

d'Hyménoptères sont interfécondes, fertilité qui disparaît en présence de la bactérie. Cette dernière joue donc un rôle primordial dans l'isolement reproductif de certaines espèces et pourrait avoir été au fil de l'évolution, un facteur supplémentaire des mécanismes de spéciation.

La stabilité des associations avec *Wolbachia*

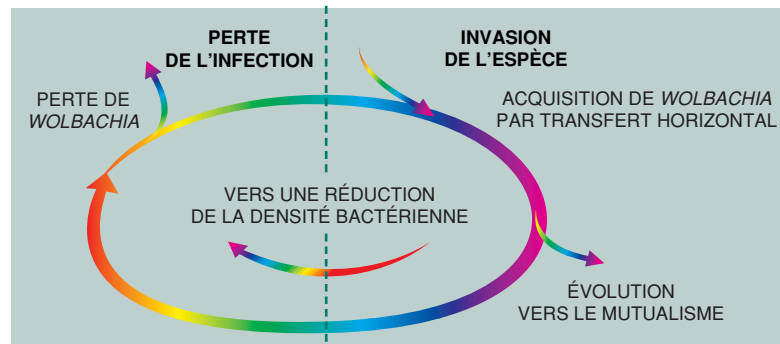
Ainsi, *Wolbachia* peut coloniser de nouveaux hôtes par transfert horizontal, puis se répandre dans les populations grâce à sa capacité de manipuler la reproduction. Ces deux phénomènes expliquent le succès évolutif de la bactérie, mais soulèvent une nouvelle question : pourquoi *Wolbachia* n'infecte-t-elle pas plus d'espèces ? Deux hypothèses sont proposées. Selon la première, toutes les espèces ne sont pas « infectables ». Pour s'installer dans une nouvelle espèce, *Wolbachia* doit museler le système immunitaire de l'hôte, et certaines espèces sont peut-être résistantes à la bactérie.

Selon la seconde hypothèse, simultanément aux acquisitions par transfert, certaines espèces pourraient perdre leur parasite, privant la bactérie d'une espèce hôte. Les associations à *Wolbachia* ne seraient pas stables dans le temps. On a montré qu'une fois une association installée, l'évolution des deux partenaires s'accompagnerait d'une réduction de l'effet de la bactérie sur la reproduction de l'hôte ne permettant plus à la bactérie de se maintenir, et entraînant la disparition de l'infection. Quelques données semblent étayer cette seconde hypothèse. Chez les parasitoïdes de la drosophile, nous avons observé que l'intensité de l'incompatibilité cytoplasmique rencontrée dans une espèce est liée à la prévalence de l'infection dans cette espèce. Ainsi, chez *Lepidopilina heterotoma*, la quasi-totalité des individus est infectée et l'incompatibilité cytoplasmique est complète. Au contraire, chez *Pachycrepoides dubius*, la bactérie n'a pas d'effet détectable, et les populations sont peu infectées (35 pour cent des individus en moyenne) : cette espèce serait en train de se débarrasser de l'infection.

Quel scénario peut-on ébaucher quant à l'évolution des associations avec *Wolbachia* ? Une espèce initialement non infectée acquiert *Wolbachia* par transfert horizontal. Seules les bactéries capables d'avoir des effets sur la reproduction se maintiennent dans les populations. Les deux partenaires coévoluent jusqu'à ce que l'infection disparaisse. Ainsi, on s'interroge : la capacité de *Wolbachia* à modifier la reproduction de ses hôtes ne se maintient-elle pas grâce aux transferts horizontaux qui lui permettent de coloniser de nouveaux hôtes, seules les bactéries ayant un effet notable sur la reproduction étant retenues ?

