

Pourquoi le ciel est-il noir la nuit?

Exposé du Professeur Bernard Hauck.

Pourquoi la nuit est-elle si sombre? Cette question, naïve qu'en apparence, n'est jamais posée lors d'une visite publique d'un observatoire. Et pourtant, c'est une question fondamentale qui s'inscrit dans un contexte plus large, à savoir celui de la finitude ou l'infinitude de l'Univers, thème présent déjà dans l'Antiquité, dont la réponse implique la connaissance du modèle d'Univers dans lequel nous vivons. Pour Epicure et ses disciples, l'espace infini est parsemé de mondes innombrables composés d'atomes. Pour les stoïciens, nous vivons dans un cosmos étoilé fini entouré d'un vide. Enfin, selon Aristote, l'Univers est fini, le nombre d'étoiles est fini et ces dernières sont situées sur la sphère des étoiles fixes.

Dans le cadre du paradoxe du ciel nocturne, une clé importante est la détermination des distances dans l'Univers, clé qui a longtemps manqué aux astronomes. Ce n'est qu'en 1838 que Bessell détermine la première distance stellaire, en mesurant la parallaxe de 61 Cygni.

Comme nous le verrons plus loin, il y a en fait deux possibilités d'interpréter ce paradoxe: soit les espaces sombres sont remplis d'étoiles qui restent invisibles et il faut rendre compte de la lumière manquante, soit les étoiles sont absentes des espaces sombres et il faut rendre compte des étoiles manquantes.

Dès le début de la Renaissance, on note un intérêt croissant pour l'extension, finie ou infinie, de l'Univers. Je ne retiendrai que certaines contributions, comme celle de Nicolas de Cuse (1401-1464), cardinal et homme d'Etat pour lequel l'Univers ne peut avoir ni bornes, ni centre. Un siècle plus tard, Thomas Digges (1545-1595) démantèle la sphère des fixes des aristotéliens en dispersant les étoiles dans l'espace. Il fut aussi le premier à formuler l'énigme de l'obscurité. Pour expliquer la non-visibilité d'un nombre illimité d'étoiles lointaines, il supposa que "la plus grande part nous reste invisible en raison de leur merveilleuse distance". Giordano Bruno (1548-1600) fut le promoteur d'un Univers dépourvu de centre et de frontière, composé d'une infinité de mondes habités.

Défenseur d'un Univers borné, Kepler (1545-1595) rejetait les systèmes épicurien et stoïcien. Pour lui, le ciel nocturne est sombre parce que l'Univers a trop peu d'étoiles pour le recouvrir. Quant à Newton (1642-1727), il considéra qu'un système soumis à sa propre gravitation est

nécessairement infini et non borné, sinon il s'effondrerait sur lui-même. Halley (1656-1742) considère l'espace comme une succession de couches sphériques contenant les étoiles. Une infinité de couches conduit alors à un ciel recouvert complètement par des étoiles. Ce n'est évidemment pas le cas et Halley émet l'hypothèse que les rayons lumineux émis par les étoiles les plus lointaines sont trop faibles pour être perçues par l'œil.

Nous rencontrons maintenant Jean-Philippe Loys de Cheseaux (1718-1751) qui fut le premier à poser correctement le problème. Nous reviendrons dans un moment à la vie et à l'œuvre de cet astronome vaudois, décédé à l'âge de trente-trois ans, et considérons maintenant son approche de ce que les astronomes nomment aujourd'hui le paradoxe de De Cheseaux-Olbers. Loys de Cheseaux suppose une distribution uniforme des étoiles. Comme Halley, il imagine des sphères concentriques de rayon croissant de façon telle que l'épaisseur des couches est constante. De plus, toutes les étoiles sont semblables au Soleil. Ainsi, chaque couche contribue de manière égale au recouvrement du ciel par les étoiles. Se basant sur le fait qu'il faut 90 000 fois la surface apparente du soleil pour recouvrir un hémisphère céleste et qu'ainsi un hémisphère céleste entièrement recouvert d'étoiles serait 90 000 fois plus brillant que le Soleil, Loys de Cheseaux calcule ensuite - et là il se distingue de Halley - que pour obtenir ce résultat il est inutile d'aller jusqu'à l'infini comme Halley. 760 mille milliards de couches d'une épaisseur de quatre années-lumière "suffiront" pour recouvrir la totalité du ciel, cela dans un rayon maximal de 3 1015 années-lumière. Le ciel devrait donc être lumineux également durant la nuit. Laissons la parole à Loys de Cheseaux :

"La différence énorme, qui se trouve entre cette conclusion et l'expérience, fait voir, ou que la sphère des étoiles fixes non seulement n'est pas infinie, mais même qu'elle est incomparablement moindre que l'étendue finie que je lui ai supposée, ou que la force de la lumière décroît en plus grande proportion que la raison inverse des carrés des distances. Cette dernière supposition est assez vraisemblable, elle demande seulement que l'espace étoilé soit rempli de quelque fluide capable d'intercepter, tant soit peu, la lumière."

