

Les couleurs du ciel

Primaire et collège

Résumé

Notre planète est entourée d'une remarquable enveloppe d'air qui donne à son ciel un aspect toujours changeant. Quand il fait beau, son ciel est bleu. En tout cas, c'est ce que nombre d'entre nous seraient prêts à affirmer...

les couleurs du ciel

Roland Lehoucq

Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ?

Notre planète est entourée d'une remarquable enveloppe d'air qui donne à son ciel un aspect toujours changeant. Quand il fait beau, son ciel est bleu. En tout cas, c'est ce que nombre d'entre nous seraient prêts à affirmer. Et pourtant, observons plus attentivement notre ciel. Que constatons-nous ? D'abord, qu'il présente d'autres couleurs, même par beau temps : il est presque blanc près de l'horizon et peut prendre d'autres teintes allant du jaune pâle au rouge foncé en passant par toute une palette de bleus. Ensuite, le ciel est moins lumineux au zénith et devient de plus en plus brillant au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'horizon (pour un Soleil de hauteur moyenne dans le ciel). Pour expliquer la vaste palette de ces couleurs, il faut d'abord comprendre ce qui arrive à la lumière du Soleil quand elle traverse l'atmosphère terrestre.

Qu'arrive-t-il à la lumière du Soleil ?

Un jour clair et ensoleillé, il semble que le Soleil brille de toute sa force. Pourtant, la majeure partie de sa lumière n'atteint jamais le sol. Le RAYONNEMENT solaire qui frappe la haute atmosphère est atténué de deux manières : par ABSORPTION et par DIFFUSION.

L'absorption est un phénomène dans lequel une partie de la lumière incidente est captée par les molécules qui, par exemple, se mettent à vibrer ou à tourner sur elles-mêmes. Cette énergie interne moléculaire finit par être dissipée en chaleur. L'absorption ne se produit pas de manière uniforme dans tout le SPECTRE des couleurs, mais seulement dans certains domaines de longueurs d'onde déterminés par la structure et la composition des molécules absorbantes. (La lumière est une ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE que l'on peut caractériser par sa PÉRIODE spatiale, sa LONGUEUR D'ONDE, distance qui sépare deux crêtes successives de l'onde. À chaque longueur d'onde de la lumière visible notre cerveau associe une couleur : le bleu correspond à une longueur d'onde d'environ 450 milliardièmes de mètre (nanomètres), le rouge à une longueur d'onde de 700 nanomètres) Ainsi, l'atmosphère est essentiellement transparente à la lumière visible mais quasiment opaque à la lumière ultraviolette à cause des molécules d'ozone, et largement opaque à la lumière INFRAROUGE, essentiellement à cause de la vapeur d'eau.

La lumière est simplement redirigée par la diffusion dans une autre direction que celle dont elle provient. Ainsi, la lumière reçue par nos yeux provient d'une autre



Image de tout le ciel prise avec un objectif « fish-eye ». Il est clair que le ciel n'est pas uniformément bleu : il est plus sombre dans la direction du zénith et le bleu est moins saturé près de l'horizon.

© Till Credner; AlltheSky.com

direction que celle de la source principale. Par exemple, la lumière que nous percevons au niveau de l'horizon est en fait celle du Soleil plusieurs fois diffusée.

La diffusion se produit pour toutes les longueurs d'onde, de façon plus ou moins importante, et c'est l'ensemble des molécules de l'air et des poussières en suspension qui en est responsable. On distingue différents types de diffusion selon la taille des diffuseurs relativement à la longueur d'onde

de la lumière qui les frappe. La DIFFUSION DE RAYLEIGH est la diffusion de la lumière par des cibles de taille très inférieure à la longueur d'onde de cette lumière (des molécules typiquement). C'est elle qui sera l'objet de notre attention dans la suite de ce texte. Lord Rayleigh montra en 1873 que plus la longueur d'onde est courte (donc bleue), plus la lumière est diffusée (plus précisément, la probabilité de diffusion est inversement proportionnelle à la puissance quatrième