En dehors de cette dynamique d'acquisition et de perte de l'infection, *Wolbachia* peut suivre une autre voie évolutive : elle peut devenir mutualiste. En effet, ce n'est que dans ces conditions, où le symbiote apporte un avantage à son hôte, que l'association pourrait être stabilisée à l'échelle de l'espèce. C'est ce qui s'est produit chez un autre parasitoïde de drosophile, *Asobara tabida*. Chez cette espèce, nous avons montré que la présence de *Wolbachia* est nécessaire à la production d'œufs.

Les nématodes entretiennent aussi des relations mutualistes avec *Wolbachia*, qui infecte la majorité des filaires. Aujourd'hui, les *Wolbachia* des nématodes sont distinctes des *Wolbachia* qui infectent les arthropodes, et l'on n'observe plus de transferts horizontaux de la bactérie, mais uniquement des transferts par la descendance.



5. STABILITÉ DES ASSOCIATIONS avec *Wolbachia*. À l'échelle de l'évolution, certaines associations seraient instables. La bactérie est d'abord acquise par transfert horizontal par une nouvelle espèce. Quand son effet sur la reproduction est intense, elle se répand dans la population infectée. Les partenaires coévoluent et, parfois, l'effet pourrait diminuer, voire disparaître et entraîner la perte de la bactérie. Pour que l'association soit stabilisée, une association mutualiste doit s'installer entre la bactérie et l'hôte.

Wolbachia est un exemple étonnant d'association entre un micro-organisme et un hôte. Toutefois, cette bactérie n'est pas simplement un cas d'école et on étudie comment l'utiliser à des fins agronomiques ou médicales. Pourrait-elle devenir un agent de lutte contre les nématodes, ce qui nous permettrait de lutter contre de nombreuses pathologies humaines difficiles à traiter ? Des antibiotiques qui élimineraient *Wolbachia* détruiraient les filaires (puisque la bactérie est devenue indispensable à leur reproduction). On envisage aussi d'utiliser l'incompatibilité cytoplasmique pour contrôler des populations de ravageurs ou des vecteurs d'agents pathogènes, ou pour répandre des gènes : si l'on parvenait à introduire des gènes dans *Wolbachia* et à relâcher des insectes infectés par cette bactérie, cette dernière envahirait les populations visées et répandrait le gène d'intérêt. Cette technique a été envisagée pour répandre des gènes de résistance à l'agent du paludisme chez les moustiques. Toutefois, ces utilisations imposeraient que l'on sache manipuler avec précision le matériel génétique de *Wolbachia* et que l'on maîtrise les transferts artificiels vers de nouvelles espèces ainsi que les phénomènes d'invasion.

La découverte des bactéries *Wolbachia*, l'un des symbiotes les plus répandus dans le monde animal, a révélé une nouvelle voie de la symbiose : la manipulation de la reproduction. Aujourd'hui, on connaît d'autres organismes qui utilisent cette même voie pour se répandre dans les populations hôtes. Plus de six projets de séquençage complet de *Wolbachia* sont en cours, qui devraient révéler les mécanismes d'action de cette bactérie féministe.

Fabrice VAVRE est chargé de recherche au CNRS dans le Laboratoire Biométrie et biologie évolutive, dirigé par Christian GAUTIER, à l'Université Claude Bernard – Lyon I.

Frank DEDEINE et al., *Removing symbiotic Wolbachia specifically inhibits oogenesis in a parasitic wasp*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, pp. 6247-6252, 2001.

Seth BORDENSTEIN et al., *Wolbachia-induced incompatibility precedes other hybrid incompatibilities in Nasonia*, in *Nature*, vol. 409, pp. 707-710, 8 février 2001.

Claudio BANDI et al., *Wolbachia in filarial nematodes : evolutionary aspects and implications for the pathogenesis and treatment of filarial diseases*, in *Veterinary parasitology*, vol. 98, pp. 215-238, 2001.

Le grand inventaire cosmique

GÜNTHER HASINGER • ROBERTO GILLI

Le jour approche où les astronomes connaîtront avec certitude tous les objets susceptibles d'émettre de la lumière dans l'Univers.