En fait, cette hypothèse d'un fluide absorbant, légitime à l'époque, n'est pas la bonne solution. Un tel fluide, chauffé par le rayonnement des étoiles, devrait rayonner intensément dans l'infrarouge, ce que nous n'observons pas aujourd'hui. Remarquons toutefois que la matière

interstellaire sous une forme très diffuse existe, sa présence sera mise en évidence en 1930 et cette découverte est due à un suisse, Robert Trumpler, né à Zürich en 1885. Trumpler avait émigré aux Etats-Unis en 1913. Il s'intéressa aux amas ouverts dont il détermina la distance. Pour les plus proches, il le fit à l'aide de Céphéides et pour les plus lointains à l'aide du diagramme HR. Supposant que le diamètre des amas ouverts est à peu près identique pour tous, il eut la surprise de constater que sur la base des diamètres apparents et des distances des amas les diamètres réels augmentent avec la distance! Il comprit qu'il avait surestimé la distance et que cette surestimation provenait d'une absorption par le milieu interstellaire. Une correction de 0.7 mag/kpc faisait l'affaire. Trumpler remarqua également que l'absorption interstellaire est sélective, c'est-à-dire qu'elle dépend de la longueur d'onde.

Il est très important de savoir comment l'absorption interstellaire varie en fonction de la longueur d'onde. L'une des premières courbes donnant l'absorption en fonction de la longueur d'onde fut obtenue au Jungfraujoch par L.Divan qui publia ses résultats en 1941. Cela nous permet de déterminer la nature des grains de poussière responsables de l'absorption.

Revenons au ciel nocturne. La démarche de Loys de Cheseaux est novatrice. C'est la première fois qu'il n'est pas fait appel à l'infinitude de l'Univers mais au nombre de couches d'une épaisseur donnée qui pourraient rendre le ciel nocturne lumineux. Il est possible de faire une analogie avec une forêt. Au-delà d'une certaine distance - la limite de visibilité - les arbres se confondent en un fond continu. Le rayon maximal calculé par Loys de Cheseaux est en fait la limite de visibilité des étoiles. La lumière de celles qui sont au-delà de cette limite ne peut donc pas nous parvenir. C'est dans un appendice d'un livre consacré à la comète à six queues qu'il découvrit en 1743 que Loys de Cheseaux publia son idée sur la noirceur du ciel nocturne.

Médecin et astronome allemand, Wilhelm Olbers (1758-1840) publia en 1823 un article intitulé "Sur la transparence de l'espace". Il montre que l'hypothèse de Halley d'étoiles lointaines trop faibles pour être perçues par l'œil n'est pas convaincante et développe une théorie identique à celle proposée par Loys de Cheseaux quelques années auparavant. Son mémoire aura un impact plus important que l'appendice du Traité de la Comète et jusqu'il y a peu d'années, c'est sous le nom de paradoxe d'Olbers que l'on mentionne le paradoxe du ciel nocturne.

Au début du XXe siècle, c'est Lord Kelvin qui, dans un mémoire de 1907, reprend la discussion en calculant la limite de visibilité des étoiles, obtenant une valeur de 3 1015 années-lumière et en tenant compte de la durée de vie des étoiles. Kelvin est en effet parmi les premiers à avoir essayé de déterminer la durée de vie des étoiles. Malheureusement, à l'époque on ne connaissait pas la source de l'énergie stellaire et l'hypothèse d'une énergie résultant de la lente contraction de l'étoile conduisit Kelvin à attribuer au Soleil un âge de vingt millions d'années! Lord Kelvin conclut que la lumière des étoiles lointaines devrait voyager pendant 3 1015 ans, durée qui excède largement la durée de vie des étoiles. La dimension de l'Univers visible est ainsi inférieure à la limite de visibilité, d'où un ciel nocturne sombre. Notons que le résultat est le même avec des durées de vie stellaires calculées aujourd'hui. Finalement, vers la fin du siècle dernier (XXe siècle!), Harrison a proposé qu'il n'y avait dans l'Univers pas suffisamment d'énergie pour saturer le ciel nocturne. Partant d'une densité de l'ordre d'un atome d'hydrogène par mètre cube, il calcule que l'annihilation de toute la matière contenue dans l'Univers conduit à une température de 20 K, ce qui rend impossible un ciel nocturne brillant.