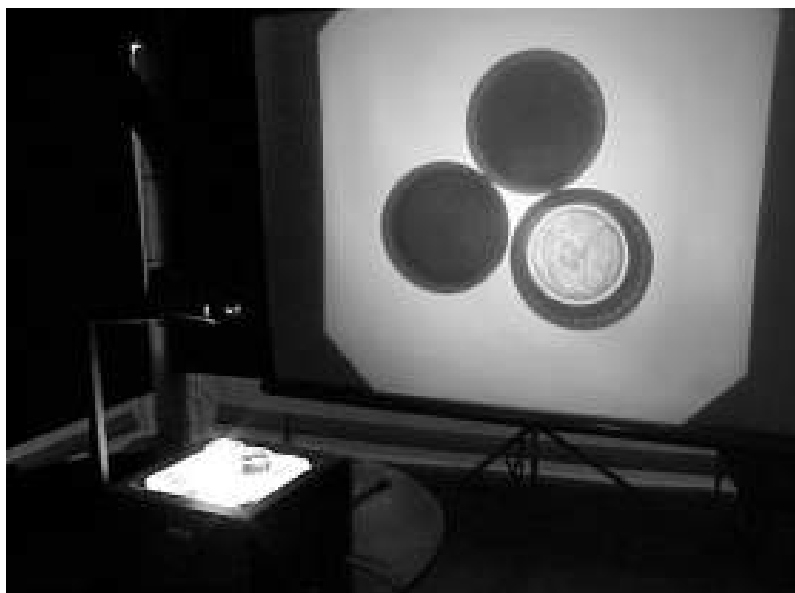


Atténuation par absorption ou par diffusion

Matériel : un rétroprojecteur éclairé par en dessous, trois ramequins en verre transparent, de l'encre de Chine, du talc.

Remplir les ramequins de la même quantité d'eau claire, verser quelques gouttes d'encre de Chine dans le premier puis mélanger doucement, un peu de poudre de talc dans le second et mélanger aussi, garder le troisième intact, comme témoin. Placer les trois récipients sur le rétroprojecteur et projeter leurs ombres sur un écran. L'ombre du récipient d'eau claire est facilement identifiable mais il est difficile de distinguer le récipient contenant de l'encre de celui contenant du talc (pour un meilleur effet, on ajustera la concentration d'encre de Chine de sorte que les ombres portées sur l'écran aient le même aspect). Pourtant, lorsque l'on regarde les ramequins sur le côté, l'un est très blanc, l'autre gris sombre. Que se passe-t-il ? Si les deux ramequins contenant de l'eau modifiée portent une ombre, c'est que leur contenu empêche la lumière de passer. Le ramequin d'eau claire sert de témoin pour montrer que c'est bien la présence d'encre ou de talc qui crée l'ombre sur l'écran. L'effet de l'encre de Chine semble facile à comprendre : elle absorbe le rayonnement de la lampe du rétroprojecteur. Une partie de l'énergie transportée par le faisceau lumineux est absorbée par les molécules qui constituent l'encre et est transformée en chaleur (la température de l'eau doit légèrement augmenter). L'INTENSITÉ du faisceau lumineux qui atteint l'écran est donc réduite du fait de cette absorption. La poudre de talc, quant à elle, est obtenue à partir d'un minéral très finement broyé : les grains ont un rayon voisin de 10 milliardièmes de mètre. Les grains de talc qui baignent dans l'eau jouent le rôle de petits réflecteurs qui renvoient la lumière incidente dans toutes les directions : ils diffusent la lumière. Le faisceau de lumière du rétroprojecteur est partiellement diffusé dans toutes les directions par le talc et seule une partie atteint l'écran. L'intensité du faisceau qui va de la lampe du rétroprojecteur à l'écran est donc réduite par diffusion.

Au final, les deux faisceaux sont atténués, l'un par absorption, l'autre par diffusion, et l'observateur qui regarde l'écran ne peut faire la distinction entre un milieu absorbant et un milieu diffusant.



de la longueur d'onde). La diffusion par les particules les plus grosses, de très grande taille devant la longueur d'onde, comme par exemple des gouttes d'eau qui constituent les nuages, de quelques milliardièmes de mètre,

ou des cristaux de glace de quelques dizaines de milliardièmes de mètre, peut être expliquée par les lois de l'optique géométrique. Enfin, la diffusion par les particules plus petites, dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde

de la lumière, est plus délicate à étudier ; on parle alors de « diffusion de Mie ».

