

Festival de Fleurance, août 2008

Pourquoi la nuit est-elle noire ?

Jean-Marc Lévy-Leblond, Université de Nice

« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles... »
Corneille, *Le Cid*

Document

Le paradoxe d'Olbers et ses solutions

David Newton, Dept of Physics and Astronomy, University of Leeds

Résumé

Au sein d'un Univers homogène, infini dans le temps et l'espace, toute ligne de visée doit aboutir à la surface d'une étoile, et toute portion du ciel avoir l'éclat du Soleil. Pourquoi donc le ciel est-il noir la nuit ? Telle est le problème étudié par Heinrich Olbers en 1826 — mais la question était posée depuis 1577 (Thomas Digges). En un demi-millénaire, plusieurs réponses ont été proposées ; pourtant, l'énigme n'a vraiment été comprise qu'à la fin du XXe siècle. La solution moderne révèle la profonde signification cosmologique de l'obscurité nocturne. L'histoire du paradoxe d'Olbers révèle l'ampleur des changements dans notre conception de l'Univers.

Jusqu'au seizième siècle, la conception occidentale de l'Univers est restée semblable à celle qu'avait proposée Aristote près de deux mille ans auparavant. Dans ce modèle, la Terre était au centre de l'Univers, le Soleil et les planètes tournant autour d'elle. Englobant ce système, une mince coque sphérique portant les étoiles, et au-delà, le néant. Cette représentation était en accord avec les observations scientifiques disponibles aussi bien qu'avec les dogmes théologiques dominants, et l'idée d'un Univers fini et borné, centré sur la Terre s'imposait comme évidente. Le seul aspect de ce modèle géocentrique qui pouvait être questionné concernait la trajectoire exacte des planètes autour de la Terre : initialement considérées comme des cercles parfaits, ces trajectoires avaient évolué en boucles complexes, qui pourtant échouaient à prédire exactement les mouvements planétaires. C'est en tentant de

revenir aux orbites rigoureusement circulaires des anciens Grecs, que l'astronome polonais Nicolas Copernic introduisit un nouveau modèle héliocentrique de l'Univers. Dans ce modèle, le Soleil était placé au centre de l'Univers (toujours fini et borné), les planètes tournant autour de lui. Malheureusement, ce modèle n'était pas plus précis que le modèle géocentrique pour prédire les mouvements des planètes ; mais en écartant la Terre du centre de l'Univers, Copernic avait jeté les bases d'un principe scientifique fondamental qui allait être l'objet de controverses acharnées pendant les cinq siècles suivants, mais qui constitue désormais le fondement de toute la cosmologie moderne.

Des étoiles jusqu'à l'infini ?

L'argument implicite qu'introduisit Copernic (sans doute inconsciemment) est le suivant : si la Terre n'est pas le centre de l'Univers, pourquoi serait-il en tout autre lieu, et pourquoi même l'Univers aurait-il un centre ? En vérité, l'idée n'était pas neuve : le poème épique écrit par Lucrèce en 55 av. J.-C., *La nature des choses*, avait été redécouvert, et l'idée d'un Univers infini était connue, sinon effectivement discutée, par nombre d'auteurs du XVI^e siècle [au premier chef Giordano Bruno]. L'un des premiers à suggérer sérieusement un Univers infini fut le mathématicien et astronome Thomas Digges qui publia sa *Parfaite description des orbés célestes* à Londres en 1576. Digges fit hardiment exploser la sphère aristotélicienne des étoiles fixes et dispersa les étoiles au hasard dans l'espace infini. Ce faisant, il nota que son modèle soulevait un problème qui est la première version de ce qu'on appelle aujourd'hui le paradoxe d'Olbers : pourquoi cette infinité d'étoiles ne rendaient-elles pas lumineux le ciel nocturne ? La réponse, selon Digges, était que la plupart d'entre elles sont trop loin pour être visibles. Bien que Digges ait mentionné cette solution en une ligne incidente de son livre, le paradoxe n'a cessé depuis de solliciter l'imagination des astronomes.

D'autres partisans d'un Univers infini au XVI^e et XVII^e siècles aboutirent à la même solution que Digges, bien qu'elle ne résiste guère à une investigation rapide : même si chaque étoile lointaine est trop faible pour être vue individuellement, le flux lumineux collectif de toutes ces étoiles devraient faire briller le ciel nocturne. Le premier à le comprendre fut Johannes Kepler qui nota avec une brillante intuition que l'obscurité relative de la nuit possédait une considérable portée cosmologique. Dans son opuscule de 1610, *Conversation avec le messager céleste* (répondant au livre majeur de Galilée, *Le messager des étoiles*), Kepler défendit un Univers fini et borné en

arguant que, dans un Univers infini aux étoiles dispersées dans tout l'espace, « la voûte céleste entière serait aussi lumineuse que le Soleil ».