Nous avons ainsi rencontré diverses explications du paradoxe du ciel nocturne. En suivant Harrison, nous pouvons dire qu'elles se divisent en deux catégories. Dans la première, nous trouvons les explications selon lesquelles les espaces sombres sont emplis d'étoiles invisibles, soit celles de Digges, Halley, Loys de Cheseaux et Olbers, tandis que dans la seconde, nous trouvons les hypothèses de Kelvin et Harrison selon lesquelles les espaces sombres sont pratiquement vides d'étoiles. En d'autres mots, dans la première catégorie le ciel nocturne est noir parce qu'il n'y a pas assez d'étoiles, alors que dans la seconde catégorie le ciel est noir parce qu'il manque de lumière stellaire.

Avant de considérer le paradoxe du ciel nocturne à la lumière de nos connaissances actuelles en cosmologie, arrêtons-nous quelques instants à Cheseaux pour y rencontrer l'œuvre de Jean-Philippe de Loys, né à Lausanne en 1718. Son père, Paul Etienne Loys, était banneret et son grand-père maternel était Jean-Pierre de Crousaz, professeur de philosophie et de mathématiques à l'Académie de Lausanne (Académie dont il fut recteur en 1706). Jean-Philippe de Loys montra un intérêt précoce pour l'astronomie et la physique. A 17 ans, il rédige trois mémoires de physique et un d'astronomie (sur les satellites en général et sur ceux de Saturne en particulier), mémoires communiqués par son grand-père à l'Académie des Sciences de Paris. Mais ses intérêts ne se

limitent pas seulement à l'astronomie et à la physique. Il publie des écrits théologiques et s'intéresse aux sciences actuarielles. Une œuvre posthume est intitulée "Probabilité sur la longueur de la vie humaine". Il sera membre correspondant des Académies des Sciences de Paris et de St-Pétersbourg. Malheureusement sa santé est fragile et il se voit dans l'obligation de renoncer à la direction de l'Observatoire de St-Pétersbourg, décédant peu après en 1751 à l'âge de 33 ans, laissant une œuvre astronomique fort importante. De 1736 à 1747, il observe depuis le domaine familial, le Château de Cheseaux, avec une lunette de quatorze pieds et un télescope de deux pieds. Il établira ainsi une liste de vingt-et-une "nébuleuses", dont sept découvertes par lui-même.

Pour mesurer l'importance de ces découvertes, mentionnons que selon un article de Bigourdan paru en 1884, 54 "nébuleuses" étaient connues à la fin du XVIIe siècle et que 21, dont les 7 de Loys de Cheseaux, le furent entre 1700 et 1750. La liste des "nébuleuses" observées par Loys de Cheseaux fut transmise par de Crousaz à Réaumur qui en donna lecture lors d'une séance de l'Académie des Sciences de Paris. Il est intéressant de noter que dans sa lettre à son grand-père, Loys de Cheseaux écrit après avoir mentionné M11: "Ces 14 nébuleuses contiennent entre elles presque autant d'étoiles visibles avec les lunettes de 25 pieds que la moitié du ciel en contient de visibles aux yeux. Voici maintenant les nébuleuses proprement dites, et qui, vues avec les plus grands télescopes, ne paraissent toujours que des nuages blancs".

Pour déterminer la distance des étoiles brillantes, Loys de Cheseaux utilisa une méthode proposée par Gregory, astronome écossais, méthode qui consiste à comparer l'éclat de ces étoiles à celui de Mars, Jupiter et Saturne, obtenant ainsi une estimation de leur diamètre apparent. Comparant ce dernier à celui du Soleil dont il connaissait la parallaxe et par là la distance, il obtint pour les étoiles les plus brillantes une distance de 240 000 unités astronomiques, soit 4 années-lumière.

Mais l'œuvre magistrale de Jean-Philippe Loys de Cheseaux est son "Traité de la Comète qui parut en Décembre 1743 et en Janvier, Février et Mars 1744". Ce traité fut publié en 1744 à Lausanne et Genève chez Marcel Bousquet et Cie. Le 13 décembre 1743, Loys de Cheseaux découvrait à l'œil nu une comète, comète qui eut la particularité de présenter six queues. Il l'observa jusqu'au 1er janvier 1744. Appliquant la théorie de Newton, suivant en cela Halley, il calcula les éphémérides de la comète du 1er janvier au 1er juin 1744. Des observations de la comète

furent faites jusqu'au début du mois de mars à Paris par Cassini, à Genève par Calandrini et à Cheseaux par le découvreur. Les éphémérides calculées par Loys de Cheseaux s'avèrent correctes. Ce résultat était de bon augure pour la prédiction de Halley. Rappelons que Halley avait prédit pour l'an 1759 le retour de "sa" comète observée en 1682. Sa prédiction avait ainsi toutes les chances d'être réalisée et la théorie de Newton d'être ainsi vérifiée.