L'épaisseur optique

Finalement, absorption et diffusion ont le même effet sur la lumière transmise à travers la matière : elles atténuent le faisceau lumineux et le milieu traversé apparaît plus ou moins opaque. On comprend aisément que l'opacité d'un milieu est d'autant plus grande que le nombre moyen de diffusions (ou d'absorptions) que peut subir la lumière est grand. Ce nombre dépend à la fois de l'« affinité » de la lumière pour les particules du milieu et du nombre de particules croisées par la lumière. L'affinité entre lumière et matière est caractérisée par la probabilité qu'une diffusion ou qu'une absorption se produise : une forte probabilité entraîne une grande capacité diffusante ou absorbante. Le nombre de particules rencontrées par la lumière dépend du produit de la densité de particules (nombre de particules par unité de volume) et de l'épaisseur du milieu traversé. Ainsi, les milieux dilués, comme les gaz, sont souvent moins opaques que les milieux denses, comme les liquides ou les solides. Quant à l'épaisseur, il est facile d'observer son effet. L'eau semble transparente quand elle remplit un verre. Pourtant, une nuit totale règne dans l'océan au-delà de quelques centaines de mètres de profondeur. Cela signifie que l'eau peut être totalement opaque pourvu que l'on en traverse une épaisseur suffisamment importante. À l'inverse, une feuille de métal assez fine, ayant une épaisseur de l'ordre du millionième de mètre, est partiellement transparente.

Finalement, les physiciens quantifient l'opacité d'un milieu par une grandeur appelée « ÉPAISSEUR OPTIQUE » qui résume bien l'ensemble des paramètres (probabilité

de diffusion/absorption, densité du milieu, épaisseur à traverser) et qui correspond au nombre moyen de diffusions/absorptions subies par la lumière. Dans l'expérience des ramequins, l'eau noircie et l'eau talquée avaient toutes deux une épaisseur optique importante, car la lumière transmise sur l'écran était assez faible. Vus de côté, les deux ramequins semblaient différents car dans celui contenant l'eau noircie, la lumière « manquante » était absorbée tandis que dans l'autre, rempli d'eau talquée, la lumière « manquante » était diffusée sur les côtés. Ainsi, un milieu fortement absorbant apparaîtra sombre quelle que soit la direction d'observation relativement à la direction de la source de lumière tandis qu'un milieu fortement diffusant apparaîtra sombre, dans la direction de la source, et brillant dans les autres directions. C'est ce qui explique que les nuages, dont les minuscules gouttelettes diffusent la lumière, apparaissent noirs vus par le dessous et blancs vus de côté. On fixe généralement, et un peu arbitrairement, la limite entre transparence et opacité à une épaisseur optique égale à 1, valeur pour laquelle le milieu transmet environ 37 % de la lumière incidente. Quand l'épaisseur optique est très petite devant 1, le nombre moyen de diffusions (ou d'absorptions) est très faible et le milieu est transparent. À l'inverse, un milieu opaque est caractérisé par un grand nombre moyen de diffusions ou d'absorptions et donc par une forte épaisseur optique. L'épaisseur optique de l'atmosphère varie d'environ 0,1 au zénith à près de 4 au voisinage de l'horizon.

Pourquoi le ciel est-il bleu ?

La lumière du Soleil contient toutes les longueurs d'onde, elle est très proche du blanc parfait. Cette lumière est filtrée et

diffusée par l'atmosphère avant qu'elle atteigne le sol. Une première conséquence du phénomène de diffusion est que le ciel apparaît lumineux dans des directions différentes de celle du Soleil. Ensuite, nous avons vu que, selon la théorie de Rayleigh sur la diffusion moléculaire, la probabilité de diffusion de la lumière par une molécule de l'atmosphère est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de sa longueur d'onde : une lumière bleue de 450 nanomètres de longueur d'onde à 3,2 fois plus de chances d'être diffusée qu'une lumière rouge de 600 nm ($(600/450)^4 = 3,2$). Ainsi, lorsque l'on regarde le ciel, on a plus de chances de voir de la lumière diffusée de couleur bleue que de couleur rouge. Le ciel apparaît donc bleu quand on regarde ailleurs que dans la direction du Soleil. Attention, il ne faut jamais regarder le Soleil directement, ni à l'œil nu, ni à travers un objet sombre de récupération, type radiographie ou pellicule voilée, ni avec un instrument d'optique, type appareil photo, jumelles ou lunette, sous peine de graves lésions de la rétine pouvant aller jusqu'à la cécité totale. Pour observer le Soleil sans instrument d'astronomie, il faut s'équiper de lunettes en polymère noir telles qu'on en trouve parfois dans les magasins d'astronomie ou auprès des associations. Avec un instrument, l'observation directe doit se faire avec un filtre spécial que l'on ne trouve que dans les magasins spécialisés. On peut aussi projeter l'image du Soleil sur un écran avec un Solarscope, un instrument simple et sûr que l'on peut commander sur le site <http://www.solarscope.com>.