Cet argument crucial de Kepler semblait écarter la notion d'un Univers infini, mais après les travaux de Galilée et, ironiquement, de Kepler lui-même, confirmant le modèle copernicien héliocentrique, l'idée d'un Univers limité paraissait de moins en moins attrayante pour nombre d'astronomes. Les lois de la gravitation d'Isaac Newton, qui expliquaient et prédisaient d'une façon remarquable les mouvements planétaires, demandaient d'ailleurs un Univers infini et homogène (pour lui éviter de s'effondrer sur lui-même). La résolution du paradoxe devint donc une question vive et le resta pendant les trois siècles qui suivirent.

La formalisation du paradoxe

La première analyse mathématique sérieuse du problème fut menée par le mathématicien suisse Jean-Philippe Loys de Chéseaux en 1744. Inspiré par un travail d'Edmund Halley, de Chéseaux imagina une série de couches sphériques concentriques d'épaisseur constante centrée sur l'observateur. Si cette épaisseur est petite devant le rayon (la distance à l'observateur), le nombre d'étoiles dans chaque couche est proportionnel à sa surface, donc au carré de ce rayon. Mais l'intensité lumineuse parvenant au centre depuis une étoile est inversement proportionnelle au carré de sa distance, c'est-à-dire au rayon de la couche à laquelle elle appartient. Ainsi, la proportion du ciel couverte d'étoiles est-elle la même pour chacune des couches. De Chéseaux montra alors qu'il fallait ajouter ces couches jusqu'à une distance de trois millions de milliards d'années-lumière [en unités modernes] pour que le ciel soit entièrement couvert d'étoiles (au nombre d'approximativement 10^{46}). La surface apparente du ciel entier étant environ 180.000 fois plus grande que celle du Soleil, la lumière stellaire totale tombant sur Terre devrait être 180.000 fois plus intense que celle du Soleil. Peut-être dépassé par l'énormité de cette conclusion, de Chéseaux suggéra faiblement qu'un milieu interstellaire absorbant atténuait cet éclat stellaire.

Malgré le caractère peu convaincant de la solution proposée par de Chéseaux [voir plus bas], personne n'offrit mieux pendant plus d'un siècle. En 1826, Heinrich Olbers effectua un traitement semblable (encore que moins rigoureux) et parvint aux mêmes conclusions. Bien qu'Olbers n'ait fait que reprendre les idées de Halley et de Chéseaux, la forme moderne du paradoxe a pris son nom, peut-être parce qu'il en a offert la version la plus succincte en introduisant l'argument de la ligne de visée :

dans un Univers infini et homogène, toute ligne de visée doit aboutir à la surface d'une étoile — pourquoi donc le ciel est-il noir la nuit ? L'avantage de cet argument est qu'il ne requiert pas une distribution aléatoire uniforme des étoiles dans l'espace, mais fonctionne aussi bien si les étoiles sont regroupées (par exemple en galaxies). C'est en 1831 seulement que John Herschel invalida la théorie d'un milieu interstellaire absorbant en montrant que, dans un Univers rempli d'un rayonnement 180.000 fois plus intense que la lumière solaire, ce milieu interstellaire s'échaufferait jusqu'à ce qu'il cesse d'absorber le rayonnement, et se contente de le diffuser [devenant aussi lumineux que le fond stellaire qu'il masquerait ...et remplacerait]. Après ce travail de Herschel, personne ne reprit plus l'idée de l'absorption comme solution du paradoxe — à la notable exception près d'Edward Fournier d'Albe qui suggéra que même si le ciel est couvert d'étoiles, la plupart pourraient être éteintes et donc sombres. Une autre suggestion pince-sans-rire de d'Albe fut que les étoiles n'étaient peut-être pas réparties au hasard mais alignées de façon que les plus proches occultent les suivantes. Bien que délibérément fantaisiste, cette solution illustre un subtil changement dans l'interprétation même du paradoxe. Comme le note Edward Harrison dans son livre *Le noir de la nuit*, avant Herschel, la question semblait être celle de la lumière stellaire manquante. Après Herschel, le manque de toute réponse réaliste quant au sort de cette lumière transforma la question qui devint celle du déficit des étoiles elles-mêmes.

Ainsi, tout en supposant l'espace infini et homogène, un modèle d'Univers populaire à la fin du XIXe siècle était celui d'une collection d'étoiles immense mais finie — la Voie lactée —, au-delà de laquelle s'étendait un vide sans fin. L'Univers victorien se mettait à régresser vers l'Univers aristotélicien — et le paradoxe disparaissait.

La vitesse de la lumière

Un aspect singulier du paradoxe d'Olbers est que, bien qu'ayant attiré l'attention de nombre de savants fameux depuis sa conception au XVIe siècle, très peu de discussions en ont reposé sur des analyses mathématiques rigoureuses (de Chéseaux constituant une exception notable). Le traitement définitif du paradoxe d'Olbers trouve son origine dans un article de Lord Kelvin, « Sur l'éther et la matière gravifique au sein d'un espace infini », publié en 1901. Il y montra que selon le modèle standard (victorien) de son époque, la Galaxie contenait bien trop peu d'étoiles pour couvrir le ciel entier. Mais il alla plus loin, et prouva que, même si les étoiles s'étendaient à l'infini dans l'espace, remplissant tout l'Univers, les étoiles visibles ne pourraient aucunement recouvrir le ciel. Il appuya sa démonstration sur

ses travaux antérieurs démontrant que les étoiles ne pouvaient briller indéfiniment, leur durée de vie étant limitée par leurs ressources énergétiques disponibles. Kelvin accomplit enfin le pas crucial consistant à penser la distance des étoiles en termes du temps de parcours de la lumière qui nous en parvient. Ole Römer avait démontré dès 1676 que la vitesse de la lumière est finie, et il peut sembler stupéfiant que personne n'ait établi cette connexion plus tôt. En fait, Mark Twain et Edgar Allan Poe avaient tous deux déjà écrit que la résolution du paradoxe d'Olbers reposait sur la finitude temporelle de l'univers, mais les savants les avaient ignorés — ce n'étaient après tout que des écrivains...

Quand nous regardons au loin dans l'espace, nous regardons aussi en arrière dans le temps. L'obscurité que nous apercevons entre les étoiles lointaines est l'obscurité primordiale qui existait avant la naissance des étoiles. Les évaluations modernes de la distance d'un éventuel fond étoilé lumineux (la limite de visibilité) donnent une valeur de 10^{23} années-lumière, ce qui veut dire que nous ne verrions des étoiles dans toute direction que si elles avaient brillé depuis au moins 10^{23} années. Mais la durée de vie d'une étoile moyenne telle le Soleil n'est que de 10^{10} années [le rapport de ces deux échelles de temps, soit 10^{13} est comparable au rapport entre un million d'années et une seconde !]. Ainsi, à la question de savoir où est passé l'essentiel de la lumière stellaire, Kelvin répond qu'elle ne nous est tout simplement pas encore parvenue. Malheureusement, l'article de Kelvin reçut peu d'attention à son époque, et fut pratiquement ignoré jusqu'à sa redécouverte par le cosmologiste Edward Harrison en 1985.

Les cosmologies modernes

Au début du XXe siècle de considérables progrès dans la fabrication des télescopes amenèrent un accroissement majeur de nos connaissances sur l'Univers. Le modèle victorien d'Univers monogalactique fut abandonné et fit place à un modèle multigalactique. Après la mise au point de la relativité générale par Einstein en 1916, le physicien russe Alexandre Friedmann trouva en 1922 un ensemble de solutions cosmologiques aux équations d'Einstein qui permettaient l'expansion de l'Univers, et en 1929, Edward Hubble montra que l'Univers était effectivement en expansion. L'idée d'un Univers statique infini dut être abandonnée. Le paradoxe d'Olbers joua un rôle surprenant dans la détermination du nouveau modèle d'Univers.

Vers 1950, deux modèles d'univers étaient en compétition. Le modèle proposé par Friedmann et le Belge Georges Lemaître, baptisé plus tard [et

malencontreusement...] “big bang”, suggérait un Univers en expansion d’âge fini, cependant que le modèle d’“état stationnaire” de Hermann Bondi, Thomas Gold et Fred Hoyle proposait un Univers d’âge infini en expansion perpétuelle. [Cette théorie impliquait l’abandon de la loi de conservation de la matière. En effet, si l’Univers est inchangé au cours du temps, sa densité ne doit pas varier, mais comme il est en expansion, de la matière doit être créée continûment pour maintenir la densité constante. Bondi évalua le taux moyen de création nécessaire à moins d’un atome d’hydrogène par litre en un milliard d’années, une valeur si faible qu’elle ne contredirait pas les expériences usuelles sur lesquelles est fondée la loi de conservation de la matière.] Ces deux modèles reposaient sur le Principe cosmologique qui avait été formalisé par Edward Milne en 1933. Dans sa forme la plus simple, ce principe énonce qu’il n’existe aucun lieu privilégié dans l’Univers, idée qui, comme on l’a indiqué, s’était progressivement imposée depuis que Copernic avait proposé le système héliocentrique.

Dans son essai de 1957, *Theories of Cosmology*, Bondi décrit les deux théories et réévalua le traitement par Olbers du paradoxe du ciel noir. Bondi commence par résumer ainsi les quatre hypothèses implicites d’Olbers :

- 1) l’Univers est homogène, de sorte que la distance moyenne entre les étoiles et la luminosité moyenne d’une étoile sont uniformes dans l’espace,
- 2) l’Univers ne change pas au cours du temps (si on le considère à une échelle suffisante),
- 3) il n’y a pas de mouvements d’ensemble systématiques dans l’Univers,
- 4) toutes les lois connues de la physique sont valables.

Puisque cet ensemble d’hypothèses conduit au paradoxe d’Olbers — un ciel nocturne brillant autant que la surface du Soleil, résultat évidemment faux —, quelle est l’hypothèse la plus aisée à abandonner ?

L’hypothèse 1) (homogénéité) repose sur un ensemble considérable de données observationnelles, et regarder l’hypothèse 4) comme erronée ne conduirait à rien, de sorte qu’elles sont à conserver toutes deux. On peut alors tenter d’abandonner l’hypothèse 3) : si les étoiles distantes s’éloignent rapidement, la lumière qu’elles émettent nous parvient décalée par effet Doppler vers des longueurs d’onde en dehors du spectre visible, de sorte que nous ne pouvons les voir.

Comme l’expansion de l’Univers avait été découverte et que l’hypothèse 3) est donc bien invalide, Bondi avança que l’expansion suffisait à résoudre le paradoxe d’Olbers, alors que les *deux* hypothèses 2) et 3) doivent être abandonnées dans la théorie du “big bang”. Bondi suggéra au contraire que l’on pouvait conserver l’hypothèse 2)

(uniformité temporelle) en abandonnant l'hypothèse 3) (pas d'expansion). Il présenta cette vision de l'univers par analogie avec une rivière coulant rapidement : toutes les molécules d'eau individuelles se déplacent mais à grande échelle, la rivière conserve une apparence inchangée. La solution spectaculaire de Bondi par la seule expansion de l'Univers eut un grand succès, mais la découverte en 1965 du fond de rayonnement micro-onde cosmique prouva que nous vivons bien dans un Univers d'âge fini, qui a connu un état primordial chaud et dense. Or des calculs subséquents par Harrison montrèrent que la solution de Bondi (décalage Doppler hors du spectre visible) ne valait que dans un Univers d'"état stationnaire" et non dans un Univers de "big bang" d'âge fini.

En définitive, si notre Univers ne baigne pas dans un rayonnement d'intensité solaire, ce n'est pas à cause du décalage Doppler, mais parce que l'univers est jeune. Les étoiles ne brillent que depuis dix milliards d'années et n'ont pas émis assez de rayonnement pour rendre lumineux le ciel nocturne.

[Traduction et adaptation de J.-M. Lévy-Leblond]

Bibliographie

Ouvrage de référence (élémentaire, sauf les appendices)

— Harrison E., *Le noir de la nuit* (Seuil, 1987 ; 1998 en version de poche) [version originale : *Darkness at Night* (Harvard University Press, 1987)]

Élémentaire

— http://pagesperso-orange.fr/oncle.dom/astronomie/histoire/ciel_noir/ciel_noir.htm

— http://paradoxe_ciel_noir.de-france.org/

Un peu plus technique

— Harrison E., « The Dark Night Sky Paradox », *Am. J. Phys.* 45, 119 (1977)

— Pesic P., « Brightness at Night », *Am. J. Phys.* 66, 1013, 1998

Spécialisée

— Harrison E., « Background Radiation Density in an Isotropic Homogeneous Universe », *Month. Not. Royal Astr. Soc.* 131, 1 (1964)

— Wesson P., « The Extragalactic Background Light and a Definitive Resolution of Olbers' Paradox », *Astrophysical Journal* 317, 601 (1987)

— Wesson P. & al., « Olbers' Paradox and the Spectral Intensity of the Extra-Galactic Background Light », *Astrophysical Journal* 367, 399 (1991)