Avons-nous vu tout ce qu'il y a à voir dans l'Univers? La réponse à cette question est non, bien sûr, car l'Univers observable et ses 10 000 milliards de milliards de milliards d'années-lumière cubes sont très loin d'avoir été explorés. Nous sommes aussi incapables de cataloguer l'ensemble des corps célestes existants que les entomologistes le sont de connaître chacun des scarabées qui peuplent la Terre. Toutefois, au même titre qu'un biologiste peut prétendre connaître les principales espèces de mammifères terrestres, par exemple, les astronomes sont sur le point de terminer l'inventaire des différentes classes d'objets susceptibles d'émettre ce qu'ils qualifient de lumière – c'est-à-dire, des ondes électromagnétiques du domaine radio au rayonnement gamma, en passant par les micro-ondes, les infrarouges ou les ultraviolets.

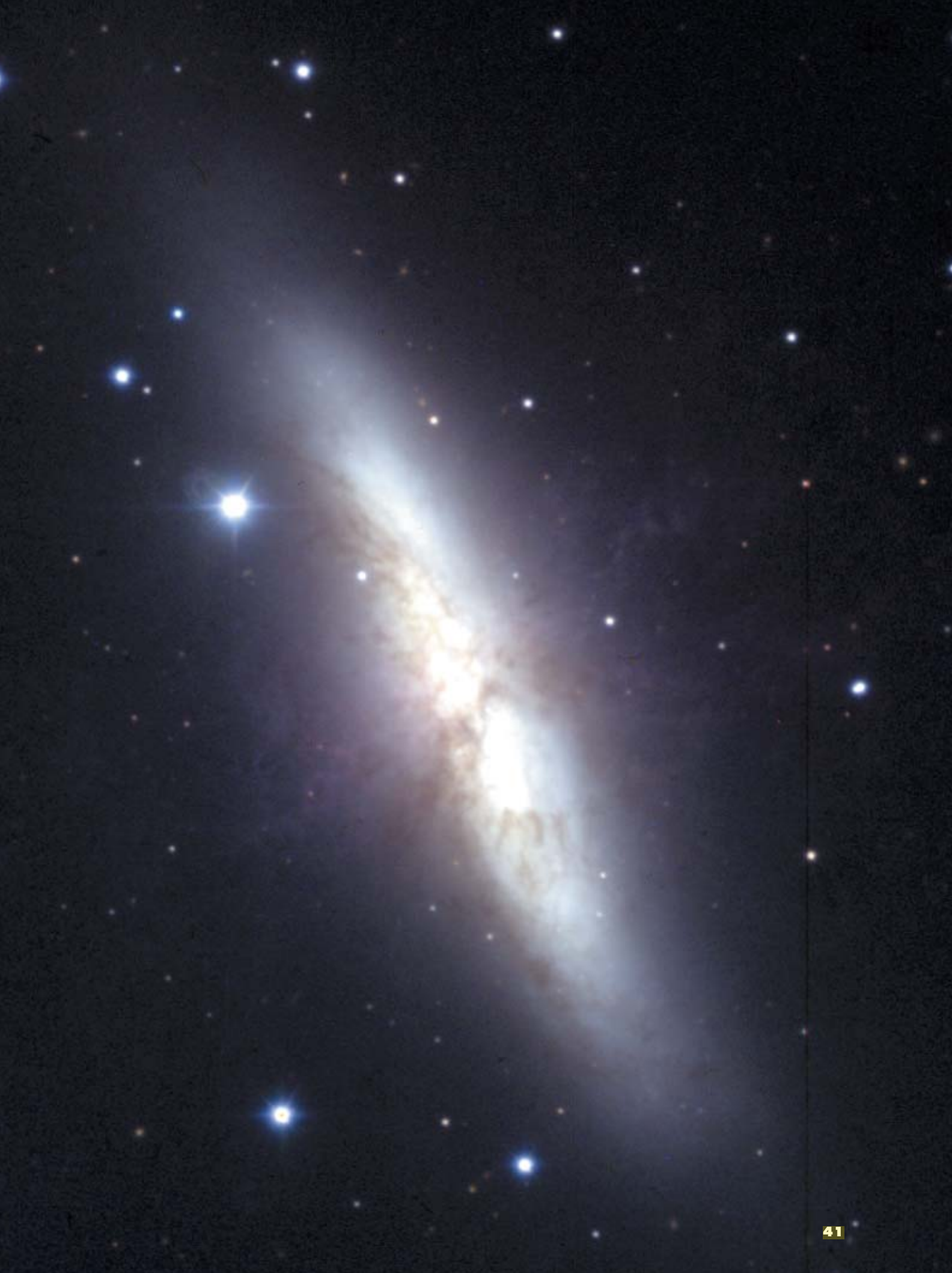
Le principe de cet inventaire consiste à étudier ce que les observateurs considèrent habituellement comme une nuisance : le fond diffus cosmique. Quand les astronomes parlent de fond diffus, ils font allusion à ce que les chercheurs des autres disciplines nomment bruit de fond, c'est-à-dire tout ce qui ne constitue pas l'objet de leur étude. Un télescope qui collecte la lumière provenant d'une étoile donnée ne peut éviter de capturer des photons issus d'autres objets proches ou lointains. Cette lumière superflue ne fait que réduire la précision de la mesure souhaitée. Ceux d'entre nous qui cherchent à établir l'inventaire des différentes classes d'objets célestes étudient précisément ce que leurs collègues négligent. Tout d'abord, nous enregistrons toute la lumière issue d'une région donnée du ciel. Ensuite, nous soustrayons les contributions dues aux objets connus, tels les étoiles, les galaxies et les nuages de gaz. S'il reste une lueur dif-

