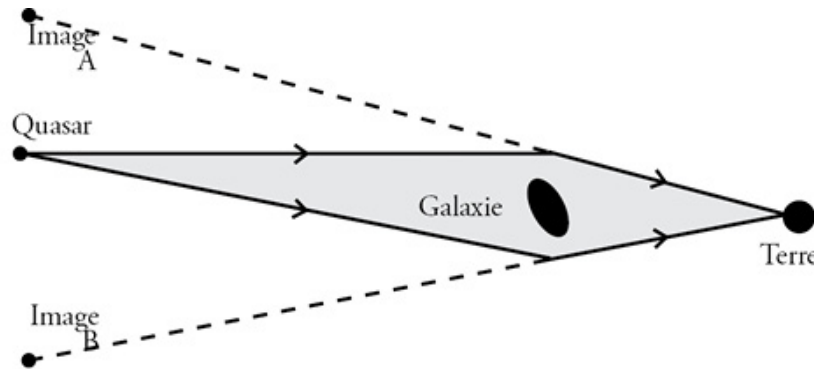


Figure 9. Effet de lentille gravitationnelle. La masse d'une galaxie dévie la lumière d'un quasar lointain. Un observateur terrestre en voit des images multiples et déformées.

Cette procédure a été appliquée début 2012 par le groupe dirigé par l'astronome écossaise Catherine Heymans, de l'Université d'Édimbourg, et l'astronome français Ludovic Van Waerbeke, de l'Université de Colombie-Britannique. Ils réussirent à cartographier la matière noire dans le cosmos sur une étendue sans précédent. Pour cerner la matière noire, ils ont étudié les distorsions de la lumière émise par quelque 10 millions de galaxies très lointaines, dans quatre régions différentes du ciel. La mission spatiale Euclid, en cours de réalisation pour le compte de l'Agence spatiale européenne, a notamment pour but de mesurer la distribution de la matière noire dans l'Univers et la manière dont cette répartition a évolué depuis le big bang.

L'étude du rayonnement diffus cosmologique qui baigne l'ensemble de l'Univers permet aussi de déterminer sa composition globale. Rappelons que ce rayonnement fossile est observable sous forme d'un rayonnement de corps noir à la température homogène de 2,725 kelvins. Mais d'infimes inhomogénéités de température trahissent l'existence d'inhomogénéités de densité dans la matière primordiale, germes des futures galaxies. Dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, l'étude statistique de ces inhomogénéités permet d'estimer la densité de matière et d'énergie dans l'Univers. Le résultat est surprenant : non seulement la densité de matière dépasse d'un facteur 5 la densité de matière ordinaire (26,8 % contre 4,9 %), mais la densité totale est dominée par une composante d'énergie

non détectée jusque-là (68,3 % contre 31,7 % pour la matière, voir le chapitre suivant sur l'énergie noire).

Nucléosynthèse primordiale

Un autre argument plaide en faveur de l'existence d'une matière inconnue. Si l'on remonte dans le passé, bien avant l'émission du fond diffus cosmologique, l'Univers a connu une phase où sa température atteignait 10 milliards de degrés. L'agitation thermique était alors si intense que l'interaction nucléaire forte était incapable d'assurer la stabilité des noyaux. Le fluide cosmique était donc constitué d'un mélange de nucléons (protons et neutrons), au milieu desquels foisonnaient électrons, photons et neutrinos. Les neutrinos jouaient un rôle important : absorbés et émis sans cesse par les nucléons, ils transformaient les protons en neutrons, et *vice versa*, maintenant un équilibre entre eux.

L'expansion aidant, la température décrivit, et vint un moment où les neutrinos ne purent plus interagir avec les nucléons, rompant ainsi l'équilibre qui régnait jusqu'alors. Le neutron est une particule instable qui, en un peu moins d'un quart d'heure, se désintègre en un proton, un électron et un neutrino. La seule voie de préservation du neutron est son assemblage avec un proton pour former un noyau de deutérium. C'est la première étape d'une nucléosynthèse produisant surtout des noyaux d'hélium-4 mais aussi d'hélium-3 et de lithium-7. Au bout de trois minutes, le refroidissement dû à l'expansion de l'Univers mit fin à cette activité nucléaire initiale. Quelle est la proportion de neutrons sauvés dans les noyaux ? La réponse dépend de la quantité de matière que contient l'Univers. S'il y a très peu de nucléons, les rencontres entre protons et neutrons sont rares, peu de deutérium est produit et l'essentiel des neutrons se désintègre ; si tel est le cas, l'hélium-4 est produit en faible proportion par rapport à l'hydrogène. En revanche, s'il y a beaucoup de nucléons, les rencontres entre protons et neutrons sont fréquentes, les réactions nucléaires nombreuses et la proportion d'hélium-4 plus importante. De surcroît, la quantité totale de matière influence le rythme de l'expansion et donc la durée pendant laquelle la nucléosynthèse primordiale se produit : une durée courte correspondra à de faibles quantités d'éléments synthétisés. Ainsi, la mesure de la contribution

primordiale à la proportion actuelle d'hélium-4 permet d'évaluer la quantité de matière formée de protons et neutrons (dite matière baryonique) dans l'Univers. La valeur trouvée, 4,9 %, conforte l'idée que la majorité de la matière de l'Univers observable ne se présente pas sous une forme lumineuse, gaz ou étoile, qui ne représente que 0,5 % de la matière ordinaire.

Une nouvelle loi ?

Toutefois, d'autres hypothèses que la matière noire sont susceptibles de rendre compte des anomalies dynamiques constatées. Au lieu d'invoquer l'existence d'une nouvelle entité, telle que la matière noire, en conservant les lois physiques inchangées (solution « ontologique »), on peut essayer de réduire l'écart entre la théorie et l'observation en modifiant ces lois (solution « législative »). Ainsi, on peut estimer préférable de modifier le cadre théorique, c'est-à-dire d'invoquer une autre force que la gravitation ou de remettre en cause l'universalité de sa loi. C'est cette dernière option que privilégie la théorie dite de la « dynamique newtonienne modifiée » (MOND, acronyme de l'anglais *Modified Newtonien Dynamics*) développée à partir de 1983 par le physicien israélien Mordehai Milgrom (1946). Il postule que la force gravitationnelle suit une loi modifiée pour des accélérations très faibles. Cette proposition explique bien les vitesses de rotation au sein des galaxies mais les succès de la théorie MOND se limitent à cette échelle uniquement. Son utilisation pour décrire une structure telle qu'un amas de galaxies, notamment l'amas du Boulet (constellation de la Carène), nécessite d'invoquer aussi une forme de matière qui ne peut pas être baryonique. La marge de manœuvre pour de nouvelles lois de la gravitation est très limitée par les nombreux tests de précision que la relativité générale a subis dans le Système solaire. Par ailleurs, des mises à l'épreuve de la gravitation ont été effectuées à de très grandes échelles, combinant astucieusement des données relatives aux lentilles gravitationnelles, aux amas galactiques et aux vitesses des galaxies. Leurs résultats excluent presque complètement certaines de ces théories alternatives. Aucun modèle ne semble aussi fructueux que celui invoquant la matière noire : il offre l'explication la plus simple mais en introduisant une mystérieuse entité physique.

Quelle pourrait être la nature de la matière noire ?

Si la matière noire n'est connue que par son action gravitationnelle, de quoi est-elle constituée ? L'alternative paraît simple : soit d'une forme non lumineuse de la matière déjà connue (dite matière « baryonique »), soit d'une forme inconnue de matière (la matière « non baryonique »), qui serait finalement beaucoup plus répandue que celle que nous connaissons. Sous quelle forme peut-elle se trouver ? Les candidats ne manquent pas.

Gaz et poussières sont généralement détectables grâce à leurs raies d'émission ou d'absorption et, en ce sens, ils ne sont pas vraiment noirs. Ils sont présents en quantité relativement importante dans le disque de notre Galaxie où la masse de gaz est comparable à celle des étoiles visibles. Mais la masse de gaz et de poussières reste insuffisante pour rendre compte de la courbe de rotation d'une galaxie. Il est exclu que le halo soit entièrement formé de gaz diffus : sa température d'équilibre serait alors voisine d'un million de degrés, provoquant l'émission d'un rayonnement X bien plus intense que ce qui est observé. L'hydrogène atomique est très étudié et il n'est clairement pas assez abondant. En revanche, il n'existe presque pas de contraintes sur l'abondance d'hydrogène moléculaire, qui n'est pas directement détectable.

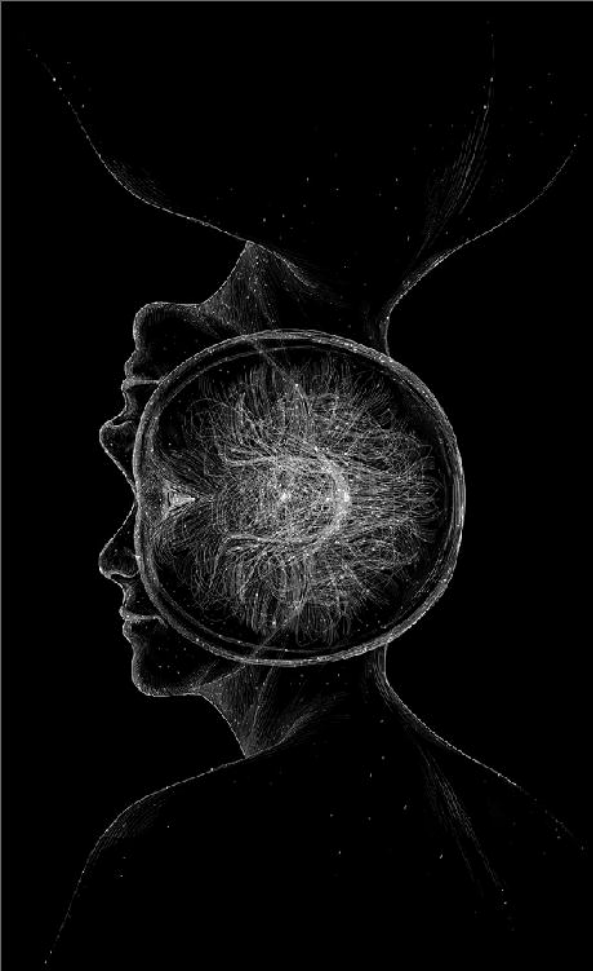
Étoiles à neutrons et trous noirs sont des candidats particulièrement sombres. Une première vague d'étoiles massives, au début de l'Univers, aurait pu en créer un grand nombre dans leur effondrement final. Pour que 90 % des baryons aboutissent dans des étoiles à neutrons ou des trous noirs, le nombre d'étoiles de petite masse (inférieure à deux à quatre fois la masse du Soleil) doit être très faible. Problème : 70 % des étoiles du disque de notre Galaxie ont une masse inférieure à deux masses solaires. D'autre part, avant de devenir étoile à neutrons ou trou noir une étoile massive explose en supernova. Une grande partie de sa masse est alors dispersée dans le milieu interstellaire, l'enrichissant ainsi en noyaux lourds, comme le fer, synthétisés durant l'explosion. La quantité de ceux-ci serait alors beaucoup plus grande que celle qui est observée. Enfin, le gaz interstellaire capté par un trou noir doit aussi rayonner en infrarouge de façon détectable à cause de l'échauffement intense qu'il subit durant sa chute. Aucun excès infrarouge de cette sorte n'a été détecté.

D'autres types d'objets sont aussi peu lumineux. Les naines brunes par exemple. Ce sont des étoiles ratées dont la petite masse, inférieure à 0,08 masse solaire, ne leur permet pas d'être le siège de réactions de fusion thermonucléaires. Les naines blanches sont également peu lumineuses en raison de leur petite taille. Elles résultent de l'évolution d'une étoile de type solaire. Quant aux étoiles à neutrons, cadavres des étoiles massives, elles ne sont pas lumineuses du tout.

Étoile à neutrons, trou noir, naine blanche, naines brunes ont été regroupés sous l'acronyme de MACHO (*Massive Compact Halo Objects*). Ces objets peuvent-ils être en quantité suffisante pour expliquer le halo massif d'une galaxie ? Le projet EROS (acronyme d'Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres) a été spécialement élaboré pour répondre à cette question. Un télescope a mesuré nuit après nuit la luminosité de millions d'étoiles des Nuages de Magellan, deux petites galaxies satellites de la Voie lactée. Il s'agissait de détecter l'amplification lumineuse temporaire causée par le passage d'un astre sombre du halo de notre Galaxie sur la ligne de visée d'une des étoiles observées. Encore un effet de lentille gravitationnelle. Dix années de traque ont permis d'exclure que le halo sombre de notre Voie lactée soit majoritairement constitué d'astres très peu lumineux laissant ainsi entier le mystère de la nature de la matière noire baryonique.