Qu'est-ce qui fixe la luminosité du ciel ? Pourquoi le ciel est-il blanc à l'horizon ?

La luminosité du ciel est exactement égale à la quantité de lumière diffusée dans la direction d'observation. Rappelons-nous que c'est le nombre moyen de diffusions, et donc le nombre de molécules qui se trouvent sur l'axe de visée, qui fixe la quantité de lumière diffusée : un point du ciel sera d'autant plus brillant que la direction dans laquelle il se trouve croisera de nombreuses molécules d'air. Ainsi, la luminosité du ciel dépend de l'épaisseur d'atmosphère traversée par la ligne de visée. Cette remarque explique que le ciel apparaisse plus foncé depuis le sommet d'une montagne ou depuis un avion volant à haute altitude que depuis le niveau de la mer. De même, à très haute altitude, dans une capsule spatiale par exemple, ou sur la Lune, le ciel apparaît noir car il n'y a plus aucune molécule pour DIFFUSER la lumière du Soleil et éclaircir le ciel.

Ce phénomène peut aussi être observé au niveau de la mer car l'épaisseur que traverse la ligne de visée dépend de sa hauteur au-dessus de l'horizon. Ainsi, lorsque l'on regarde vers le zénith, l'épaisseur d'atmosphère traversée est minimale. Plus la ligne de visée descend vers l'horizon, plus l'épaisseur de la masse d'air qu'elle traverse augmente : l'épaisseur optique de l'air traversé en visant l'horizon est trente-huit fois supérieure à celle correspondant à une visée vers le zénith. Puisque l'épaisseur optique de l'atmosphère traversée est minimale au zénith, c'est dans cette région du ciel que le ciel apparaît le moins lumineux, ce que l'on constate facilement. De plus, le ciel devient de plus en plus lumineux quand on descend vers l'horizon. On constate aussi qu'il devient d'un bleu moins profond, et même quasiment blanc,



La diffusion Rayleigh

Matériel : un grand récipient rectangulaire aux parois transparentes (un aquarium par exemple, sa longueur doit être d'au moins 30 à 40 cm) et rempli d'eau claire, du lait, un projecteur de diapositives ou toute source puissante de lumière – il faut que le spectre soit aussi riche en lumière bleue que possible, ce qui exclut par exemple les sources à filament dont la lumière est trop jaune (en général, les sources de lumière artificielles sont pauvres en bleu et si l'on s'en sert pour cette expérience, il sera donc difficile de conclure que le bleu est plus diffusé que le rouge !).

Disposer le projecteur de sorte que son faisceau lumineux traverse le récipient dans la plus grande longueur et se projette sur un écran distant de quelques mètres. Ajouter quelques gouttes de lait, mélanger et laisser reposer. Le faisceau lumineux devient immédiatement très visible quand il traverse l'eau lactée. La lumière ainsi diffusée est légèrement bleutée, le bleu étant plus prononcé près de l'endroit où le faisceau pénètre dans l'aquarium. Elle devient progressivement orangée près de la sortie et la tache lumineuse projetée sur l'écran est rouge-orangé. Les macromolécules du lait dilué dans l'eau sont des particules de petite taille comparées à la longueur d'onde de la lumière. La probabilité d'être diffusé est alors beaucoup plus grande pour un rayonnement de courte longueur d'onde (bleu) que pour un rayonnement de grande longueur d'onde (rouge). C'est ce que l'on observe dans cette expérience. L'eau lactée éclairée apparaît bleutée car elle diffuse fortement la lumière tandis que la lumière émergeant du récipient est sensiblement rougie car elle a perdu l'essentiel de sa composante bleue.

à quelques degrés au-dessus de l'horizon. Ce phénomène résulte du fait qu'il y a alors suffisamment de molécules le long de la ligne de visée (les rayons lumineux traversent une épaisseur d'air plus importante) pour qu'il se produise de multiples diffusions. La lumière, quelle que soit sa longueur d'onde, va donc être diffusée et rediffusée de nombreuses fois. Ce mélange des couleurs donnera à l'atmosphère la couleur de la source : le blanc de la lumière

solaire. Enfin, la couleur du ciel dépend aussi de nombreux autres paramètres, comme la teneur en AÉROSOLS variés (poussières, gouttelettes...), qui peuvent fluctuer au cours du temps.