fuse d'origine non identifiée, nous en déduisons que notre recensement n'est pas encore complet.

Le fond diffus

Le terme de fond diffus évoque en général le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement radio et micro-onde omniprésent n'est pas constitué de sources ponctuelles non identifiées, mais semble avoir une origine vraiment diffuse, en l'occurrence un plasma chaud très homogène qui baignait l'Univers 400 000 ans après le Big Bang. Cependant, d'autres fonds s'ajoutent à ce rayonnement fossile pour contribuer à «cette obscure clarté qui tombe des étoiles», notamment les fonds diffus X, infrarouge et visible (parfois qualifié d'optique). Le recensement des sources et l'estimation précise de leur contribution aux diverses composantes du fond diffus sont l'une des tâches les plus ardues de l'astronomie. Comme nous l'avons vu, dans son principe, cette estimation est simple puisqu'elle ne consiste qu'à soustraire de la totalité du signal reçu l'ensemble des sources identifiées entre la Terre et l'Univers profond : le bruit engendré par le détecteur lui-même, le rayonnement issu de notre propre Système solaire, l'émission de notre galaxie, et ainsi de suite. Il faut, de plus, évaluer le signal d'arrière-plan en tenant compte du fait qu'il a pu, lors de son trajet jusqu'à nous, être atténué et partiellement absorbé par la matière intergalactique. Dans la pratique,

1. CERTAINES GALAXIES, telle M82, abritent un trou noir supermassif et produisent des étoiles à un rythme effréné, dix fois supérieur à celui de la Voie lactée. Elles émettent probablement l'essentiel du rayonnement électromagnétique qui emplit l'Univers et qui constitue le fond diffus cosmique.





Roger Ressmeyer/Corbis

2. LA VOIE LACTÉE apparaît comme une simple traînée laiteuse à l'œil nu, mais se décompose en 100 milliards d'étoiles lorsqu'on l'observe à l'aide d'un télescope (dans le cartouche, la constellation de l'Autel). Il en va de même du fond diffus, cette faible lueur qui emplit le ciel entre les étoiles et qui est produite par l'ensemble des objets lointains de l'Univers que l'on peut, aujourd'hui, recenser.