Désormais, les astrophysiciens sont majoritairement convaincus de l'existence de matière noire non baryonique. Les espoirs ont un temps reposé sur le neutrino, une particule interagissant très faiblement avec la matière. Mais sa masse, bien que non nulle, est beaucoup trop faible pour rendre compte de la matière noire non baryonique. Au mieux, les neutrinos contribuent autant que les étoiles au bilan de matière de l'Univers. En dehors du neutrino, la physique des particules ne connaît avec certitude aucune particule susceptible de correspondre à la matière noire non baryonique. Toutefois, de nouveaux développements théoriques visant à étendre le champ du modèle standard de la physique des particules prédisent l'existence de nouvelles particules qui feraient de bonnes candidates. Elles sont regroupées sous le nom générique de WIMP (*Weakly Interactive Massive Particles*, l'acronyme signifiant « mauviette » en anglais) et forment une classe de particules massives, stables, interagissant faiblement avec la matière. La particule nouvelle la

plus légère, nommée « neutralino », pourrait être l'une d'entre elles. Les physiciens espèrent les détecter dans les grands accélérateurs comme le Large Hadron Collider du CERN, à Genève. Ils cherchent aussi à déceler leur éventuelle présence grâce à des détecteurs installés sous des centaines de mètres de roche ou sous la glace du pôle Sud. Il s'agit de les protéger d'autres types de particules pour détecter les rares interactions de particules de matière noire avec les atomes de leurs machines. Ces expériences sont délicates, car elles sont confrontées à de nombreuses sources parasites. Quelques équipes ont annoncé avoir observé des signaux qui seraient dus à la matière noire, mais d'autres groupes infirment ces résultats. La question reste aujourd'hui ouverte. Au cours des prochaines années, la situation devrait cependant s'éclaircir, car les expérimentateurs augmentent sans cesse la sensibilité de leurs détecteurs. Si la recherche reste infructueuse malgré tous leurs efforts, l'idée de matière noire deviendra sûrement plus difficile à défendre. Quoi qu'il en soit, dans leur quête des origines de la matière ordinaire, les astrophysiciens ont rempli l'Univers d'une matière exotique dont la traque sera probablement l'une des grandes aventures scientifiques de ce siècle.





LES ALCHEMIES DE LA MATIÈRE NOIRE

Ainsi le poète moderne retrouve l'ancienne rêverie du noir des alchimiste qui cherchaient le noir plus noir que le noir : « Nigrum nigrius nigro »

Gaston Bachelard, *La Terre et les Rêveries du repos*.

Dans les années 1930, l'astronome américain d'origine suisse Fritz Zwicky observa, dans un amas de la constellation Coma Berenices, les vitesses relatives anormalement élevées de certaines galaxies. Il en conclut que si ces vitesses devaient s'expliquer par des effets gravitationnels, elles impliquent la présence d'une masse considérablement plus importante que celle de la matière observée. Ses collègues ne se laissèrent pas convaincre et poussèrent même le scepticisme jusqu'à le priver du temps d'observation nécessaire pour mettre à l'épreuve son hypothèse. De tempérament irascible, Zwicky en conçut une amertume qui s'exprima par des sarcasmes virulents à leur égard. Peu à peu, il se trouva complètement isolé. Certains colportent la légende noire qui voudrait que ce soit son côté « loup solitaire » qui ait été la cause de l'ostracisme et non l'inverse. Quoi qu'il en soit, l'astronomie et l'astrophysique perdirent quarante ans pour ne pas l'avoir écouté. À l'origine de la matière noire, il semble qu'il y ait eu quelque chose *que l'on ne voulait pas voir*.

Aujourd'hui, le biais semble renversé : l'adjectif « noir » accolé à « matière » marque toujours la difficulté, voire l'impossibilité, d'observer cette substance mystérieuse, mais cette obscurité aurait plutôt tendance à jouer un rôle incitatif pour la recherche. Tous les astrophysiciens, ou presque, croient à la matière noire même s'ils ne peuvent la voir. Ainsi, le noir participe à la substantialisation de cette hypothèse. Parce qu'elle est « noire », inconnue, cette matière exotique excite l'imagination des scientifiques. Sa noirceur signifie l'absence de détection par des moyens classiques, mais cette impuissance n'est plus interprétée comme un indice d'une probable inexistence. Au contraire, la noirceur semble légitimer de

folles spéculations théoriques ! La matière noire est la substance cachée que traquent ensemble astrophysiciens et physiciens des particules.

Un noir plus noir que le noir

Pour étudier les résonances imaginaires de la matière noire, nous allons mobiliser les images d'un art occulte et les ressources d'une parole qui aime à cacher ce qu'elle prétend révéler : le corpus hermétique. Ce rapprochement entre astrophysique et alchimie n'implique point que les recherches des alchimistes de jadis aient eu le moindre rapport réel avec celles des scientifiques contemporains. Nous le proposons *sur le plan de l'imaginaire* parce que les écrits hermétiques livrent nombre d'images qui associent la matière, le mystère et la noirceur, dans les écrits portant sur ce que les alchimistes nommaient eux-mêmes la « matière noire », mais qui est plus connue sous le nom d'« œuvre au noir ». Nous examinerons ainsi comment l'image alchimique de la matière noire se réveille et se transforme au contact de l'hypothèse astrophysique de la matière noire et comment elle la « colore », peut-être, en retour.

Comme celle des astrophysiciens, la matière noire des alchimistes s'oppose avant tout à la lumière des astres : elle est comme une ombre que le soleil ne parvient jamais à éclairer. De façon énigmatique, l'alchimiste allemand Michael Maier (1569-1622) établissait déjà un lien entre cette ombre mystique et l'art de l'astronome : « L'utilité des ombres en Astronomie est si grande que, sans elles, cette science pourrait à peine être achevée » (*L'Atalante fugitive*, 1618, p. 189). Son discours commence par faire référence à l'ombre projetée des corps : « Le Soleil ne pénètre pas la densité des corps ; lui demeure donc opposée l'ombre de toutes choses : plus vile qu'elles certes, elle n'en est pas moins utilisée par les Astronomes à qui elle offre maintes commodités » (*idem*). Dans les textes hermétiques, il n'est jamais facile de suivre la pensée de l'auteur, mais il semble bien qu'aux yeux de Maier l'utilité des ombres pour les astronomes soit un argument en faveur de l'existence d'une autre ombre cachée à l'*intérieur* des corps : la matière noire.

Bachelard aimait beaucoup lire les traités d'alchimie. Il était aussi, comme on l'a déjà vu à propos du corps noir, très attentif au fantasme de la noirceur cachée au cœur de la substance des choses. Il appréciait, en

particulier, le fantasme paradoxal suivant : que le noir substantiel puisse être dissimulé *sous des dehors noirs*. La quête imaginaire du noir caché réclame de chercher au cœur de la meilleure cachette, celle de la noirceur elle-même, pour dénicher « ce noir aigre qui travaille sous la noirceur émoussée, ce noir de la substance produisant sa couleur d'abîme » (*La Terre et les Rêveries du repos*, p. 35).

D'après Zwicky, l'écart entre les vitesses prévues et observées de certaines galaxies aurait dû imposer à ses collègues de prendre en compte l'anomalie qui suscitait de sa part l'hypothèse de la masse manquante. Si l'on demeure dans le cadre de la théorie de la relativité générale, pour expliquer les vitesses observées, il faut en effet admettre que la matière telle que nous la connaissons ne représente qu'une fraction de la masse de l'Univers. Certes, le physicien n'est pas absolument contraint à cette hypothèse d'ordre ontologique (inventant de nouveaux êtres) : il peut, comme l'a expliqué Roland, préférer changer les lois de la gravitation. Une solution « législative » de ce type est en particulier défendue par les partisans de la théorie MOND (*Modified Newtonian Dynamics*). Si l'on modifie la deuxième loi de Newton (celle qui définit la force en fonction de l'inertie et de l'accélération), la matière noire n'existe pas, ce n'est pas une réalité mais une ombre due aux imperfections de la théorie standard. Or, on trouve déjà cette hésitation ontologique dans les spéculations des alchimistes au sujet de la matière noire. Pour Maier, la matière noire existe, mais elle n'est pas une substance ordinaire, elle n'est qu'une ombre, elle est donc comme un non-être comparée aux substances observables dans l'Univers : « L'ombre est chose très utile, bien que proche du non-être : ainsi apparaît l'ombre des Philosophes qui est le Noir plus noir que le noir » (*idem*). Voilà définie la spécificité imaginaire du noir de la matière noire : il est « Nigrum nigrius nigro », un *noir plus noir que le noir*.

La matière noire des astrophysiciens est dite « noire » (en français) parce qu'elle n'est pas détectable au moyen des ondes électromagnétiques. Nous savons que les idées noires de la physique désignent, en général, ces choses que l'on ne parvient pas à observer. Il faut, toutefois, souligner l'accentuation par rapport aux significations antérieures du noir physique : le trou noir ne se voit pas, mais il interagit avec la lumière quand elle le rencontre, il l'absorbe. En revanche, la matière noire n'aurait absolument

aucune interaction avec la lumière qui la traverse, elle ne l'absorbe pas plus qu'elle n'en émet. Elle n'interagit avec elle et la matière ordinaire qu'au travers de la gravitation. Le sens du noir de la matière noire va donc bien au-delà du sens conventionnel du noir en physique, c'est un « noir plus noir que le noir ». On peut même se demander si l'adjectif « noir » convient encore pour une matière qui est, en fin de compte, invisible, impalpable et transparente. La noirceur signale qu'elle est résolument cachée, ce qui, bizarrement, au lieu d'inciter au doute, favorise la croyance en son existence. Imaginairement, ce qui est noir a de la consistance.

Hypothèse *ad hoc* (voire métaphysique aux yeux d'un strict positiviste), la matière noire résulte d'une *substantialisation*. La masse manquante est d'abord un problème, une anomalie au sein d'un modèle scientifique. La « matière sombre » (traduction de *dark matter*) ne désignait qu'une solution problématique, mais la matière noire est plus qu'une simple hypothèse : elle acquiert le statut de réalité incontestable dans certains discours scientifiques. Lorsqu'on exhibe des « cartographies » de la matière noire, certains les présentent comme l'observation indirecte d'une réalité, alors qu'il ne s'agit, en toute rigueur, que d'une représentation obtenue par simulation numérique de ce que l'hypothèse impose pour rendre compte des observations. Parce qu'elle est appelée « matière » et qu'elle est dite « noire », la masse manquante acquiert ainsi une consistance imaginaire.

Il n'y a pas à s'offusquer de ce que des scientifiques postulent l'existence de substances qui n'ont jamais été observées. Face à un écart majeur par rapport aux prédictions théoriques, les scientifiques n'ont souvent le choix qu'entre deux solutions fort risquées : modifier la théorie ou inventer un nouvel élément dans le cadre théorique existant. Il n'y a aucun moyen de savoir à l'avance quelle sera la meilleure stratégie. Toutefois, il est frappant que la qualification de « noire » ne soit pas neutre à cet égard : elle pousse à supputer plutôt qu'à douter. La noirceur conjugue deux dynamiques imaginaires contraires : elle intensifie la croyance en la matière en même temps qu'elle suggère qu'elle est irrémédiablement hors d'atteinte. Ce noir plus noir que le noir serait-il alors le propre d'une idée occulte ? Ou n'est-il que provisoire, en attente de sa transmutation ?

L'œuvre au noir

En alchimie, la *Nigredo* ou œuvre au noir n'est qu'une étape. Lui succèdent l'œuvre au blanc, puis l'œuvre au rouge, qui est l'aboutissement du grand œuvre tant espéré. Reprenant des images égyptiennes, orphiques et chrétiennes, de mortification suivie d'une résurrection, les alchimistes présentent le passage par la noirceur comme une étape néfaste indispensable avant l'obtention de la vraie connaissance de la matière : « Cette masse, ainsi noire ou noircie, est la clef, le commencement [...] cette Noirceur montre la vraie manière d'opérer ; car la masse étant rendue difforme, et corrompue de vraie corruption naturelle, il s'ensuit de cette corruption une génération de nouvelle disposition réelle en cette Matière » (Bernard le Trévisan, *La Parole délaissée*, xv^e siècle, p. 428). Étant la clef pour accéder à la plus éclatante splendeur, il paraît naturel de supposer que la matière noire est très bien protégée. Cette évocation de l'excitation de la découverte des secrets de la matière noire est extrêmement suggestive. En poussant le bouchon un peu trop loin, on dirait que les astrophysiciens rejoignent les alchimistes dans la quête de la pierre philosophale, non par leurs moyens d'investigation, mais par la fascination qu'ils éprouvent pour leur objet : leur matière noire est primordiale et cachée. Ne serait-ce pas qu'elle est cachée parce qu'elle est primordiale ?

Selon les alchimistes, la matière noire entretient un lien étroit avec Saturne, symbole qui superpose la planète aux anneaux, l'antique divinité romaine du temps et le plomb. Ce Saturne est le « père » de la matière noire. Il la protège et la dissimule. Il en fait une substance secrète, qui se refuse à la lumière, comme fermée sur elle-même :

« Le désir saturnien enferme cet enfant doré en lui, non en sa forme grise, mais en un éclat obscur [...] il le couvre de son manteau noir [...] il constitue l'essence du libre désir (le corps d'or) parvenu au plus haut degré de corporéité dans la mort fixe ; il n'est cependant pas la mort mais une fermeture représentative de la divine essence céleste » (Jacob Boehme, *De la signature des choses*, 1621, p. 29).

L'œuvre au noir, obtenue par calcination ou par dissolution dans l'acide, est vile, comparable à des excréments, *et* immensément précieuse, puisqu'il s'agit du premier stade du grand œuvre censé produire la pierre philosophale changeant le plomb en or. De même, la matière noire n'était, au départ, qu'un expédient pour rendre compte d'une regrettable anomalie,

mais elle est devenue l'un des Graals de l'astrophysique et celui qui parviendra à élucider sa nature aura fait un pas de géant dans la compréhension de l'Univers... et vers l'or du prix Nobel.