Couleur et éclat du Soleil

Lorsque le Soleil se couche, sa couleur passe d'un blanc éblouissant à un jaune brillant, puis à l'orange et enfin à un rouge profond.



Quand il est haut dans le ciel, la quantité de lumière enlevée à un faisceau de lumière solaire est petite car l'épaisseur optique de l'atmosphère est faible. Le Soleil apparaît alors quasiment de la même couleur que s'il était vu hors de l'atmosphère, c'est-à-dire blanc. Quand il est proche de l'horizon, sa lumière traverse une plus grande épaisseur d'atmosphère et une fraction significative est diffusée hors du faisceau. La lumière bleue étant plus facilement diffusée, le faisceau, appauvri en bleu, apparaît donc plus rouge qu'il ne l'était initialement. Le Soleil apparaît alors rouge-orangé. De plus, l'ozone de la haute atmosphère absorbe fortement le bleu et le vert, ce qui favorise encore l'impression de rougissement. Enfin, la présence de particules dans l'atmosphère (poussières, fumées, gouttelettes d'eau...) accentue encore ce rougissement : les couchers du Soleil sont d'un rouge intense vus depuis des villes fortement polluées. Les particules de diamètre inférieur à 100 nm sont des diffuseurs particulièrement efficaces et leur influence surpasse celle des molécules d'air. Ce rougissement intense peut aussi être observé lors d'éclipses totales de Lune.

Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ?

La réponse semble simple : parce que le Soleil est couché et que l'atmosphère terrestre, ne diffusant plus sa lumière, n'a plus la teinte bleutée qu'on lui connaît durant la journée. Et pourtant...

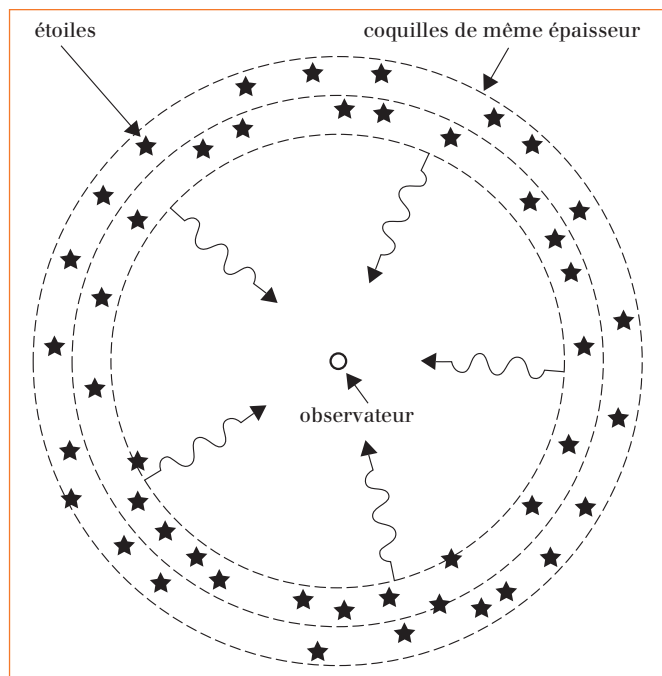
Un ciel infiniment brillant ?

En 1720, l'astronome anglais Edmund Halley montre que le ciel nocturne devrait nous apparaître d'une clarté aveuglante. Cela paraît surprenant car il est bien connu que les

étoiles sont moins lumineuses que le Soleil parce qu'elles sont extrêmement éloignées de nous : leur luminosité apparente décroît comme l'inverse du carré de leur distance. Pour calculer la luminosité qui résulte de la contribution de toutes les étoiles du ciel, Halley imagine une succession de sphères concentriques centrées sur notre position et découpant l'espace en coquilles de même épaisseur. Si les étoiles sont uniformément réparties dans l'espace, leur nombre dans une coquille augmente comme le volume de la coquille, c'est-à-dire comme le carré de son rayon puisque son épaisseur est constante. Ainsi, la baisse de luminosité des étoiles due à leur éloignement est compensée par leur nombre de plus en plus important quand la distance augmente : toutes les coquilles contribuent de la même façon à la lumière que nous recevons des étoiles. Du coup, la conclusion s'impose : dans un univers éternel, infini et uniformément rempli d'étoiles, le ciel nocturne devrait être infiniment brillant. Cela n'est d'ailleurs pas surprenant : une infinité d'étoiles rayonnant pendant une éternité émettent une quantité infinie de lumière.