WFI/European Southern Observatory

cette méthode se révèle difficile, car la soustraction est une opération qui amplifie les erreurs. Par chance, dans certains domaines du spectre, le fond diffus constitue le signal le plus brillant. En revanche, dans d'autres domaines, notre travail revient à extraire un simple murmure d'une cacophonie cosmique. En général, nos conclusions sont limitées par la précision avec laquelle nous connaissons l'émission d'avant-plan. En dépit de ces obstacles, nous sommes parvenus à caractériser le spectre du fond diffus avec une assez grande précision et sur un domaine spectral assez large (voir la figure 4).

Le grand recensement

La composante du fond diffus dans le domaine des rayons X fut découverte en 1962. Son spectre présente un maximum autour de 30 kiloélectronvolts et s'étend de façon continue vers les énergies plus élevées. En deçà de un kiloélectronvolt, on trouve un grand nombre de raies d'émission provenant de noyaux atomiques, superposées à ce spectre continu, et qui semblent être l'empreinte d'un gaz chauffé à plusieurs millions de kelvins à l'intérieur ou autour de notre galaxie. Dans les années 1970, les premiers satellites sensibles aux rayons X, tels *Uhuru*, *Ariel V* et *HEAO 1*, ont montré que l'émission X de plus forte énergie était répartie de façon uniforme sur

l'ensemble de la voûte céleste. On en déduisit que son origine est extragalactique. En effet, si la matière responsable de ce rayonnement était répartie comme celle de notre galaxie, l'éclat du fond diffus serait plus important dans le plan de la Voie lactée (ou dans le plan de l'écliptique si le rayonnement était émis par le Système solaire). Les satellites sensibles aux rayons gamma, tels *SAS-3*, *COS-B* et *Compton-GRO*, ont confirmé que les rayonnements plus énergétiques encore suivent également cette répartition uniforme.

Le fond cosmologique micro-onde et le fond diffus de rayons X dominent l'éclat du ciel dans leur domaine respectif du spectre électromagnétique. Ce n'est pas le cas pour le reste du fond diffus. Ainsi, sa composante infrarouge n'a été identifiée qu'en 1996 par Jean-Loup Puget et ses collègues de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay, et n'a été mesurée de façon précise qu'il y a deux ans. En lumière visible et dans le domaine ultraviolet, les premières mesures du fond cosmique ont été réalisées par Rebecca Bernstein et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie. Avant ces mesures directes, les astronomes se contentaient d'évaluer le fond optique en extrapolant la distribution des galaxies les moins brillantes décelables sur certaines images prises par le télescope spatial *Hubble*. Quant à la composante du fond diffus

dans l'ultraviolet lointain, elle est absorbée par l'hydrogène... qui constitue l'essentiel du milieu interstellaire. En conséquence, dans ce domaine, les astronomes ne disposent que d'estimations fondées sur l'extrapolation des mesures obtenues dans les domaines adjacents du spectre, les ultraviolets moyens et les rayons X de basse énergie.

Quelles sont les sources des différentes composantes du fond diffus? En fait, chaque composante est constituée d'émissions venues de différentes classes d'objets astronomiques. La lumière des étoiles, dont l'énergie est issue de la fusion thermonucléaire, ne contribue qu'aux domaines infrarouge proche, optique et ultraviolet. Cependant, les quasars et autres noyaux actifs de galaxies alimentent tout le spectre électromagnétique, des ondes radios aux rayons gamma. Quant aux nuages de poussière interstellaire, ils absorbent la lumière visible, et les rayonnements ultraviolets et X, mais restituent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Pour compliquer encore un peu notre problème, le fond diffus, en chaque point du ciel, est la somme des émissions issues d'objets qui sont situés tout au long de la ligne de visée, c'est-à-dire à des époques différentes de l'histoire de l'Univers. Ainsi nombre de ces objets ont disparu de l'Univers contemporain, tandis que les astres que l'on observe aujourd'hui n'existaient