L'anima du cosmos

À qui admet l'existence de la matière noire, c'est en effet un nouvel univers qui se dévoile sans se montrer : il existerait bien plus de matière dans l'Univers que ce que nous pouvons en voir ! Par conséquent, la matière ordinaire ne serait qu'une fine écume de la matière réelle. Ce renversement de perspective théorique est comparable à la découverte psychanalytique de la vie inconsciente : notre existence consciente n'est qu'une toute petite partie de ce qui se trame dans notre esprit et il y a bien des choses que nous faisons que nous ne pourrions expliquer par nos délibérations et nos décisions conscientes. La psychanalyse d'obédience jungienne insiste sur le fait que nous ne prenons conscience de notre véritable personnalité que lorsque nous acceptons ses parts d'ombre refoulées, ses aspects dérangeants et parfois dangereux. Carl Gustav Jung nomme cet aspect de notre psyché l'*anima*, l'âme sombre et enfouie, par différence avec l'*animus*, notre personnalité assumée, valorisée et agissante. L'*anima* a beau être la composante passive et obscure de la psyché, elle est aussi la plus importante. Si l'on suit cette analogie, la matière noire serait l'*anima* du cosmos.

Jung trouvait dans les livres des alchimistes de nombreuses représentations de cette dualité fondamentale de l'âme sous la forme d'un hermaphrodite couronné. Les écrits et les gravures des alchimistes abondent de tels archétypes, qui constituent un matériau précieux pour le psychanalyste. Dans la mesure où elle joue avec les symboles sans être réellement contrainte par l'expérience, l'alchimie projette très librement les archétypes de l'inconscient collectif sur la « substance » alchimique. Or, en ce qui regarde la nature de la matière noire, l'astrophysique se trouve elle aussi dépourvue de point de référence expérimental. Elle découvre un terrain vierge que la physique des particules la plus spéculative envahit avec allégresse. En effet, pour combler l'énorme déficit de masse, les astrophysiciens ont d'abord placé leurs espoirs dans ce qu'ils nommaient encore la « matière sombre », c'est-à-dire dans de la

matière classique difficilement observable, telle que les naines blanches, les naines brunes et les trous noirs. Ces astres donnaient, si l'on nous passe l'expression, un peu de couleur à la matière noire. Mais cela ne suffisait pas, tant s'en faut. Alors, ils en appelèrent à leurs collègues théoriciens de la physique des particules pour inventer de multiples variétés de matière exotique, c'est-à-dire différente de la matière connue, mais tolérée par certains modèles théoriques. Un lien s'établit alors entre le macrocosme et le microcosme.

L'union du macrocosme et du microcosme

Il y aurait ainsi de la matière noire « froide » (c'est-à-dire lente par rapport à la vitesse de la lumière), composée de particules massives que l'on n'a pas détectées jusqu'à présent parce qu'elles interagiraient très peu avec le reste de la matière. Il y aurait aussi de la matière noire « chaude » (se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière), dont les trois formes de neutrinos connues sont une composante et, enfin, de la matière noire « tiède », dont la principale composante serait le neutrino « stérile », une quatrième forme de neutrino (que l'on dit stérile parce qu'il n'interagit pas avec la matière et qu'il est donc indétectable). De leur côté, certains alchimistes rapprochaient aussi leurs spéculations sur la matière noire des doctrines atomistes de l'Antiquité : « Réjouis-toi alors parce que tu verras certainement sous peu tout noir comme du charbon, et tous les membres de ton composé seront réduits en atomes » (Eyrénée Philalèthe, *L'Entrée ouverte au palais fermé du roi*, 1645, p. 672.). Ces atomes sont ceux de Démocrite, Épicure et Lucrèce. Ils n'ont d'existence que métaphysique.

Pour les astrophysiciens, l'accord recherché avec une autre branche de la physique est le seul moyen de progresser, et il représente *a priori* de nouvelles contraintes. Toutefois, la multiplication des hypothèses sur la nature de la matière noire a de quoi jeter le trouble. En poursuivant notre analogie irrévérencieuse, on peut suggérer que les physiciens des particules sont conduits à multiplier les particules exotiques pour combler la masse manquante des astrophysiciens de la même manière que les traités d'alchimie multipliaient les noms et les symboles attribués à la

matière noire pour masquer le fait qu'elle ne se trouve nulle part dans la nature et qu'elle est impossible à produire par les procédés techniques qu'ils préconisaient. Ainsi l'œuvre au noir est aussi appelé la « Poix noire », le « Sel brûlé », le « Plomb fondu », le « Laiton non net », la « Magnésie », le « Merle de Jean », « l'Occident », les « ténèbres », la « lèpre », la « mort », la « mortification du Mercure », ou encore « l'Hadès ». Il va sans dire que les majuscules signifient que la Poix, le Sel, le Plomb, le Laiton, le Mercure ou la Magnésie ne sont point identiques aux substances que ces termes désignent d'ordinaire.

La « tête de corbeau » est l'une des expressions qui revient le plus souvent : il semble qu'à un stade du processus de « mortification », une partie de la matière contenue dans la cornue soit censée se volatiliser en une vapeur noire ; le corbeau étant un « volatile noir », cette substance est nommée « tête de corbeau »... Nonobstant, la mythologie fait bien les choses : le corbeau est aussi un oiseau lié à Chronos, le dieu du Temps chez les Grecs, homologue du Saturne des Latins, et à Odin, dieu de la Vie, de la Mort, de la Guerre et de la Magie chez les Scandinaves, qui est accompagné de deux corbeaux symbolisant la Pensée et la Mémoire. L'abondance du vocabulaire et la cohérence des symboles occultent la vacuité de la référence matérielle. Aucun alchimiste n'a jamais pu indiquer clairement de quoi il parlait. Il est vrai, comme le rappellent des spécialistes de l'alchimie fascinés par leur objet d'étude, qu'il suffirait qu'un alchimiste s'exprime clairement pour qu'il ne soit plus digne de porter ce titre. L'alchimie est par essence un art qui cache les secrets qu'il prétend détenir.

Dans leur propre recherche d'une union entre la masse du macrocosme et les variétés du microcosme, les astrophysiciens et les physiciens des particules jouent, quant à eux, la transparence. Leur quête de la matière noire n'en est pas moins incertaine. L'accélérateur de particules remplace avantageusement la cornue, mais il lui arrive aussi de faire chou blanc. La matière noire froide était ainsi censée être composée de particules « symétriques », c'est-à-dire qu'à chaque boson on fait correspondre un fermion et réciproquement. Ces nouvelles particules n'ont jusqu'à présent jamais été observées bien que leur existence soit prédite par une extension du modèle standard fort populaire parmi les physiciens des particules, la « supersymétrie ». Hélas, aucune d'elles n'a, pour l'instant, été détectée

par le grand collisionneur de hadrons (LHC) mis en service au CERN et certains théoriciens estiment que cette théorie est probablement « morte ».

La matière noire chaude est, quant à elle, composée de particules dont l'existence est avérée, les neutrinos. Néanmoins, leur nombre et leur masse ne résolvent qu'une petite partie du problème. Quant au neutrino stérile qui constituerait la matière noire tiède, il n'interagit avec la matière que lorsqu'il se transforme en une autre forme de neutrino, si bien que l'on ne l'observera jamais directement. Seul un léger déficit du flux de neutrinos issu des centrales nucléaires suggère son existence. De toute façon, la faible quantité de cette matière noire tiède ne peut pas davantage expliquer l'énormité de la masse manquante. La matière noire est une solution au problème de la masse manquante, certes, mais cette solution est elle-même problématique : elle explique l'obscur par l'obscur, « *obscurium per obscurius* »...

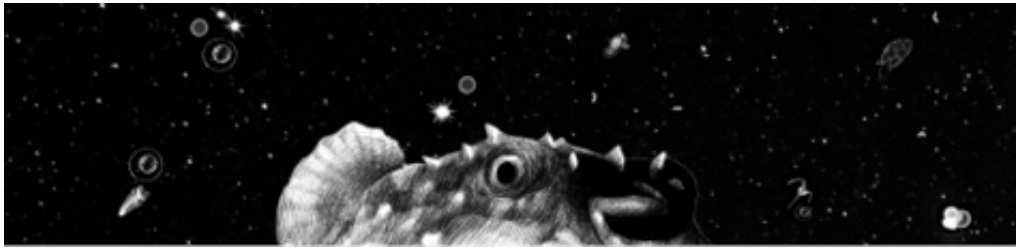
Au terme de cette rêverie sur la matière noire, l'idée noire des astrophysiciens s'est changée en une image noire qui rappelle étrangement les délires alchimiques. N'oublions pas que si l'œuvre au noir alchimique évoque l'image refoulée de la matière noire astrophysique, c'est parce qu'une idée scientifique a précisément pour fonction de refouler de telles images. On ne peut rapprocher les incertitudes scientifiques des songes alchimiques sans s'exposer aux protestations du scientifique et du « Philosophe » hermétique. Que la matière noire résiste pour l'instant aux efforts des physiciens ne signifie pas qu'il s'agisse d'une hypothèse fautive. S'il est certain que l'alchimie n'a rien à voir avec une science, la méditation sur ses symboles produit peut-être une forme de sagesse.

Reste que, du point de vue de l'épistémologue et du psychanalyste de la connaissance, la matière noire paraît une substantialisation hâtive et suspecte et que, s'il ne tenait qu'à lui, il vaudrait mieux persister à parler de la « masse manquante » pour garder à l'esprit qu'il s'agit d'un problème ouvert. Toutefois, la principale théorie concurrente, MOND, présente aussi des difficultés, et transformer les lois de la physique n'est pas une option à envisager à la légère.

Quant au point de vue spirituel de la quête de la matière noire, il ne faut pas oublier que l'alchimie n'était pas qu'un art de charlatans et de faiseurs d'or. C'était aussi un discours initiatique permettant aux Hommes, selon Jung, de *s'individuer* en accord avec les dispositions inconscientes de leur

psyché pour comprendre leur maturation à travers les âges de la vie. Comme le confiait Marguerite Yourcenar (1903-1987) à propos du titre de son magnifique roman, *L'Œuvre au noir* : « On discute encore si cette expression s'appliquait à d'audacieuses expériences sur la matière elle-même ou s'entendait symboliquement des épreuves de l'esprit le libérant des routines et des préjugés. » Voilà une belle formule : « Se libérer des routines et des préjugés. » Telle doit être la ligne de conduite de l'esprit quand il progresse à tâtons dans le noir.





ÉNERGIE NOIRE

Il était noir comme la nuit, comme le vide.

[...] *Il était comme un négatif.*

Joseph Brodsky, *Collines*

La cosmologie vise à construire une description cohérente de l'Univers observable, c'est-à-dire de l'ensemble des choses avec lesquelles nous avons interagi, essentiellement via la lumière. Cet univers observable est l'intérieur d'une sphère dont nous occupons le centre. Celle-ci a un rayon d'environ 45 milliards d'années-lumière et contient une centaine de milliards de galaxies. Pour décrire cet ensemble accessible à nos observations, la cosmologie en bâtit un modèle, c'est-à-dire une représentation idéalisée fondée sur la connaissance de lois physiques validées expérimentalement sur Terre, ici et maintenant, et sur nos observations du cosmos. Le modèle cosmologique contemporain est connu sous le nom très médiatique de « modèle à big bang ». Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a un siècle. La gravitation y est décrite de façon géométrique par un espace-temps courbe. Plus précisément, alors que le mouvement d'un objet en chute libre est expliqué par la force d'attraction gravitationnelle dans la théorie de Newton, il est interprété comme le trajet de plus court chemin dans un espace-temps courbe dans la théorie d'Einstein. La géométrie de l'espace-temps fixe la trajectoire de la matière et, en retour, le contenu matériel déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et contenu matériel sont intimement liés par les équations de la relativité générale. Ces équations fort complexes ne peuvent être résolues en pratique qu'au prix d'une double hypothèse : les propriétés géométriques et physiques de notre Univers sont, à un instant donné, les mêmes en tout point et dans toutes les directions autour de chaque point. Autrement dit, l'Univers est homogène et isotrope. Ce « principe copernicien », introduit en 1915 par Einstein, puis indépendamment par les astronomes russe Alexandre Friedmann (1888-1925, en 1922, et belge Georges Lemaître (1894-1966), en 1927, conduit à des modèles cosmologiques simples : à chaque instant

les propriétés géométriques de l'espace, sa courbure notamment, sont identiques en tout point et dans toute direction. La courbure peut cependant varier au cours du temps, ce qui confère à ces modèles un caractère dynamique inattendu : l'espace peut être en expansion. En 1917, Einstein travaillait à la construction du premier modèle cosmologique ayant pour cadre sa relativité générale. Il était persuadé que l'Univers était statique et éternel mais constatait que ses équations conduisent naturellement à des solutions dynamiques. Pour obtenir une solution en accord avec ses convictions philosophiques, il dut introduire dans ses équations un terme supplémentaire constant, le seul autorisé, nommé « constante cosmologique ».

Quelques années plus tard, en 1929, la dynamique de l'Univers aux grandes échelles de distance fut confirmée. L'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) observa que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était systématiquement décalé vers le rouge. Ce phénomène est dû à l'effet Doppler : la longueur d'onde d'un signal sonore ou électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. Edwin Hubble établit une relation de proportionnalité, la « loi de Hubble », entre la vitesse apparente de fuite et la distance des galaxies. Dans le cadre de la relativité générale, les observations de Hubble ont été interprétées comme résultant de l'expansion de l'Univers : c'est l'espace qui s'étire et donne l'impression que les galaxies s'éloignent les unes des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est nommé « paramètre de Hubble ». Il quantifie le taux d'expansion de l'Univers et a été déterminé avec une précision de l'ordre de 1 % : il vaut environ 21,3 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. En vertu du principe copernicien, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie obtiendrait les mêmes résultats ; en particulier, il mesurerait la même valeur pour le paramètre de Hubble. Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré ce paramètre dans le passé obtiendrait le même résultat aujourd'hui, car le paramètre de Hubble peut varier au cours du temps.