Examinons maintenant le paradoxe du ciel nocturne dans le cadre de la cosmologie du XXe siècle. Déterminant en 1924, à l'aide de Céphéides, la distance de M31, Hubble mit un terme à la longue discussion concernant la nature des galaxies spirales et le concept de galaxie voyait ainsi le jour. Depuis, grâce aux développements technologiques qui nous ont permis de construire des télescopes toujours plus performants, pensons au Hubble Space Telescope et au Very Large Telescope de l'European Southern Observatory, des galaxies toujours plus nombreuses ont été découvertes et ces "nébuleuses" ont révélé bien quelques-uns de leurs secrets. Je prendrai un exemple parmi celles découvertes par Loys de Cheseaux, celle de l'Aigle ou M16. Loys n'y avait vu qu'un amas d'étoiles. Les observations récentes du HST et du VLT nous montrent non seulement un amas ouvert, mais aussi une splendide nébuleuse dans laquelle apparaissent des zones de poussières très denses et de gros nuages moléculaires sombres, berceaux de nombreuses étoiles.

Deux découvertes majeures sont faites au cours du XXe siècle. Tout d'abord, en 1929, la loi de Hubble ($V = Hd$) exprimant que notre Univers est en expansion. Puis, en 1965, la découverte par Penzias et Wilson du rayonnement cosmologique à 3K, résidu du Big Bang. Cette dernière découverte implique que notre Univers a un âge, une histoire. La théorie de la Relativité Générale d'Einstein (1916) va permettre la construction de modèles d'Univers. Parmi l'ensemble des modèles possibles, il faut retenir ceux qui correspondent à un Univers en expansion et ayant une origine spatio-temporelle. Ce seront les modèles de Friedmann. Trois modèles sont à disposition:

- un modèle hyperbolique (univers ouvert et toujours en expansion),
- un modèle euclidien (univers également ouvert et toujours en expansion)
- un modèle elliptique (univers fermé et se contractant après une certaine durée).

Pour déterminer le modèle d'Univers dans lequel nous vivons, il nous faut connaître la densité de ce dernier.

L'âge de l'Univers implique l'existence d'un horizon cosmologique. Cela

provient du fait que la vitesse de la lumière a une valeur finie ($c = 300\,000 \text{ kms-1}$). Si l'âge de l'Univers est de x milliards d'années, il n'est pas possible d'observer des objets plus lointains que x milliards d'années-lumière, ce qui détermine l'horizon cosmologique. L'Univers peut être infini du point de vue géométrique, mais l'Univers observable est bien fini. Mais quelle est la dimension de cet Univers observable? La réponse nous est donnée, nous venons de le voir, par l'âge de l'Univers.

La détermination de cet âge a fait ces vingt dernières années l'objet de plusieurs approches, mais ce n'est que récemment que deux projets utilisant les supernovae de type Ia comme chandelles cosmologiques ont conduit à déterminer un âge plus fiable que ce que l'on connaissait jusqu'ici. Grâce à des observations, faites notamment avec le Hubble Space Telescope, le VLT et le télescope américain Keck, des supernovae ayant une grande valeur de z (le décalage vers le rouge) ont pu être observées.

Ces observations ont conduit à un résultat surprenant: à grand z , soit à grande distance, les supernovae observées sont trop faibles pour être compatibles avec l'hypothèse d'un Univers rempli seulement de matière et de rayonnement. De plus, l'Univers est non seulement en expansion, mais en expansion accélérée. Si les deux composantes de l'Univers que nous connaissons bien (matière et rayonnement) sont accompagnées d'une troisième, appelée, faute de mieux, l'énergie sombre, quelle est alors la nature de cette dernière? Deux hypothèses ont été proposées, hypothèses que je ne mentionne que brièvement. Tout d'abord, l'énergie du vide, invoquée depuis quelques années et un concept nouveau, celui de la quintessence, effet de la désintégration d'un champ de particules.

La détermination de la distance de ces supernovae lointaines a aussi conduit à une meilleure détermination de l'âge de l'Univers, soit 14.5 milliards d'années. Cela correspond donc à un horizon cosmologique de 14.5 milliards d'années-lumière et nous souvenant que la limite de visibilité selon Loys de Cheseaux et Lord Kelvin est de $3 \cdot 10^{15}$ années-lumière, le paradoxe soulevé par Loys de Cheseaux trouve ainsi sa solution. Le rayon de l'Univers observable limité par l'horizon cosmologique est bel et bien inférieur à la limite de visibilité.

Bernard Hauck