Un ciel aussi brillant que le Soleil ?

En 1823, Heinrich Olbers, un médecin et astronome allemand, reprend le calcul de la luminosité du ciel dans un article intitulé « Sur la transparence du ciel ». 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

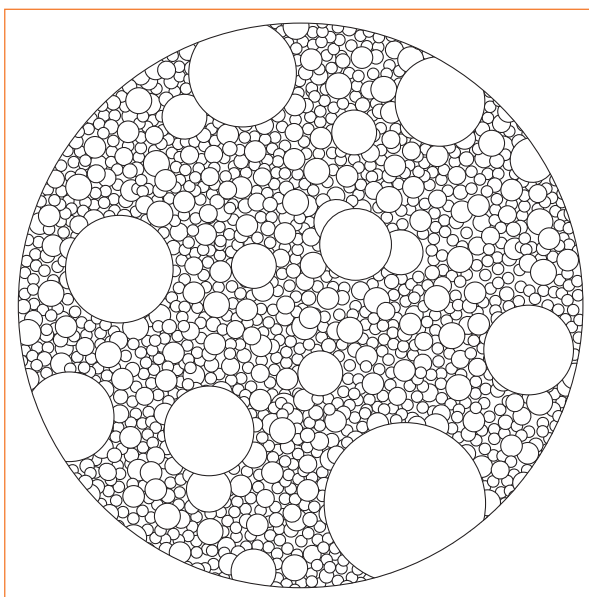


du ciel devrait nous envoyer de la lumière stellaire, donc de la lumière solaire. » Dans son calcul, Olbers tient donc compte du fait que, en dépit du très petit diamètre apparent des étoiles, les plus proches peuvent masquer les étoiles plus lointaines. Cet effet limite la quantité de lumière susceptible de nous parvenir en limitant la portée de notre regard dans l'univers (ci-contre). La situation est analogue à celle d'une grande forêt au milieu de laquelle notre ligne de vue intercepte nécessairement le tronc d'un arbre : nous ne pouvons pas voir arbitrairement loin tant que la densité d'arbres reste à peu près constante. Quelle est alors la luminosité du ciel ? Pas infinie, certes. Puisque chaque ligne de visée rencontre nécessairement la surface d'une étoile, le fond du ciel nocturne devrait avoir une luminosité égale à celle de la surface du Soleil, être aveuglante donc.

En 1743, l'astronome suisse Jean-Philippe Loys de Chéseaux avait aussi proposé de résoudre le paradoxe en

introduisant une limite de visibilité. Il supposait que l'Univers n'était pas parfaitement transparent : la lumière des objets les plus lointains ne peut nous parvenir parce qu'elle est absorbée par le milieu occupant l'espace entre les étoiles. En 1848, l'astronome anglais John Herschel fait remarquer que cette explication ne tient pas : en absorbant la lumière des étoiles, le milieu interstellaire doit s'échauffer et briller à son tour. C'est exactement ce qui se passe dans le Soleil : l'énergie produite en son centre est absorbée par l'enveloppe opaque. Chauffées par la lumière qu'elles absorbent, les couches externes rayonnent à leur tour. La surface du Soleil est certes

bien plus froide que son cœur (6 000 °C contre plus de quinze millions), mais il n'y a pas de perte d'énergie : le Soleil produit en son cœur peu de PHOTONS de grande énergie et rayonne à sa surface beaucoup de photons d'énergie moindre. Au final, sa surface rayonne exactement autant d'énergie que son cœur en produit. Bref, Herschel montre



lui aussi que le fond du ciel devrait, quelle que soit son opacité, être aussi lumineux que la surface du Soleil. Et de même qu'il nous est impossible de voir directement le centre du Soleil, nous ne pouvons voir directement les astres les plus lointains. Nous devrions avoir l'impression d'être entourés d'une sphère dont le rayon fixerait la limite de visibilité et dont la température serait celle de la surface d'une étoile. La contradiction avec la réalité nocturne est flagrante...

Notre vision serait-elle limitée ?