Einstein n'admettra la réalité de l'expansion de l'Univers comme conséquence de sa théorie qu'au début des années 1930, reniant du même coup sa constante cosmologique. Celle-ci perd alors sa raison d'être originelle et laisse place à des modèles d'univers dynamiques, tels que les

prévoit spontanément la relativité générale. Délaissée par son créateur, la constante cosmologique séduisit néanmoins d'autres astrophysiciens, car elle permettait de résoudre le problème de l'âge de l'Univers. À l'époque, les modèles dépourvus de constante cosmologique donnaient à l'Univers un âge d'environ 2 milliards d'années, alors que celui de la Terre déduit des mesures géochimiques est de 4,5 milliards d'années. Dans son étude systématique des solutions cosmologiques, Lemaître avait remarqué qu'une constante cosmologique pouvait momentanément « geler » l'expansion, permettant ainsi d'ajuster l'âge de l'Univers modèle de sorte à être cohérent avec les observations de l'époque. Dans les décennies suivantes, le débat sur la constante cosmologique se poursuit. Le problème des cosmologistes est de taille. L'âge de l'Univers est déterminé à partir des estimations du paramètre de Hubble et du contenu matériel de l'Univers observable. Malheureusement, la valeur mesurée du paramètre de Hubble et l'inventaire du contenu matériel évoluent au gré des observations, faisant ressurgir épisodiquement le problème de l'âge de l'Univers. Depuis, les cosmologistes se sont lancés dans un inventaire systématique visant à répertorier et à « peser » chacun des constituants de l'Univers, les valeurs les plus récentes provenant du croisement de grands catalogues de galaxies et des observations du fond diffus cosmologique, notamment par le satellite européen Planck.

Une étonnante observation

À la fin des années 1990, deux équipes, l'une dirigée par Saul Perlmutter (de l'Université de Berkeley, en Californie), et l'autre par Brian Schmidt et Adam Riess (respectivement à l'Université de Canberra en Australie, et à l'Université de Berkeley), ont entrepris de mesurer le rythme de l'expansion de l'Univers dans le passé. Pour cela, ils observèrent le flux lumineux de supernovæ de type Ia (SNIa) situées à plusieurs milliards d'années-lumière. Ces explosions d'étoiles sont extrêmement intéressantes, car leur luminosité maximale est reproductible. La mesure de leur flux lumineux apparent revient donc à mesurer la distance parcourue par les photons émis lors de l'explosion – distance qui dépend de la géométrie de l'Univers et donc de son contenu. Les observations de ces SNIa lointaines révélèrent que leur flux apparent était plus faible

qu'attendu dans un Univers exclusivement composé de matière. La distance parcourue par la lumière de ces supernovæ était donc plus importante que prévu : l'expansion de l'Univers semblait donc avoir accéléré. Ces travaux valurent à leurs auteurs de recevoir le prix Nobel de physique en 2011. Ce résultat étant inattendu, les chercheurs ont lancé de nouvelles études sur les SNIa lointaines dont le sondage *Supernova Legacy Survey* (SNLS). De 2003 à 2008, grâce au télescope Canada-France-Hawaii de 3,6 mètres de diamètre, SNLS a observé plusieurs centaines de SNIa extragalactiques, contre une cinquantaine dans les observations antérieures. L'effort est d'ampleur, car les SNIa sont rares : de l'ordre d'une explosion par siècle pour une galaxie spirale comme la nôtre. À l'issue du relevé, SNLS disposait d'environ 500 SNIa échantillonnant l'Univers sur une période couvrant 2 à 8 milliards d'années dans le passé. Les mesures montrent que le flux provenant des SNIa lointaines s'avère effectivement plus faible que celui attendu dans un Univers ne contenant que de la matière. Elles s'accordent avec l'hypothèse d'un Univers en expansion accélérée.

Pour les chercheurs, force est d'admettre l'existence d'une composante énergétique capable d'accélérer l'expansion et qui ne soit ni de la matière ni du rayonnement. Une telle composante peut être incluse dans les équations de la relativité générale d'Einstein sous la forme d'un terme supplémentaire du côté « contenu matériel » de l'égalité. C'est cette composante énergétique inconnue qui est appelée « énergie noire ». En fait, le terme mathématique qui lui correspond avait déjà été introduit par Einstein dans ses équations pour qu'elles aient des solutions statiques, privilégiées par le grand physicien. Il était alors désigné comme étant la « constante cosmologique » et apparaissait du côté « géométrie » de ses équations, et s'interprétait comme une propriété de l'espace-temps. L'ironie est qu'il fut justement abandonné après la découverte de l'expansion de l'Univers par Hubble, alors que l'accélération de celle-ci impose de le réintroduire. Il suffit d'ajuster sa valeur pour rendre compte de l'accélération de l'expansion.

Pléthore d'explications

Que représente physiquement l'énergie noire ? Sa présence dans les

équations d'Einstein peut signifier l'intervention d'un nouvel acteur physique dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, la densité de l'énergie noire est constante au cours du temps, tandis que celle de la matière ordinaire diminue à cause de la dilution due à l'expansion de l'Univers. La densité d'énergie noire ne variant pas et le volume d'Univers étant dilaté par l'expansion cosmique, il faut qu'elle soit créée en permanence. Autre propriété étrange : contrairement à la matière ordinaire, sa pression est négative, exactement opposée à sa densité d'énergie : elle accélère l'expansion au lieu de la ralentir.

La densité de l'énergie noire est estimée grâce aux observations cosmologiques. Elle est très faible : pour alimenter une ampoule de 100 watts pendant 10 secondes, il faudrait collecter l'énergie contenue dans un volume de 10 kilomètres cubes ! Elle représente cependant la majorité du contenu de l'Univers : sa densité représente environ 68 % du contenu de l'Univers, contre seulement 32 % pour la matière (27 % de matière noire et 5 % de matière ordinaire). Au final, c'est 95 % du contenu de l'Univers qui se présente sous une forme inconnue des théories physiques actuelles. Le modèle cosmologique standard donne une excellente description de l'Univers observable. Cependant, comme physicien, on peut rester sur sa faim quant à la description des entités censées rendre compte de ces observations, voire trouver ce modèle discutable.

À partir de l'inférence de ces propriétés, les physiciens ont imaginé la nature possible de l'énergie noire. Une première possibilité émerge dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les particules et leurs interactions en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Une particule est alors décrite comme l'excitation élémentaire, un quantum, du champ qui lui est associé. Le vide se définit de la même manière comme étant l'état des champs dont l'énergie est minimale, pas forcément nulle. Le vide n'est plus ce qui reste quand on a enlevé la matière et la lumière, mais une configuration particulière de l'état des champs, celle de plus basse énergie, à zéro particule. En vertu de de la relation d'indétermination due au physicien allemand Werner Heisenberg (1901-1976), cet état particulier peut, comme les autres, fluctuer. De ces

fluctuations résulte une énergie dite de point zéro, ou simplement énergie du vide.

Dans cette vision moderne, le vide, c'est-à-dire l'état de plus basse énergie des champs quantiques, possède deux contributions : l'énergie de point zéro et une énergie potentielle qui résulte de l'interaction des champs avec eux-mêmes. Cette seconde contribution dépend de la température et peut donc varier au cours du temps simplement parce que l'Univers se dilue et se refroidit sous l'effet de son expansion. Fait intéressant, le vide doit apparaître de la même façon à tout observateur en mouvement rectiligne uniforme. Cette symétrie, résultant du principe de relativité d'Einstein, implique que lui est associée une pression négative et que sa densité d'énergie est constante. Ainsi, l'énergie du vide se comporte exactement comme l'énergie noire. L'Univers pourrait donc être en expansion accélérée à cause de la contribution de l'énergie du vide à sa densité d'énergie. Énergie du vide et énergie noire ne seraient qu'une seule et même entité. Malheureusement, la valeur calculée pour la densité d'énergie du vide est 120 ordres de grandeur supérieure à celle mesurée pour l'énergie noire ! Jamais la physique n'a vu un si grand écart entre prédiction et observation.

Le problème de l'énergie du vide a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, à une époque où l'on penchait pour une constante cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc elle aussi être nulle, en contradiction avec l'estimation évoquée précédemment. Une façon d'y remédier est d'introduire une « supersymétrie » dans la théorie quantique des champs. Celle-ci stipule que chaque particule élémentaire du modèle standard, comme le quark ou l'électron, a un « superpartenaire ». Ces particules appariées ont la même masse, mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie du vide serait nulle sans avoir à faire un ajustement artificiel. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie est pertinente, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée qu'attendue. Cependant, même dans cette situation, la densité de l'énergie du vide reste encore 60 ordres de grandeur plus grande que les déterminations cosmologiques

de l'énergie noire.

D'autres physiciens ont imaginé des contenus matériels alternatifs qui produiraient une expansion cosmique accélérée que l'on désigne sous le terme générique de « quintessence ». Par exemple, l'existence d'un champ scalaire (c'est-à-dire dont le spin est nul) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique. Les modèles à quintessence sont compatibles avec les observations. Toutefois, l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de l'énergie noire, car elle n'aurait pas le même paramètre d'état. Ce paramètre, que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision, est égal au rapport entre la densité d'énergie et la pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport sans dimension). Il est égal à -1 pour l'énergie noire et diffère en général de cette valeur pour un modèle de quintessence. La densité d'énergie associée n'est alors plus constante et varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes espèrent mettre en évidence.

Les modèles précédents supposent que la relativité générale décrit correctement la gravité aux échelles cosmologiques. Mais il n'en va peut-être pas ainsi. Les physiciens ont plusieurs fois rencontré des situations de dissonance entre des observations gravitationnelles et les acteurs physiques censés en être la cause. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets ou à la modification de la théorie de la gravitation. Ainsi la découverte de la planète Neptune grâce aux calculs de l'astronome Urbain Le Verrier, qui avait supposé sa présence pour expliquer des anomalies dans la trajectoire d'Uranus. Nous l'avons déjà évoqué au chapitre consacré à la matière noire. Le Verrier tenta de renouveler son exploit pour expliquer l'avance séculaire du périhélie de Mercure. Ce fut un échec. Cette anomalie orbitale fut expliquée bien après sa mort par une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue : faut-il sauver les lois de la gravitation en introduisant de nouveaux acteurs physiques sombres (matière noire et énergie noire) ? Ou doit-on plutôt tenter de modifier les lois de la gravitation pour rendre compte des observations ?

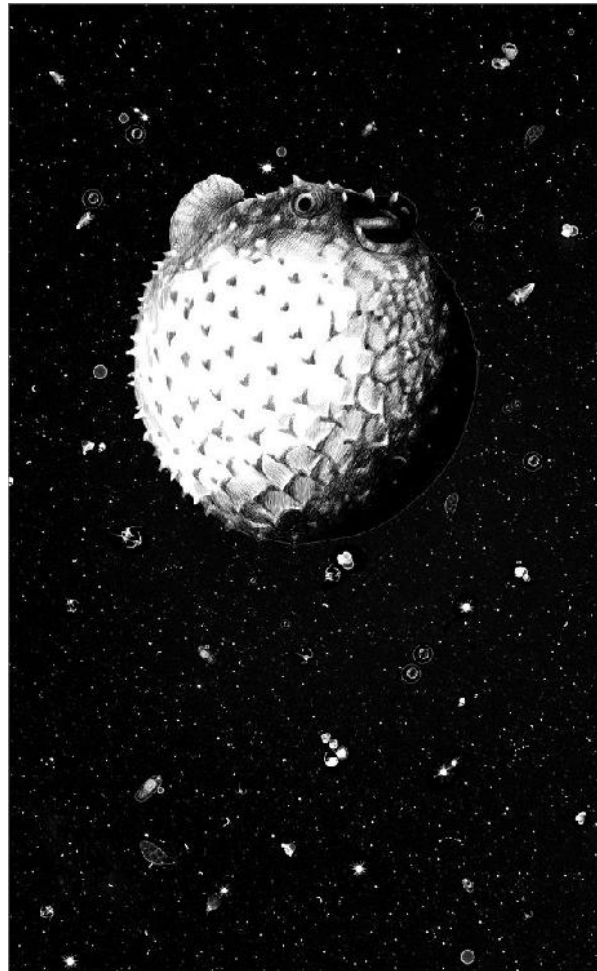
Une façon d'aller dans le sens d'une modification législative consiste à supposer que notre espace-temps à quatre dimensions possède une dimension d'espace supplémentaire, une cinquième dimension s'étendant

jusqu'à l'infini. Seul le graviton – particule qui véhicule l'interaction gravitationnelle – pourrait se propager dans cette dimension supplémentaire. Comme les autres particules, telles que le photon, ne peuvent y accéder, cette dimension supplémentaire échappe à nos mesures usuelles, mais pourrait se manifester au travers de son effet sur la gravitation. Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que les gravitons s'échappent est faible et les équations de la relativité générale décrivent correctement la gravitation. À plus grande échelle, un certain nombre de gravitons s'échappent dans la cinquième dimension et les équations de la relativité générale ne sont plus adaptées. L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale y est valide, donne donc l'impression que le rythme de l'expansion de l'Univers augmente. Ce modèle a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais il présente néanmoins plusieurs difficultés théoriques et expérimentales. Soulignons qu'il est très difficile de modifier la relativité générale à grande distance tout en restant en accord avec les tests précis de cette théorie allant des échelles ordinaires à celle du Système solaire.

Il a aussi été envisagé de renoncer au principe cosmologique. Si les observations du rayonnement diffus cosmologique tendent à prouver que l'Univers est pratiquement isotrope, l'homogénéité à grande échelle reste sujette à discussion. L'accélération de l'expansion, déduite de celle du mouvement des supernovæ, pourrait découler d'inhomogénéités locales. Il faudrait alors refonder la cosmologie non plus sur les espaces de Friedmann-Lemaître, mais sur ceux de Tolman-Bondi dont la principale caractéristique est d'avoir une courbure qui varie dans l'espace autour d'un centre qui occupe une position particulière dans l'Univers. Il s'agit de scénarios qui ne sont pas encore complètement exploités et demeurent parcellaires.

Ce recensement non exhaustif des façons de rendre compte de l'accélération de l'expansion de l'Univers atteste la difficulté que présente l'élaboration d'une théorie physique de ce phénomène. Pour l'instant, aucune des approches mentionnées ne fait l'unanimité même si l'énergie noire est l'hypothèse la mieux admise par les astrophysiciens. La question de l'interprétation de l'accélération de l'Univers a engendré bien des travaux qui ont surtout eu le mérite de pousser à mieux comprendre le

modèle cosmologique standard. Les données à venir, notamment celles des grands programmes d'observation tels que celui prévu pour le satellite européen Euclid, devraient permettre d'invalider un certain nombre d'approches et de mieux comprendre le mystère de l'énergie noire et les propriétés de la gravitation à très grande échelle. À ce jour, la cause de l'accélération de l'expansion de l'Univers reste une question ouverte.





LES MYSTÈRES DE L'ÉNERGIE NOIRE

Avec ses spéculations obscures et incertaines sur la nature intime et les causes des choses, le philosophe est pareil à « un aveugle cherchant dans une salle obscure un chat noir qui n'y est pas ».

William James, *Quelques problèmes de philosophie*

Un rêveur qui étend sa rêverie aux dimensions de l'Univers est naturellement porté à la sérénité, estime Bachelard : « L'axe normal de la rêverie cosmique est celui le long duquel l'univers sensible est transformé en un univers de beauté » (*La Poétique de la rêverie*, 1960, p. 157). Un tel rêve d'équilibre harmonieux et d'éternelle stabilité inspira-t-il à Einstein sa constante cosmologique ? N'était-elle pas censée contrebalancer l'effet de la gravitation et empêcher que l'Univers ne finisse par s'effondrer ? En ajoutant un terme à la géométrie de l'Univers, Einstein pensait avoir garanti un état homogène et statique – sa « tranquillité », aurait dit Bachelard : « La *Tranquillité* est l'être même et du Monde et de son Rêveur » (*idem*, p. 149). Avec sa constante, Einstein avait fixé le point d'équilibre fragile entre deux menaces symétriques guettant l'Univers : la rétractation et l'expansion infinie. Mais le rêve s'est brisé. Les observations des astronomes ont fait pencher la balance dans le sens de l'expansion, puis, de façon plus stupéfiante, ont fait basculer celle-ci vers une inattendue accélération. Et la couleur de ce mystère, c'est évidemment la noirceur de l'énergie noire.

Mon équation, disait Einstein, ressemble à « un édifice dont une aile serait bâtie en marbre fin (le premier membre de l'équation) et l'autre serait bâtie en bois de qualité inférieure (le second membre de l'équation) » (*Physique et Réalité*, 1936, p. 370). Le marbre désigne la géométrie, la courbure de l'espace-temps, tandis que le bois de piètre qualité symbolise le contenu matériel de l'Univers. Or, en grec, « bois » se dit *hylé*, mot qui désigne aussi la matière en général. Le bois dont parle Einstein évoque donc ce que des philosophes tardifs de l'Académie

appelaient la « matière prime », c'est-à-dire le substrat indifférencié de toute chose, une matière informe, confuse, obscure, sans aucune qualité propre.

Pendant des décennies, les scientifiques sont restés fidèles au marbre impassible ; ils se sont contentés de la constante cosmologique et de sa non-substantialité géométrique. Puis, un jour, ou peut-être une nuit, ils en eurent assez de déformer la grille spatio-temporelle et ils franchirent le Rubicon algébrique. S'emparant de la *hylé* comme d'un matériau malléable à leur guise, ils rouvrirent la boîte de Pandore d'une ontologie foisonnante. Ainsi furent libérées les puissances d'un imaginaire fantastique et inquiétant, celui de la dernière et de la plus puissante image noire : les Ténèbres.

Il aura suffi d'une manipulation mathématique anodine – changer le signe d'un terme algébrique en le faisant passer de l'autre côté de l'égalité – pour que sa signification change du tout au tout. C'est une expérience banale en mathématique que de progresser par la manipulation aveugle des termes d'une équation. Dans un entretien donné en 1996, Andrew Wiles (1953) explique que la recherche en mathématique lui évoque l'exploration à tâtons dans une pièce obscure : « On entre dans une pièce et on est dans le noir, le noir complet, on trébuche en se cognant aux meubles et puis, peu à peu, vous apprenez où ils se trouvent et, finalement, au bout de six mois environ, vous trouvez l'interrupteur. » Un autre grand mathématicien la compare à l'exploration d'un paysage recouvert d'un voile de ténèbres : « Cette période noire qui marque les premiers pas d'un mathématicien en territoire inconnu, c'est la première phase du cycle habituel. Après le noir vient une petite, petite lueur fragile, qui nous fait penser que quelque chose se prépare [...] » (Cédric Villani, *Théorème vivant*, p. 264). Le mathématicien sait fort bien apprivoiser l'obscurité. Il n'y pressent un problème que si son séjour dans le noir se prolonge trop longtemps et lui fait redouter d'avoir manqué un embranchement dans la nuit ou de s'être aventuré sur un chemin qui ne débouche sur rien. Il en va autrement en physique, quand il ne s'agit plus de pures mathématiques, car, même dans la physique la plus théorique, la manipulation des signes a des conséquences métaphysiques incommensurables. Ainsi, le transfert d'un membre de l'équation vers l'autre métamorphose la constante cosmologique en une mystérieuse énergie noire et *vice versa*.

« Énergie noire » est la traduction la plus courante de l'expression *dark energy*, introduite par Dragan Huterer et Michael Turner, en 1998, pour désigner la cause possible de l'accélération de l'expansion de l'Univers. En français, l'adjectif « noir » accolé à « énergie » prend un sens qui constitue une innovation par rapport aux cas que nous avons déjà étudiés. Davantage que la difficulté de la détection, il signale l'ignorance de la nature du phénomène en question : avec l'énergie noire, on se trouve vraiment plongé dans le noir. À tel point que, pour en définir la nature, on se réfère à ce à quoi cette « énergie » s'oppose : elle se manifeste par une répulsion qui est l'inverse de la gravitation. « Noir » prend donc une signification inédite, à la fois métaphorique – il désigne l'absence de connaissance – et spéculative – évoquant l'obscurité d'une définition purement négative. Les philosophes et les théologiens connaissent cette tournure qui consiste à définir une entité métaphysique en énumérant ce qu'elle n'est pas : il s'agit de la rhétorique de l'ontologie négative. Cette procédure a toujours été considérée comme l'ultime recours avant d'admettre que la raison a atteint ses limites et se heurte à l'ineffable, s'il existe, ou à l'illusion.

La noirceur de l'énergie est donc mystérieuse. Elle est la marque d'un renversement des valeurs : l'énergie noire est avant tout ce qui s'oppose à la gravité. Sa négativité la rend, en un sens, analogue à la noirceur des messes noires, ces rites sataniques où les symboles sacrés étaient censés être profanés et renversés afin d'invoquer le Malin. Cette sombre association, l'homme de raison la balaye d'un revers de la main : l'énergie noire n'a point de rapport avec les images maléfiques attachées à la sorcellerie... En est-on sûr ?

Leçon de ténèbres

L'énergie dont il est question exerce tout de même une emprise redoutable : elle prend peu à peu le dessus sur les autres forces cosmiques et condamne la matière à la dilution dans un Univers étiré indéfiniment. À long terme, les galaxies seront si éloignées les unes des autres qu'elles seront comme des îles solitaires dérivant au milieu d'un océan ténébreux sans limites. Il ne sera plus possible de savoir que d'autres mondes

existent, repoussés qu'ils sont tous au-delà de l'horizon. L'idée même d'Univers aura disparu ou ne sera guère plus qu'un mythe. Voilà les sombres rêveries qui assaillent celui qui se laisse entraîner dans le sillage imaginaire de l'énergie noire. Il plonge l'Univers tout entier dans les ténèbres de la fin des temps.

Les ténèbres symbolisent la nuit cosmique, la totalité indifférenciée et terrifiante. Les spécialistes des symboles, comme Mircea Eliade (1907-1986), affirment qu'elles ne sont néanmoins pas strictement négatives : elles recèlent des latences, des virtualités, des semences fécondes. Dans la Bible, Dieu est dit ainsi avoir créé le monde à partir des ténèbres primordiales, dans la solitude et le chaos, dans le *tohu-bohu*. Mais, ces ténèbres-là étaient précisément celles qui *précèdent* le monde. L'énergie noire représente, au contraire, un moteur obscur dont l'influence était négligeable à l'origine et qui croît au cours du temps. Elles ne renvoient pas à l'imaginaire des ténèbres originelles, mais à celui de ténèbres finales. Dans sa belle étude sur « Le symbolisme des ténèbres dans les religions archaïques » (1960), Eliade souligne cette polarité : les ténèbres symbolisent ce qui précède l'existence, le néant fécond – elles s'apparentent alors au chaos primordial, là où aucune forme n'est encore discernable, cette phase pré-individuelle de l'être dont aucune structure ne se dégage encore –, mais elles symbolisent aussi ce qui suit l'annihilation du monde, ce qui demeure après la disparition des individus, lorsqu'ils ont réintégré la vacuité stérile et indistincte du néant. Les ténèbres inspirées de l'énergie noire se situent de ce côté ultime et négatif. Si elles ne sont pas « rien », elles symbolisent tout de même l'impossibilité de l'existence, la fin du monde.

Qui va tuer l'Univers ?

Comme Bachelard, Eliade rapproche la fluence des Ténèbres de la fluidité des eaux : le monde n'a guère plus de consistance qu'une goutte d'eau isolée, puis s'évapore. Des mythes décrivent, d'ailleurs, la création du monde comme l'émergence d'une île faite d'eau et destinée à réintégrer l'élément aquatique comme une future Atlantide. Les cosmogonies asiatiques, océaniennes et amérindiennes figurent le passage des ténèbres à la lumière par des masques du type *t'ao-t'ieh* (mot chinois

qui signifie « ogre glouton ») : ils représentent un monstre noir qui laisse échapper de sa gueule le soleil ou un enfant lumineux. Or, ce cauchemar est voué à revenir nous chercher à la fin de la vie. Les religions archaïques ont un nom pour ce monstre noir qui viendra clore la boucle de notre existence. Mais quel nom donner à celui qui, à la fin des fins, refermera sa gueule obscure sur le monde entier ? D'une certaine manière, les cosmologistes se sont lancés à la conquête des Ténèbres parce qu'ils avaient à cœur d'élucider cette énigme. Il ne leur suffisait plus de constater que l'Univers se meurt. Ils veulent savoir *qui l'a tué*. Leur quête de l'énergie noire évoque pour cette raison la trame des romans noirs.

L'expression « roman noir » désigne deux genres littéraires distincts : le roman gothique, apparu à la fin du XVIII^e siècle en Angleterre (Horace Walpole, Mary Shelley, etc.), où surviennent d'effrayantes créatures, et le roman policier américain d'après la Première Guerre mondiale (Dashiell Hammett, Raymond Chandler, etc.), qui narre les enquêtes en eaux troubles de « durs à cuire » (*hard boiled*). Il se trouve que la quête de l'énergie noire suggère un rapprochement avec les deux formes de noirceur : fantastique et criminelle.

La recherche de la cause physique de l'accélération de l'expansion évoque, parfois, un récit trouble hanté par d'innommables monstruosité. La profusion des hypothèses ouvre la porte à une ontologie étrange : « l'énergie fantôme », qu'invoquent certains théoriciens, aurait la curieuse propriété de voir sa densité augmenter au cours de l'expansion de l'Univers, comme les ombres se font plus épaisses à mesure que progresse l'action des récits d'horreur ; la « quintessence » est nommée ainsi par d'autres astrophysiciens parce qu'elle s'oppose aux quatre formes connues de la matière-énergie (la matière baryonique, les photons, les neutrinos et la matière noire) ; elle se nomme donc par analogie avec la façon dont Empédocle et les anciens alchimistes considéraient l'éther comme un cinquième élément différent du feu, de l'eau, de l'air et de la terre ; mais, si les physiciens avaient eu plus de révérence pour la cosmogonie d'Empédocle, ils auraient dû l'appeler la « Haine », car c'est ainsi que se nomme la force qui sépare les choses : « chacune emportée séparément par la répulsion que provoque la Haine » (*Manuscrit de Strasbourg*) ; l'énergie du vide quantique, quand elle est invoquée pour expliquer l'énergie noire, établit un lien entre le microcosme et le macrocosme au prix d'une

hybridation osée entre la relativité générale et la mécanique quantique ; dans une autre veine, l'énergie noire évoquera « le côté obscur de la Force ». Il y a bien d'autres hypothèses plus « monstrueuses » les unes que les autres, mais aucune qui soit satisfaisante. En dépit de nombreuses pistes, la recherche sur la nature de l'énergie noire est désorientée et frustrante.

À ce titre, il faut rappeler que le roman noir américain, celui de la « série noire », diffère aussi du roman à énigme classique en ce que rien n'y garantit une fin heureuse. Pire, rien n'y garantit que l'énigme soit finalement résolue. Parfois, le héros perd ses illusions, la filature échoue et il laisse échapper le criminel... Le suspense est à son comble. Notre rêverie sur l'énergie noire risque de virer à la traque d'un être insaisissable. Toutefois, il ne faut pas se décourager si vite. Dans l'imaginaire, notre enquête n'a guère à se préoccuper de l'inexistence des créatures qui se cachent dans l'obscurité. Il nous suffit d'y croire pour qu'elles soient là. Il s'agit donc de trouver un être imaginaire qui aurait le profil du coupable recherché : une créature noire, puissante, maléfique, responsable de l'écartèlement du monde et capable d'anéantir jusqu'au souvenir de la lumière.