En 1848, Edgar Allan Poe publie *Eureka*, un poème en prose dans lequel il propose une solution au paradoxe de la nuit noire ignorée par les scientifiques de son temps : la sphère incandescente d'Olbers, de Chéseaux et d'Herschel est si lointaine que sa lumière n'a pas encore eu le temps de nous atteindre. Dans un livre publié en 1861, l'astronome allemand Johann von Mädler exprime scientifiquement l'idée de Poe : comme la vitesse de la lumière est finie (300 000 km/s) et qu'un temps fini (environ quatorze milliards d'années) s'est écoulé depuis la création de l'Univers, nous ne pouvons percevoir que les corps célestes suffisamment proches pour que leur lumière ait eu le temps de nous parvenir. Il existe donc un horizon (correspondant à quatorze milliards d'années-lumière, c'est-à-dire à la distance parcourue à la vitesse de la lumière en quatorze milliards d'années) d'au-delà duquel nulle lumière ne nous est encore parvenue. En 1901, Lord Kelvin complète l'argument en se fondant sur ses recherches concernant la cause physique de la luminosité des étoiles. Il affirme d'abord que les étoiles ne peuvent briller indéfiniment puisque leur durée de vie est limitée par leurs ressources en énergie et écrit : « 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. » Cette conclusion est tout à fait naturelle si l'on considère que les étoiles n'existent que depuis un temps fini, depuis lequel leur lumière, qui voyage à une vitesse finie, n'a pu parcourir qu'une distance finie, bien plus petite que le rayon de la limite de visibilité. Autrement dit, la finitude de la vitesse de la lumière et l'âge fini des objets peuplant l'Univers se conjuguent de sorte que seule une petite partie de l'Univers nous est accessible directement. Un horizon limite nos investigations.

Et dans un Univers en expansion ?

Cette explication était valide dans un Univers infini et statique, contexte cosmologique où le paradoxe de la nuit noire fut posé. Mais qu'en est-il dans un UNIVERS EN EXPANSION ? Cette expansion, mise en évidence par l'observation des galaxies lointaines dans les années 1930, s'explique dans le cadre de modèles cosmologiques fondés sur la théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale. Le premier effet de cette expansion est de diluer la lumière émise par les étoiles et les galaxies, ce qui a pour effet de repousser la limite de visibilité calculée par Olbers, Chéseaux et Herschel. Mais il faut tenir compte d'un autre phénomène : l'expansion de l'Univers décale vers le rouge la lumière en provenance des galaxies lointaines. Cet effet résulte d'une dilatation de la longueur d'onde de la lumière émise au fil de son voyage dans un espace en expansion. Comme, à nombre de photons reçus égal, un objet est d'autant moins lumineux que sa lumière est rouge, les galaxies les plus distantes sont donc moins lumineuses qu'elles ne le seraient si elles étaient immobiles. C'est pour cette

raison que les galaxies les plus lointaines sont extrêmement difficiles à observer, même avec les plus puissants télescopes. De ce fait, la brillance de surface des astres les plus lointains décroît avec la distance, ce qui pourrait expliquer la noirceur de la nuit.

Finalement, dans le cadre cosmologique actuel, deux effets peuvent expliquer pourquoi la nuit est noire : la durée de vie finie des étoiles et des galaxies (qui limite le nombre de photons émis dans l'univers) et l'expansion de l'Univers (qui diminue la densité de photons en augmentant le volume de l'espace et diminue l'énergie des photons par le DÉCALAGE VERS LE ROUGE). Un calcul détaillé montrerait que le premier facteur est dominant et le second relativement mineur : l'expansion ne peut réduire l'intensité du fond du ciel que par un facteur 4 au mieux par rapport à un Univers statique.

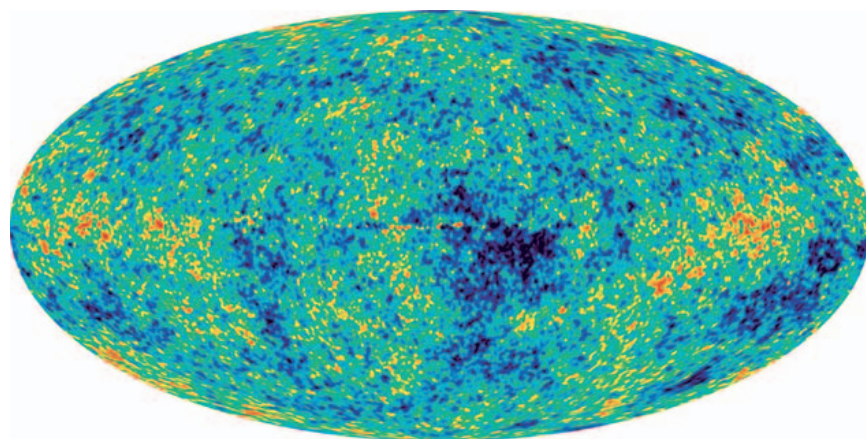
Cette nouvelle discussion du paradoxe de la nuit noire permet de préciser le concept d'HORIZON COSMOLOGIQUE, déjà présent dans la pensée d'Olbers. Si le ciel étoilé n'est pas aussi brillant que la surface du Soleil, c'est essentiellement parce que nous ne voyons qu'une infime partie des objets qui peuplent l'Univers car ils ont une durée de vie finie. Comme la vitesse de la lumière est elle aussi finie, il existe un horizon du