La mythologie nordique est connue pour s'achever en un gigantesque combat où la totalité ou presque des dieux, des géants et des hommes trouveront la mort : *Ragnarök*. Cet affrontement est précédé par trois hivers sans soleil. La première mention de cette fin du monde se trouve dans l'*Edda poétique* (XIII^e siècle) : le loup Fenrir et ses fils, Hati et Skoll, dévorent respectivement les astres, le Soleil et la Lune, privant le monde de toute lumière. Fenrir est donc le suspect idéal. Quand il fut recueilli par les Ases, il n'était encore qu'un petit louveteau, puis il se mit à *grandir démesurément*. Quand les Ases apprirent qu'il devait causer leur perte, ils l'entravèrent avec un lien magique fabriqué par les elfes sombres à l'aide de matières qui n'existent plus (bruits de pas de chat, barbe de femme, racines de montagne, haleine de poisson, etc.). Dupé par ses maîtres, il fut ligoté jusqu'à la fin des temps, et l'on comprend qu'il ait accumulé un effroyable désir de vengeance. Fenrir, le meurtrier d'Odin, le dévoreur d'étoiles, est le coupable idéal.

Pourtant, quelques détails clochent... D'abord, Fenrir *n'est pas* noir, c'est un loup gris. Si le noir est l'apanage d'un personnage du panthéon

nordique, c'est de Nótt, fille du géant Norvi, qui est la déesse de la Nuit. Elle parcourt le ciel sur un char tiré par un cheval noir, et précède son fils Dag, dieu du Jour, recouvrant la terre de rosée. Elle n'a rien d'une criminelle. Car la noirceur n'est pas associée au mal chez les Nordiques : comme on l'a déjà mentionné, les deux corbeaux d'Odin sont noirs. Ensuite, le témoignage qui accable Fenrir, l'*Edda poétique*, n'est pas vraiment digne de foi. Il a été rédigé tardivement, quand le polythéisme perdait déjà du terrain face au christianisme, par un prêtre islandais que Régis Boyer soupçonne de partialité : n'aurait-il pas fait périr tous les dieux païens pour signifier que l'âge des anciennes croyances était révolu ? Ne se serait-il pas inspiré de l'Apocalypse de saint Jean ? Tout cela laisse à penser que les crimes de Fenrir ont pu être grandement exagérés.

Autrement dit, il s'agirait d'une dénonciation calomnieuse. Au bénéfice du doute, il faut se résoudre à acquitter Fenrir.

Quels sont les autres suspects ? Dans le panthéon égyptien, le serpent géant Apophis est noir et personnifie le chaos qui agresse le Soleil à la fin du jour. Il serait prêt à avouer les crimes dont on l'accuse, car il souhaite vivement dévorer le Soleil. Mais tous les témoignages le décrivent se faisant battre à plate couture par Rê, le dieu du Soleil, secondé par Seth, et même finissant découpé en morceaux par la déesse féline Bastet. Bref, il peut fanfaronner tant qu'il veut, il reçoit à chaque fois une raclée, ne prenant brièvement le dessus que lors des éclipses de Soleil. La piste égyptienne ne s'arrête pas là, cependant, car on pourrait se demander si Apophis ne sert pas à éloigner les soupçons d'un autre dieu bien plus puissant. Le vrai coupable, ne serait-ce pas Seth ? Il a une gueule *noire* ; on le dit « grand de force » ;

il est marié à la déesse de la Mort Nephtys ; il a assassiné son frère, Osiris, dont il a dispersé les membres aux quatre coins du monde ; il a épousé la sauvage Anat et la sidérale Astarté ; il aurait même violé son neveu Horus, et, selon d'autres témoignages, Apophis ne serait pas son ennemi, mais son associé ! Seth le comploteur pourrait très bien faire croire qu'il s'oppose aux forces des Ténèbres en repoussant les assauts d'Apophis aux côtés de Rê, alors qu'il prépare en secret la victoire finale des Ténèbres sur la lumière du Soleil.

Que répond Seth à cette accusation ? D'abord, qu'il n'a rien d'une

créature noire : on l'appelle « le dieu rouge ». Ensuite, qu'il dispose de nombreux témoignages de moralité : pour la lignée de Ramsès, il est une force brutale mais foncièrement positive. Enfin, il se dit victime d'un délit de faciès : il est le dieu des étrangers et des rouquins, de l'aridité du désert et des déshérités, du tonnerre et des éclairs, de tout ce qui rompt l'ordre établi et qui est persécuté. Il est le dieu bisexuel, le dieu à tête de chacal, l'incompris. Bref, il brouille les pistes et, faute de preuves, il faut aussi se résoudre à l'acquitter.

On pourrait convoquer Nyx, la noire déesse de la Nuit des Grecs, qui réside sur le lieu du crime, puisqu'elle habite « aux confins de l'Orient », à la fin du monde. Mais elle a un alibi (elle est constamment en voyage) et n'a pas la force de s'en prendre aux puissances astrales. En fait, aucune créature de la mythologie ne fait le poids (ou plutôt le contrepoids puisqu'il s'agit d'incarner l'anti-gravité). Nous aurons beau chercher, nous n'y trouverons pas d'image assez puissante pour personnifier les Ténèbres finales.

Le vertige des hypostases

Alors revenons à notre point de départ : et si la personnification de l'énergie était une fausse piste ? Si c'était l'anonyme constante cosmologique la vraie responsable ? Une fois modifiée sa valeur, elle précipite l'Univers vers sa perte. Ce qui a écarté nos soupçons, c'est qu'elle paraît trop abstraite, sans corrélat matériel. Tant qu'elle reste sagement du côté géométrique de l'équation d'Einstein, la source de la force répulsive est immanente à la structure même de l'Univers : elle signifie qu'il en est ainsi et pas autrement sans qu'on en sache la raison. C'est pourquoi elle laisse peu de prises aux projections imaginaires. Il est difficile de fantasmer sur ce qui se tient en dehors de l'horizon de l'Univers.

À notre connaissance, il n'y a qu'une seule métaphysique qui s'y soit risquée. Il s'agit de la métaphysique néoplatonicienne. Vénéral, sophistiquée, spéculative, elle a forgé ses concepts pour dompter une puissance d'expansion infinie et, comme Einstein, pour fixer les limites d'un Cosmos éternel. Elle convient tout de même comme nouveau point de départ à nos rêveries cosmologiques à la poursuite de l'énergie noire

parce qu'elle s'accompagne du récit de « l'émanation ».

À condition d'en pervertir certaines lois, l'émanation peut fournir une narration imaginaire capable de suivre la cosmologie dans ses développements ou plutôt de remonter à ses principes. Néanmoins, vous devez être prévenu : l'ascension néoplatonicienne vers le principe premier est difficile et le récit de l'émanation est aussi abstrait que les modèles scientifiques.

La métaphysique néoplatonicienne a été élaborée, entre autres, par Plotin (205-270), Proclus (412-485) et Damascius (460-537). Ces philosophes raisonnent ainsi : pour expliquer quelque chose, c'est-à-dire pour justifier le fait qu'une chose est telle qu'elle est, il faut en trouver le principe. Or, ce principe ne peut être trouvé qu'au sein d'un ordre de réalité plus élevé. Cette méthode ascendante produit la hiérarchie des « hypostases », qui sont chacune le principe des réalités de rang inférieur. Dans le langage ordinaire, le verbe « hypostasier » signifie substantiver une action (par exemple, quand on dit « le boire et le manger »), mais il a pris une connotation péjorative dans le langage philosophique, notamment depuis que Kant a souligné le fait qu'il est illégitime d'hypostasier au sens de « poser l'existence d'une chose simplement parce qu'on en a logiquement besoin pour prouver l'existence d'une autre chose qui, elle, existe ». Selon Kant, nous nous abusons chaque fois que nous passons de la nécessité de l'hypothèse à la certitude de l'hypostase. Par exemple, l'énergie noire est *hypostasiée* quand certains astrophysiciens la présentent comme une réalité observée, alors qu'il s'agit d'une hypothèse pour rendre raison de l'accélération de l'expansion.

Si la notion d'hypostase éveille aujourd'hui quelque méfiance épistémologique, l'antique métaphysique néoplatonicienne assumait, elle, sans réserve sa confiance dans la logique et le finalisme qui consistent à poser l'existence de quelque chose pour expliquer autre chose. Ainsi, pour rendre raison de la forme des êtres naturels, il faut supposer qu'ils ont une « âme », un principe qui les anime. Par exemple, la trajectoire circulaire des astres obéit au désir de se conformer à leur *daimon* immobile (car le cercle est le mouvement le plus proche du repos). L'Âme, c'est-à-dire l'ensemble des âmes, est donc la première hypostase que l'on découvre au cours de notre ascension. Et, parmi les âmes, la plus haute et la plus importante est, bien sûr, « l'Âme du monde », qui rythme la respiration de

l'Univers entier. Toutefois, on ne comprendrait pas comment les âmes agissent dans le temps et l'espace, s'il n'existait pas une hypostase plus élevée, éternelle et purement intelligible, qui assure l'unité de leur identité à travers les variations temporelles. Cette seconde hypostase est l'Être (ou *Logos*) qui est au-delà du temps et de l'espace. Elle rassemble tous les êtres intelligibles, dont les plus primordiaux ne sont pas les dieux mais les nombres. Et parmi ceux-ci, le plus fondamental est « l'un », car il confère l'unité à tous les nombres et à tous les autres êtres. (D'un point de vue technique, il y a deux « uns » : l'unité, qui par sommation successive engendre les autres nombres, et l'un véritablement premier, qui confère leur propre unité à ces nombres, c'est-à-dire qui fait que, par exemple, cinq fois l'unité est un nombre, le 5.)

Cela vous semble-t-il déjà assez complexe, trop abstrait et même un peu obscur ? Le raisonnement de Plotin ne s'arrête pas là : tous les êtres forment l'hypostase de l'Être, mais d'où l'Être lui-même tient-il son unité ? Certes, pas du « un » qui vient d'être évoqué, puisque ce n'est qu'un être. Même s'il est *primus inter pares*, l'un ne saurait s'extraire de l'Être pour s'y appliquer dans sa totalité. Il y a dans la pensée des néoplatoniciens un respect de la rigueur logique, des définitions et de la distinction des niveaux qui évoque les précautions destinées à éviter les paradoxes au sein de la théorie des ensembles : l'un ne saurait être le principe de l'unité de ce dont il est une partie, tout comme il n'y a pas en mathématique d'« ensemble de tous les ensembles ». Si l'être ne peut se donner à lui-même son unité, c'est donc qu'il y a une hypostase primordiale, antérieure à l'être, une hypostase à l'origine de tous les êtres et cause de leur unité. De ce principe premier, on ne saurait même dire qu'il *est* (ou n'est pas), car ce serait se méprendre sur sa nature et s'exprimer comme s'il était un être. L'hypostase suprême, Plotin l'appelle « l'Un » parce qu'elle confère l'unité à l'Être et que ne subsiste en elle aucune trace de la multiplicité des êtres ou des âmes.

Désormais, l'ascension étant achevée, le récit de l'émanation peut commencer : de l'Un émane l'Être. Puis (mais il ne s'agit pas d'une succession temporelle, puisque le temps n'existe pas encore), l'Être est sujet à une « procession » interne, à savoir l'engendrement des nombres successifs, puis de tous les êtres, jusqu'au point où il engendre l'idée de l'âme et déborde de lui-même pour engendrer une réalité plongée dans le

temps : l'Âme. Celle-ci produit à son tour l'ensemble des âmes, qui animent dans le temps et l'espace la Nature, qui anime la matière, mais n'est elle-même plus principe de rien du tout. Si bien que les choses matérielles, celles qui nous entourent, sont les réalités dernières, les plus basses, avant de se heurter à la limite inférieure, à savoir la « matière prime », une matière informe qui n'a aucune qualité propre, car elle n'est que ce presque rien, le réceptacle passif des formes.

La cohérence logique du récit de l'émanation est forte ; elle exclut d'ailleurs toute intervention arbitraire d'un dieu créateur. L'Un est une hypostase supérieure à n'importe quelle divinité : il est l'origine de tous les dieux que l'homme pourra révéler (ils ne sont jamais que des êtres). L'imaginaire de la constante cosmologique, indifférent aux théodicées et aux cosmogonies, pourrait bien être néoplatonicien. Mais ce serait un néoplatonisme renversé, pervers, un néoplatonisme *noir*... Car les ténèbres sont du côté de la matière informe et non de l'Un, qui est métaphoriquement plus proche de l'impalpable beauté de la lumière que de toute autre chose sensible. Plotin se refuserait à hypostasier une force capable de briser l'harmonie éternelle du Cosmos. Il se rangerait résolument aux côtés d'Einstein pour établir un bel Univers statique et éternel. La force répulsive de l'énergie noire renverse la dynamique de l'émanation ; elle la dévergonde ; elle transgresse les limites. Le récit plotinien de l'émanation ne résiste pas au basculement de la constante cosmologique du côté de l'expansion accélérée.

La métaphysique néoplatonicienne possède cependant encore des ressources. Elle est remontée plus haut, toujours plus haut, à un principe premier qui est au-delà même de toute limitation. Dans les *Éléments de théologie* de Proclus, l'hypostase suprême prend le nom de « puissance infinie », *apeiron dynamis*. Or, *apeiron* signifie « illimité ». Une illimitation qui rappelle la puissance de dilatation de l'énergie noire. Plus troublant encore, Proclus appelle aussi *apeiron dynamis* la « matière prime », ce qui n'a aucune structure ni unité. Il y a donc deux manières d'être « infinie » pour la puissance : soit en tant que surpuissance, générosité absolue dont émanent les êtres, soit au contraire comme passivité absolue, par la privation de toute qualité. Le système est en tension entre la puissance infinie d'en haut et la puissance infinie d'en bas. Certes, l'éternité de l'Univers n'est pas remise en cause, mais ne trouve-t-

on pas dans cette polarité une image qui convient à l'énergie noire ? Dans la cosmologie actuelle, on passe d'une puissance infinie à l'autre, du « big bang » à l'Univers réduit en poussière. L'image de l'énergie noire, ce serait l'émanation inversée, devenue dégénérescence.

Si l'on se risque à de telles pensées, on risque de ne plus s'arrêter. Car le grand écart de la puissance infinie n'est pas la dernière image noire du néoplatonisme. La forme ultime du questionnement fut atteinte avec Damascius. Lui seul osa poser la question : « Quel est le Principe du Principe ? » Il poussa le raisonnement logique à ses limites, peut-être même au-delà, au prix d'une grande obscurité. Michel d'Éphèse (vers 1070- vers 1140) disait de son style qu'il était « noir comme de l'encre ». Damascius raisonnait en effet aux limites de la raison. Il produisit de la métaphysique absolue, vertigineuse et aveuglante comme un alcool pur, de la métaphysique noire.

Le « Tout » des choses, l'Univers, doit avoir un principe, affirme-t-il, et ce principe ne saurait faire partie du « Tout ». Alors, quel est-il ? Difficile à dire, puisque tout ce qui vient à l'esprit est forcément quelque chose qui fait partie du Tout. Au moins peut-on dire ce qu'il n'est pas (et l'on retrouve ici la rhétorique de l'ontologie négative) : le Principe n'est ni la Nature, ni l'Âme, ni l'Être, qui font partie du Tout. Il n'est pas non plus le Tout lui-même, puisque l'on ne saurait, évidemment, être à soi-même son propre principe. Il n'est même pas l'Un qu'avait en vue Plotin, même si, par sa simplicité, l'Un est encore ce qui s'en rapproche le plus. Il n'est pas l'Un parce que l'Un se différencie de tout ce à quoi il accorde l'unité, donc il se définit encore à travers sa relation au Tout. Même la puissance infinie de Proclus se définit par sa relation à autre chose qu'elle-même, la limite. Or, nous cherchons un principe absolu.

Il faut bien reconnaître que toutes ces négations n'apprennent rien sur l'essence du principe absolu. Et cela est très bien ainsi, ajoute Damascius. Car, en définitive, la quête de l'absolu, lorsqu'elle est rigoureusement menée à son terme, se confronte à l'ineffable et à l'inconnaissable. Il faut accepter que la pensée s'évanouisse, qu'elle tombe dans un abîme, qu'elle verse dans le « rien » justement. L'Un est un concept épuré, simple et beau, mais le véritable absolu doit échapper à toute appréhension, même aux spéculations les plus élevées. Or, qu'est-ce qui échappe à toute pensée, sinon le Néant ? Il y a deux sortes de « riens » : le Rien supérieur à l'Un et

le rien inférieur à la matière. Damascius a exacerbé la solution de Proclus : le néant écartèle encore davantage la métaphysique que l'infini. On sent aussi que son discours a frisé l'effondrement dans l'obscurité mystique, dans le silence. Comme si ce tardif néoplatonicien avait accompli un dernier tour de piste, terriblement risqué, et poussé dans ses ultimes retranchements sa métaphysique millénaire avant qu'elle retourne elle-même au silence, anéantie par les religions d'un Dieu créateur réputé « cause de soi », c'est-à-dire que l'Académie succombe sous les persécutions de religions vulgaires qui ne s'embarrassent guère de contraintes logiques ni de rigueur spéculative. C'est sans doute la leçon qu'il faut retenir de l'exercice : à trop chercher l'image absolue, on risque d'aboutir au néant, et l'on s'expose à être balayé par une pensée moins subtile.

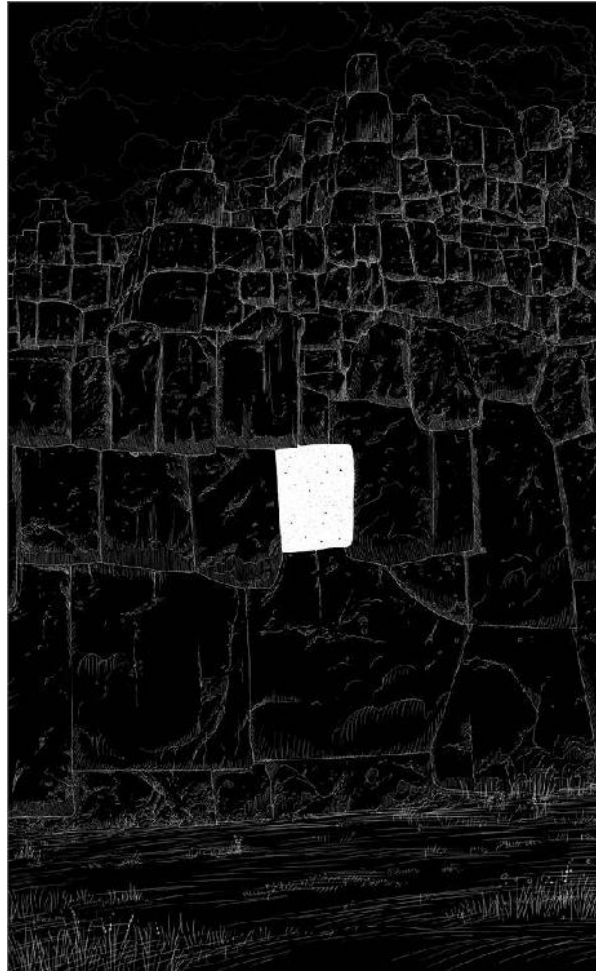
Il ne faut pas désespérer : tout n'est pas noir !

Dans *À bout de souffle*, Jean Seberg demande à Jean-Paul Belmondo : « “Entre le chagrin et le néant, je choisis le chagrin” [c'est une citation des *Palmiers sauvages* de William Faulkner], et toi, tu choisirais quoi ? » Cette question symbolise le dilemme du psychanalyste de l'imaginaire confronté au mystère de l'énergie noire : ou bien, il se lance à la poursuite désespérée de monstres insaisissables, ou bien, il prolonge la quête de l'inaccessible principe jusqu'à aboutir au néant. Dans ce film (en noir et blanc), le héros préfère le néant parce que le chagrin lui semble un compromis idiot (cela annonce sa fin tragique et « dégueulasse »).

Ne peut-on échapper au dilemme ? Ne peut-on desserrer l'étreinte des images noires ? Il y a quelque chose de trop sinistre dans l'alternative pour qu'on l'accepte sans barguigner. Certains astronomes et astrophysiciens ont d'ailleurs observé qu'il existe une troisième voie : si l'on renonce à l'hypothèse d'une répartition uniforme de la matière dans l'Univers, alors l'accélération de l'expansion peut s'expliquer par un effet de perspective, une « aberration » au sens optique. La théorie de la relativité d'échelle de Laurent Nottale (1952) permet, elle aussi, de résoudre l'énigme sans avoir à postuler l'existence de l'énergie noire. Dans ce cas, il n'y a plus besoin de chercher de coupable. L'Univers retrouve un peu de ses couleurs. Le poète Jacques Réda (1929) achève un de ses réjouissants poèmes

scientifiques ainsi :

*Et puis quoi ? L'univers serait-il en cavale ?
Pour échapper à qui ? Rejoindre quel endroit ?
Quel désastre éternel ? Quelle fin triomphale ?
Le voici, de propos résolu, hors la loi.
L'énergie noire, il faudrait la repeindre en rose.*





LA DOMINATION DU NOIR

Au terme de notre enquête sur les idées noires qu'avons-nous appris ? Il nous semble, d'abord, que le dialogue a permis de clarifier et de préciser les discours de l'un et l'autre. En attirant son attention sur des scrupules métaphysiques, mêmes désuets, ou sur quelques nuances glanées dans l'histoire des arts et des idées, le philosophe incite le physicien à encore plus de vigilance dans l'emploi des mots devant traduire la connaissance, tandis qu'en corrigeant l'expression vague qui trahirait la rigueur du raisonnement ou en sollicitant davantage d'audace et de fulgurance poétiques pour suivre l'originalité de la pensée scientifique, le physicien se fait, quant à lui, l'indispensable conseil du philosophe qui file les métaphores en connaissance de cause.

Nous avons aussi été surpris par la diversité des échos entre les idées et les images. Il n'y a pas de règle absolue dans leur correspondance. À écrire ensemble, nous avons appris un art de la distance. Seule la recherche à la fois intuitive et calculée du juste écart permet aux analogies entre science et imaginaire de mettre en valeur autant les résonances que les dissonances. Cet écart est variable : les lignes épistémologique et « psychanalytique » sont rarement de sages parallèles, ce sont plutôt des géodésiques non euclidiennes ; elles se déforment au voisinage de leurs objets ; souvent, elles se prolongent et se relancent ; parfois elles s'entrecroisent dans l'émerveillement partagé ou divergent ironiquement. Toutefois, ces chassés-croisés ne sont pas arbitraires. Le dialogue amorce un travail d'écriture qui va, selon nous, au-delà du simple exercice de style.

La gradation des noirs exhibe une progression qui possède un sens : du noir familier du ciel nocturne au noir le plus mystérieux, celui de l'énergie inconnue censée expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, le passage en revue des idées noires est aussi un trajet historique. Il nous renseigne sur l'évolution des pratiques scientifiques de nomination (on pourrait dire de « qualification » puisqu'il s'agit d'un adjectif).

Contrairement à ce que l'on entend parfois, le fait que le langage scientifique soit construit en rupture avec le langage ordinaire sur la base de conventions ne signifie pas que les noms soient neutres ou insignifiants vis-à-vis de la compréhension des idées. Au contraire, le choix des mots a souvent une grande importance et fait partie intégrante du travail de la science. Il est flagrant aussi que les pratiques de nomination ont beaucoup évolué au cours de l'histoire des sciences et, en particulier, qu'a eu lieu une accélération en même temps qu'une modification profonde de leur finalité lors des dernières décennies.

L'explication de la noirceur du ciel nocturne est une question qui aiguïait peut-être déjà les spéculations des astronomes de l'Antiquité. Les réponses apportées à cette énigme ont évolué ensuite, au cours de plusieurs siècles, au rythme des progrès du savoir et des techniques. L'expression « problème du ciel noir » est elle-même assez récente et cette désignation paraît sans mystère. Pourtant, derrière l'évidence de l'observation quotidienne et l'emprunt au langage ordinaire se dissimulent un problème épineux et la définition singulière d'un noir transparent. Voilà un exemple de lente sédimentation historique du sens.

L'expression « corps noir » est issue de circonstances différentes et relève d'une tout autre temporalité. En 1860, Gustav Kirchhoff crée l'expression en même temps que l'idée. Il baptise son objet théorique « corps noir » par analogie : un corps parfaitement noir est un corps idéalement absorbant (et donc idéalement émetteur). Il transforme ainsi radicalement le sens de l'adjectif pour répondre aux exigences de précision du langage scientifique. Le surgissement de ce noir est instantané et indissolublement lié au modèle théorique qu'il désigne. Il est donc lié aussi aux problèmes qui en découlent et qui donneront naissance, en moins d'un demi-siècle, à une révolution scientifique, la mécanique quantique, qui constitue le grand ébranlement récent du sens commun. En étudiant ses résonances avec le choc de l'art contemporain, nous avons voulu souligner cette brusque accélération des métamorphoses de l'esprit au siècle dernier.

La formation et la diffusion de l'expression « trou noir » marquent une inflexion des pratiques de nomination, une innovation. Le concept est relativement ancien et pendant longtemps il ne fut question que d'astres occlus ou, plus tard, de « corps de Schwarzschild ».

À vrai dire, il n'en fut même question qu'au sein d'une fraction minime de la communauté scientifique. Malgré son charme désuet l'astre occlus n'intéressait pas grand monde. Il est difficile de déterminer qui fut la première personne à employer l'expression « trou noir ». Mais, lorsqu'en 1967 John Wheeler choisit de rebaptiser ainsi l'idée préexistante, il réalise délibérément une opération de marketing dont il a le secret : une sorte de design sémantique. Il forge une expression destinée à mettre en relief un concept en partant de sa signification théorique, mais en exploitant surtout sa saillance imaginaire.

Le succès est prodigieux : les trous noirs monopolisent l'attention de ses collègues, ils envahissent la science-fiction et intègrent finalement le langage courant et la culture générale.

Dans un milieu très compétitif, comme l'est devenue la recherche scientifique durant la seconde moitié du ^{xx}^e siècle, de telles pratiques de design sémantique efficace sont devenues une nécessité stratégique : il ne suffit pas de faire une grande découverte, il faut lui donner un nom qui attire l'attention des pairs et assure son rayonnement dans le champ de la recherche, voire au-delà. C'est dans cette perspective qu'il faut analyser l'apparition des fameuses matière et énergie noires.

Avec elles, un cap a été franchi dans l'évolution des pratiques de nomination : il ne s'agit plus de faire valoir rapidement une découverte, il s'agit de faire valoir par avance les bénéfices attendus d'une hypothèse, c'est-à-dire rien d'autre que la *promesse* de futures découvertes. L'expression contribue ainsi à faire exister dans la communauté une idée qui n'est pas nécessairement acceptée par l'ensemble de ses membres : certains scientifiques présentent ces idées noires comme des réalités observées, alors que leur noirceur signifie que ces objets sont justement inobservables, tandis que d'autres restent prudents face à ce qu'ils considèrent comme des bulles spéculatives. Le journaliste Sean Kalinich estime qu'« il y a un usage intéressant dans le monde de la science ; quand vous ne pouvez pas expliquer ou caractériser quelque chose, ajoutez “noir” (*dark*) après le mot habituel et ça le rendra parfaitement correct » (*Decrypted Tech*, 20 juin 2012). Cette caricature révèle certains travers actuels de la concurrence effrénée au sein de la recherche : elle pousse à un usage hâtif et racoleur de la nomination plutôt qu'à une patiente et fidèle retranscription des implications conceptuelles.

On pourrait donner d'autres exemples de cette dérive, cantonnons-nous aux idées noires : le fait que l'adjectif « noir » se prête particulièrement bien à ces pratiques du design sémantique ostentatoire est sans doute révélateur des évolutions de la société tout entière. Autrefois, le noir n'aurait pas forcément été aussi attractif. Même s'il renvoie à un élément fascinant de l'imaginaire, il a, par le passé, été contaminé par des associations d'idées dépréciatives. Le noir était naguère plutôt stigmatisant au sein de la culture, alors que la modernité est caractérisée par la domination du noir, surreprésenté et survalorisé, notamment dans le design vestimentaire : « Le noir du *design* n'est ni le noir princier et luxueux des siècles précédents, ni le noir sale et misérable des grandes villes industrielles ; c'est un noir à la fois sobre et raffiné, élégant et fonctionnel, joyeux et lumineux, bref un noir moderne. [...] Le noir est à la fois moderne, créatif, sérieux et dominateur » (Pastoureau, *Le Noir*, p. 189). Le noir symbolise à la fois le chic et la correction, l'élégance et la sobriété.

Il faut souligner alors un fait encore plus troublant à propos des expressions « matière noire » et « énergie noire » : *elles n'existent qu'en français*. En anglais, langue qui domine les discussions scientifiques, l'adjectif *black* ne s'applique pas à ces idées : les Anglo-Saxons préfèrent étudier la matière *sombre* (*dark matter*) et l'énergie *sombre* (*dark energy*). Il en va de même en allemand : *dunkle Materie, dunkle Energie*. Pour un chercheur italien, il s'agira de matière et d'énergie *obscuras* (*materia oscura, energia oscura*). Si bien que le particularisme linguistique français est remarquable : notre langue est la seule à « noircir » ces idées. Pour être tout à fait juste, il arrive que ces expressions coexistent avec celles de « matière sombre » et « énergie sombre ». On distingue ainsi parfois la matière sombre de la matière noire en employant la première expression pour désigner la matière difficilement détectable mais supposée de nature classique et la seconde pour la matière proprement exotique. Toutefois, en règle générale, le « noir » domine largement et il semble que les chercheurs persistant à employer « sombre » sont précisément ceux qui font preuve de scepticisme à l'égard de ces idées.

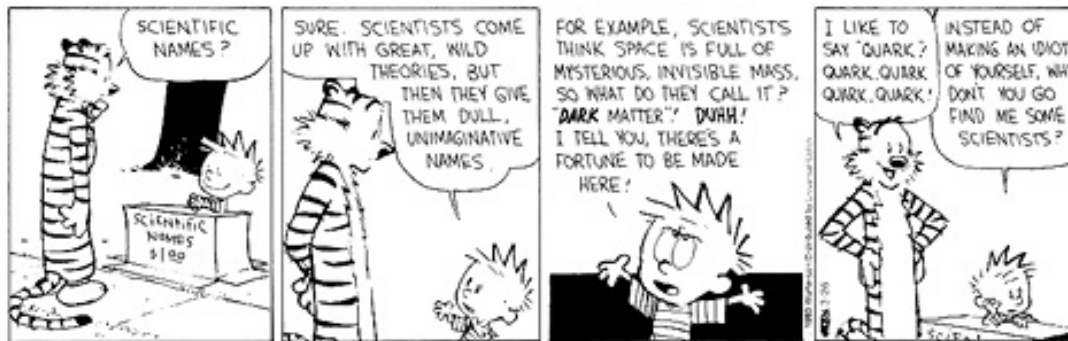


Figure 10. Bill Waterson, *The Complete Calvin and Hobbes, Book Four 1992-1995*, Andrews McMeel Publishing, 2012, p. 49 (strip 2)

Cela renforce notre intérêt à considérer la connotation imaginaire que la noirceur véhicule implicitement dans le langage scientifique. La séduction des idées noires a quelque chose qui ne tient pas au hasard, mais au fait qu'elles induisent irrésistiblement des images noires. Qualifier une idée de « sombre » ou d'« obscure », c'est indiquer explicitement la difficulté de la détection tout en soulignant aussi implicitement l'embarras théorique dans lequel on se trouve pour caractériser ce phénomène. En ce sens, ajouter *dark* rend effectivement les idées plus correctes parce que cet adjectif doit inciter à la prudence. Dans la langue de Shakespeare comme dans la nôtre, quelque chose de sombre est, au figuré, quelque chose de difficile à comprendre, voire de funeste (« une sombre histoire »). Du fait de cette connotation, la *dark matter* ou la *dark energy* apparaissent comme des hypothèses risquées, peu évidentes, auxquelles on ne consent pas sans quelque perplexité ou répugnance. En choisissant de traduire *dark* par « noir », les chercheurs francophones ont profondément modifié le sens de la nomination. Ils l'ont radicalisée et ont profité de l'effet symbolique du noir dans notre langue.

Être noir, c'est être absolument sombre, c'est-à-dire impossible à détecter. À travers cette absolutisation de la sombreur en noirceur, la nouvelle nomination refoule les connotations qui s'attachent à l'image sombre, c'est-à-dire qu'elle occulte l'indice des doutes qui peuvent légitimement naître face à ces idées. La noirceur de la matière et de l'énergie noire symbolise ce qui est résolument caché et, paradoxalement, au lieu de questionner ces hypothèses, elle renforce la croyance en leur existence. Imaginairement, ce qui est noir a davantage d'existence que ce qui est seulement sombre. La matière noire et l'énergie noire résultent de

substantialisations : masse manquante et constante cosmologique acquièrent le statut de réalités matérielles incontestables. En habillant ainsi leurs idées de noir, les scientifiques prennent un risque, qui sera peut-être couronné de succès, ou qui restituera au noir une autre de ses valeurs traditionnelles, celle du deuil : « Ce vêtement noir que portent les hommes de notre temps est un symbole terrible. [...] C'est la raison humaine qui a renversé toutes les illusions et qui porte elle-même le deuil » (Alfred de Musset, *La Confession d'un enfant du siècle*, 1836).

Quoi qu'il en soit du dénouement que les progrès de la science apporteront à ces questions, nous croyons que les deux éclairages fournis par l'épistémologie historique et par la psychanalyse de la connaissance sont pertinents et complémentaires. Ils permettent de prendre du recul par rapport à des questions complexes et brûlantes, difficiles et pointues, mêlant toujours la rigueur du raisonnement à un engagement inévitablement affectif. Ce qui nous a séduits dans les idées noires et qui les rend si précieuses, c'est cette intrication de la construction algébrique et expérimentale avec la latence d'un riche symbolisme imaginaire. C'est ce qui les rend si fascinantes et qui réclame pour cette raison d'autant plus d'efforts afin de les mettre à distance et de permettre un travail d'accommodation, c'est-à-dire d'y porter un regard tour à tour critique et bienveillant.



BIBLIOGRAPHIE

Les idées noires de la physique

- Gaston Bachelard, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1983 (1934).
- Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin, 2004 (1938).
- Gaston Bachelard, *La Psychanalyse du feu*, Paris, Gallimard, 2008 (1938).
- Gaston Bachelard, *L'Eau et les Rêves. Essai sur l'imagination de la matière*, Paris, José Corti, 1956 (1940).
- Gaston Bachelard, *La Terre et les Rêveries du repos. Essai sur les images de l'intimité*, Paris, José Corti, 2004 (1948).
- Gaston Bachelard, *Études*, Paris, Presses universitaires de France, 2001 (1970).
- André Franquin, *Idées noires. L'intégrale*, Paris, Fluide glacial, 2001.
- Henri Michaux, *L'Infini turbulent*, Paris, Gallimard, 2012.

Le ciel noir

- Edward Harrison, *Le Noir de la nuit, une énigme du cosmos*, Paris, Seuil, 1998.
- Heinrich Olbers, *La transparence de l'espace cosmique*, extrait de « Astronomie et Astrophysique », présenté par J.-P. Verdet, Paris, Larousse, 1993.
- Jean-Michel Alimi, *Pourquoi la nuit est-elle noire ?*, Paris, Le Pommier, coll. « Les Petites Pommes du savoir », 2002.

Pourquoi le ciel est-il noir ?

- Aristote, *De l'Âme*, Paris, Les Belles Lettres, 1989.
- Gaston Bachelard, *L'Air et les Songes. Essai sur l'imagination du mouvement*, Paris, José Corti, 1987 (1943).
- <http://www.germaincaminade.com/>
- Ératosthène, *Catastérismes*, Paris, Les Belles Lettres, 2013.
- Annie Mollard-Desfour (éd.), *Le Dictionnaire des mots et expressions de couleur. Le Noir*, Paris, CNRS Éditions, 2005.
- Michel Pastourau, *Dictionnaire des couleurs de notre temps*, Paris, Bonneton, 1992.

Le corps noir

Étienne Klein, *Le Facteur temps ne sonne jamais deux fois*, Paris, Flammarion, coll. « Champs sciences », 2009.

Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, University of Chicago Press, 1987.

Le rayonnement du corps noir

Paul Valéry, *Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, Paris, Gallimard, 1992.

Alfred Pacquement et Pierre Encrevé (éd.), *Soulages*, Paris, Éditions du Centre Pompidou, 2009.

Maurice Merleau-Ponty, *Phénoménologie de la perception*, Paris, Gallimard, 1945.

Jean Perrin, *Les Atomes*, Paris, CNRS Éditions, 2014.

Le trou noir

Matteo Smerlak, *Les Trous noirs*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? », 2016.

Jean-Pierre Luminet, *Le destin de l'univers – Trous noirs et énergie sombre*, Paris, Fayard, 2010.

Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Paris, Flammarion, coll. « Champs sciences », 2009.

Christopher Priest, *Le Monde inversé*, Paris, Gallimard, 2002.

Charles Sheffield, *Les Chroniques de McAndrew*, Paris, Le Livre de poche, 1990.

Dossier *Pour la Science* n° 75, « Trou noir », avril-juin 2012.

Conférences d'Alain Riazuelo sur le trou noir :

http://www.canal-u.tv/video/cerimes/voyage_autour_et_a_l_interieur_d_un_trou_noir.7888

https://www.youtube.com/watch?v=A_KBd0kSlAc

La gravité du trou noir

Gaston Bachelard, *La Terre et les Rêveries de la volonté*, Paris, José Corti, 1988.

Michel Pastoureau, *Noir. Histoire d'une couleur*, Paris, Seuil, 2008.

Victor Hugo, *Les Contemplations*, Paris, GF-Flammarion, 2008.

Matière noire

Gianfranco Bertone, *Le mystère de la matière noire, dans les coulisses de l'Univers*, Paris, Dunod, 2014.

Dossier *Pour la Science* n° 83, « Les mystères du cosmos, du big bang aux trous noirs », avril-juin 2014.

Robert H. Sanders, *The Dark Matter Problem : a Historical Perspective*, Cambridge, Cambridge University Press, 2010.

Alain Bouquet et Emmanuel Monnier, *Matière sombre et énergie noire*, Paris, Dunod, 2008.

Jean-Philippe Uzan et Patrick Peter, *Cosmologie primordiale*, Paris, Belin, 2005.

Les alchimies de la matière noire

Françoise Bonardel (éd.), *Philosopher par le feu. Anthologie de textes alchimiques*, Paris, Alhora, 2009.

Carl Gustav Jung, *Dialectique du moi et de l'inconscient*, Paris, Gallimard, 1986.

Marguerite Yourcenar, *L'Œuvre au noir*, Paris, Gallimard, 1976.

Énergie noire

Dossier *Pour la Science* n° 83, « Les mystères du cosmos, du big bang aux trous noirs », avril-juin 2014.

Jean-Pierre Luminet, *Le destin de l'univers – Trous noirs et énergie sombre*, Paris, Fayard, 2010.

Alain Bouquet et Emmanuel Monnier, *Matière sombre et énergie noire*, Paris, Dunod, 2008.

Jean-Philippe Uzan et Patrick Peter, *Cosmologie primordiale*, Paris, Belin, 2005.

Les mystères de l'énergie noire

Ferdinand Alquié (éd.), *Polarité du symbole*, Paris, Desclée de Brouwer, 1960.

Gaston Bachelard, *La Poétique de la rêverie*, Paris, Presses universitaires de France, 1974.

Régis Boyer, *L'Edda poétique*, Paris, Fayard, 1992.

Damascius, *Traité des premiers principes*, tome 1, *De l'ineffable et de l'un*, Paris, Les Belles Lettres, 1986.

Albert Einstein, *Œuvres choisies*, tome 5, *Physique et réalité*, Paris, Seuil-CNRS, 1991.

Jacques Réda, *La physique amusante*, Paris, Gallimard, 2009.

Cédric Villani, *Théorème vivant*, Paris, Grasset, 2012.

Cette édition électronique du livre
Les Idées noires de la physique de Vincent Bontems et Roland Lehoucq
a été réalisée le 14 octobre 2016
par la société [Flexedo](#).
Elle repose sur l'édition papier du même ouvrage
(ISBN 978-2-251-44590-8).