passé, une distance maximale d'au-delà de laquelle aucune lumière ne nous est encore parvenue. Nous ne voyons donc pas aussi loin, dans l'espace et dans le temps, que nous le voudrions. On estime que la lumière de la plus ancienne galaxie fut émise bien avant la formation du Soleil et de la Terre, il y a 13,2 milliards d'années.

Quand fut émise la plus ancienne lumière ?

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 dû émerger d'une phase pendant laquelle il était très dense et très chaud. Quand la température dépasse 3 000 kelvins (environ 2 730 °C), la matière est opaque à la lumière. Comme pour un gaz qui se détend, l'expansion refroidit l'Univers. Quand la température devient suffisamment basse, les premiers atomes d'hydrogène neutre se forment et la lumière se désolidarise de la matière. Elle se propage librement dans un Univers qui, lui, est devenu transparent.

Le paradoxe de la nuit noire prend alors un relief tout particulier car la lumière émise au moment de la formation de l'hydrogène baigne encore l'Univers. Elle fut émise à une température voisine de celle d'une



Carte, couvrant tout le ciel, des fluctuations de température du « rayonnement fossile », dont la température moyenne est de 2,725 kelvins (environ -270 °C). Ce rayonnement fut émis quand l'Univers avait une température de l'ordre de 3 000 kelvins. Satellite WMAP (juin 2003), © NASA.

étoile. Pourquoi ne la voit-on pas partout dans le ciel ? Tout simplement parce que ce rayonnement primitif, décalé vers le rouge à cause de l'expansion de l'univers, n'est aujourd'hui perceptible que sous forme de micro-ondes invisibles à nos yeux. L'énergie moyenne de ces photons est mille fois plus faible que celle des photons de la lumière visible et le flux lumineux du rayonnement primitif est des milliers de milliards de fois moins intense que celui des étoiles. Ce « rayonnement fossile » (représentation page précédente) nous donne la plus vieille image de notre Univers, alors qu'il n'était âgé que de 370 000 ans, et la surface dont il semble émis fixe la limite d'au-delà de laquelle nulle lumière ne peut nous parvenir car auparavant, la matière était opaque. Cette surface, plus lointaine que la première galaxie formée, borne l'Univers observable.

Bibliographie

Armelle BARNIER, *Pourquoi la nuit, il fait noir ? (et neuf autres questions essentielles de Zoé)*, Le Petit Musc, 2001.

Edward HARRISON, *Le Noir de la nuit, une énigme du cosmos*, Le Seuil, 1998.

David K. LYNCH et William C. LIVINGSTON, *Aurores, mirages, éclipses..., Comprendre les phénomènes optiques de la nature*, Dunod, 2002.

Heinrich OLBERS, « La transparence de l'espace cosmique », dans *Astronomie et Astrophysique*, textes présentés et réunis par Jean-Pierre Verdet, Larousse, coll. « Textes essentiels », 1993, p. 716.

Sur la Toile

Quelques explications sur l'interaction lumière-atmosphère :

http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Rayonnement/Cours/partie2/partie2_1.htm

L'optique atmosphérique :

<http://perso.orange.fr/marc.chapelet/pheno/index.htm>

Une autre façon de faire l'expérience du coucher du Soleil :

<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Rayonnement/Coucher/index.html>

Un bon site sur l'optique atmosphérique (en anglais) :

<http://www.atoptics.co.uk/>

Trois sites sur le paradoxe de la nuit noire :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_d'Olbers

http://perso.orange.fr/oncle.dom/astronomie/histoire/ciel_noir/ciel_noir.htm

<http://nabla1.chez-alice.fr/>

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquérir ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE