

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 159 - Septembre 2017 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 159 - automne 2017



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2017

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjoint : Jean-Luc Fouquet

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
Communication : Charles-Henri Eyraud
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site :
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Francis Berthomieu, Marc Bussière, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Suzy Collin-Zahn, Françoise Combes, Domitille et Jean-Louis Coustillet, Hervé Faivre, Bettina Goy, François Hurter, Christian Larcher, Georges Lecoutre, Jean-Pierre Maillard, Jean-François Mugnier, Élodie Prieur, Béatrice Sandré, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 159, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Messier 31, qu'on appelait encore il y a moins d'un siècle la « nébuleuse » d'Andromède, est la seule galaxie visible à l'œil nu depuis l'Europe. Située à 2,5 millions d'années-lumière, elle s'approche de nous à la vitesse de 120 km/s et devrait rencontrer la Voie lactée dans environ 4 milliards d'années

Cette image faite en ultraviolet par le petit télescope spatial GALEX montre une structure en anneau qui serait le signe d'une ancienne collision avec M32.

Image NASA / JPL-Caltech

Les Cahiers Clairaut

Automne 2017

Éditorial

Le xx^e siècle nous a appris que les étoiles suivaient, comme nous, un processus qui va de la naissance à la mort. À présent, nous découvrons qu'il en est de même dans le monde fabuleux des galaxies. Celles-ci naissent juste après le Big Bang, mènent une vie tourmentée faites de rencontres, de déformations, de fusions avant de prendre leur retraite, parfois très tôt, lorsqu'elles ne forment plus d'étoiles. À l'aide d'ordinateurs très puissants, on réalise une cartographie de ces grandes structures « qui brillent comme des lucioles dans un réseau de filaments de matière » dessinant une immense toile cosmique.

À côté de ces galaxies ordinaires, il en existe d'autres encore plus agitées, les « galaxies à noyau actif ». Toutes les galaxies possèdent au centre un « ogre gigantesque » : un trou noir massif de plusieurs millions ou milliards de masses solaires. Parmi les grandes questions qui se posent actuellement, celle de la masse ordinaire manquante par rapport aux mesures est surprenante. Où est donc passée la matière ordinaire ? C'est un problème non résolu même si l'on suppose qu'elle pourrait se trouver dans les filaments de la toile cosmique associée à de la matière noire.

Un article propose d'entraîner les élèves à la détermination des ordres de grandeurs et à la notation scientifique. Par exemple en comparant le nombre approximatif des galaxies au nombre estimé des grains de sable sur les côtes maritimes ou à celui du nombre de gouttes d'eau dans les océans. Ou bien de « peser » une galaxie par différentes méthodes.

Plus simplement, dans le cadre des TPE, une élève de première S nous propose différentes méthodes expérimentales pour retrouver le diamètre de la Terre et de la Lune et des distances astronomiques. Pour les amateurs de voyages dans l'espace et dans le temps, les uchronies, les extra-terrestres... nous vous recommandons une passionnante histoire de la SF, propice à un travail interdisciplinaire.

Dans ce numéro nous débutons une étude sur l'histoire de la spectroscopie allant du spectroscope à prisme au spectrographe à réseau. Dans un autre numéro sera abordé son prolongement moderne, la spectroscopie de Fourier.

Christian Larcher, pour l'équipe

Sommaire

Histoire

Histoire de la spectroscopie (1)

JP Maillard

p 2

Avec nos élèves

Mesures de distances et de diamètres (TPE)

Élodie Prieur

p 7

Thème : les galaxies

Article de fond

La vie des galaxies

Françoise Combes

p 13

Histoire

Les galaxies, histoire des découvertes

Pierre Causeret

p 18

Article de fond

Les galaxies actives

Suzy Colin-Zahn

p 21

Mots croisés

p 26

Avec nos élèves

Activités sur le thème des galaxies

Hervé Faivre

p 27

Avec nos élèves

Une photo de galaxie par des collégiens

Jean-Michel Vienney

p 30

Histoire

Une brève histoire de la science-fiction

Marc Bussière

p 32

Ciel de l'automne

Pierre Causeret

p 37

Vie de l'association

Notre première école d'été

D & JL Coustillet

p 38

L'éclipse du 21 août 2017

Bettina Goy et François Hurter

p 39

Lecture pour la marquise

Le paradoxe des jumeaux

p 40

Solutions mots croisés

p 40

HISTOIRE

Histoire de la spectroscopie (1) : du spectroscopie à prisme au spectrographe à réseau

Jean-Pierre Maillard, Institut d'Astrophysique de Paris (jean-pierre.maillard@iap.fr)

Dans cette première partie, Jean-Pierre Maillard décrit l'évolution historique de la spectroscopie, initialement en utilisant des prismes, puis progressivement des réseaux en réflexion ou en transmission. Le prochain article abordera une autre méthode : la spectroscopie de Fourier.

La *spectroscopie* qui désigne la méthode d'analyse de la composition de la lumière constitue le moyen fondamental pour déterminer les conditions physiques et les constituants d'une source de lumière. Elle joue un rôle décisif en astronomie, la lumière étant la principale messagère des sources célestes. L'observation spectroscopique implique la construction de *spectromètres*, littéralement appareils à mesurer un *spectre*. Ces instruments ont une histoire liée aux progrès de la découverte des propriétés de la lumière et à ceux des moyens de la détecter. Le présent article retrace les principales étapes qui ont conduit du *spectroscopie à prisme* inventé au début du XIX^e s. au *spectrographe à réseau*, qui s'est généralisé. Ces dispositifs dispersent la lumière pour en former le spectre. Un deuxième article présentera une toute autre méthode, basée sur un montage optique dénommé *interféromètre*, inventé à la fin du XIX^e s., la *spectroscopie de Fourier*, qui utilise l'analyse mathématique dont ce physicien français du XIX^e s. est l'auteur.

Découverte de la composition de la lumière

On attribue à Newton (1643-1727) la mise en évidence (1666) de la propriété d'un prisme en verre de décomposer la lumière, qui s'explique par la loi de la réfraction décrite auparavant par Descartes (1637). Il partagea la lumière solaire sortant du prisme en sept couleurs élémentaires, allant du violet au rouge. En traversant le prisme, par l'effet de la réfraction, la lumière bleue est plus déviée que la lumière rouge, ce qui sépare spatialement les couleurs (figure 1). Avec cette même loi, Newton expliquera le phénomène de l'arc-en-ciel, manifestation naturelle de la dispersion de la lumière.

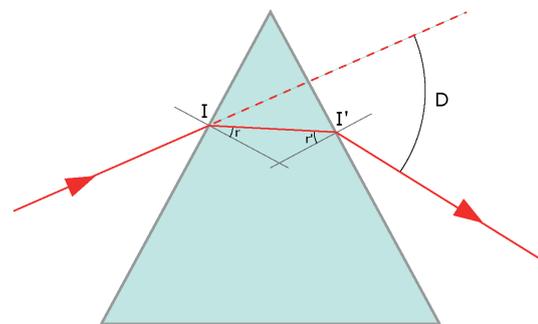


Fig. 1. Trajet d'un rayon lumineux dans un prisme. La déviation totale du rayon incident représentée par l'angle D dépend de la « couleur » de la lumière.

William Herschel (1738-1822), astronome anglais célèbre pour sa découverte en 1781 d'une nouvelle planète, Uranus, se demanda en 1800 si les rayons du Soleil qui nous éclairent et nous chauffent, possèdent une *puissance calorifique* qui dépend de leur couleur. Pour cela, il installa trois thermomètres, l'un éclairé par la lumière solaire dispersée par un prisme et les deux autres placés à côté, en dehors du faisceau lumineux. Il constata en déplaçant ensemble les trois thermomètres du violet au rouge que la température lue sur le premier augmentait tandis que celle des deux autres ne changeait pas. Il poursuivit son expérience en plaçant ses thermomètres au-delà de la limite du rouge (figure 2) et mesura alors une différence de température encore plus forte entre le premier thermomètre et les deux autres. Il en déduisit la présence de *rayons calorifiques invisibles*, nommés depuis *rayons infrarouges* (IR). Il conclut que ces rayons même invisibles pouvaient être appelés « lumière » comme ceux qui nous éclairent puisqu'il n'observait pas de discontinuité en déplaçant son thermomètre de la partie visible à la partie invisible au-delà du rouge.



Fig. 2. Expérience d'Herschel qui lui permet de mettre en évidence l'existence du rayonnement infrarouge.

En apprenant la découverte faite par Herschel, Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) commença en 1801 des expériences pour voir s'il ne pourrait pas détecter de la lumière invisible dans le spectre solaire au-delà du violet. Avec un montage semblable, il utilisa du chlorure d'argent, substance chimique connue pour sa propriété de noircir en présence de lumière. Il déplaça ce produit déposé sur une plaque, du rouge vers le violet et au-delà et constata qu'il noircissait très lentement éclairé par la lumière rouge et immédiatement placé après le violet. Ritter nomma cette lumière invisible *rayons chimiques*, appelés ensuite *rayons ultraviolets* (UV). Ces deux expériences marquent les prémices de la spectroscopie.

Aux origines de la spectroscopie

Il faut attendre Joseph von Fraunhofer (1787-1826) pour assister à la véritable naissance de la spectroscopie. En 1814, il isole un pinceau de lumière de la source par une fente découpée dans un écran avant de traverser un prisme. La lumière dispersée tombe sur une règle en verre graduée que l'on examine avec un oculaire, dispositif appelé pour cette raison un *spectroscope*. Fraunhofer note sur la règle la présence de traits verticaux brillants, parallèles à la fente d'entrée, lorsque la source est une flamme et de traits sombres sur un fond brillant quand c'est le Soleil, traits qu'il nomme *raies*. La spectroscopie

était née par la mise en évidence de « raies » dans la composition de la lumière solaire. Le changement de couleur d'un bout à l'autre de la règle a conduit, en même temps qu'était découverte la nature ondulatoire de la lumière, à la notion fondamentale de *longueur d'onde*, désignée couramment par la notation λ , paramètre qui distingue les couleurs et détermine la composition d'une lumière. Entre le violet et le rouge, λ varie continuellement de 400 à 700 nm. Chaque raie observée dans cet intervalle se trouve affectée d'une longueur d'onde précise qui la caractérise.

Trois ans plus tard, Fraunhofer réalisa un dessin, premier spectre solaire publié (figure 3), montrant la position des raies sombres repérées grâce à son spectroscope, qu'il désigna par des lettres pour les plus intenses. Certaines de ses notations sont encore utilisées comme *raies D, H et K*, appelées encore *raies de Fraunhofer*.



Fig. 3. Spectre solaire dessiné par Fraunhofer en 1817 avec les principales raies repérées par des lettres.

Il s'intéressa dès 1821 aux propriétés dispersives d'une série de fentes étroites parallèles, réalisée par des fils métalliques tendus, également espacés, formant un système appelé *réseau* (grating en anglais) qui fonctionnait en transmission. Fraunhofer réalisa ensuite des réseaux formés par des traits parallèles gravés sur un miroir, augmentant le nombre équivalent de fentes. Il ira jusqu'à 302 traits par mm, inventant le *réseau par réflexion*. Il remplaça dans son spectroscope le prisme par un tel réseau, avec lequel il put mesurer les positions de 476 raies du Soleil.

En France, en 1842, Edmond Becquerel (1820-1891) qui s'intéressait aussi à la spectroscopie du Soleil eut l'idée de remplacer la règle graduée du spectroscope par un daguerréotype, l'ancêtre de la plaque photographique, du nom de l'inventeur qui l'avait mis au point quelques années auparavant. Avec ce montage, il réalisa pour la première fois un *spectrographe* qui lui permit, grâce à la photographie, une reproduction exacte du spectre solaire, sans plus avoir besoin d'un dessin.

L'identification du spectre solaire

Le physicien Gustav Kirchhoff (1824-1887) à Heidelberg perfectionne le spectroscope à prisme de Fraunhofer par le choix de verres appelés *flints*, qui augmentent la dispersion de la lumière. Il introduit une lentille collimatrice après la fente d'entrée, de telle sorte que le prisme soit éclairé par un faisceau

parallèle, et une lentille collimatrice après le prisme qui ainsi forme l'image du spectre sur la règle graduée, donnant un instrument beaucoup plus lumineux.

Avec ce montage, entre 1859 et 1861, Kirchhoff et son collaborateur Bunsen (1811-1899), obtiennent avec la flamme d'un brûleur (figure 5) des spectres du sodium, du potassium, du fer et d'autres éléments chimiques, avec lesquels ils entreprennent l'identification des atomes responsables des raies relevées par Fraunhofer dans le spectre solaire. Ils écrivent : « *Les raies sombres dans le spectre solaire qui ne sont pas causées par l'atmosphère terrestre viennent de la présence dans l'atmosphère brillante du Soleil de ces substances qui dans une flamme produisent des raies brillantes à la même position* ».

Leur étude inaugure l'application majeure de la spectroscopie qui est de permettre l'identification des éléments chimiques présents dans une source céleste. Par ailleurs, la méthode de comparaison entre spectres de laboratoire et spectres astronomiques qu'ils ont mise en œuvre est toujours utilisée.

Ils découvrent aussi la notion fondamentale de *spectre d'émission* et de *spectre d'absorption* d'un même élément (voir encadré). Grâce aux progrès des plaques photographiques, des spectrographes à prisme seront installés derrière des lunettes astronomiques pour cette fois placer sur la fente d'entrée des étoiles, marquant le vrai début de l'astrophysique. Ces observations conduiront à la classification des étoiles par types spectraux, distingués par leur température de rayonnement, caractérisés par leurs spectres qui révèlent des compositions chimiques différentes.

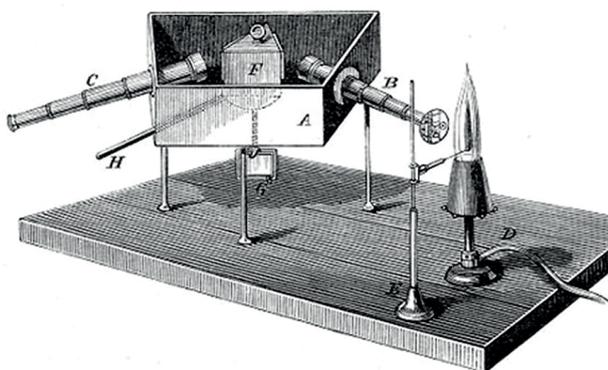


Fig. 4. Spectroscopie à prisme de Kirchhoff et Bunsen pour leurs travaux en laboratoire. Avec à l'entrée une fente, la boîte A porte la collimatrice B, l'oculaire C et le prisme F. En D est un brûleur et un support E tient l'élément dont on prend le spectre.

Spectre d'émission et spectre d'absorption

Un spectre décrit la distribution de l'énergie lumineuse d'une source en fonction de la longueur d'onde. On parle de *spectre d'émission* quand cette distribution présente des pics isolés. Au contraire, des minima étroits d'énergie dans cette fonction indiquent un *spectre d'absorption* (figure 5). Le niveau entre les *raies d'absorption* suppose l'existence de sources qui émettent un *spectre continu*, ne présentant aucune raie comme le spectre d'une lampe à incandescence. Au laboratoire, le spectre d'absorption d'un gaz est obtenu avec la lumière d'une telle source qui après traversée d'un tube rempli du gaz, entre dans un spectrographe. Trois paramètres principaux déterminent l'aspect d'un spectre d'absorption : la température, la pression du gaz et la longueur du parcours de la lumière dans le gaz. Il est en fait impossible de simuler ainsi l'atmosphère du Soleil ou d'une étoile. La solution, découverte par Kirchhoff et Bunsen, consiste à obtenir des spectres en émission avec un brûleur. Ainsi les éléments étudiés sont portés à haute température qui, sans être égale, se rapproche de celle du Soleil. Ils sont vaporisés et émettent de la lumière donnant un spectre en émission. Une décharge électrique dans le gaz contenu dans un tube constitue une autre source d'excitation, plus couramment utilisée.

Mais l'identification d'un élément dans le spectre solaire par comparaison avec son spectre d'émission s'avère possible parce qu'une raie donnée peut se former en émission ou en absorption selon les conditions d'excitation. L'observation des spectres a conduit aussi les physiciens à se poser la question des mécanismes de formation des raies d'un élément, à commencer par le plus simple, l'hydrogène. Pour parvenir à les expliquer, une nouvelle physique, née au début du XX^e s., a dû être développée, la *mécanique quantique*. La description qu'elle permet de la structure des atomes, des liaisons entre atomes dans les molécules, qui donnent naissance aux raies observées, représente un autre volet majeur de la spectroscopie.

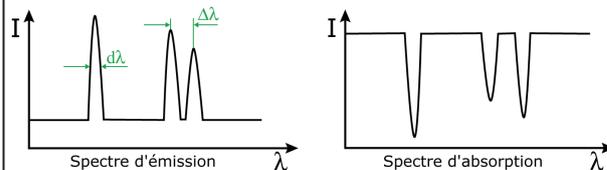


Fig. 5. Schémas d'un spectre d'émission et d'un spectre d'absorption.

L'avènement du spectrographe à réseau

La *résolution spectrale*, notée R , constitue la caractéristique essentielle d'un spectromètre. Elle est égale à $\lambda/d\lambda$ où λ est la longueur d'onde considérée et $d\lambda$ le plus petit domaine de longueur d'onde que l'instrument permet d'identifier en ce point. Elle exprime la capacité de l'instrument de séparer deux raies proches. Si les sommets de deux raies sont

séparés par $\Delta\lambda$ (figure 5), elles apparaissent distinctes si $d\lambda < \Delta\lambda$. Pour un même domaine, plus de raies apparaissent avec R élevé. En éclairant le spectromètre par une source émettant une raie fine et intense, idéalement un laser, mais aussi une lampe emplie d'un gaz à basse pression, la largeur à mi-hauteur mesurée sur le spectre de cette raie donne $d\lambda$. Une valeur de $R \approx 100$ est qualifiée de « basse résolution ». Une « haute résolution » signifie généralement $R \geq 10^5$. La résolution des spectroscopes fut améliorée en sélectionnant pour les prismes des verres à grand pouvoir dispersif, les flints. Des spectroscopes avec plusieurs prismes en série ont été construits, multipliant ainsi la dispersion de la lumière par le nombre de prismes. Un montage mérite d'être signalé, inventé en 1862 à Vienne par Ludwig von Littrow (1811-1877) avec un prisme qui porte son nom. Le montage est décrit par un observateur français : « *Dans ce spectroscope, la lumière au sortir du collimateur traverse plusieurs prismes et tombe sur un dernier de 30° dont la face postérieure est étamée. Le faisceau revient donc sur lui-même, traverse à nouveau les prismes et rentre dans la lunette collimatrice* ». Dans le prisme de Littrow la lumière est réfractée par la première face puis réfléchi par le miroir et à nouveau réfractée par la face d'entrée. Il donne donc une dispersion finale égale à celle d'un prisme de 60°. Placé à la suite d'une série de prismes, il permet de doubler la dispersion totale. Toutefois, ces montages compliqués sont rares. La résolution atteinte par le spectroscope à prisme unique demeure au mieux de l'ordre de 1000. De plus, la dispersion des verres qui détermine la résolution n'est pas constante, plus forte dans le bleu que dans le rouge. Dans le dernier quart du XIX^e s., le prisme commence à être remplacé par les premiers réseaux par réflexion qui vont permettre d'atteindre des résolutions beaucoup plus élevées. Le réseau combine les effets de *diffraction* de la lumière par une fente étroite et d'*interférence* entre les rayons de même direction issus de chaque fente. Il généralise l'expérience menée en 1803 par Thomas Young (1773-1829) avec deux fentes. La séparation entre deux fentes successives, paramètre caractéristique du réseau, se nomme le *pas*. Si i est l'angle d'incidence sur le réseau d'un rayon de lumière de longueur d'onde λ , l'angle de sortie r est donné par la relation fondamentale :

$$\sin r = \sin i + k \lambda / a$$

où k est un nombre entier appelé ordre et a le pas du réseau. Pour voir le rôle de k et a prenons $i = 0^\circ$, soit $\sin r = k\lambda/a$. Sachant que $|\sin r| < 1$, pour une valeur donnée de a , la longueur d'onde λ peut se trouver

diffractionnée pour plusieurs valeurs de k , positives et négatives. Avec un faisceau incident de lumière visible, pour que toute la lumière sorte et seulement dans les ordres $+1$ et -1 , a doit être supérieur à la plus grande longueur d'onde présente dans la lumière analysée, mais peu différent pour une variation notable de r avec λ . Avec $a = 2 \mu\text{m}$, r varie entre $11,5^\circ$ et $20,5^\circ$, soit 9° pour λ entre $0,4$ et $0,7 \mu\text{m}$. La dispersion passe à $20,8^\circ$ pour $a = 1 \mu\text{m}$ (de $23,6^\circ$ à $44,4^\circ$) montrant que ce dispositif permet une grande dispersion de la lumière, nécessaire pour atteindre de hautes résolutions. Des dispersions plus grandes demandent un pas encore plus petit et ensuite une limitation du domaine spectral couvert. Notons que $a = 1 \mu\text{m}$ signifie 1 000 traits/mm.

Des machines à graver les réseaux sont construites à partir de 1881 par le physicien américain Henry Rowland (1848-1901), qui atteindront des valeurs de 800 traits/mm. Une pointe diamantée portée par une vis de grande précision est animée d'un mouvement de translation pour graver un sillon sur la hauteur d'un miroir. Puis la vis tourne d'un tour pour déplacer la pointe, le pas de la vis étant égal au pas du réseau, et graver un nouveau sillon. Le processus est long et délicat. Des réseaux avec des densités de traits plus élevées attendront encore plusieurs années. Mais le nom de Rowland demeure associé à l'invention du *réseau concave* car gravé sur un miroir sphérique. En plaçant la fente d'entrée sur le cercle dit de Rowland le schéma optique du spectrographe est simplifié puisque la lentille pour éclairer le réseau et celle pour faire l'image du spectre ne sont plus nécessaires. Ce montage qu'il utilisa pour améliorer la résolution du spectre solaire, a toutefois l'inconvénient que le spectre se forme sur ce cercle, obligeant à courber le détecteur. Il demeure utilisé pour des applications dans l'UV lointain où pour une efficacité optique suffisante un minimum de pièces optiques s'impose.

La généralisation de l'emploi de la plaque photographique placée au foyer du collimateur de sortie sur laquelle se forme l'image du spectre de la source étudiée, marqua l'avènement du *spectrographe à réseau* qui permet l'enregistrement de l'image du spectre qui peut ainsi être mesuré et conservé.

La spectroscopie au-delà du visible

Les premiers spectrographes à réseau utilisaient la configuration optique du spectroscope, avec lentilles collimatrices à l'entrée et après le réseau (figure 4). Le montage devenu classique, dit de « Czerny-Turner », du nom de ses deux inventeurs à Berlin en

1930, a consisté à remplacer les lentilles collimatrices par des miroirs convergents de même focale (figure 6). En fait, dès 1889, le spectroscopiste allemand Hermann Ebert (1861-1913) avait eu l'idée de remplacer les lentilles par un seul grand miroir sphérique, une moitié servant pour le faisceau d'entrée, l'autre pour celui de sortie. Ce montage sera repris en 1952 par l'américain William Fastie (1916-2000) sous le nom « Ebert-Fastie », installé dans des fusées car très compact, pour les premiers essais de spectroscopie depuis l'espace. Ces deux montages étaient motivés par le souci d'étendre l'analyse spectroscopique au-delà du domaine visible où elle se trouvait limitée par la plaque photographique, avec Czerny-Turner en infrarouge et Ebert-Fastie dans l'ultraviolet. Pour ce faire, dans le montage de la figure 6, une fente est placée en sortie comme à l'entrée. Ce dispositif dénommé *monochromateur* permet de faire tomber une seule longueur d'onde sur une cellule photo-électrique sensible à la lumière non visible, détecteur qui commençait à se développer. En pivotant avec précision le réseau autour d'un axe parallèle aux traits, placé au milieu de sa surface, on « balaie » le spectre de la source. Ainsi furent obtenus les premiers spectres de sources IR puis UV en laboratoire.

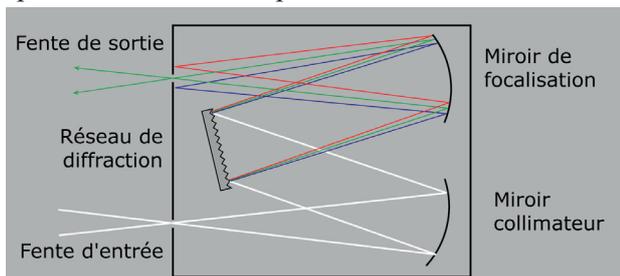


Fig. 6. Montage optique d'un monochromateur à réseau de type Czerny-Turner.

Une autre révolution, débutée dans les années 80 et qui se poursuit, fut réalisée par le développement des détecteurs photo-électriques panoramiques, ou mosaïques de détecteurs. La plaque photographique fut bien sûr le premier détecteur panoramique. Mais aussi bien dans les appareils pour particuliers que dans les caméras spécialisées, elle est maintenant remplacée par les détecteurs CCD (Charge-coupled device) à base de silicium, beaucoup plus sensibles et permettant une digitalisation directe des images. Leur dimension est donnée en nombre de pixels, donc en nombre de détecteurs individuels rassemblés sur un même support. Avec au début au mieux 100×100 , des CCD de $4\,000 \times 4\,000$ pixels sont aujourd'hui courants. Différentes techniques ont permis d'adapter leur sensibilité vers l'UV et même jusqu'aux rayons X.

À partir des années 90, les premières mosaïques de détecteurs IR sont apparues, qui travaillent à très basse température, avec diverses combinaisons de matériaux semi-conducteurs suivant le domaine spectral, et d'autres avec des *bolomètres* à base de germanium pour accéder à l'infrarouge lointain. Ces détecteurs ont permis de supprimer le besoin d'un monochromateur, améliorant considérablement la sensibilité des spectrographes, et d'en étendre l'usage sur de larges domaines en dehors du visible.

Conclusion

Le spectrographe à réseau s'est imposé donc dans tous les domaines spectraux où il est possible de réaliser des réseaux et grâce à de nombreux progrès dans leur fabrication. Des études ont précisé l'influence du profil des traits sur l'efficacité du réseau. Elles ont conduit aux *réseaux échelle*, un profil en forme de marche d'escalier adapté pour une utilisation sous un grand angle d'incidence donnant une réflexion maximum dans les ordres élevés, qui permettent d'atteindre les très hautes résolutions. Mais plusieurs ordres se trouvent superposés. Un filtre peut être placé à l'entrée du spectrographe pour isoler un seul ordre, mais le domaine spectral est alors très étroit. La solution adoptée pour les grands spectrographes consiste à introduire à la suite du réseau échelle un réseau de faible dispersion dans une direction perpendiculaire afin de séparer les ordres, formant un spectrographe à *dispersion croisée*. Pour rendre les réseaux plus accessibles, sachant la difficulté de leur gravure, des techniques de réplique ont été mises au point pour fabriquer à moindre coût de nombreuses copies à partir d'un modèle. Mais la haute résolution vers les courtes longueurs d'onde demande des réseaux à plusieurs milliers de traits par mm. Ils sont obtenus avec les réseaux *holographiques*. Des franges d'interférence parallèles très serrées par laser formées sur une couche de résine photosensible déposée sur un support plan poli, génèrent dans l'épaisseur de la couche des sillons de profil sinusoïdal. Des densités jusqu'à 6 000 traits/mm sont ainsi réalisées.

Mais la rapidité de la technique fait qu'elle remplace désormais souvent les répliques de réseaux gravés. Ainsi le spectrographe est utilisé du visible jusqu'aux rayons X, dernier domaine où les difficultés techniques à résoudre étaient grandes du fait des longueurs d'onde très petites, de 0,1 à 2 nm. Du côté de l'infrarouge, au-delà de $250\ \mu\text{m}$ il n'est plus possible de construire de réseaux. D'autres techniques doivent prendre le relais, dont la spectroscopie de Fourier qui fera l'objet de l'article II. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Mesures de distances et de diamètres avec les méthodes des premiers scientifiques

Élodie Prieur, lycée Pierre Bourdieu, Fronton

En utilisant les méthodes des premiers scientifiques, des élèves de 1^{ère} S refont, dans le cadre des TPE, des expériences permettant de mesurer les distances ainsi que les diamètres des objets astronomiques proches.

Je présente ici quelques activités scientifiques que j'ai effectuées au cours de l'année scolaire 2015-2016 sur le thème de l'astronomie, alors que j'étais en classe de première S, option SVT, dans le lycée Pierre Bourdieu de Fronton (Haute-Garonne). Pour ces activités, j'ai pu bénéficier de l'aide de J.L. Prieur, astronome à l'Observatoire Midi-Pyrénées et animateur du Club d'Astronomie de Villemur¹. Le but recherché était la détermination de distances et de diamètres d'objets astronomiques, en utilisant les méthodes des premiers scientifiques.

Avec trois autres étudiants du lycée, pour les Travaux Personnels Encadrés, nous avons choisi le thème « Microscopique Macroscopique ». Ce thème nous a permis d'aborder plusieurs sujets différents, dont une partie consacrée à l'observation au microscope de petits objets et une autre partie à la construction d'un instrument optique permettant d'observer à la fois des objets lointains ou proches. Je présente ici la partie dont je me suis occupée et qui concerne l'astronomie.

Détermination du diamètre de la Terre (méthode d'Ératosthène)

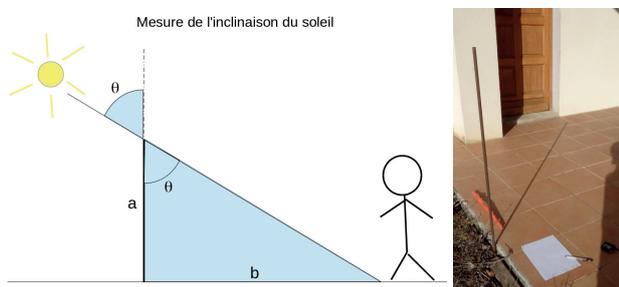


Fig.1. Mesure de l'angle θ , distance zénithale du Soleil au solstice d'hiver, lors de son passage au méridien à partir de l'ombre d'un piquet vertical.

a. Principe de la mesure.

b. Cliché d'une des installations utilisées le 26/12/2015 à Villariès.

Nous avons effectué une mesure de l'angle zénithal du Soleil à Villariès le 26/12/2015, lors du passage au méridien. Nous supposons ici que cette mesure correspond au solstice d'hiver, car cette date est suffisamment proche du solstice d'hiver, qui était précisément le 22/12/2015 (cet angle varie peu au voisinage du solstice). Le principe consiste à mesurer la longueur de l'ombre d'un piquet vertical (figure 1). La valeur de l'ombre la plus courte est observée au moment du passage du Soleil au méridien :

$$\tan(\theta) = b_{\text{mini}}/a$$

Pour obtenir une estimation des erreurs, nous avons utilisé deux piquets, de hauteur 1,035 m et 1,685 m. Les mesures sont reportées dans le tableau 1.

Heure (T.L.)	Valeurs de b (en m)	
	pour a = 1,035 m	pour a = 1,685 m
12 h 55	2,38	3,90
12 h 58	2,38	3,89
13 h 01	2,37	3,87
13 h 04	2,38	3,89

Tableau 1. Mesure de la longueur de l'ombre b, lors du passage du Soleil au méridien, le 26/12/2015 à Villariès, pour chacun des deux piquets utilisés (cf. figure 1).

L'ombre la plus courte correspond dans les deux cas aux mesures effectuées à 13 h 01.

Nous en déduisons deux mesures de la tangente de cet angle :

- pour le petit piquet, $\tan(\theta) = 2,37/1,035 = 2,2898$
- pour le grand piquet, $\tan(\theta) = 3,87/1,685 = 2,2969$

La moyenne de ces deux valeurs est donc

$$\tan(\theta) = 2,293 \pm 0,003 \text{ d'où } \theta = 1,159 \pm 0,001 \text{ rad}$$

La figure 2a (page suivante) montre que la longueur L_θ de l'arc MC vaut : $L_\theta = \theta_{\text{rad}} \times R_T$ où θ_{rad} est la valeur de θ en radians et où R_T est le rayon de la Terre.

On en déduit la valeur du diamètre de la Terre :

$$D_T = 2 L_\theta / \theta_{\text{rad}}$$

1 <http://www.astrosurf.com/cav-villemur>

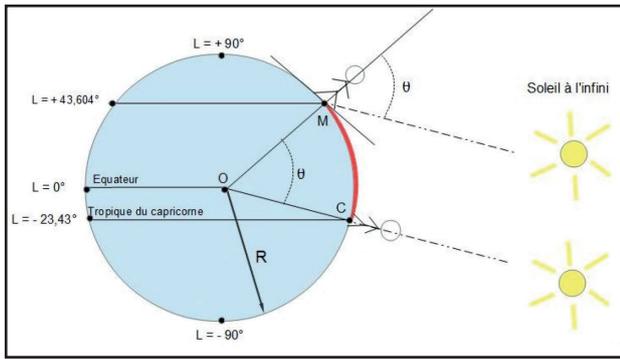


Fig. 2a. Mesure du diamètre de la Terre avec la méthode d'Ératosthène, dans le cas particulier du solstice d'hiver.

Fig 2b. Distance entre Toulouse et le Tropic du Capricorne sur le même méridien.

On rappelle qu'au solstice d'hiver, le Soleil est à la verticale du tropique du Capricorne.



En utilisant Internet (figure 2b), nous avons obtenu la valeur de L_θ , distance à la surface du globe entre Villariès (latitude 43,75 N ; longitude 1,490 E) et le point B de coordonnées (23,43 S ; 1,490 E), situé à la fois sur le même méridien et sur le tropique du Capricorne (dont la latitude est de 23,44° S) :

$$L_\theta = 7\,456 \pm 30 \text{ km.}$$

En utilisant notre mesure à Villariès ($\theta = 1,159 \text{ rad}$) lors du passage du Soleil au méridien au voisinage du solstice d'hiver, nous en déduisons :

$$D_T = 2 \times 7\,456 / 1,159, \text{ soit finalement :}$$

$$D_T = 12\,860 \pm 110 \text{ km}$$

La valeur connue est de 12 742 km. Nous avons donc fait une erreur absolue de 118 km, soit 1 % en valeur relative, seulement !

Mesure du diamètre apparent de la Lune et du Soleil

Vus depuis la Terre, la Lune et le Soleil présentent un angle apparent Φ_L et Φ_S dont la tangente est le rapport de leur diamètre sur la distance à la Terre :

$$\tan(\Phi_L) = D_L/d_{TL} \text{ et } \tan(\Phi_S) = D_S/d_{ST}$$

En remplaçant pas les valeurs actuelles, $D_L = 3\,475 \text{ km}$, $d_{TL} = 384\,400 \text{ km}$, $D_S = 1\,393\,000 \text{ km}$, $d_{ST} = 149\,600\,000 \text{ km}$, on obtient :

$$\Phi_L = 0,518^\circ \text{ et } \Phi_S = 0,533^\circ$$

2 Il s'agit ici de valeurs moyennes. La distance de la Lune variant de 356 000 à 407 000 km, son diamètre apparent varie de 0,49° à 0,56°. Quant à celui du Soleil, il varie de 0,52 à 0,54°.

Pour mesurer nous-mêmes ces angles, nous avons pris des photographies avec un appareil compact Sony DSC-HX50 (figure 3). Cet appareil est équipé d'un capteur CMOS Exmor R de format 1/2.3" avec 3 648 × 2 726 pixels, et des pixels carrés de $e = 1,55 \mu\text{m}$ de côté. La focale de l'objectif annoncée par le constructeur est de 4,3 à 129 mm. (ou 24 à 720 mm en « équivalent 24×36 mm »). Nous avons pris ces clichés en mode « grossissement maximal », qui ajoute un grossissement numérique de 2,5 fois, et la focale équivalente devient donc $f = 129 \times 2,5 = 323 \text{ mm}$.



Fig. 3. Photographies de la Lune (a) et du Soleil (b) prises par l'auteur avec un compact Sony DSCHX50.

Sur le cliché de la Lune de la figure 3a, dont le format fait 3 648 × 2 726 pixels, nous avons mesuré un diamètre d de 1 862 pixels, ce qui correspond à un diamètre angulaire Φ_L tel que :

$$\tan(\Phi_L) = \frac{\text{diamètre sur le capteur}}{\text{focale}} = \frac{1862 \times 0,00155}{323}$$

On en déduit donc :

$$\Phi_L = 0,512^\circ \pm 0,03^\circ$$

La valeur attendue étant 0,518°, notre erreur est donc de 0,006°, soit 1,2 %.

Pour le Soleil, nous avons mesuré un diamètre d de $1\,960 \pm 2$ pixels sur le cliché de la figure 3b, dont le format fait 3 648 × 2 726 pixels. On a donc :

$$\tan(\Phi_S) = 1\,960 \times 0,001\,55 / 323, \text{ donc :}$$

$$\Phi_S = 0,539^\circ \pm 0,03^\circ$$

La valeur attendue étant 0,535°, notre erreur est donc de 0,004°, soit 0,7 %.

Détermination de la distance Terre Lune (avec la parallaxe)

L'éclipse de Soleil du 3/10/2005 était annulaire à Alger et partielle à Villariès. On peut donc employer la méthode décrite dans la figure 4, en utilisant les photographies prises simultanément à Alger et à Villariès (figure 5). Au moment du maximum de l'éclipse, le Soleil était aligné avec la Lune à Alger : l'observation faite à Villariès fournit donc directement l'angle α .

On a : $LB = AB / \tan(\alpha)$

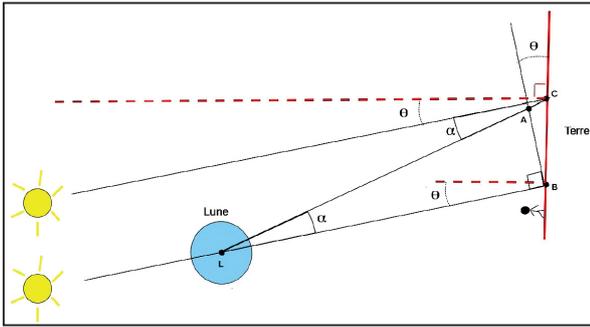


Fig. 4. Détermination de la distance Terre Lune à partir d'observations à Villariès (point C) de l'éclipse du 03/10/2005, qui était annulaire à Alger (point B). Pour simplifier, on considère la Terre plate entre Villariès et Alger.



Fig. 5. Éclipse du Soleil du 03/10/2005 observée au moment du maximum (à 9 h 06 T.U.) à Villariès (a), et à Alger (b).

Alger et Villariès sont à peu près situés sur le même méridien. Le maximum de l'éclipse à Villariès a lieu vers 9 h (T.U.) et l'éclipse totale à Alger se produit à 9 h 06 (T.U.). Le Soleil est alors environ deux heures avant le passage au méridien, et sa distance zénithale est $\theta \approx 50^\circ$. Puisque α est un angle très petit devant θ , on a :

$$AB \approx BC \cos(\theta)$$

BC, la distance Alger Villariès est d'environ 789 km, donc : $AB \approx 789 \times \cos(50^\circ) \approx 507$ km.

Sur la figure 5, on mesure une largeur de croissant de 70 pixels pour un diamètre de 410 pixels, soit 17 % du diamètre solaire. Le diamètre apparent du Soleil étant $\Phi_s = 0,53^\circ$ (voir paragraphe précédent), on en déduit que $\alpha = 0,17$ et $\Phi_s \approx 0,090^\circ$ ainsi que $LB \approx 507 / \tan(0,09^\circ) = 323\ 000$ km. À cette valeur, il convient d'ajouter le rayon terrestre, soit 6300 km, pour obtenir d_{TL} , la distance Terre Lune :

$$d_{TL} = 329\ 000 \text{ km}$$

D'après les éphémérides, la distance de la Lune était de 357 000 km ce jour-là. Nous avons donc une erreur de 8 %, ce qui était prévisible étant donné la faible distance entre Alger et Villariès et les approximations faites. Pour obtenir une erreur plus faible, on aurait intérêt à utiliser une plus grande distance entre les points d'observation sur Terre, en choisissant une autre éclipse et en tenant compte de la rotondité de la Terre.

Détermination du diamètre de la Lune (méthode d'Aristarque)

Aristarque de Samos (III^e siècle av. J.-C.) a déterminé les tailles relatives de la Lune et de la Terre, à partir d'observations d'une éclipse totale de Lune. Il supposait que l'ombre de la Terre au niveau de l'orbite de la Lune avait la taille de la Terre, car le Soleil était très éloigné (cf. figure 6). Aristarque avait observé que l'ombre de la Terre avait une taille d'environ trois fois le diamètre apparent de la Lune : il en avait déduit que le diamètre de la Terre (D_T) était environ trois fois celui de la Lune (D_L) : $D_T / D_L \approx 3$. Aristarque n'a pas pu en déduire le diamètre exact de la Lune, car le diamètre de la Terre n'était pas encore connu à cette époque : il n'a été déterminé (pour la première fois) qu'au siècle suivant, par Ératosthène³. Avec les valeurs connues actuellement, $D_T / D_L = 12\ 742 / 3\ 470 = 3,67$, dans le cas où on supposerait que le Soleil est à l'infini, le diamètre D_o de l'ombre de la Terre serait donc tel que $D_o / D_L = 3,67$.

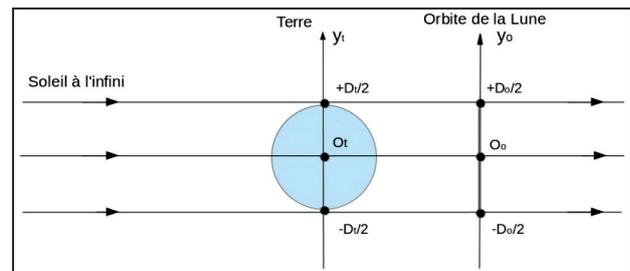


Fig. 6. Éclipse de Lune : principe de la méthode d'Aristarque. Si on suppose que le Soleil se trouve à l'infini, le diamètre D_o de l'ombre de la Terre est égal au diamètre de la Terre D_T .

Nous avons profité de l'éclipse du Lune du 28 septembre 2015 pour refaire cette expérience. Pour cela, j'ai photographié la Lune à la fin de l'éclipse, alors qu'il faisait encore nuit, avant de prendre l'autobus pour le lycée (figure 7). Pour compléter cette étude, nous avons utilisé un autre cliché pris au début de l'éclipse, au Val de Saire dans la Manche, par un astronome amateur qui l'a publié sur Internet. Les deux clichés ont été pris à $t_1 = 3$ h 24 et $t_2 = 6$ h 12, et sont donc espacés de $t_2 - t_1 = 168$ min.

La période de révolution de la Lune autour de la Terre (par rapport à un repère fixe, comme celui représenté par les étoiles lointaines) est de $P_L = 27,32$ jours soit $27,32 \times 24 \times 60$ min.

La Lune s'est donc déplacée par rapport aux étoiles d'un angle $\beta_{1,2}$ tel que :

³ Il en existait déjà des estimations avant Ératosthène. Voir l'article du n° 79 des Cahiers Clairaut à ce sujet (automne 1997).

$$\beta_{1,2} = \frac{(t_2 - t_1)}{P_L} \times 360 = \frac{168}{27,32 \times 24 \times 60} = 1,54^\circ$$

Cet angle vaut environ trois fois le diamètre apparent de la Lune Φ_L (cf. le 2^e paragraphe). Sur la figure 7, nous avons donc séparé les deux clichés obtenus à 3 h 24 et 6 h 12 de trois diamètres lunaires. Nous avons ensuite mesuré le diamètre du cercle qui s'ajustait au tracé de l'ombre terrestre sur ces deux clichés⁴. Nous avons trouvé :

$$D_o/D_L = 2,76 \pm 0,2$$

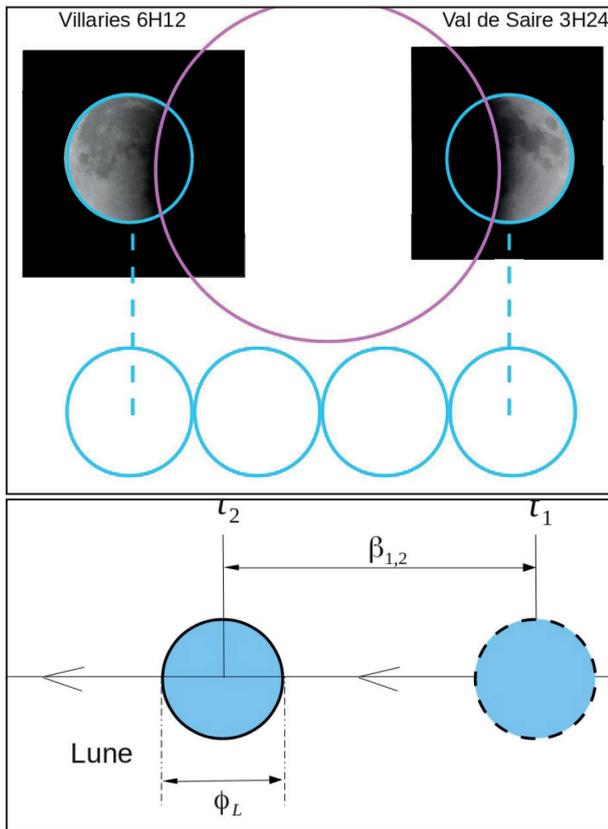


Fig. 7. Éclipse de Lune du 28/09/2015. La première figure est un montage de deux photographies séparées de l'angle correspondant au mouvement apparent de la Lune par rapport aux étoiles. Elle permet de mesurer la dimension de l'ombre terrestre (cercle rose) qui cause cette éclipse. La seconde figure illustre le mouvement apparent de la Lune $\beta_{1,2}$ par rapport aux étoiles, entre deux instants t_1 et t_2 .

En faisant l'hypothèse d'Aristarque, qui supposait que le Soleil était à l'infini, on aurait $D_o \approx D_T$ et $D_T/D_L = 2,76$. Le diamètre de la Lune serait alors de $D_L \approx D_T / 2,76$ soit $D_L \approx 12\,742 / 2,76 = 4\,617$ km.

C'est beaucoup plus que la valeur connue de 3 470 km ! L'hypothèse d'un Soleil à l'infini est donc inexacte et il nous faut calculer plus précisément les dimensions du cône d'ombre de la Terre au niveau de l'orbite lunaire. D'après la figure 8, où d_{ST} est la distance Soleil-Terre,

⁴ On suppose que, pendant ces 168 minutes, l'ombre de la Terre est fixe par rapport aux étoiles, donc que la Terre ne tourne pas autour du Soleil.

D_S et D_T sont respectivement le rayon du Soleil et de la Terre, et α est le demi angle de l'ouverture de ce cône, on a :

$$\tan \alpha = \frac{z}{d_{ST}} = \frac{D_S - D_T}{2d_{ST}}$$

Comme le diamètre de la Terre ($D_T = 12\,700$ km) est beaucoup plus petit que celui du Soleil

$$\tan \alpha \approx \frac{D_S}{2d_{ST}}$$

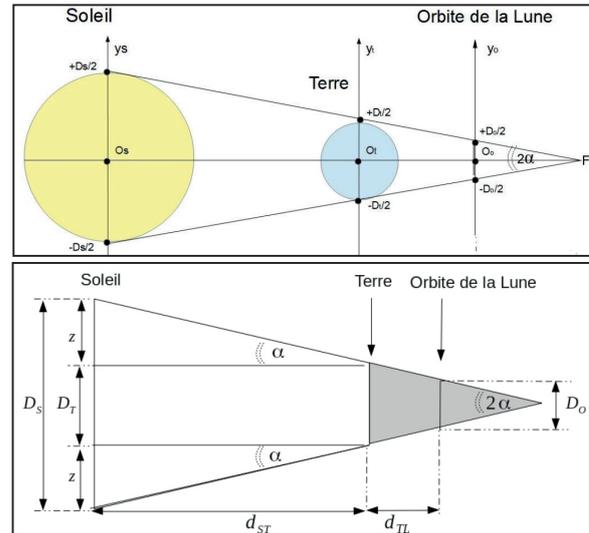


Fig. 8. Schéma général d'une éclipse de Lune (en haut) et paramètres utilisés pour le calcul du cône d'ombre (en bas).

($D_S = 1\,392\,000$ km), on a :

Cet angle α est donc tout simplement la moitié de Φ_S , le diamètre apparent du Soleil vu depuis la Terre, que nous avons mesuré au 2^e paragraphe. On a donc $\alpha = 0,539/2$ et $\tan(\alpha) = 0,004\,61$.

D'après la figure 8, le diamètre de l'ombre terrestre au niveau de l'orbite de la Lune (c.-à-d. à la distance d_{TL} de la Terre) est D_o tel que :

$$D_o = D_T - 2 d_{TL} \tan \alpha$$

ou encore :
$$\frac{D_o}{D_T} = 1 - \frac{2d_{TL} \tan \alpha}{D_T}$$

Cette relation montre bien que l'hypothèse d'Aristarque n'est qu'une approximation, où on suppose que le second terme est nul. En utilisant les valeurs exactes, on trouve :

$D_o/D_T = 1 - 2 \times 384\,400 \times 0,004\,61 / 12\,742 = 0,721$
 À partir de nos observations de l'éclipse de Lune, où nous avons mesuré $D_o/D_L = 2,76 \pm 0,2$ (cf. figure 7), nous pouvons donc en déduire une seconde estimation du diamètre de la Lune, qui est une valeur 0,721 fois plus petite que celle obtenue précédemment :
 $D_L \approx 0,721 \times 12\,742 / 2,76$

$$D_L = 3\,333 \pm 200 \text{ km}$$

Par rapport à la valeur connue $D_L = 3470$ km, l'erreur n'est que de 137 km, soit une erreur relative est de 4%. Cela montre bien qu'il était nécessaire de prendre en compte la forme conique de l'ombre terrestre.

Détermination de la distance Soleil Vénus (avec l'élongation maximale)

Vénus est la planète la plus proche de la Terre, facilement visible le matin peu de temps avant le lever du Soleil ou le soir peu après le coucher du Soleil. Elle semble être l'étoile la plus brillante du ciel et a souvent été appelée « étoile du berger ». On remarque que sa distance angulaire avec le Soleil, appelée élongation (cf. figure 9b) varie de jour en jour entre deux limites de -46° et $+46^\circ$ ⁵. On le comprend facilement avec la figure 9c puisque Vénus est plus proche du Soleil que la Terre. Une propriété du cercle est que toute droite tangente au cercle en un point quelconque M est perpendiculaire au rayon passant par ce point M, on en déduit d'après cette figure que le triangle TVS est rectangle en V, et donc :

$$d_{SV} = d_{ST} \times \sin \beta$$

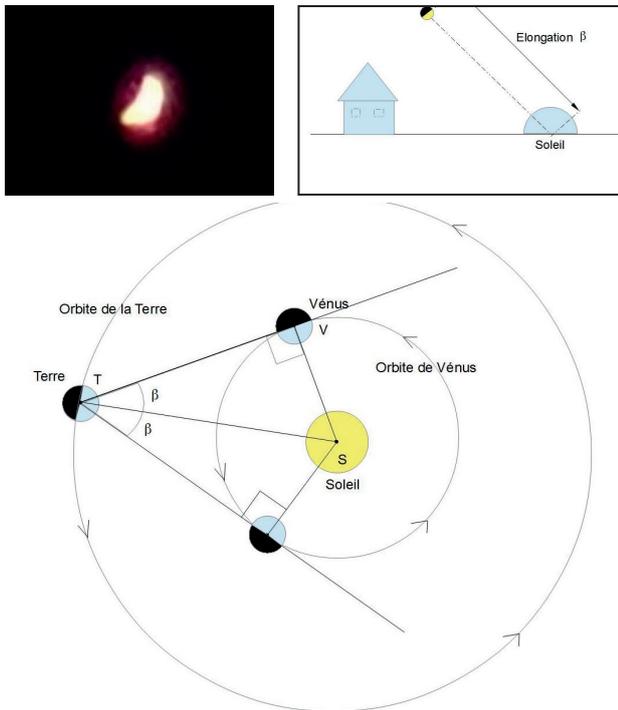


Fig. 9. Vénus et élongation maximale. (a) Cliché pris par l'auteur avec un Sony DSCHX50. (b) L'élongation β est la distance angulaire entre Vénus et le Soleil, vue depuis la Terre. (c) Sur le dernier schéma, l'élongation de Vénus est maximale.

⁵ L'orbite de Vénus étant elliptique ainsi que celle de la Terre, l'élongation maximale de Vénus varie entre 45° et $47,8^\circ$. Dans la suite, les orbites sont supposées circulaires.

La distance d_{ST} est souvent prise comme unité de mesure des distances dans le Système solaire, et est appelée unité astronomique (ua). L'élongation maximale β valant 46° , on en déduit que :

$$d_{SV} = 1 \times \sin(46^\circ) \approx 0,71 \text{ ua}$$

En fait cette valeur de 46 degrés n'est pas très précise. La valeur admise actuellement pour la distance moyenne Soleil Vénus est 0,724 ua (détermination très précise avec un radar).

Conclusion

Nous sommes donc parvenu à refaire les expériences qui avaient conduit aux premières déterminations de distances et de diamètres en astronomie, en utilisant les mêmes méthodes. Cette façon de procéder présente l'avantage de ne pas demander de gros moyens et d'être accessible du point de vue théorique (avec le niveau d'un élève en classe de première S par exemple).

Nous avons travaillé à partir de données personnelles (expériences, photographies) ou bien nous avons utilisé des observations de club d'astronomie amateur accessibles sur Internet. L'accès à Internet nous a été aussi très utile pour fournir des mesures à la demande (distance entre deux endroits de la Terre par exemple), et plus généralement pour nous permettre d'apprendre de nouvelles choses.

À l'aide d'un simple appareil photo, nous avons observé et réalisé des mesures du monde macroscopique (diamètre de la Terre, de la Lune, distances de la Lune, du Soleil, etc.). Nous avons été surpris par la qualité des résultats que nous avons obtenus. Il est surprenant de constater que la simple mesure de la longueur de l'ombre d'un piquet pendant les vacances de Noël nous a conduit à déterminer le rayon de la Terre avec une précision de l'ordre de 50 km (erreur inférieure à 1%) ! ■

Remerciements

Je tiens à remercier mes camarades du groupe de T.P.E., Doriane Clede, Maryon Dejean, et Hugo Louys, ainsi que toutes les personnes qui nous ont aidés lors de ces T.P.E., et en particulier Mme Artigues, M. Laude, M. Bressolles, du lycée Pierre Bourdieu de Fronton.

Quelques-uns des liens utilisés

<http://www.apmep.fr/IMG/pdf/atelierM15.pdf> (détermination de distances dans le système solaire, atelier CLEA)

<http://www.timeanddate.com/astronomy/moon/distance.html> (éphémérides de la Lune)

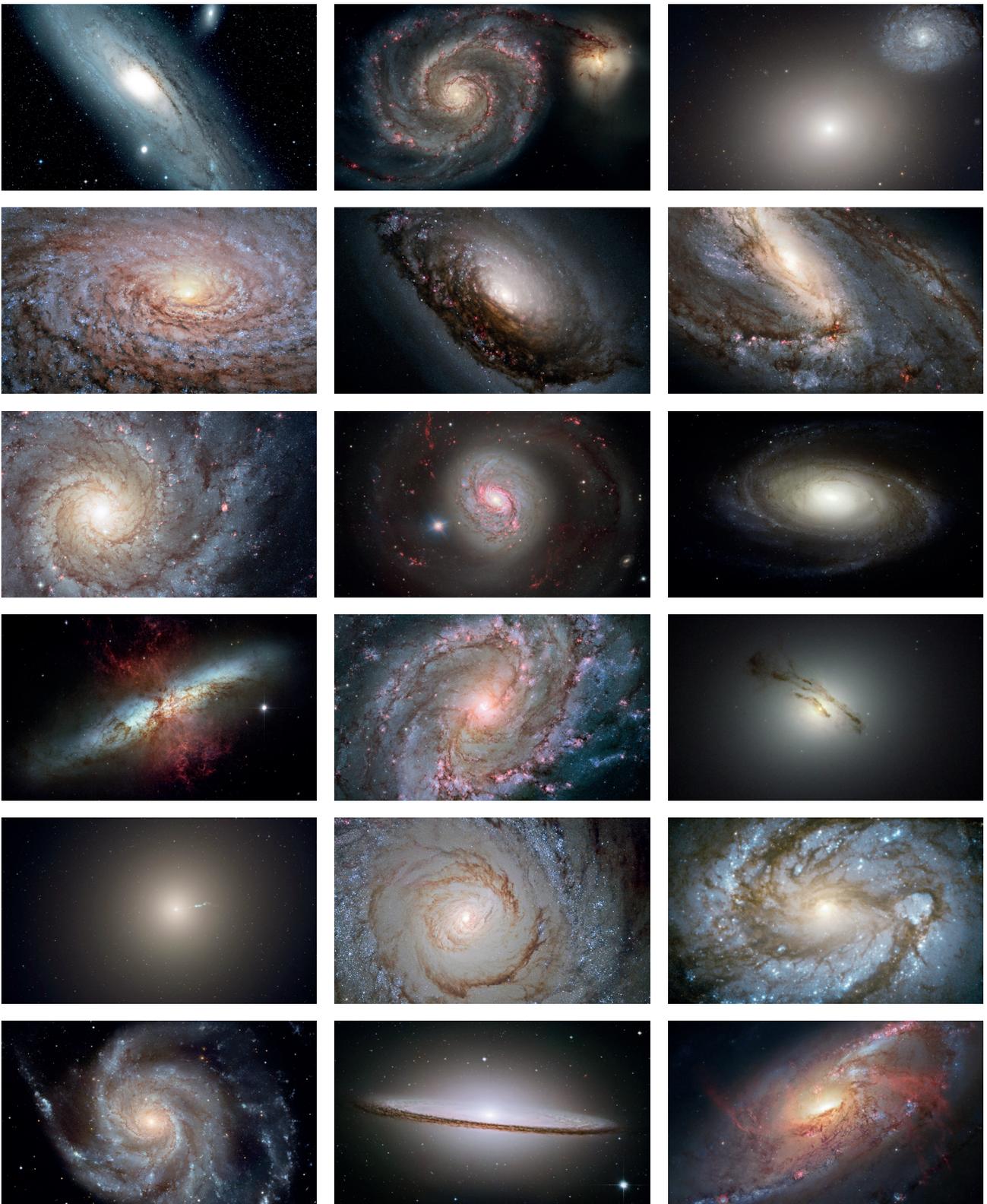
<http://userpages.irap.omp.eu/~jprieur/cav> (photos éclipse du Soleil)

<http://www.vds-phl.fr/2015/09/eclipse-totale-de-lune-plein-lune-27-et-28-septembre-2015.html> (photo du Val de Saïre)

http://www.lexilogos.com/calcul_distances.htm (calcul de distances sur Terre)

<http://www.coordonnees-gps.fr/> (coordonnées GPS de points sur Terre).

THÈME: LES GALAXIES



Photos de 18 des 40 galaxies du catalogue de Messier telles que vous ne les observerez jamais car réalisées par le télescope spatial Hubble ou le VLT. De gauche à droite et de haut en bas, ligne **1** : M31-M51-M60 ; **2** : M63-M64-M66 ; **3** : M74-M77-M81 ; **4** : M82-M83-M84 ; **5** : M87-M94-M100 ; **6** : M101-M104-M106. Images prises au VLT pour M77 (crédit ESO), par le HST pour les autres (crédit NASA/ESA)

ARTICLE DE FOND

La vie des galaxies

Françoise Combes, Observatoire de Paris, Professeur au Collège de France

Cet article décrit la vie tourmentée des galaxies. Celles-ci se forment par accrétion de matière dans un vaste réseau de filaments au sein de la toile cosmique et par fusion entre elles, avant de prendre leur retraite lorsqu'elles ne forment plus d'étoiles. Ce scénario est actuellement observé en direct par les télescopes les plus puissants. Restent à définir le rôle et la nature de la matière noire.

Les galaxies se forment juste après le Big Bang, très tôt dans l'Univers, elles ont une vie tourmentée, assemblent peu à peu leur masse par accrétion ou fusion avec des galaxies voisines.

On peut dire qu'elles prennent leur retraite lorsqu'elles ne forment plus d'étoiles, et certaines la prennent très jeunes !

De quoi sont faites les galaxies ?

Pour faire une galaxie, assemblez des étoiles (200 milliards pour la nôtre, la Voie lactée), des atomes d'hydrogène avec un peu d'hélium, une pincée de poussières, des traces d'autres éléments (C, N, O, ... Fe), et surtout beaucoup de matière noire.

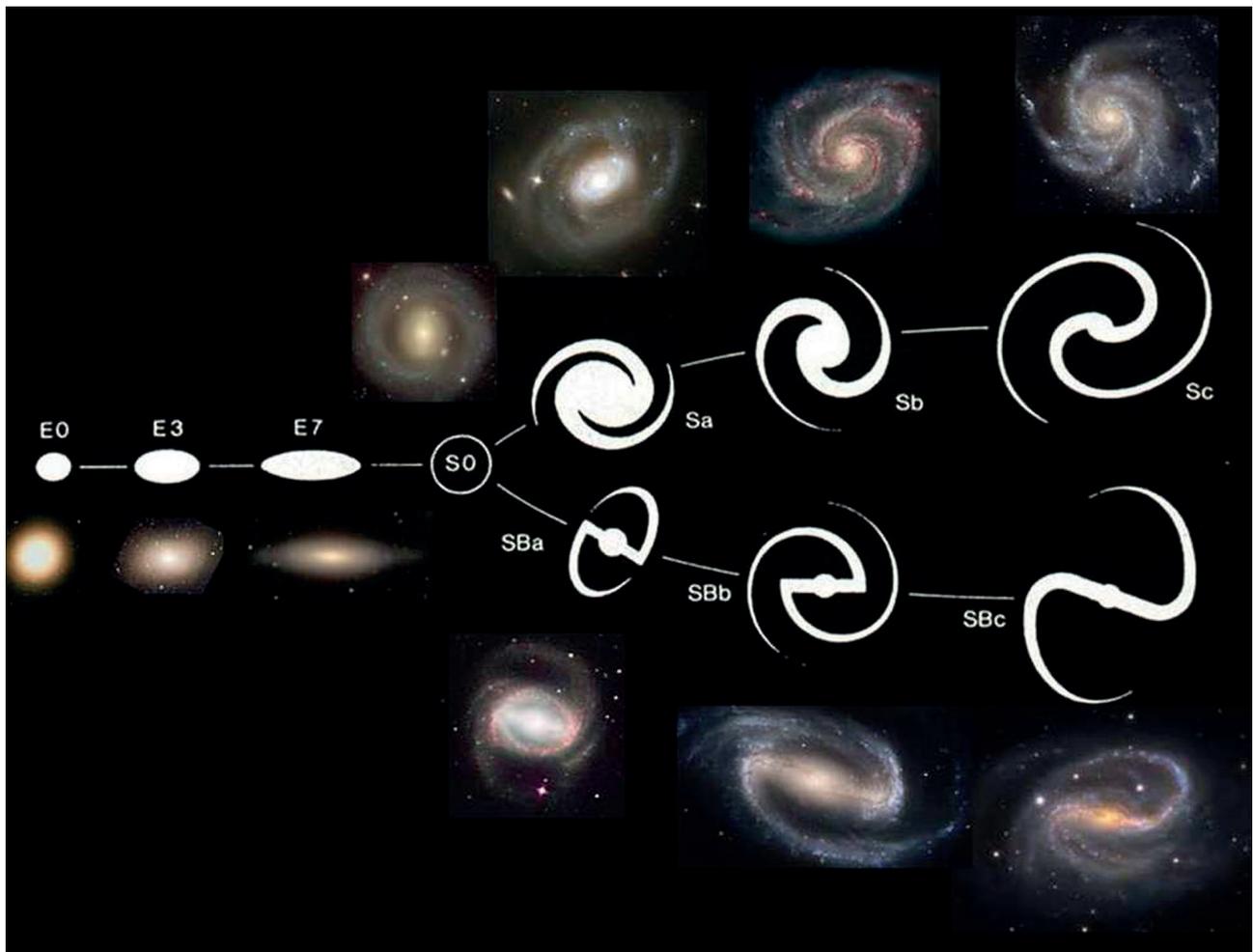


Fig. 1. La classification de Hubble des galaxies. La plupart des galaxies sont des disques en rotation possédant des bras spiraux, comme les galaxies de droite. Il existe aussi des galaxies qui ne tournent pas (ou peu), de forme sphéroïdale, plus ou moins aplaties, que l'on appelle les elliptiques. Dans la séquence de la droite vers la gauche, le bulbe central prend de plus en plus d'importance et finit par dominer. La proportion de gaz et la formation d'étoiles diminuent aussi de droite à gauche.

Les galaxies se révèlent avec toute une variété morphologique : des disques en rotation comme la Voie lactée, qui peuvent être très minces comme ceux que nous voyons par la tranche, des elliptiques, sphéroïdes assez lisses, sans trop de caractères mais massives, et mêmes des irrégulières, peu brillantes (cf. figure 1).

Nous vivons dans une galaxie très moyenne, une spirale du milieu de la séquence, avec seulement un petit bulbe. Elle fait 100 000 années-lumière de diamètre et possède un trou noir super-massif en son centre, comme toutes les galaxies à bulbe. Comme nous sommes à l'intérieur du plan, nous ne voyons la Voie lactée que par la tranche. Et encore, en lumière optique, notre champ de vision s'arrête très vite au bras spiral local, à cause de la poussière qui produit un écran opaque. Dans les longueurs d'onde infrarouge, beaucoup moins absorbées par la poussière, nous pouvons voir jusqu'au centre : le bulbe nous montre un effet de perspective, car il est allongé selon une barre venant vers nous, la partie proche nous apparaît plus épaisse que la partie lointaine. C'est la preuve que notre Galaxie est bien barrée, ce dont on se doutait, au vu des mouvements perturbés du gaz. En ceci, notre galaxie est très commune, puisque deux tiers des galaxies sont barrées. Les barres sont un des moteurs de l'évolution, elles permettent au

gaz d'arriver vers le centre, de former des étoiles, et d'alimenter le trou noir central.

La naissance, l'environnement

Comment se forment les galaxies, dans quel environnement ? Les galaxies ne sont pas distribuées au hasard dans l'Univers, elles se forment dans un réseau de filaments de matière, que l'on appelle la toile cosmique (cf. figure 2). Bien que l'essentiel de la matière ne soit pas visible, les galaxies sont des traceurs de la toile, elles brillent comme des lucioles pour nous montrer la structure sous-jacente. C'est ainsi qu'ont pu être cartographiées les grandes structures qui nous entourent (amas de la Vierge, de Coma...). Nous appartenons, avec la galaxie d'Andromède, à un groupe de galaxies, le Groupe Local, lui-même appartenant à une super-structure, le super-amas local, baptisé Laniakea (immense horizon céleste, en Hawaïen). L'Univers est en expansion rapide après le Big Bang, et ce mouvement d'expansion s'oppose à l'effondrement de la matière sous l'effet de sa propre gravité. Il est très difficile de former des structures, surtout que le fond cosmique de rayonnement observé aujourd'hui en micro-onde, nous apprend que l'Univers était presque parfaitement homogène et isotrope, à 10^{-5} près, quand il avait 400 000 ans.

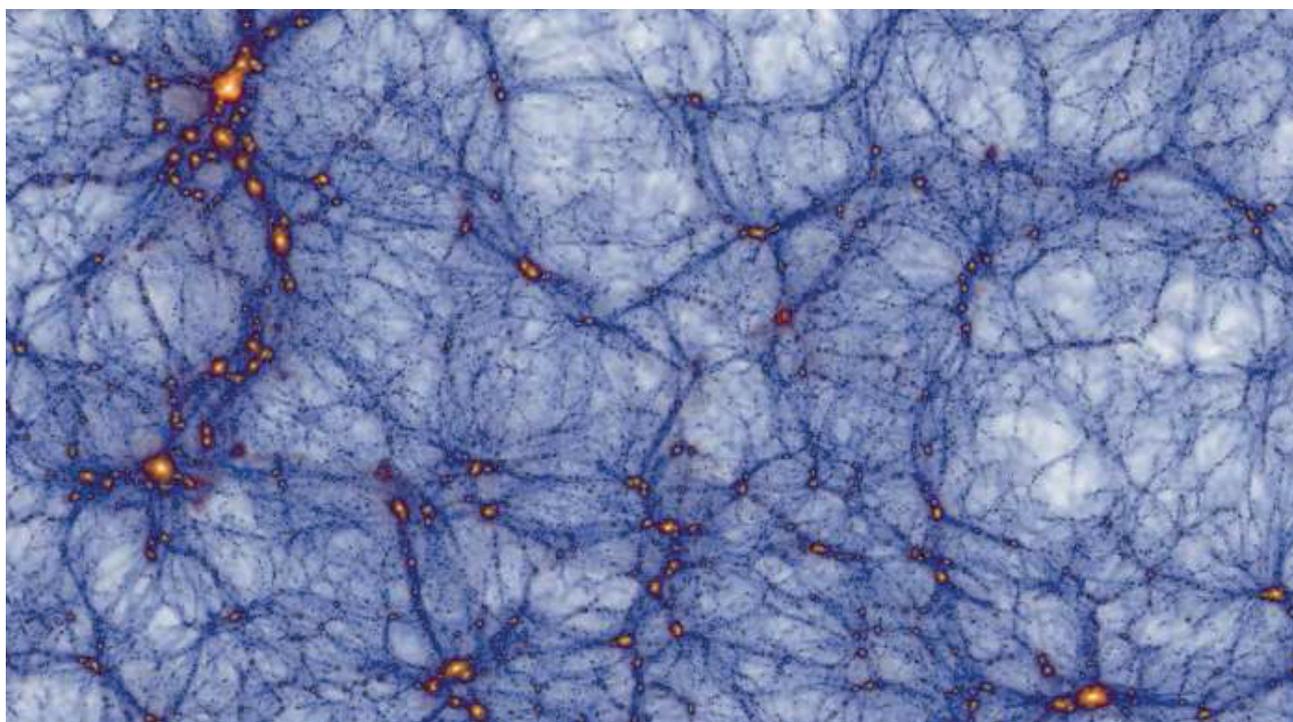


Fig. 2. La toile cosmique. Cette coupe dans la simulation du Millénium montre clairement la toile cosmique des structures. Les régions jaune vif sont les groupes et amas de haute densité qui se forment à l'intersection des filaments. Il existe un navigateur interactif dans le Millennium¹ à l'URL galformod.mpa-garching.mpg.de/mxlbrowser/

¹ Simulation informatique qui permet de reconstituer l'évolution de l'Univers à partir du « fond diffus cosmologique ». Cette simulation porte sur environ 10 milliards de particules théoriques. Elle nécessita l'utilisation des plus gros ordinateurs existants.

Ces toutes petites fluctuations de densité n'auraient pas eu le temps de devenir des galaxies aujourd'hui, s'il n'existait pas en arrière-plan de la matière noire, insensible à la lumière, aux photons et à leur pression.

La matière noire peut former des structures qui vont devenir des « galaxies noires » et une fois que l'Univers s'est refroidi par expansion et que les atomes se sont formés par recombinaison de la matière ionisée, alors les atomes tombent dans les galaxies et commencent à former des étoiles. Au début, ce ne sont que des petites structures, de la taille de galaxies naines ou même d'amas globulaires.

Puis les galaxies croissent en masse de deux façons : d'abord elles attirent la matière des filaments cosmiques qui leur sert de cordon ombilical, puis elles fusionnent entre elles pour former des galaxies de plus en plus massives : c'est le scénario de la formation hiérarchique des galaxies. Les galaxies sont alors de moins en moins denses.

Le scénario de la naissance et de la croissance des galaxies peut aujourd'hui être observé en direct : les télescopes de plus en plus puissants peuvent regarder de plus en plus loin. Du fait de la vitesse finie de la

lumière, cela équivaut à remonter dans le temps, et aujourd'hui on voit l'Univers lorsqu'il avait 5 % de son âge actuel. Les galaxies étaient alors très jeunes et nous ont envoyé de la lumière qui n'arrive jusqu'à nous que maintenant, après 13 milliards d'années de voyage.

Les galaxies étaient plus petites et plus nombreuses autrefois. Elles étaient toutefois très brillantes, car leur taux de formation d'étoiles était 10 fois supérieur. Au départ, les galaxies sont presque entièrement formées de gaz, très instable, qui s'effondre en une myriade d'étoiles. Aujourd'hui, les galaxies spirales n'ont en moyenne que 5 à 10 % de gaz, l'ayant déjà consommé en étoiles. La plupart des étoiles qui nous entourent dans la Voie lactée sont nées dans la première moitié de l'âge de l'Univers.

Interactions de marée entre les galaxies

La vie des galaxies n'est pas un long fleuve tranquille : durant toute leur évolution, elles se rencontrent, se collisionnent, se déforment et, après quelques centaines de millions d'années d'interactions, elles peuvent fusionner entre elles.



Fig. 3. Le quintette de Stephan. Ce groupe compact de galaxies semble contenir 5 objets en interaction (d'où son nom). En fait la galaxie bleue en bas à gauche est une intruse, elle est six fois plus proche de nous. Les quatre autres, de couleur plus jaune, sont très perturbées, et des chocs dans le gaz interne au groupe peuvent se voir en rayons X, ici en bleu turquoise.

Nous observons autour de nous de nombreuses galaxies en interaction, où des bras de marée très longs peuvent former comme les antennes d'un insecte ou des queues de souris.

La Voie lactée interagit avec ses voisins, d'abord avec les Nuages de Magellan, qui sont déformés et décentrés, avec le gaz déplacé entourant notre Galaxie comme un anneau. Nous interagissons avec la galaxie d'Andromède, qui devrait fusionner avec la Voie lactée dans 2 à 3 milliards d'années.

Mais l'environnement du Groupe Local est tout de même assez tranquille au regard de ce qui se passe dans les groupes compacts de galaxies (cf. figure 3), et plus violent encore dans les amas riches, où les galaxies sont balayées de tout leur gaz à l'entrée et transformées peu à peu en sphéroïdes, par interaction et harcèlement. Dans les amas de galaxies, ce sont les elliptiques qui dominent, des galaxies déjà en retraite, ne formant plus aucune étoile.

Les interactions de marée peuvent donner des formes très variées aux galaxies, selon la géométrie de la rencontre, selon le sens relatif de la rotation des disques des galaxies et leur mouvement orbital. Lorsqu'un compagnon arrive sur une orbite quasi polaire, il peut perdre de la matière selon cette orbite, et ainsi former un anneau perpendiculaire au disque de la galaxie principale. C'est un peu la configuration du Grand Nuage de Magellan et du courant magellanique, dans le plan polaire de la Voie lactée. Lors de la collision de plein fouet entre deux galaxies, il peut se former des anneaux, qui sont comme des ondes qui se propagent radialement dans les disques, un peu comme les rides formées par la chute d'une pierre dans un étang. Le prototype de cette collision est une galaxie appelée « Roue de Charrette » (figure 4).



Fig.4. La galaxie dite de la Roue de Charrette photographiée par le Hubble Space Telescope. Elle est située à environ 500 millions d'années-lumière dans la constellation du Sculpteur (image ESA/Hubble & NASA).

Notre voisine Andromède a été victime d'une telle collision de plein fouet récemment, avec un compagnon 10 fois moins massif : 2 anneaux sont observés à des rayons différents dans le gaz du disque d'Andromède. La perturbation étant moins violente, on perçoit encore la structure spirale sous-jacente, qui existait avant la collision. Alors que la Voie lactée n'a pas expérimenté de fusions majeures avec des galaxies massives au cours de la deuxième moitié de l'Univers, ce n'est pas le cas d'Andromède qui possède une multitude de courants stellaires, boucles et coquilles d'étoiles, comme de nombreux débris de toutes les interactions récentes. Tous ces débris de marée sont tellement étendus, qu'ils rejoignent la galaxie du Triangle (Messier 33), reliée à Andromède par un pont de gaz et d'étoiles, de plus de 10 rayons galactiques de longueur. Tous ces vestiges sont très précieux pour reconstruire, notamment par des simulations numériques, le passé de notre Groupe Local, et la formation de notre galaxie.

Où sont les atomes dans l'Univers ?

Les vitesses de rotation des disques de galaxies nous montrent qu'elles sont toutes entourées d'un halo de matière invisible très massif. Les observations cosmologiques, et entre autres la nucléosynthèse primordiale des éléments dans le Big Bang, démontrent que la matière ordinaire, les atomes, ne peut constituer que 5 % du contenu total de l'Univers (cf. figure 5). Parmi la matière totale, les atomes représentent environ 17 % au niveau global. Ceci est établi par une concordance d'expériences allant des fluctuations de température dans le fond cosmique micro-onde, des lentilles gravitationnelles et des supernovae Ia comme chandelles standard. Mais lorsque l'on mesure cette fraction au niveau des galaxies par les vitesses de rotation, on est loin du compte ! Les atomes ne représentent jamais plus de 3 % environ, et même moins pour les galaxies les moins massives. La fraction de matière ordinaire est maximum pour les galaxies de masse semblable à celle de la Voie lactée (3 %), mais ensuite cette fraction diminue pour les galaxies plus massives ou moins massives que la nôtre. Où est donc passée la matière ordinaire dans l'Univers ? La majorité n'est pas dans les galaxies, mais sans doute dans les filaments de la toile cosmique. Associée à la matière noire des filaments, elle se trouve dans un état si dilué qu'il est difficile de la détecter, soit sous forme de gaz chaud, soit sous forme de gaz plus froid. Un problème non résolu est de savoir pourquoi la matière ordinaire a été chassée des galaxies, car certainement juste après

le Big Bang, les premières structures devaient avoir la composition générale globale de l'Univers.

La solution du problème pour les galaxies naines pourrait se trouver dans la rétroaction due à la formation d'étoiles : l'énergie fournie par l'explosion des supernovae, les vents stellaires peut donner au gaz interstellaire des vitesses de l'ordre de 100 km/s, suffisantes pour quitter la galaxie. Par contre en ce qui concerne les galaxies massives, leur puits de potentiel gravitationnel est trop profond, et la vitesse d'échappement est bien plus grande que 100 km/s, l'énergie de la formation d'étoiles ne suffit pas à éjecter le gaz en dehors des galaxies. C'est là que le trou noir super-massif au centre de chaque galaxie pourrait avoir son importance !

L'énergie gravitationnelle libérée par la matière tombant sur le trou noir est phénoménale. Le rendement énergétique est bien supérieur à celui de l'énergie nucléaire de fusion dans les étoiles ! Il est possible de calculer toute l'énergie qui a été libérée par la croissance du trou noir pour obtenir sa masse actuelle, c'est environ 80 fois l'énergie de liaison de la galaxie toute entière. Si l'énergie dégagée par le trou noir était entièrement absorbée par la galaxie, celle-ci serait détruite. Heureusement pratiquement toute l'énergie est rayonnée, ou sort par des jets de matière dans l'espace inter-galactique. Une petite partie de cette énergie pourrait tout de même servir à éjecter une grande partie du gaz des galaxies. Les

astronomes essaient d'éclaircir ce problème par des simulations et des observations plus poussées.

Une vie de galaxie

Nous connaissons beaucoup mieux aujourd'hui la vie des galaxies : les premières d'entre elles naissent 500 millions d'années après le Big Bang. Elles sont petites et compactes, et constituées en grande partie de gaz et de matière noire. Mais elles continuent à se former et à évoluer, et il s'en forme encore aujourd'hui ! Les petites galaxies accroissent leur masse, par accréation de matière à partir des filaments cosmiques, et elles interagissent et fusionnent entre elles pour donner de plus grosses galaxies.

Tant qu'elles possèdent du gaz interstellaire, les galaxies sont vivantes et continuent de former des étoiles. En fin de chaîne de fusion, il se forme des galaxies elliptiques massives qui ont épuisé tout leur gaz et ne forment plus d'étoiles, ce sont des galaxies mortes.

Bien sûr, il existe encore des problèmes non résolus dans la formation et l'évolution des galaxies, nous ne comprenons pas pourquoi des galaxies stoppent brutalement leur formation d'étoiles et partent à la retraite très jeunes, et quel est le rôle et la nature de la matière noire.

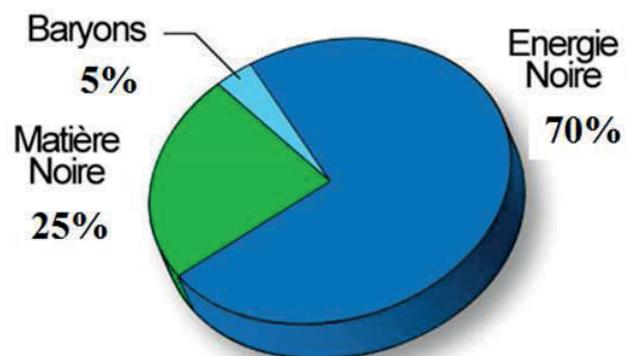
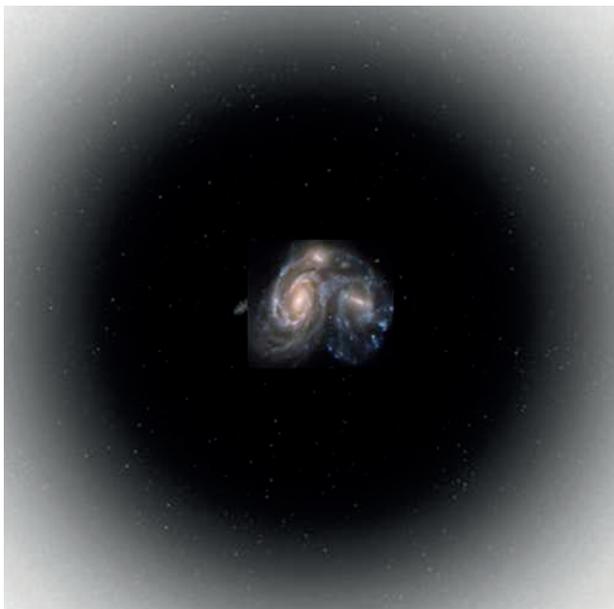


Fig. 5. La matière noire dans l'Univers. Les galaxies sont entourées d'un halo de matière noire, qui se révèle uniquement par la force gravitationnelle qu'il exerce sur les étoiles et le gaz (à gauche). Le camembert de droite résume notre connaissance du contenu de l'Univers : les atomes bien connus (ou baryons) ne représentent que 17 % de la matière totale. Pourtant dans les galaxies, les baryons ne sont jamais plus que 3 % du total, et souvent moins.

HISTOIRE

Les galaxies, histoire des découvertes

Pierre Causeret, Esbarres

Voici un court résumé des étapes importantes dans l'évolution des idées sur les galaxies au cours des siècles.

La Voie lactée dans l'Antiquité grecque

Pour Aristote, il s'agissait d'un phénomène atmosphérique, plus proche que la Lune, pour Démocrite, c'était une multitude d'étoiles... On peut noter que les termes de Voie lactée et de galaxie ont la même origine, gala, galaktos signifiant lait en grec.

Deux légendes de la Voie lactée

En Grèce, la légende dit que Zeus avait déposé Hercule sur le sein d'Héra, endormie, pour le rendre immortel. Mais celle-ci, se réveillant, arrache Hercule de son sein et une traînée de lait se répand dans le ciel, formant la Voie lactée.

En Chine, la légende du Bouvier et de la Tisserande met en scène Véga, Altaïr et la Voie lactée. Elle est répandue dans de nombreux pays asiatiques et il en existe différentes versions. Altaïr est un bouvier, tombé amoureux de Véga, la fée tisserande. Ils vivent heureux ensemble jusqu'à ce que la déesse du ciel découvre qu'un mortel a épousé une fée. Elle décide alors de les séparer par un grand fleuve, la Voie lactée, qu'elle trace dans le ciel. Heureusement, chaque année, la 7^e nuit du 7^e mois lunaire, des pies forment un pont au-dessus de la Voie lactée permettant aux deux amoureux de se retrouver.

Époque arabe

Dans son superbe catalogue d'étoiles, al-Sufi représente la galaxie d'Andromède sur son *Traité des étoiles fixes*, recopié une multitude de fois pendant plusieurs siècles. Il observe aussi les nuages de Magellan. Aux alentours de l'an 1000, al-Biruni imagine que la Voie lactée est constituée d'étoiles nébuleuses. À la même époque, al-Haytham (Alhazen) montre qu'elle n'a pas de parallaxe et conclut qu'elle est donc très éloignée, hors de l'atmosphère, réfutant ainsi la théorie d'Aristote.

Europe puis USA

1610. Galilée publie le *Sidereus Nuncius* faisant part de ses premières observations à la lunette.

« Nous avons observé la substance, ou matière, de la Voie lactée elle-même à la lunette. Grâce à elle, les observations réalisées feront taire toutes les querelles qui ont torturé les philosophes pendant tant de siècles, et nous nous sommes libérés des discussions verbeuses. Car la Galaxie n'est rien d'autre qu'un groupement innombrable d'étoiles réunies en amas »¹. Il parle ensuite d'autres « luminosités laiteuses » apparaissant à la lunette comme des groupements d'étoiles serrées avec en exemple Praeseppe (dans le Cancer) et la nébuleuse d'Orion qu'il croit avoir résolue en étoiles, il ne cite pas de galaxie.

1750. Thomas Wright explique la Voie lactée comme « un effet d'optique dû à notre immersion dans ce qui ressemble localement à une couche peu épaisse d'étoiles ».

Quelques années plus tard, Emmanuel Kant imagine que certains des objets nébuleux visibles dans le ciel sont d'autres « univers-îles » semblables à notre Voie lactée : « (...) tout concorde pour que nous considérions ces figures elliptiques comme de tels ordres de mondes et, pour ainsi dire comme des Voies Lactées »².

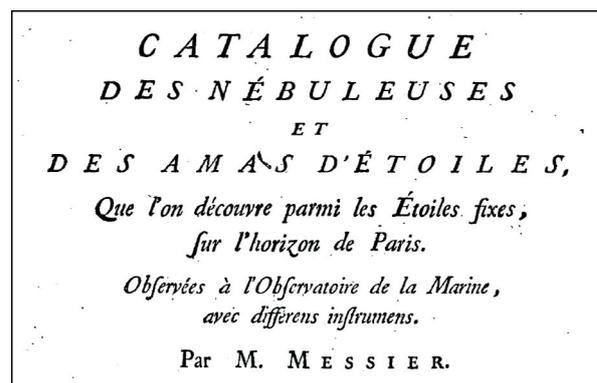


Fig. 1a. Extrait du premier catalogue de Charles Messier publié en 1771 dans l'*Histoire de l'Académie royale des sciences*. Il ne comptait que 45 objets.

¹ Galilée, observations astronomiques, traduction et commentaires du *Sidereus Nuncius* (CRAL-CLEA-SAL)

² Emmanuel Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, cité sur <https://media4.obspm.fr>

1771. Premier catalogue de Charles Messier contenant 45 objets. Il sera ensuite complété pour arriver à 110 objets. On sait maintenant que 40 d'entre eux sont des galaxies. Les plus lumineuses sont M31 (dans Andromède), M33 (Triangle) et M81 (Grande Ourse).

Charles Messier, grand découvreur de comètes, voulait éviter de confondre une nouvelle comète avec un objet nébuleux déjà connu.

ANNÉE & JOURS.	ASCENSION droite.	DÉCLINAISON.	DIAM.	INDICATION DES NÉBULEUSES & des amas d'étoiles.
	D. M. S.	D. M. S.		
3	7. 26. 32	39. 9. 32. B.	o. 40	la belle nébuleuse de la ceinture d'Andromède.
3	7. 27. 32	38. 45. 34. B.	o. 2	petite nébuleuse sans étoile, qui est au-dessus & peu éloignée de celle de la ceinture d'Andromède.
25	20. 9. 17	29. 32. 25. B.	o. 15	nébuleuse sans étoile, entre la tête du Poisson boréal & le grand Triangle, à peu de distance d'une étoile nouvelle de 6. ^e grandeur & de l'étoile β du Triangle, suivant Flamsteed.

Fig. 1b. Les objets du catalogue de Messier sont classés par ordre chronologique d'observation. Les 31^e, 32^e et 33^e ont été observés les 3 et 25 août 1764. Ce sont les seules galaxies de ce premier catalogue. On les nomme maintenant Messier 31, Messier 32 et Messier 33 (ou M31, M32 et M33). On peut remarquer que les ascensions droites sont données en degrés. (crédit BnF)

1785. William Herschel avec sa sœur Caroline, sonde plusieurs centaines de zones de la Voie lactée. En supposant que les étoiles ont toutes la même luminosité, il déduit leur distance de leur éclat apparent. La Voie lactée apparaît à Herschel comme une meule en grès centrée sur le Soleil (figure 2).

Ils recensent aussi près de 2 500 nébuleuses et amas stellaires. Il faut préciser qu'à cette époque, le terme de nébuleuse recouvrait aussi bien ce qu'on appelle aujourd'hui galaxie que les actuelles nébuleuses.

Le General catalogue of nebulae and clusters of stars, publié par son fils John en 1864, regroupe plus de 5 000 objets observés par le père, la sœur et le fils. Il est complété en 1888 par John Deyer qui publie le New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars (en abrégé NGC) avec 7 840 objets du ciel profond classés par ascension droite croissante. Ce catalogue est toujours utilisé aujourd'hui. M31 est aussi NGC 224.

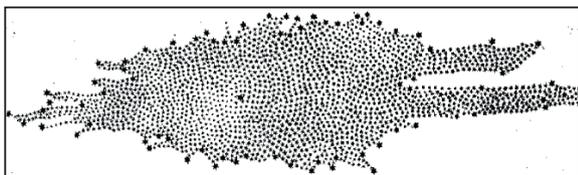


Fig. 2. La Voie lactée vue par William et Caroline Herschel. Selon les cas, cette image est légendée « Représentation de la Voie Lactée selon Caroline Herschel » ou « Notre Galaxie vue par William Herschel ».

1845. William Parsons, comte de Rosse, observe le ciel depuis l'Irlande avec son Léviathan, télescope

de 183 cm de diamètre. Il découvre la structure spirale de la « nébuleuse » M51 (dans les Chiens de Chasse) puis de M99 (Chevelure de Bérénice).

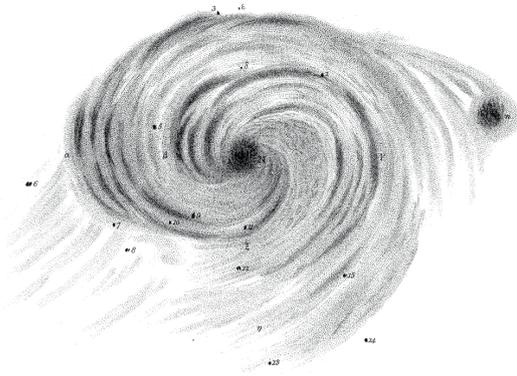


Fig. 3. La « nébuleuse » spirale M51 dans les Chiens de Chasse dessinée par William Parsons.

1860. Gustav Kirchhoff établit ses trois lois avec Robert Bunsen. Il y présente trois types de spectres : spectre continu pour un objet chaud, spectre d'émission pour un gaz chaud et spectre continu avec raies d'absorption pour un objet chaud entouré d'un gaz froid.

1864. William Huggins fait le spectre d'une nébuleuse planétaire et obtient un spectre de raies d'émission. Il s'agit donc de gaz excité. La même année, il obtient un spectre continu avec la « nébuleuse » d'Andromède.

Il y a donc plusieurs types de « nébuleuses » de natures différentes.

1904. Kapteyn s'aperçoit que les mouvements propres des étoiles ne sont pas aléatoires. Oort comprendra plus tard que ces mouvements sont liés à la rotation de la Galaxie qu'il met en évidence en 1927.

1908. Henrietta Leavitt découvre la relation entre la période de variation des Céphéides (type d'étoile variable) et leur luminosité intrinsèque. C'est cette relation qui permettra à Edwin Hubble de mesurer des distances de galaxies : la période donne la luminosité absolue qu'il suffit de comparer à la luminosité observée pour en déduire la distance.

1912. Vesto Slipher obtient des spectres de nébuleuses spirales se présentant comme un spectre continu entrecoupé de raies d'absorption, identique donc aux spectres stellaires. Problème, ces raies d'absorption étaient souvent décalées, parfois vers le bleu comme M31 (qui s'approche de nous), souvent vers le rouge (pour les nébuleuses spirales qui s'éloignent de nous), impliquant des vitesses très

élevées comparées aux vitesses des étoiles (par effet Doppler).

1917. Grâce au télescope de 2,50 m du Mont Wilson, Edwin Hubble pense avoir résolu en étoiles la « nébuleuse » d'Andromède M31.

1917. Harlow Shapley, en étudiant la répartition de 69 amas globulaires et leur distance, montre qu'ils sont répartis dans un halo de forme sphérique dont le centre est dans la direction du Sagittaire, à environ 60 000 années-lumière. Il fait la supposition que c'est aussi le centre de la Galaxie et en déduit que le Système solaire est situé sur un bord de la Galaxie. La surestimation de la distance (on donne plutôt 26 000 années-lumière actuellement) est due au problème de l'absorption interstellaire, négligée par Shapley.

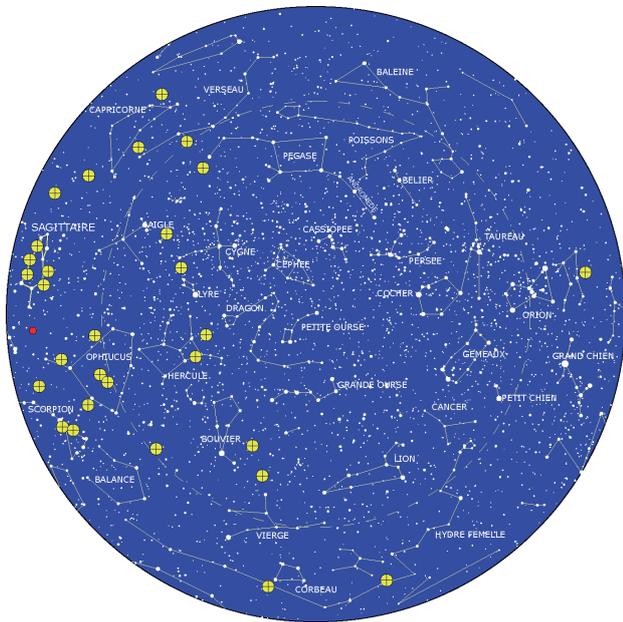


Fig. 4. Carte des amas globulaires du catalogue de Messier (ronds jaunes marqués d'une croix). On voit bien que leur distribution n'est pas aléatoire. Le point rouge indique le centre de la Galaxie.

1920. Le grand débat, à Washington. Au cours de nombreuses discussions, deux camps s'affrontent : Harlow Shapley défend l'idée d'une grande Galaxie incluant les nébuleuses spirales. Dans l'autre camp, Heber Curtis pense que les nébuleuses spirales sont d'autres galaxies, très éloignées. Parmi ses arguments, l'observation de plusieurs novae dans M31 (en fait des supernovae). Ce grand débat n'apporte pas de réponse définitive, faute d'argument décisif.

1924. Grâce à l'observation de Céphéides dans M31, la « nébuleuse » d'Andromède, Hubble parvient à estimer sa distance à 900 000 années-lumière, donc à l'extérieur de notre Galaxie.

Le grand débat est alors tranché. Les nébuleuses spirales sont d'autres galaxies, Kant avait raison. On réserve maintenant le terme de nébuleuses aux objets constitués de gaz et de poussières et on utilise le mot de galaxies pour les amas de milliards d'étoiles.

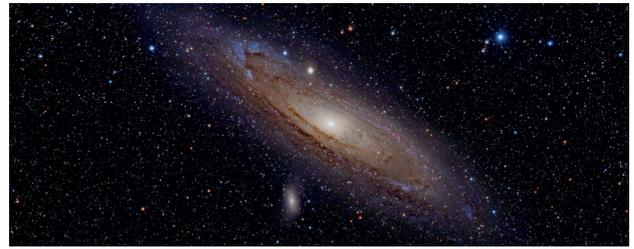


Fig. 5. La « nébuleuse » d'Andromède devient la galaxie d'Andromède. On voit aussi sur l'image M32 (au-dessus) et M110 (en dessous). Photo Adam Evans.

1930. Hubble, qui a mesuré de nombreuses vitesses radiales de galaxies énonce sa fameuse loi : la plupart des galaxies nous fuient avec une vitesse proportionnelle à leur distance.

1936. Edwin Hubble propose une classification des galaxies : spirales, spirales barrées, elliptiques, irrégulières (voir figure 1 page 13).

1952. W. Baade s'aperçoit qu'il existe deux types de Céphéides. La distance de M31 en est doublée.

1970. Vera Rubin et Kent Ford montrent que les étoiles tournent plus vite qu'elles ne devraient à grande distance du centre des galaxies : la courbe de rotation observée ne correspond pas à la courbe prévue par les lois de la gravitation avec la matière lumineuse observée. C'est ce qui amènera le concept de matière noire. On peut noter que Fritz Zwicky avait déjà suggéré l'existence d'une matière invisible dès les années 30 en étudiant les mouvements des galaxies dans les amas.

1976. Faber et Jackson découvrent une relation empirique entre la luminosité des galaxies elliptiques et la dispersion des vitesses de leurs étoiles, relation qui permet de déterminer la distance de ce type de galaxies.

1977. Tully et Fisher établissent une relation entre la luminosité d'une galaxie spirale et sa courbe de rotation. Ce sera un moyen d'obtenir la distance de certaines galaxies en obtenant la magnitude absolue à partir de la courbe de rotation et en comparant à la magnitude visuelle.

Nous arrêterons ici cette courte histoire des galaxies, la fin du xx^e siècle et le début du XXI^e sont trop riches en découvertes... ■

ARTICLE DE FOND

Les galaxies actives

Suzy Collin-Zahn, chercheur honoraire à l'Observatoire de Paris

Françoise Combes a présenté dans l'article précédent ce que l'on pourrait appeler les « galaxies ordinaires », dont la vie, comme elle l'écrit, n'est pas « un long fleuve tranquille ». On observe aussi des galaxies encore moins tranquilles, car elles traversent une phase que l'on nomme « active ». À vrai dire, presque toutes les galaxies sont passées par cette phase au cours de leur évolution. Leur noyau devient alors brillant et variable, et émet des raies spectrales intenses et des rayons X ; il peut également produire un puissant rayonnement gamma et radio, ou projeter dans l'espace de gigantesques jets relativistes. À moins qu'il n'ait toutes ces propriétés à la fois. C'est que le trou noir central est alors copieusement nourri en matière, laquelle, avant de s'y engouffrer pour toujours, rayonne intensément ou est violemment expulsée avant d'avoir pu même s'en approcher.

Les trous noirs supermassifs : des objets que l'on n'attendait pas !

Après la Seconde Guerre mondiale, plusieurs radars sont reconvertis en radiotélescopes et tournés vers le ciel. On découvre alors avec stupéfaction qu'un rayonnement radio intense provient de plusieurs sources cosmiques. En 1952, la source radio la plus brillante est identifiée ; il s'agit d'une faible galaxie lointaine, Cygnus A (figure 3).

Par ailleurs, Carl Seyfert observe en 1943 six galaxies proches assez ordinaires, mais possédant un noyau bleu très brillant d'aspect stellaire. Il en prend les spectres et y voit des raies en émission très larges, certaines d'éléments fortement ionisés, par exemple des atomes de néon ayant perdu quatre électrons. Traduites en vitesse (effet Doppler), les largeurs des raies signifient que le gaz émissif est agité de mouvements aléatoires allant jusqu'à 8 000 km/s, un phénomène complètement nouveau à l'époque. Il faut attendre 1959 pour que Lodewijk Woltjer fasse remarquer que ces vitesses impliquent probablement, au sein du noyau, l'existence d'une masse équivalant à des centaines de millions de fois celle du Soleil.

Avec son article, Seyfert a sans le savoir découvert un nouveau domaine, celui des galaxies actives. Car les « galaxies de Seyfert » sont en tout point semblables à leurs grandes sœurs plus lointaines, les quasars, que l'on ne va pas tarder à découvrir à leur tour.

En effet, presque vingt ans plus tard, en voulant identifier optiquement l'une des sources du troisième catalogue de radiosources de Cambridge, 3C 273, Marteen Schmidt prend au mont Palomar le spectre d'une « étoile » très bleue située au centre de la source (figure 1). Ce spectre présente de très larges raies spectrales en émission, à des longueurs d'onde totalement inconnues. Schmidt comprend rapidement qu'il s'agit des raies habituelles de l'hydrogène, mais décalées vers le rouge

dans une proportion de 16 % (ce décalage est dit « redshift » en anglais), ce qui, traduit de nouveau en effet Doppler, correspond à une vitesse d'éloignement de 45 000 km/s. Comme une étoile lancée à 45 000 km/s est difficile à imaginer, Schmidt en conclut que le décalage doit être dû à l'expansion de l'Univers et donné par la loi de Hubble, selon laquelle il est proportionnel à la distance. Ce qui confère à 3C 273 une distance de un à deux milliards d'années-lumière. Puisque l'éclat varie en raison inverse du carré de la distance, on en déduit que l'objet a une luminosité de l'ordre de celle de mille galaxies ! Dans la communauté astronomique, c'est un coup de tonnerre qui vaut à Schmidt les honneurs de la première page du Times. En l'espace de quelques années, on trouve des centaines d'objets semblables, encore plus distants et aussi lumineux, et de surcroît rapidement variables avec le temps. On leur donne le nom de « quasars », contraction de « quasi stars » ou de « quasi stellar objects ».



Fig. 1. À gauche, le premier quasar découvert, 3C 273, avec son jet visible en haut et à gauche, et à droite une galaxie de Seyfert vue presque de face, NGC 5548. Dans les deux cas on voit que la source centrale est très petite. Images du télescope spatial Hubble. Crédit NASA.

Que sont donc les quasars, se demande-t-on alors ? Certains astronomes font immédiatement le rapprochement avec les galaxies de Seyfert, qui partagent leurs propriétés visibles¹ (figure 2), et pensent qu'il s'agit de

¹ On s'apercevra par la suite que les quasars partagent les propriétés des galaxies de Seyfert dans tous les domaines de longueurs d'onde – et pas seulement dans le domaine visible –, notamment l'émission de rayonnement X.

noyaux de galaxies particulièrement lumineux. Il faut cependant attendre presque vingt ans avant que les observations avec les grands télescopes au sol et avec le télescope spatial Hubble aient une résolution spatiale et une dynamique suffisantes pour que l'on puisse distinguer la « galaxie hôte » du quasar, tant celui-ci écrase de son éclat tout ce qui l'environne.

Tout le monde n'est pas d'accord, tant s'en faut, car ces objets sont extrêmement variables, certains pouvant gagner ou perdre une magnitude en quelques jours. Ce qui signifie – principe de causalité oblige – que leurs dimensions sont inférieures à quelques jours-lumière. Sachant que l'étoile la plus proche de nous est éloignée de quatre années-lumière, et que les quasars rayonnent comme des centaines de galaxies, c'est-à-dire comme des milliers de milliards d'étoiles comparables au Soleil, on est face à une énigme.

C'est pourquoi, pendant presque vingt ans, de nombreux astronomes – pendant les premières années ils étaient majoritaires, et parmi eux certains étaient très connus – pensent que les quasars sont proches, et que leurs redshifts ne sont pas dus à l'expansion de l'Univers mais à une loi physique encore inconnue. En effet, si les quasars sont proches, leur luminosité devient raisonnable pour leur taille. Cette « controverse du redshift », parfois très violente, s'éteint cependant à mesure que les évidences observationnelles viennent conforter l'origine cosmologique du redshift (les quasars ont les mêmes redshifts que les galaxies environnantes, par exemple).

Dans le même temps, certains astronomes plus théoriciens que les autres soutiennent de plus en plus fortement l'hypothèse de la présence au centre du noyau galactique d'un trou noir de plusieurs millions ou milliards de masses solaires. Au début des années 1980, l'hypothèse du trou noir l'emporte, car elle permet d'expliquer de nombreux phénomènes. Entre temps

d'ailleurs, on avait découvert les étoiles à neutrons, ces quasi-cadavres d'étoiles encore capables de nous envoyer de puissants signaux, qui prouvaient la validité des théories les plus hardies, puis les « trous noirs stellaires », comme Cyg X1 (à ne pas confondre avec Cyg A !).

Le zoo des galaxies actives

Dans les années suivant la découverte des quasars, on s'aperçoit qu'il existe de nombreux objets ressemblant à des galaxies mais possédant de bien étranges propriétés. On parle alors du « zoo des galaxies actives ». On y trouve pêle-mêle, outre les quasars et les galaxies de Seyfert, des objets apparemment très différents mais présentant tous la propriété d'émettre un rayonnement intense dans un tout petit volume. Parmi les quasars, certains rayonnent en radio, d'autres non. Parmi les galaxies, il y a les « radiogalaxies » comme Cygnus A, qui sont dix mille fois plus intenses en radio qu'en optique ; les « BL Lac », ressemblant aux quasars radio mais très variables, polarisés et sans raies spectrales ; les blazars, sortes de BL Lac possédant des raies spectrales ; les « OVV », pour « objets violemment variables » ; les LINERS (pour Low Ionization Nuclear Emission Line Regions), présents dans les noyaux de nombreuses galaxies elliptiques et émettant du rayonnement X ; les galaxies ultra-lumineuses en infrarouge ou ULIRG, etc. Nous verrons plus loin comment on peut expliquer ces diverses formes d'activité.

Dans un premier temps, on nommait « galaxies actives » toutes les galaxies présentant des raies spectrales en émission. On confondait donc les galaxies à grande formation d'étoiles – présentant des raies en émission provenant du gaz chauffé par les étoiles – et les galaxies possédant un noyau activé par un trou noir. On a maintenant pris l'habitude de n'appeler que les secondes « galaxies actives », ou, mieux, « galaxies à noyau actif » ou AGN en anglais (mot que nous utiliserons par la suite pour simplifier), le terme englobant les quasars très lumineux et les galaxies plus proches au noyau parfois peu lumineux dans le visible, mais émettant par exemple des rayons X ou possédant une source radio compacte. Ainsi les ULIRG sont en général des galaxies à formation d'étoiles et non des AGN.

Comment fonctionne le trou noir au centre des galaxies ?

D'abord pourquoi est-il si « lumineux » ? Il ne l'est évidemment pas par lui-même, mais par son environnement. Comme tout objet massif, il attire la matière proche ; celle-ci se conduit comme une météorite venant de l'espace qui s'enflamme et devient une belle étoile filante en pénétrant dans l'atmosphère terrestre. Or, près du trou noir, la vitesse de la « météorite » dépasse cent mille km/s au lieu d'être de quelques dizaines de km/s. Elle possède donc une énorme énergie de mouvement qui est convertie en chaleur et rayonnée, avant que ce

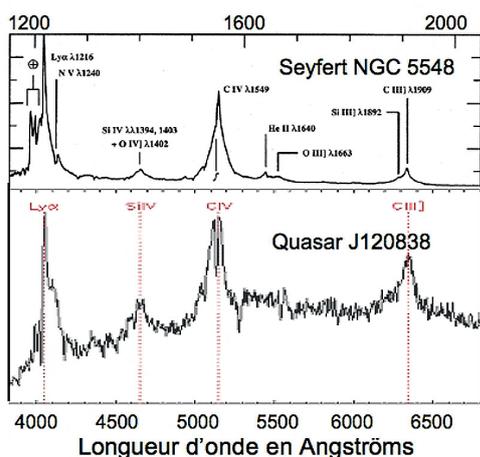


Fig. 2. Spectres ultraviolet de la galaxie de Seyfert NGC 5548 et du quasar J120838 obtenus avec le télescope spatial Hubble. On constate qu'ils montrent des raies spectrales identiques, mais celles du quasar sont déportées dans l'optique à cause du redshift. Crédit NASA.

qui en reste ne disparaisse dans le trou noir. L'énergie rayonnée peut s'élever à 30 % de l'énergie au repos – le fameux $E = m_0c^2$ de la formule d'Einstein – un rendement bien plus grand que les réactions nucléaires dans les étoiles (0,7 %)².

Cette matière provient des confins de la galaxie hôte, et pour parvenir au centre, il lui faut se débarrasser de l'énorme moment cinétique qu'elle possède au départ³. Comme l'explique F. Combes, les barres effectuent une partie du travail, ainsi que les perturbations se produisant lors de la collision et de la fusion de deux galaxies. À une dizaine d'années-lumière, soit dix mille à cent mille fois le rayon du trou noir, on pénètre dans la zone où domine sa gravitation ; c'est seulement là que l'ogre tapi au centre va jouer son rôle en attirant la matière, laquelle peut toutefois encore lui échapper si elle a une vitesse assez élevée⁴. Un autre processus va alors prendre le relais : le « disque d'accrétion ». En effet, le gaz ne se précipite pas radialement sur le trou noir, car sa vitesse initiale a une probabilité très faible d'être dirigée précisément vers lui. Elle spirale en s'en rapprochant très lentement, formant un disque dont la vitesse de rotation augmente suivant la loi de Kepler jusqu'à approcher celle de la lumière. Au début, le gaz forme un tore épais rempli de poussières, puis devient un disque mince qui se réchauffe à cause de la viscosité⁵ et rayonne de plus en plus intensément. Sa couleur change : de rouge à l'extérieur, il devient bleu puis ultraviolet près du trou noir, ce qui explique que la plupart des AGN soient très bleus (à l'émission) et rayonnent essentiellement dans le domaine ultraviolet. Cependant, tous les AGN n'ont pas de disque d'accrétion, ou bien il peut être en partie épuisé et ne pas s'étendre suffisamment loin, c'est pourquoi certains, comme les LINERS, sont invisibles en optique.

Comment les AGN se manifestent-ils ?

Les larges raies en émission sont observées seulement dans les spectres des quasars et des galaxies de Seyfert. On pense qu'elles proviennent de nuages s'échappant à grande vitesse du disque d'accrétion ; mais il faut

2 En supposant un rendement ϵ de 10 %, et une luminosité L de 1039 W (celle de 3C 373), soit $L = c^2 \epsilon \frac{dM}{dt}$, il faut que le trou noir avale $\frac{dM}{dt} = 1,7$ étoile comme le Soleil par an, ce qui n'est pas aussi exorbitant qu'on pourrait le penser.

3 Le moment cinétique est en effet égal à $R \times V \times M$, où R est le rayon, V la vitesse de rotation et M la masse ; si la matière se trouve au départ à 3 000 parsecs ($\approx 10^{20}$ m) du centre et a une vitesse de rotation de 200 km/s, qu'elle parvient avec une vitesse de rotation de 200 000 km/s jusqu'à l'horizon d'un trou noir ayant une taille d'un milliard de mètres (voir l'encart), un facteur 10^8 sépare la valeur du moment cinétique au départ et à l'arrivée !

4 Précisément, au dessus de la vitesse de libération.

5 Le mécanisme invoqué pour cette viscosité est l'« instabilité magnéto-rotationnelle », qui provient du cisaillement du champ magnétique dans le disque en rotation différentielle (c'est le cas d'un disque képlérien) contenant des particules chargées.

avouer que leur origine est mal comprise, bien qu'elles jouent un rôle fondamental dans la détection des quasars. Certaines Seyfert (de type 1) ont à la fois des raies larges et d'autres plus étroites provenant de régions plus éloignées du trou noir, et ayant par conséquent des vitesses plus faibles. D'autres (les Seyfert de type 2) ne présentent que les raies plus étroites ; nous allons en voir la raison un peu plus loin.

Presque tous les AGN, même les plus faibles, émettent du **rayonnement X** ; ce dernier est variable sur des échelles de temps très courtes, parfois de l'ordre de l'heure. Il provient d'une couronne très chaude entourant le trou noir dont il représente véritablement **la signature**. Notons d'ailleurs que les AGN rendent compte d'au moins 80 % de tout le rayonnement X du ciel. Dans certains objets, on observe au voisinage de 7 keV une raie du fer produite par la réflexion du rayonnement de la couronne sur le disque d'accrétion. Elle est déformée⁶ par des effets de relativité générale d'autant plus importants qu'on en est plus proche. Comme la matière plonge plus près du trou noir s'il est en rotation, la forme de la raie permet – vaguement, avouons-le – de distinguer les trous noirs en rotation des trous noirs sans rotation (voir l'encart).

Une composante importante de l'émission des AGN est le rayonnement radio. Il peut être confiné dans la région centrale, ou bien s'étendre sous forme d'un jet se propageant parfois jusqu'à des millions d'années-lumière. Les jets sont constitués de particules chargées ayant des vitesses très proches de celle de la lumière (particules « relativistes »). Ils émettent du rayonnement « synchrotron »⁷ qui se prolonge parfois jusque dans le domaine visible. Dans certaines radiogalaxies et quasars radio, l'émission se prolonge jusqu'au domaine gamma. Elle est alors due à un processus appelé « Compton inverse », où les électrons relativistes communiquent leur énergie aux photons radio ou optiques et ainsi les propulsent dans le domaine gamma.

Les « radiogalaxies » ont été divisées en deux classes par Fanaroff et Riley : les FRI et les FR II. Les FRI ont des jets étendus plus brillants au centre ; les FR II, plus puissantes, se terminent par de grands lobes possédant à leurs extrémités des « taches chaudes » dues à des chocs sur le gaz intergalactique (figure 3). Le scénario préféré pour la formation des jets est l'effet Blandford-Znajek : si le trou noir est en rotation rapide, son frottement sur le disque d'accrétion provoque l'apparition de champs électrique et magnétique qui extraient l'énergie de rotation du trou noir par effet dynamo. On s'attend donc à ce que des jets soient présents lorsque le trou noir possède une rotation rapide. Nous allons voir que c'est le cas.

6 Elle est étirée vers le rouge et amplifiée du côté bleu.

7 Du nom des accélérateurs – les synchrotrons – dans lequel ce rayonnement a été identifié pour la première fois, en 1950. Il est émis par des particules relativistes chargées se déplaçant dans un champ magnétique.

Un autre mécanisme d'éjection est celui des vents (« outflows » en anglais), un phénomène ressemblant aux jets mais dans lequel du gaz non relativiste est dispersé dans un grand angle. La plupart du temps, on le détecte indirectement par de larges raies spectrales en absorption. On pense que ces vents s'échappent de la surface du disque d'accrétion en suivant les lignes de force du champ magnétique.

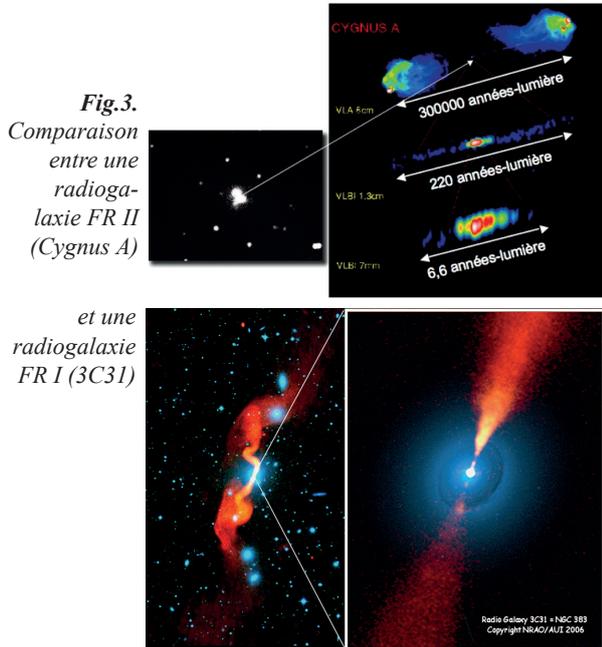


Fig.3. Comparaison entre une radiogalaxie FR II (Cygnus A) et une radiogalaxie FR I (3C31). En haut, la galaxie Cygnus A, à gauche dans le visible et à droite le jet radio associé, à différentes échelles : on voit qu'il provient d'une région très petite à l'intérieur du noyau. En bas, un montage optique (en bleu) et radio (en rouge) de 3C31. Les sources radio sont en fausses couleurs.

Le trou noir mène le bal

On a rapidement compris que les AGN possèdent tous un trou noir massif et que leurs apparences différentes sont dues soit à des angles de vue différents, soit à des masses, des taux d'accrétion ou des vitesses de rotation différents, soit encore, naturellement, à un état différent d'évolution.

Influence de l'inclinaison : le « schéma unifié »

Le principe est simple : comme le trou noir possède un plan privilégié correspondant au tore épais et au disque d'accrétion, les phénomènes qui se produisent au centre sont cachés ou au contraire visibles suivant l'orientation de la ligne de visée (figure 4).

Influence de la rotation

Une question a tarabudé longtemps les astronomes : pourquoi les jets sont-ils toujours observés dans des galaxies elliptiques massives ?

On sait que celles-ci sont formées par l'agglomération de plus petites galaxies. Chacune possède son trou

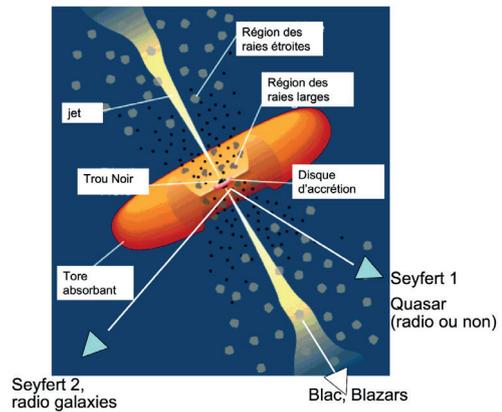


Fig. 4. En 1995, Ury et Padovani ont proposé ce « schéma unifié » tenant compte de la direction dans laquelle est observé un AGN. Les Seyfert de type 1, qui ont des raies très larges, sont vues de face, et les Seyfert 2 sont vues par la tranche, le tore cachant alors la région plus centrale. Les blazars et les BL Lac sont respectivement des quasars radio et des galaxies FR I dont le jet pointe dans une direction proche de la ligne de visée ; ils sont vus de face. Le rayonnement est alors amplifié par un effet relativiste (cette amplification explique pourquoi on ne voit dans certains cas que la partie du jet dirigée vers nous, comme dans 3C 273, alors qu'ils sont certainement éjectés symétriquement).

noir supermassif ; lors d'une fusion, les trous noirs se rapprochent et finissent par tourner l'un autour de l'autre. Parfois l'un est éjecté de la galaxie par un effet de fronde. On en a des preuves par l'observation, loin du centre d'une galaxie et de leur frère supermassif resté au centre, de trous noirs « errants », ainsi que d'AGN binaires (figure 5).

La plupart du temps, les deux trous noirs doivent finir par fusionner, formant un trou noir plus massif animé

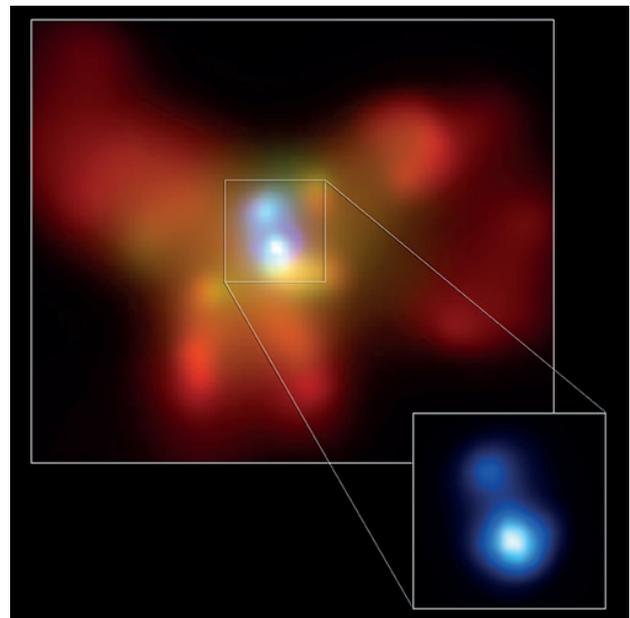


Fig. 5. Image en rayons X de la galaxie NGC 6240, constituée de deux galaxies en train de fusionner, prise avec le télescope spatial Chandra, superposée à une image optique. Deux noyaux contenant chacun un trou noir sont visibles en rayons X. Crédit NASA.

d'une rotation rapide⁸. Or on a vu que la présence d'un jet implique une rotation rapide du trou noir. Il est donc normal de trouver les jets dans les galaxies elliptiques massives.

Influence du rapport entre la luminosité et la masse

La luminosité est limitée supérieurement par la « luminosité d'Eddington⁹ », atteinte lorsque la pression du rayonnement émis contrebalance la gravité et bloque l'accrétion. Les quasars, recevant autant ou plus de matière qu'ils ne peuvent en avaler, rayonnent près de cette limite – ce qui permet de déterminer approximativement la masse du trou noir. Les propriétés des AGN dépendent fortement du rapport entre la luminosité observée (incluant tous les domaines de longueur d'onde) et la luminosité d'Eddington et, comme cette dernière est proportionnelle à la masse, du rapport entre la luminosité et la masse. Ainsi les rapports d'intensités entre les raies spectrales dépendent-ils fortement du rapport L/M, sans que l'on en comprenne encore la raison. En revanche, on s'explique bien pourquoi les AGN ayant un faible rapport L/M ont un rayonnement X intense¹⁰.

Les grands relevés et l'évolution des AGN

Deux grandes révolutions se sont produites au cours de ces deux dernières décennies. L'une correspond aux gigantesques simulations numériques, telle celle qui a conduit à la figure 2 de l'article de F. Combes. L'autre est celle des Big Data, dont l'astronomie est l'une des plus grandes pourvoyeuses. Ces données proviennent des très grands relevés obtenus grâce aux progrès des détecteurs et à l'existence de télescopes dédiés, comme le télescope Sloan aux États-Unis : le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) contient ainsi des centaines de milliers de quasars et de galaxies actives confirmés, et plus d'un million de candidats. De grands relevés de données X et radio sont également effectués ; la comparaison entre les différentes longueurs d'onde permet de découvrir des candidats nouveaux et des propriétés nouvelles. Par ailleurs, les grands télescopes munis d'une optique sophistiquée détectent des AGN de plus en plus lointains. Ces deux types d'observations se conjuguent pour prouver que les AGN et les galaxies normales ont suivi une évolution parallèle depuis leur naissance, quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Ce qui pose des problèmes pour les trous noirs supermassifs, dont certains ont déjà atteint à

ce moment-là des masses considérables : comment ont-ils grossi aussi rapidement ? Comment sont-ils nés ? Ils pourraient s'être effondrés directement en trous noirs d'environ un million de masses solaires, en même temps que se formaient les protogalaxies, ou bien provenir de l'agglomération de trous noirs stellaires formés lors de l'effondrement des premières étoiles. Les modèles ne sont pas encore suffisamment élaborés pour permettre de choisir entre ces deux solutions.

La fausse retraite des trous noirs

Un quasar cesse de rayonner après une centaine de millions d'années lorsqu'il a avalé toute la matière issue, entre autres, des fusions de galaxies et contenue dans sa sphère d'influence. Que se passe-t-il alors ? Il devient « dormant » et perceptible seulement par la gravité qu'il exerce autour de lui. Grâce à cette propriété, on a découvert que toutes les galaxies « normales » assez massives contiennent, camouflé au centre, un trou noir dont la masse est quelques millièmes de celle du bulbe de la galaxie hôte (figure 6). C'est une preuve de leur évolution concomitante, due en partie à l'effet évoqué par F. Combes : le rayonnement, le jet et les vents pourraient expulser une grande partie du gaz de leur galaxie et arrêter leur croissance. La question est loin d'être réglée...

Il existe en particulier de notables exceptions à cette relation. On vient ainsi de découvrir que certaines galaxies naines « ultra-compactes » possèdent des trous noirs presque aussi massifs que la galaxie elle-même ! Il s'agit probablement de galaxies dont les étoiles et le gaz ont été littéralement balayés et capturés lors de leur traversée d'une galaxie plus massive.

Rappelons en terminant que les trous noirs dormants peuvent se réveiller, et même très facilement ; il suffit que les effleure un nuage de gaz ou tout simplement une étoile. Si c'est une étoile, elle est alors déchirée par les violents effets de marées qu'elle subit près du trou noir ; une partie s'échappe, mais l'autre est capturée ; le phénomène se manifeste par une émission brutale de rayons X, observée dans un certain nombre d'AGN. Le trou noir central de la Voie lactée, Sgr A*, a ainsi eu des

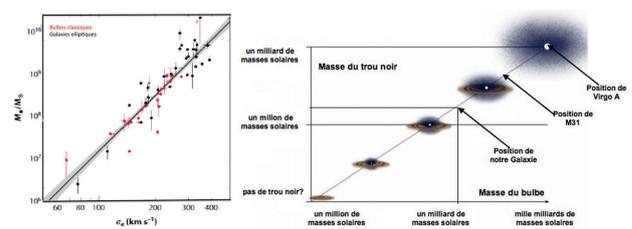


Fig. 6. À gauche, la relation observée entre la masse du trou noir et la dispersion de vitesse dans le bulbe, d'après Kormendy et Ho, 2013. Cette dernière peut être traduite en masse du bulbe. À droite, un schéma simplifié de la relation entre la masse du trou noir et celle du bulbe.

8 C'est l'équivalent des trous noirs binaires de quelques dizaines de masses solaires dont on a observé récemment la fusion accompagnée de l'émission d'ondes gravitationnelles.

9 Eddington est un célèbre astronome anglais du début du xxe siècle, qui a été entre autres l'auteur de la première vérification de la relativité générale, en 1919, lors d'une éclipse totale de Soleil.

10 Ils ont une couronne chaude et pas de disque d'accrétion.

« poussées de fièvre » au cours des derniers millions d'années, et il en subira d'autres qui iront probablement jusqu'à transformer parfois la Voie lactée en galaxie de Seyfert, heureusement sans que rien ne soit perturbé sur notre Terre hospitalière. D'ailleurs, comme toutes les galaxies possédant un trou noir supermassif, à un moment dans le passé la Voie lactée a dû être un quasar, modeste il est vrai puisque son trou noir est resté peu massif.

Note pour y voir clair dans les trous noirs

Toutes les galaxies « ordinaires » possédant un trou noir supermassif central traversent des phases actives à différentes époques de leur vie, y compris présentement. Elles se produisent lorsque le trou noir a de la matière à avaler. Lorsqu'il en a beaucoup, la galaxie devient un quasar ; lorsqu'il en a un peu moins, une galaxie de Seyfert, et encore moins, un LINER.

Parallèlement, si le trou noir est en rotation par suite d'une fusion avec un autre trou noir, la galaxie devient un quasar radio ou une simple radiogalaxie. Enfin, l'angle sous lequel nous le voyons correspond à des sous-classes de galaxies, comme la distinction entre Seyfert de type 1 et 2, ou bien entre les radiogalaxies et les BL Lac, ou entre les quasars et les blazars.



Caractéristiques d'un trou noir

Un trou noir est un objet si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche de s'en échapper la matière et le rayonnement qui ont pénétré en deçà de son « horizon ». Le rayon de l'horizon, appelé aussi rayon gravitationnel ou de Schwarzschild (du nom du physicien allemand qui a le premier étudié les trous noirs, en 1916) est égal à $2 GM/c^2$, où G est la constante de la gravitation, M la masse du trou noir, et c la vitesse de la lumière, soit 3 kilomètres pour un trou noir d'une masse solaire et 3 milliards de kilomètres – 20 ua – pour un trou noir d'un milliard de masses solaires comme ceux qui sont considérés ici (si la Terre pouvait devenir un trou noir, sa taille serait celle d'une bille). On constate que ce rayon est proportionnel à la masse, ce qui signifie que la densité moyenne d'un trou noir est d'autant plus petite que sa masse est grande, contrairement à ce qu'on pourrait imaginer.

Outre sa masse, un trou noir est caractérisé par sa rotation et sa charge électrique. Cette dernière est toujours supposée nulle car la matière cosmique qu'avale le trou noir est électriquement neutre. En ce qui concerne la rotation, on distingue les trous noirs sans rotation ou trous noirs de Schwarzschild, et ceux avec rotation ou trous noirs de Kerr (un physicien néo-zélandais). Un paramètre fondamental est l'ISCO (« Innermost Stable Circular Orbit ») ou dernière orbite circulaire stable en dessous de laquelle la matière tombe sans rayonner dans le trou noir. Pour un trou noir sans rotation, le rayon de l'ISCO vaut trois fois le rayon de Schwarzschild ; il est cinq fois plus petit pour un trou noir de Kerr extrême. L'énergie rayonnée étant voisine de GM/R , on en déduit que celle rayonnée autour d'un trou noir de Kerr est environ cinq fois plus grande que celle produite autour d'un trou noir de Schwarzschild.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2							■				
3			■								
4				■					■		
5					■					■	
6							■				
7								■			■
8		■					■				
9					■						■

Horizontalement

- Comme certaines galaxies.
- Un des bras de notre galaxie. Panseur français.
- LR6. Comme certaines galaxies.
- Chiffres romains. Réunion de cardinaux. Dans les Céphéides.
- Capitale du Valais. Plat du Sud.
- Famille d'astronomes russes. Symboles de solidarité.

- Composantes de galaxies. Demi chanteur.
- Premier télescope à optique active. Comme le débat des années 1920 sur la nature des nébuleuses et des galaxies.
- Abers. Noir dans une galaxie.

Verticalement

- Un peu plus de 1000 années-lumière pour notre Galaxie.
- C'est grâce à elle que l'on a pu mesurer les premières distances de galaxies.
- Piles alcalines. Formation vénusienne circulaire.
- Le plus gros satellite artificiel de la Terre. Propices à l'observation des galaxies quand elles sont noires.
- Cassini I^{er} était celui de Cassini III. Ensemble de quatre télescopes.
- De rouge pour la Lune éclipse.
- Louis ou Charles par exemple. On y trouve le centre de notre Galaxie.
- Galaxie très énergétique. Dans Andromède.
- Adresse. Cœur de galaxie.
- Entre Grèce et Turquie. On y trouve oméga, qui serait un reste de galaxie et non un amas globulaire.
- De telles galaxies permettent des calculs de distance. Cube.

Solution p. 40

AVEC NOS ÉLÈVES

Activités sur le thème des galaxies

Hervé Faivre, enseignant de sciences physiques, Semur-en-Auxois

Hervé Faivre anime depuis de longues années un atelier astronomie dans son collège. Il nous propose ici des activités de différents niveaux sur le thème des galaxies.

L'Univers évolue ; on le voit en expansion, mais c'est surtout dans nos représentations qu'il a évolué le plus à l'échelle du temps humain. Dernièrement, dans une publication récente¹, le nombre de galaxies estimé à été multiplié par 10 ... et alors ? Qu'est-ce que cela change pour nous avec nos élèves ?

Si, comme moi, ces dernières années vous avez pu réaliser quelques activités autour des galaxies, peut-être vous êtes-vous demandé s'il faut tout mettre à la corbeille et recommencer.

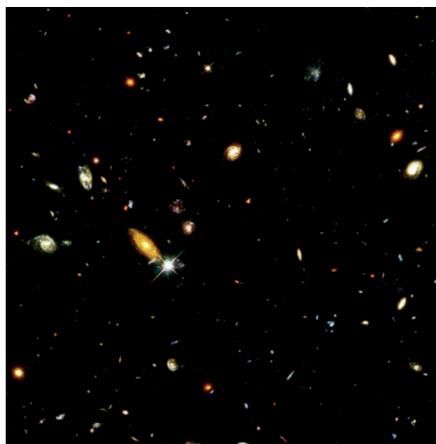
Voici quelques calculs et autres amusements actualisés autour de ce thème.

Le champ profond de Hubble et l'estimation du nombre de galaxies

Le « champ profond de Hubble » (ou HDF pour l'anglais Hubble Deep Field) est une région de l'hémisphère nord de la sphère céleste située dans la constellation de la Grande Ourse, couvrant à peu près 1/30 000 000 de la surface du ciel, et qui contient environ 3 000 galaxies de faible luminosité. Cette prise de vue s'est étalée sur 10 jours consécutifs du 18 au 28 décembre 1995. Elle a une taille d'environ 2,6 minutes d'arc. Cela équivaut à celle d'un bouton de chemise placé à 25 mètres².

Fig. 1. Vue d'une partie de l'Univers explorée par le télescope spatial Hubble. Des milliers de galaxies sont visibles sur cette image.

©NASA, ESA, 1995



Quelques calculs à faire à partir de l'article

Le champ de vision de cette image est de 2,6 minutes d'arc (diamètre du champ), soit, en supposant le champ circulaire, $\pi \times (2,6/2)^2 = 5,3$ arcminutes² ou encore $5,3/(60 \times 60) = 1,47 \times 10^{-3}$ deg².

L'angle solide de la voûte céleste entière mesure 4π stéradians soit $4\pi \times (180/\pi)^2 \approx 41\,253$ deg²

$1,47 \times 10^{-3} / 41\,253 = 3,57 \times 10^{-8}$ soit 1/28 000 000 de la voûte entière (proche de 1/30 000 000).

Pour accéder au nombre total de galaxies dans l'Univers visible, il suffit alors de multiplier 3 000 par 28 000 000 et on obtient déjà une « petite » centaine de milliards de galaxies.

Depuis, ces données ont été améliorées avec un Champ Ultra Profond (HUDF) et même un Hubble eXtreme Deep Field en 2012 comptant des objets à plus de 13,2 milliards d'années-lumière. On admettait alors un nombre de galaxies d'environ 200 milliards.

En fin d'année dernière, en utilisant des images du champ ultra profond avec Hubble et d'autres télescopes (VLT), des astronomes, en Grande-Bretagne, ont réussi à construire des images 3D³. Ils sont alors arrivés à la conclusion que le nombre actuellement admis de galaxies était sous-estimé d'au moins un facteur 10 !

Pour faire très court : auparavant nous n'étions pas en mesure de compter les petites galaxies lointaines et peu lumineuses (on aurait pu le deviner). Il semble bien que, dans l'espace lointain, il y ait dix fois plus de galaxies par unité de volume que dans l'espace proche.

Si on voit loin dans l'Univers, on voit tôt dans le passé. Ce que l'on trouve n'est pas le nombre de galaxies d'aujourd'hui mais bien le nombre de galaxies dont la lumière nous parvient seulement aujourd'hui. Il s'agit d'une sommation sur la profondeur de champ de l'image qui revient en fait à une sommation sur du temps. Nombre de galaxies ont disparu ou fusionné

1 <https://arxiv.org/abs/1607.03909>

2 Résumé de l'article Wikipedia sur le sujet.

3 https://www.sciencesetavenir.fr/espace/univers/dix-fois-plus-de-galaxies-dans-l-univers-observable_107518

depuis. Mais alors, qu'a bien pu apporter la 3D dans ce nouveau recensement ?

L'image 3D représente les galaxies observables dans une direction donnée à une distance comprise entre 0 à une dizaine de milliards d'années-lumière. Imaginez un peu le cauchemar : prenez une photo de classe pour compter vos élèves. Votre classe est très profonde (les effectifs nombreux des classes surchargées...). Tout devant, au premier rang, il y a des lycéens brillants (un peu trop ils gênent même votre perception du fond). Au deuxième rang, ils brillent déjà moins mais surtout ce sont des élèves plus jeunes au look de collégiens ! Au troisième, encore plus jeunes, des primaires. Au quatrième rang, des maternelles... et vers le fond de la classe, c'est flou, diffus, plus rien à voir, il fait tout noir.

Saurez-vous dire combien vous avez d'élèves ? Dans cette classe ? Cette année ? Depuis toujours ? Certains élèves du fond auront peut-être même quitté le cursus avant le lycée.

Bon ! Un facteur 10 en astronomie, ce n'est rien. Au final, on apprend juste qu'il y a dix milliards d'années, il y avait au moins dix fois plus de galaxies qu'aujourd'hui par unité de volume et que, depuis, beaucoup ont fusionné pour former des objets plus gros... Bref, pas de quoi s'affoler et réécrire tous les manuels. Au pire on rajoute un zéro au crayon.

Allons-nous manquer de sable ?

Il est usuel de comparer le nombre d'étoiles dans l'Univers avec celui des grains de sable sur Terre. Pour s'essayer à la notation scientifique des grands nombres, c'est un bon exercice pour des collégiens.

Prenons 200 milliards de galaxies contenant chacune entre 200 et 400 milliards d'étoiles. L'ordre de grandeur du nombre d'étoiles dans l'Univers est donc de $2 \times 10^{11} \times 3 \times 10^{11} = 6 \times 10^{22}$ soit environ 10^{23} étoiles.

Comptons les grains de sable sur l'ensemble des plages du monde. On prend 1 000 000 km pour la longueur totale des côtes à l'échelle mondiale (selon les sources cela varie énormément selon l'échelle choisie, les côtes se présentent sous forme fractale... en estimer la longueur n'est pas très raisonnable⁴). On considère, de plus, que seulement 1/4 de ces côtes sont recouvertes de sable sur une bande de 100 m de plage et 4 m de profondeur sur 250 000 km.

Cela donne :

$$100 \times 4 \times 2,5 \times 10^8 = 10^{11} \text{ m}^3 \text{ de sable.}$$

Un grain de sable a une taille comprise en 0,01 et

2 mm, disons $0,1 \text{ mm}^3$ en moyenne.

On obtient $10^{11} / 10^{-10} = 10^{21}$ grains de sables.

C'est un peu juste, il va falloir creuser davantage !

On peut aussi le comparer au nombre de gouttes d'eau dans les océans.

Volume d'eau salée (97 % de l'hydrosphère) :

$$1,3 \times 10^9 \text{ km}^3 = 1,3 \times 10^{18} \text{ m}^3$$

Volume d'une goutte d'eau moyenne :

$$0,5 \text{ mL} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Nombre de gouttes d'eau :

$$1,3 \times 10^{18} / 5 \times 10^{-7} = 2,6 \times 10^{24} \text{ gouttes}$$

Cette fois c'est un peu trop, mais c'est préférable, compte tenu de l'inflation du nombre de galaxies.

Photographier des galaxies avec des gros télescopes

Déjà en 2012, dans le CC n° 140, je vous présentais l'utilisation des télescopes de Faulkes et les travaux des collégiens pour reproduire le diagramme en diapason des galaxies en utilisant ces télescopes. Il est toujours possible d'observer et de photographier les galaxies avec les Faulkes ou avec les télescopes Iris.

Fig. 2. Exemples d'images prises avec les Faulkes.

Chez FAULKES, l'interface a beaucoup évolué et le nombre de télescopes opérationnels également. C'est un excellent outil pour l'observation des galaxies de tous types par télescopes téléopérés en toutes saisons et toutes latitudes avec des appareils de 2 m, 1 m et moins). Les télescopes IRIS ouvrent également cette possibilité depuis la France. Ils n'offrent toutefois pas le confort du décalage horaire des Faulkes ! Ces instruments feront l'objet d'un article dans un prochain numéro.

Prendre part à des projets avec galaxyzoo

Le nouveau décompte des galaxies nous apprend que 90 % restent à étudier. Des nouveautés sont donc probables mais sans doute pas de quoi modifier la classification de Hubble (vers 1936) ou celle de Vaucouleurs (1959). Néanmoins il y aura certainement de quoi alimenter la base de données

4 Voir par exemple https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_longueur_de_c%C3%B4tes

de Galaxy Zoo qui fête ses 10 ans. C'est la 4^e version et il a de nombreux petits frères dans la galaxie des projets de sciences participatives.

Galaxy Zoo 3D et Sunspotter sont en pause actuellement, victimes de leurs succès, mais d'autres projets vous permettent de partir à la recherche d'objets martiens (Planet Four) de supernovæ (Supernova Hunters), d'exoplanètes ou de disques protoplanétaires (Exoplanet Explorers / Disk Detective)...



Fig. 3. Avec Galaxy Zoo, les élèves peuvent participer simplement à des projets comme la classification des galaxies issues d'images de Hubble et bien d'autres.

Comment « peser » une galaxie ?

On peut estimer la masse d'une galaxie dès lors qu'il est possible d'accéder à sa vitesse de rotation et son rayon⁵. Nous vous proposons trois exemples d'exercices.

Les deux premiers permettent d'obtenir la masse de notre Galaxie connaissant la vitesse du Soleil autour du centre galactique, le troisième utilise un spectre d'une autre galaxie et le décalage Doppler-Fizeau. Nous ne donnons ici que les énoncés, vous trouverez les solutions sur les sites respectifs.

- Exercice proposé sur le site du CLEA⁶

- * Quelle est la distance du Soleil au centre galactique en kilomètres et en unités astronomiques ?
- * Combien d'années met le Soleil pour faire une révolution autour du centre galactique ?
- * Quelle est la loi de Kepler pour le Soleil tournant autour du centre galactique et pour la Terre tournant autour du Soleil, avec les unités suivantes : unité astronomique et année. En déduire la masse M de notre Galaxie.
- * Retrouver le résultat directement en utilisant la constante de la gravitation G .

⁵ On utilise, dans les exemples qui suivent, soit la 3^e loi de Kepler généralisée ($r^3/T^2 = GM/4\pi^2$) soit l'égalité entre l'accélération gravitationnelle du centre et l'accélération centripète ($GM/r^2 = V^2/r$)

⁶ <http://clea-astro.eu/lunap/GalaxMasse/GalMasActiv>

- Exercice proposé par l'observatoire de Paris⁷

Notre galaxie, la Voie Lactée, a la forme d'une galette d'environ 30 000 pc de diamètre et 2 000 pc d'épaisseur. La région centrale est formée d'un bulbe d'allure sphérique de 2 700 pc de rayon, qui contient l'essentiel de la masse galactique. Le Soleil orbite à 8 000 pc du centre galactique. D'après les mesures Doppler effectuées sur la raie à 21 cm de l'hydrogène, l'orbite du Soleil est approximativement circulaire, et la vitesse orbitale du Soleil est d'environ 220 km/s.

- * Déterminer la période T du mouvement du Soleil autour du centre galactique. L'exprimer en années.
- * Estimer la masse du bulbe galactique, en unité de masse solaire.

- Exercice proposé par HOU⁸

Les étapes de l'exercice :

- * On mesure le décalage Doppler-Fizeau sur le spectre de la galaxie NGC 7083 sur deux parties éloignées de 10 pixels du centre et on en déduit leur vitesse en km/s.
- * Connaissant la distance de la galaxie, on calcule la distance de chaque partie au centre sachant qu'un pixel correspond à 0,82".
- * On déduit de ces deux résultats la masse de la galaxie.

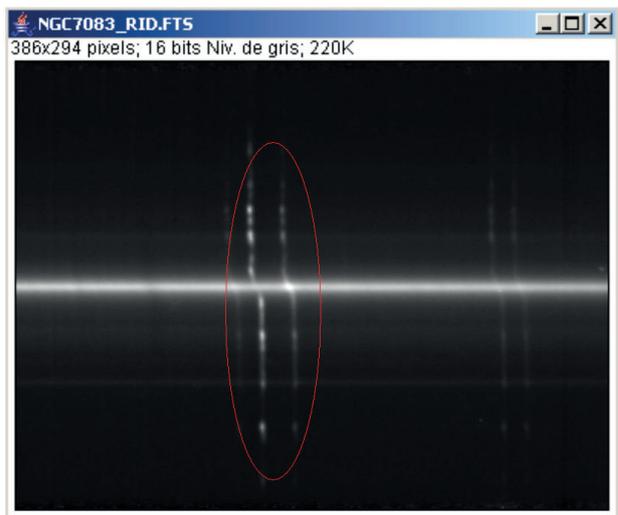


Fig. 4. Spectre de la galaxie NGC 7083. Au centre, la bande claire est le spectre du noyau de la galaxie. Le décalage spectral est bien visible sur les raies entourées en rouge.

Une autre méthode pour estimer la masse d'une galaxie est de déduire de sa luminosité le nombre de soleils qu'elle pourrait contenir pour rayonner autant. On peut imaginer diverses activités sur le sujet à base de logarithmes... ■

⁷ http://www.edu.upmc.fr/uel/physique/astrophysics/exercer/chapitre2/souschapitre1/section1/page8_1.html

⁸ <http://www.fr.euhou.net/index.php/exercices-mainmenu-13/lyce-mainmenu-174/84-peser-une-galaxie>

AVEC NOS ÉLÈVES

Une photo de galaxie par des collégiens

Jean-Michel Vienney, vienney_j_m@orange.fr

Des collégiens peu expérimentés qui photographient une supernova, ce n'est pas courant. Mais avec de la motivation et un encadrement technique conséquent, c'est possible....

Dans le cadre du projet Experts Juniors Picardie Sciences (Programme d'Investissements d'Avenir - Ombelliscience), de nombreux jeunes ont travaillé avec leurs enseignants sur des projets scientifiques en partenariat avec des laboratoires de l'Université de Picardie Jules Verne.

Ainsi un groupe de collégiens de Poix de Picardie a travaillé en 2016-2017 sur la thématique de la lumière, de la source aux détecteurs. Avec leur enseignant Stéphane Boué, ils ont découvert et participé à des travaux expérimentaux (élaboration de couches minces, spectrophotométrie) au Laboratoire de physique de la matière condensée, encadrés par Pierre Barroy, enseignant-chercheur. Pierre et Stéphane ont ensuite préparé, avec eux et des bénévoles de l'association Planète Sciences (Paul Giroud, Olivier Bonnavaud, Jean-Michel Vienney) un séjour à l'observatoire Jean-Marc Salomon¹ à Buthiers (Seine et Marne).

0 h 30, dans la pénombre de la salle sous coupole du TJMS.

«Vérification du temps de pose, du répertoire d'enregistrement et du nom générique des fichiers, des cases à cocher : choix du binning, choix du filtre, enregistrement automatique, dernières vérifications sous la coupole, à l'étage au dessus : cimier bien orienté, toutes les lumières éteintes... C'est bon, vous pouvez lancer les poses ».

Très concentrés devant le panneau de commande de la caméra qui s'affiche sur le moniteur de Kepler, l'ordinateur de pilotage du TJMS, trois jeunes collégiens viennent de repasser en revue la check-list du cahier de procédures. Derrière eux, Pierre acquiesce : après la série de poses avec le filtre « luminance », on est maintenant parti pour une série de poses avec le filtre rouge, puis si tout va bien ce sera le vert, et enfin le bleu. But : obtenir à partir de ces 4 séries d'images (luminance, rouge, vert, bleu) une image finale en couleurs de la cible du jour : la

galaxie NGC 6946 aussi nommée du « feu d'artifice »... nous verrons plus loin pourquoi !



Fig. 1. Trois des collégiens devant Galilée, l'ordinateur de traitement.

Mais revenons au début de l'histoire ...

Arrivés la veille en toute fin d'après-midi, sérieusement retardés par les embouteillages de l'est parisien, nos collégiens et leurs professeurs ont commencé par aller au pas de course dîner au restaurant de la base de loisirs puis prendre possession de leurs hébergements pour enfin monter à l'observatoire où les attendait l'équipe des bénévoles qui allaient les accompagner pendant leur séjour.

Juste le temps de poser leurs affaires et les voici entraînés sur la terrasse dans les lueurs du crépuscule, pour monter les « petits » instruments. C'est ensuite en jonglant entre les fréquents passages de nuages qu'ils ont pu s'initier à l'utilisation des cartes mobiles du ciel, apprendre à repérer méthodiquement et mémoriser, en leur associant quelques légendes, les principales constellations, utiliser cartes du ciel mobiles et jumelles, observer deux passages de l'ISS avec Thomas Pesquet à bord (les collégiens avaient semé chez eux les mêmes graines que Thomas à bord de la station), relever la position des lunes galiléennes et observer les bandes nuageuses à la surface de Jupiter, sans oublier la visite du télescope de 600 mm et quelques observations visuelles. Vers 1 h, bien fatigués par leur long voyage les plus

¹ Observatoire situé en Seine-et-Marne et géré par l'association Planète Science. <http://www.planete-sciences.org/astro>

courageux ont même pu suivre le lever de Saturne et admirer ses anneaux et Titan, la plus brillante de ses lunes.



Fig. 4. Passage de l'ISS au-dessus du TJMS : Thomas Pesquet est à bord.

Dès le lendemain matin, débriefing autour du petit déjeuner : plébiscite de la séance d'apprentissage des constellations, de l'observation de Jupiter avec le télescope. Discussion libre autour des cibles projetées pour la prochaine soirée : nébuleuses, galaxies (trio du Lion), amas stellaires (M13), étoiles filantes, passages de satellites artificiels, nouvelle séance de découverte des constellations et de leurs légendes...

Plus tard dans l'après-midi, ateliers expérimentaux autour de la lumière solaire, observation du Soleil (avec le proturographe du TJMS et sur la terrasse avec une lunette Halpha et une lunette munie d'un filtre visuel), sans oublier la « ronde du zodiaque », atelier autour des maquettes du CLEA pour expliquer les mouvements apparents du Soleil et des planètes devant les 13 constellations du zodiaque.

Et le soir, toujours en jonglant entre les nombreux passages de nuages, reprise des activités d'observation entamées la veille, avec en plus installation sur la terrasse du Dobson de 450 mm apporté par Olivier, et une initiation à l'imagerie et au pilotage du TJMS et de sa caméra CCD.

Parmi les cibles proposées, priorité a été donnée à la galaxie NGC 6946. Galaxie spirale, juste à cheval entre les constellations du Cygne et de Céphée, grande comme 1/3 de pleine Lune vue depuis la Terre, à environ 20 millions d'années-lumière, elle est surnommée « galaxie du feu d'artifice » pour le nombre élevé de supernovas qu'on y a observé depuis le début du siècle dernier. C'est plus précisément l'occasion de confirmer la dixième, SN2017eaw détectée juste quelques jours avant !

Malgré les nombreux passages nuageux, le télescope est aligné, puis la cible pointée. Après mise au point et astrométrie une première image exploitable

s'affiche sur l'écran de Kepler. Comparaison avec les images des bases de données, la supernova est bien là et après un premier prétraitement rapide, Pierre est en mesure de nous donner une première évaluation de sa magnitude, tout à fait en accord avec les valeurs déjà publiées.

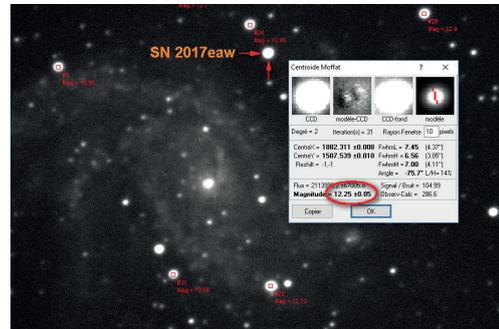


Fig. 3. Copie de l'écran de contrôle de Kepler, l'ordinateur de pilotage du TJMS.

Reste maintenant à faire une belle image, pour le compte-rendu du voyage, et voici notre équipe de collégiens au travail pour une séance qui sera malheureusement interrompue par l'arrivée définitive des nuages juste avant le lancement des poses avec le filtre bleu ce qui n'a pas empêché, certes en trichant un peu, de réaliser une image en couleurs tout à fait présentable.



Fig. 2. SN 2017 eaw dans la galaxie NGC 6946. Image composite acquise le 25 mai 2017 au TJMS (Buthiers 77760) par les « experts juniors » du collège de Poix (Picardie). Télescope 600 mm ; f:D=3,7 caméra STT-8300 ; 16 poses de 120 s (6L, 5R, 5V).

Et surtout les collégiens sont repartis le lendemain, les yeux encore pleins des magnifiques découvertes de ce séjour, et bien décidés à pousser plus loin leurs recherches et terminer leur projet, et préparer la « restitution », qui aura lieu au grand amphithéâtre de l'UFR des Sciences d'Amiens et leur vaudra des félicitations de Mme la Rectrice de l'Académie... Bravo les Experts Juniors !

Une brève histoire de la science-fiction

Marc Bussière, mbussiere@orange.fr

Après nous avoir proposé des activités pour les élèves autour de la science-fiction dans l'avant-dernier numéro, Marc Bussière nous propose ici de survoler plus de 2 000 ans d'écrits sur les voyages dans l'espace ou le temps, les uchronies, les extra-terrestres... de quoi trouver des idées de travail interdisciplinaire.

Pour beaucoup de personnes, la science-fiction (SF en abrégé) est née en même temps que les premières mentions de soucoupes volantes dans les journaux à sensation, au sortir de la Seconde Guerre mondiale, dans les années 50. Or il n'en est rien, la science-fiction n'est pas du tout une invention récente de la littérature, ni même du cinéma. En tant que genre littéraire, il est aussi vieux que l'humanité !

La nuit des temps...

Récemment, certains paléontologues ont émis une nouvelle hypothèse concernant l'art pariétal : nos ancêtres homo sapiens ou néandertaliens auraient gravé ou peint sur les parois de leurs grottes une représentation non pas des animaux qu'ils voyaient, mais des animaux qu'ils espéraient abattre. Nous serions ainsi devant les premières images d'anticipation, ou plutôt la science (cynégétique)-fiction serait à l'origine de toutes les images humaines...

Plus sûrement, le plus ancien roman que nous connaissons est *l'Épopée de Gilgamesh*, fixée sur des tablettes d'argile par les Sumériens au début du deuxième millénaire av. J.-C. soit plus de mille ans avant les premières lignes de la Bible. Et ce roman peut déjà être rattaché au genre science-fiction : il narre les aventures fantastiques du héros éponyme de cette Épopée, Gilgamesh, qui, aidé du demi-dieu Enkidu, combat des géants et des monstres. Mais à la mort d'Enkidu, Gilgamesh va se mettre en quête de l'immortalité, thème commun à la science-fiction et au fantastique depuis donc la nuit des temps... Le héros rencontrera un humain rescapé du Déluge (la légende sera reprise par les Hébreux...) qui lui donnera une plante magique conférant l'immortalité à celui qui la consomme... mais il se la fera voler sur le chemin du retour.

Chez les Grecs, Aristophane est l'auteur de la première utopie de l'histoire, en 393 av. J.-C. : *L'Assemblée des femmes*. Elles prennent le pouvoir démocratiquement et ouvrent une ère sans guerre...

Outre Aristophane, Platon est l'auteur (vers 360 av. J.-C.) de la seconde utopie, il invente le mythe de *l'Atlantide* (Platon en serait l'inventeur, car, à ce que dit la recherche actuelle, personne n'en avait jamais parlé avant lui). Mais le grand fondateur de la littérature de science-fiction proprement dite est Lucien de Samosate. Cet auteur grec du deuxième siècle après J.-C. a composé une magnifique *Histoire véritable* (... pour, dit-il, « ne pas être le seul au monde qui n'ait pas la liberté de mentir ») où le héros est emporté par une tempête jusque dans la Lune. Endymion, roi de la Lune, combat Phaéon, roi du Soleil. Chaque camp aligne des dizaines de milliers d'extra-terrestres terrifiants : nous sommes dans la première Guerre des Étoiles inventée par l'humanité !

Entre Lucien de Samosate et le XIX^e siècle, la science-fiction n'est pas un genre littéraire à part de la littérature générale. De très nombreux auteurs en écrivent sans forcément restreindre leur œuvre à ce seul genre. La place manque ici pour les nommer. Thomas More écrit en 1516 une *Utopie* qui aura une nombreuse descendance. Citons peut-être le plus connu (à cause de la pièce de théâtre éponyme d'Edmond Rostand), Cyrano de Bergerac qui écrit en 1637 une *Histoire comique contenant les États et Empires de la Lune*, suivie (édition posthume) en 1662 des *Fragments d'Histoire comique contenant les États et Empires du Soleil*. Cyrano de Bergerac s'est inspiré de Lucien, mais s'en éloigne aussi : notre auteur bâtit également une utopie qui lui permet de critiquer les défauts de son époque. Le point (à peu près...) commun à tous ces auteurs de science-fiction d'avant le XIX^e siècle est qu'ils ne cherchent pas à s'appuyer sur les progrès de la race humaine ou des techniques pour bâtir leurs histoires, la visée est le plus souvent éthique, morale ou philosophique. Songeons par exemple à Voltaire lorsqu'il écrit *Micromégas* (1752) : il s'agit pour lui d'un conte à visée philosophique, il cherche avec son gigantesque extra-terrestre de Sirius (huit lieues de haut) et son ami le Nain de Saturne

(qui ne mesure que 6 000 pieds !) à montrer à ses contemporains que notre monde n'est pas le centre de l'Univers, que notre savoir et notre puissance sont très relatifs... Beaucoup d'ouvrages que nous rangeons dans la catégorie « science-fiction » relatent des voyages plus ou moins merveilleux où les héros sont confrontés à des usages, des savoirs, des modes de vie fondamentalement différents de ceux de l'époque où vivent ces écrivains. Swift avec ses *Voyages de Gulliver* (1726), incarne très bien ce type d'écrivain. La Terre est encore largement méconnue et il est facile de loger sur ses nombreuses « Terrae incognitae » (terres inconnues, en blanc sur les cartes de l'époque) mystérieux royaumes, peuples sages ou belliqueux, races oubliées, ou Grands Anciens au savoir millénaire. Plus tard, il faudra délocaliser dans l'espace de plus en plus lointain toutes ces chimères.

La naissance de la science-fiction moderne au XIX^e siècle

Jusqu'au XIX^e siècle, beaucoup d'humains partagent cette opinion selon laquelle « c'était mieux avant », que l'âge d'or est derrière nous et que nous vivons l'âge d'airain (opinion encore partagée de nos jours par nombre de nos contemporains). Seulement, la révolution scientifique et industrielle du XIX^e siècle va changer la donne : pour la première fois des êtres humains voient de leur vivant le monde évoluer rapidement, en bien comme en mal (les guerres vont devenir vraiment meurtrières...). Les connaissances augmentent aussi considérablement, et surtout sont largement vulgarisées et mises à la portée de tous.

Le nombre d'auteurs qui vont se saisir de ce thème de l'anticipation va grandissant. Nous nous limiterons à quatre écrivains, deux britanniques et deux francophones.

Mary Shelley (1797-1851) va bouleverser en 1818 la littérature en créant de toute pièce un mythe littéraire. Son Frankenstein est un médecin qui cherche à (re)créer la vie elle-même. Dans le film de 1931, Boris Karloff incarne la créature à qui le docteur Frankenstein infuse la vie grâce à la foudre. Dans le roman de Mary Shelley, rien de tout cela, on ignore comment l'étincelle de vie est donnée au monstre. L'histoire finira mal, le monstre et son créateur mourront...

Est-il besoin de présenter Jules Verne (1828-1905) ? Auteur d'une centaine d'ouvrages dont 64 appartiennent à la série Les Voyages Extraordinaires, chez l'éditeur Hetzel, une cinquantaine de ses voyages ressortent du domaine de la science-fiction. Il faut citer les plus spectaculaires : *Voyage au centre de la Terre* (1864) (Verne imagine que la Terre est en

partie creuse), *De la Terre à la Lune* (1865), *Vingt mille lieues sous les mers* (1869), Hector Servadac (1877), *Robur le conquérant* (1886)... Jules Verne est un homme de son temps. Il se documente beaucoup, et extrapole à partir de ses lectures : ainsi, ce n'est pas un hasard si l'obus qui va emmener pour la première fois des humains dans l'espace est tiré de la Floride, là où les américains bâtiront cap Canaveral, rebaptisé cap Kennedy, pour envoyer à leur tour une fusée dans l'espace ! Verne a simplement lu que c'est plus beaucoup plus facile d'envoyer une fusée si l'on est proche de l'équateur. Or, si l'on veut tirer une fusée depuis le Sud des États-Unis, la Floride s'impose vite... Grâce à Hetzel et ses magnifiques volumes, Verne est lu partout, en France comme à l'étranger. Et ses romans sont publiés ensuite dans de très nombreuses collections populaires (citons en France la Bibliothèque verte).

Rosny aîné (1856-1940), auteur franco-belge est peut-être moins connu du grand public que Jules Verne. Pourtant c'est un auteur à l'imagination débordante : c'est le premier à imaginer, dans les *Xipéhuz* (1887), une forme de vie et une intelligence qui ne soient pas basées sur le carbone, mais sur la silice. Il a un siècle d'avance ! Rosny invente à lui seul un genre littéraire : avec *La Guerre du feu* (1909), il prête vie et intelligence à nos lointains ancêtres. L'histoire se passe à l'époque où l'homme maîtrisait mal le feu, savait le conserver, mais pas toujours l'allumer. C'est de la rétro-anticipation, en quelque sorte : c'est de la science-fiction, car si nous ne savons pas comment vivaient, pensaient nos ancêtres, Rosny se base sur les travaux des préhistoriens de son époque, comme Jules Verne le fait avec les nouvelles technologies naissantes au XIX^e siècle. Mais cela se passe autrefois ! La recette sera reprise dans la *Guerre des Étoiles* : le générique du film nous apprend que cette histoire s'est passée « *il y a fort longtemps, dans une lointaine galaxie* »... c'est aussi de la rétro-fiction ! H. G. Wells (1866-1946) est considéré, plus que Verne encore, comme le fondateur de la science-fiction moderne. Dès la parution de *La Machine à explorer le temps* (1895), la science-fiction à la Jules Verne, plutôt optimiste dans l'ensemble, (sauf sans doute à la fin de sa vie, Verne croit plutôt que le monde va s'améliorer...) est battue en brèche. La fin de l'humanité, selon Wells et son voyageur temporel, sera bien triste ! Trois autres chefs-d'œuvre doivent être signalés : *L'Île du Docteur Moreau* (1896) met en scène un savant fou qui transforme en êtres humains des animaux au prix d'abominables souffrances, *L'homme invisible* (1897) et surtout *La Guerre des Mondes* (1898) roman mémorable plusieurs fois porté à l'écran : pour la première fois un roman raconte

l'invasion méthodique, irréprouvable de notre planète par des extra-terrestres belliqueux, des Martiens en l'occurrence, qui nous exterminent après avoir bu notre sang... Heureusement ils seront vaincus non pas par le génie de l'homme (Wells n'est pas Jules Verne) mais par les bactéries et autres virus terriens qui rongent nos vainqueurs et les tuent.

L'apogée du XX^e siècle

Les auteurs européens du XIX^e et du début du XX^e siècle sont encore des écrivains généralistes qui ne publient pas que de la science-fiction. Verne, par exemple, fait paraître d'excellents romans d'aventure (*Le Tour du monde en quatre-vingts jours*, *Cinq Semaines en ballon...*). Rosny ou Wells publient également d'autres genres de romans. En Europe, d'autres auteurs que français ou anglais sont séduits par le genre. Citons par exemple Karel Capek qui invente le premier robot de la littérature en 1921 (dans un roman qui s'appelle *R.U.R.*).

Aux États-Unis, Verne et Wells sont régulièrement publiés, ainsi qu'Edgar Poe. Mais, s'il existe une revue déjà spécialisée dans le fantastique, *Weird Tales*, la « scientifiiction », comme on appelait alors ce genre outre-Atlantique (le mot science-fiction date de 1929...) n'avait pas encore de media dédié. Un Luxembourgeois installé là-bas, Hugo Gernsback (1884-1967), va y remédier en avril 1926, en fondant la revue *Amazing stories*.

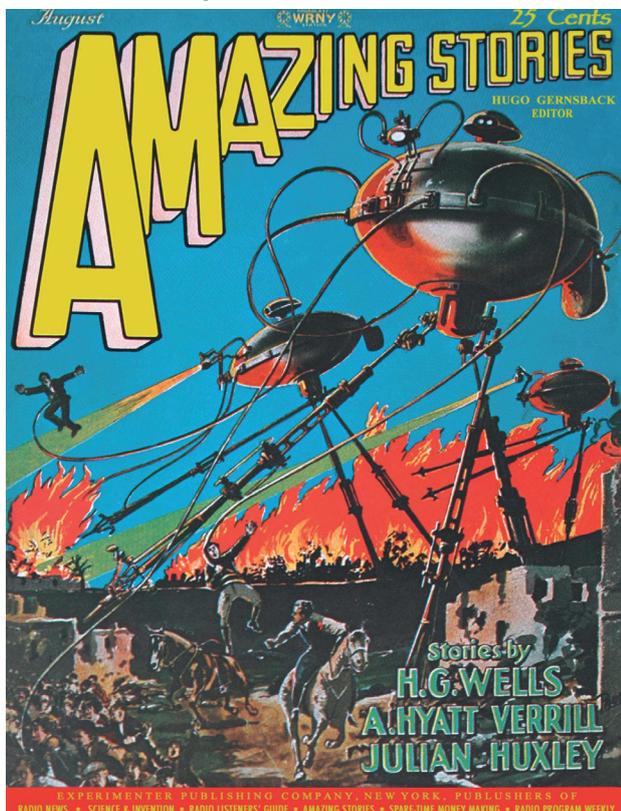


Fig. 1. Couverture du magazine *Amazing stories*, de 1927, illustrant une attaque de la Terre par les Martiens...

Cette revue mensuelle connaîtra environ 500 numéros pendant ses 44 ans d'existence. Elle publie, souvent pour la première fois, la plupart des grands auteurs anglo-saxons de la science-fiction moderne : Dick, Burroughs, Bradbury, Arthur C. Clarke, Heinlein, Matheson, Poul Anderson, Fritz Leiber, Lovecraft, Abraham Merrit, Simak, Ballard, Asimov...

Beaucoup de ces auteurs publient dès les années 30-40 aux USA, mais ne seront connus chez nous qu'après la seconde guerre mondiale, grâce à des écrivains français comme Boris Vian qui les traduiront. On a même parlé d'âge d'or de la science-fiction pour ces quelques décennies qui vont de 1930 à 1980, à juste titre : la science-fiction est maintenant un genre à part entière qui s'épanouit dans ces revues. Outre *Amazing*, citons aussi *Starling Stories* (van Vogt et Philip José Farmer), *Astounding Science-fiction*... En France, après guerre, les éditeurs lancent de nombreuses collections spécialisées qui passionnent les amateurs : le Rayon fantastique, Fleuve noir anticipation, *Ailleurs et demain*...

Les revues américaines bon marché aux couvertures tapageuses vont quasiment faire naître un autre genre de la science-fiction, la bande dessinée. Certes, Hergé en Europe, pour ne citer que lui, s'intéressera à l'anticipation (*Tintin marchera sur la Lune*). Mais c'est surtout aux USA que le genre se développe, notamment avec une sous-catégorie consacrée aux héros : *Buck Rogers* (1929), *Flash Gordon* (1933), *Guy l'Éclair* en français, *Tarzan* (1937, il vit aussi des aventures relevant de la science-fiction). Les super-héros apparaissent ensuite : *Superman* (1938), *Batman* en 1939, *Wonder Woman* en 1942 et toutes les autres créatures qui s'agitent encore de nos jours sur les écrans : *Spiderman*, *Hulk*, les *Fantastic Four*, le *Surfeur d'argent*...

C'est que romans et bandes dessinées sont abondamment repris par le cinéma. Si Méliès a, dès 1902, imaginé plaisamment *Le voyage dans la Lune*, si Fritz Lang a tourné en 1926 son spectaculaire *Metropolis*, si *Frankenstein* a été porté sur les écrans dès 1931, si *King Kong* est tourné en 1933, c'est surtout après la Seconde Guerre mondiale que le cinéma s'empare des thèmes de la science-fiction : *Invaders from Mars* (1953), *Le Jour où la Terre s'arrêta* (1951), *L'Homme qui rétrécit* (1957), *La Planète des Singes* (1967). Nous ne nous arrêterons pas, faute de place, sur les dessins animés qui ressortent également du genre. Citons simplement le chef d'œuvre de René Laloux, *Planète sauvage* (1973) d'après le roman *Oms en série*, de Stefan Wul (pseudonyme de Pierre Pairault).

Les mille habits de la science-fiction contemporaine

Entre les années 40 et les années 90, la plupart des grands thèmes de la science-fiction ont été abordés et bien traités par la littérature et souvent par le cinéma. On peut citer quelques ouvrages qui font date.

Voyage dans l'espace

Après la Lune et le Soleil chez Lucien de Samosate et Cyrano de Bergerac, on visite le Système solaire chez Robida (Saturne, par exemple, dans les *Voyages très extraordinaires*), puis progressivement toute la Galaxie. Ian M. Banks (1954-2013) imagine toute une civilisation qu'il appelle le monde de la Culture, et qui nous promène dans notre Galaxie, dans une série de romans : descendants des Terriens, extra-terrestres, intelligences artificielles, Banks donne vie à cet univers foisonnant.

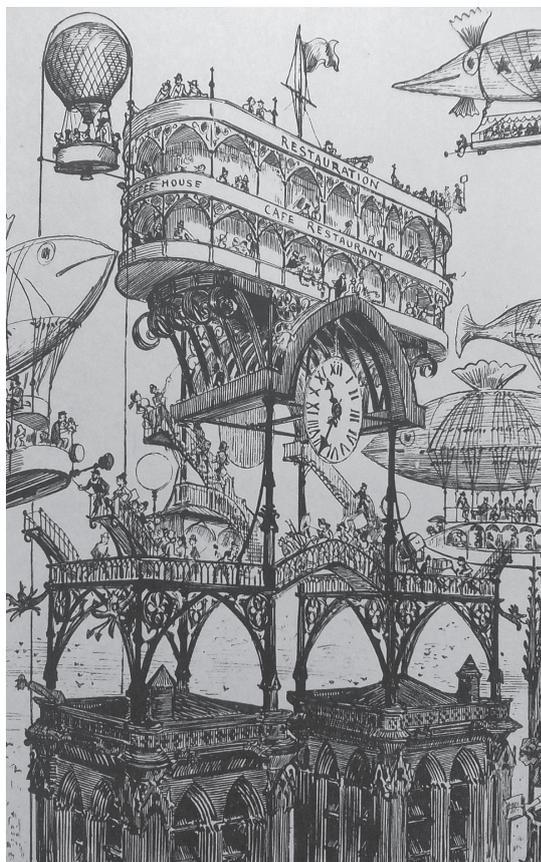


Fig. 2. Gravure tirée du *Vingtième siècle*, de Robida, à la fois auteur et illustrateur, datée de 1883, pour un éditeur qui s'appelait *La Librairie Illustrée*.

Voyages dans le temps

Outre le roman de Wells, citons celui de Jules Verne, *Paris au xx^e siècle* (1863) ou encore le *Voyageur imprudent*, de René Barjavel (1944). Une très courte nouvelle de Fredric Brown, *La Flotte de Vengeance* (1950, dans le recueil *Fantômes et Farfafouilles*), illustre bien le thème du paradoxe temporel : une

mystérieuse flotte apparaît dans le Système solaire et détruit les colonies terriennes de Mars puis de Vénus. Les humains arrivent à la détruire complètement, curieusement sans qu'elle riposte, puis construisent une Flotte de Vengeance qu'ils expédient à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans la direction d'où est venu l'agresseur. Ces vaisseaux vengeurs arrivent dans un système où ils détruisent les deux premiers astroports qu'ils aperçoivent avant de s'apercevoir que, l'Univers étant courbe, ils sont revenus à leur point de départ dans le passé et viennent de détruire les deux bases de Vénus et de Mars... Ils acceptent alors de ne pas riposter à la flotte terrestre qui les intercepte et les détruit !

Au cinéma, *Retour vers le futur*, de Robert Zemeckis (1985) et ses trois suites ont illustré abondamment ce thème.

Utopie, contre-utopie et uchronie

Si l'on a vu que les utopies ont abondé entre l'Antiquité grecque et le XIX^e, force est de constater que la lecture de ces mondes supposés parfaits n'est guère passionnante, sauf chez Aristophane ! Les contre-utopies font davantage réfléchir. *Le Meilleur des Mondes*, d'Aldous Huxley (1931), décrit un monde d'où l'histoire a disparu : les humains naissent in vitro et sont conditionnés par leur naissance à tenir un certain rôle dans la vie. Les Alpha sont les plus grands, ils régissent toute la société. Les Bêta sont un peu plus petits et forment la grande catégorie des employés supérieurs. Puis viennent les autres catégories jusqu'aux Epsilon, petits et peu malins, créés par séries de 64 clones issus du même œuf, qui sont les travailleurs de base. Tous les enfants reçoivent un enseignement « hypnopédique » qui va les persuader d'accepter le rôle social qui leur est dévolu. Un personnage naîtra par accident dans une réserve de Sauvages et ne supportera pas son destin tout tracé...

Le roman *1984* a été publié par George Orwell (1903-1950) en 1949. Il décrit un monde entre fascisme et communisme, où l'on réécrit sans cesse le passé, où tous les citoyens sont surveillés dehors ou chez eux par Big Brother qui les espionne, les écoute, peut les arrêter, les torturer... Big Brother est encore l'expression utilisée pour désigner de nos jours tous les systèmes inventés pour surveiller l'humanité, comme ce qui est utilisé par la NSA américaine qui écoute tous les portables, lit tous les mails du monde entier en permanence.

Moins connu, mais tout aussi fascinant, *Rêve de fer*, de Norman Spinrad, date de 1972 : l'auteur imagine que Hitler a fui l'Allemagne dans les années 20 aux USA, il végète comme illustrateur de revues de SF avant d'écrire un roman, *Les seigneurs de la*

Svastika. Le héros est un « purhomme » qui mène une lutte féroce contre les mutants issus des guerres atomiques... Spinrad veut faire réfléchir le lecteur sur le fascisme latent de ce type de récit ou de film. C'est réussi ! Il s'agit donc d'une uchronie : dans ce type de récit, les auteurs imaginent qu'à un moment, l'histoire a dévié du courant que nous connaissons, ce qui invite le lecteur à la réflexion. Ainsi, dans le *Maître du Haut-château*, publié en 1962 par Philip K. Dick, l'auteur conjecture que l'Allemagne et le Japon ont gagné la Seconde Guerre mondiale et occupent chacun la moitié des USA...

Robots, androïdes

Très présents depuis le début du xx^e siècle, au cinéma comme dans la littérature, les robots aident ou combattent l'humanité : on citera dans la littérature toute l'œuvre d'Isaac Asimov, inventeur des trois lois de la robotique, et au cinéma *Metropolis* de Fritz Lang, ou encore *Terminator*, réalisé par James Cameron en 1984, sans oublier les deux robots de la *Guerre des Étoiles* (George Lucas, 1977), *Sispeo* et *R2D2*. L'androïde est tout aussi artificiel mais joue sur la confusion possible avec l'être humain ordinaire. Sans ce domaine, le chef d'œuvre absolu est *Blade Runner*, de Ridley Scott (1982), d'après un roman de Philip K. Dick, *Les Androïdes rêvent-ils de moutons électriques ?*

Guerre dans l'espace

C'est tout un genre à lui tout seul, au point que les Anglo-Saxons lui ont donné un nom, le space opera. Dans une production innombrable, on appréciera par exemple toute l'œuvre contemporaine de Jack Campbell (né en 1956). Au cinéma, outre l'incontournable saga de la *Guerre des Étoiles*, le film *Starship Trooper*, de Paul Verhoeven (1997) est une parodie grinçante de ce type de récit militariste, pas forcément bien comprise lors de la sortie du film car prise au pied de la lettre...

Heroic fantasy

Savants fous, fin de l'humanité (*L'armée des 12 singes*, 1995, Terry Gilliam), remplacement par des animaux (*La Planète des singes*, roman de Pierre Boulle 1962, porté au cinéma en 1967), conquête de l'espace, surpopulation, empoisonnement de la Terre, la science-fiction a abordé de très nombreux thèmes. Celui qui actuellement est le plus florissant est ce qu'on appelle l'heroic fantasy, mélange de science-fiction et de merveilleux selon un dosage plus ou moins important. Ainsi, dans la saga la *Guerre des Étoiles*, nous sommes résolument dans un univers de SF, mais ce qu'on appelle la Force (May the Force be with you...), sorte de pouvoir télépathique et télékinésique, tient de la « fantasy ». Cette dernière

est un avatar déjà ancien de la SF. Edgar Rice Burroughs, l'auteur de *Tarzan* (1912) pourrait en être un précurseur avec ses deux autres sagas : *Pellucidar*, série de romans qui se déroulent à l'intérieur de notre Terre qui est creuse, et les *Conquérants de Mars*, où le héros est John Carter. *Le Seigneur des anneaux*, de Tolkien, publié en 1953, va durablement lancer ce genre. Dans la très abondante production, citons bien évidemment les aventures de *Harry Potter* (J.K. Rowling 1997), mais aussi l'excellente œuvre de Robin Hobb (*L'assassin royal*, par exemple, dont l'écriture a commencé en 1995, et qui continue en 2017). Ou encore la série de romans consacrée aux chevaliers-dragons de Pern, d'Anne Mac Caffrey (1926-2011). Le thème du dragon télépathe sera repris par de très nombreux écrivains, y compris dans la série *Game of Thrones*, série de romans commencée en 1996 par George R. Martin, et porté sur le petit écran au fil de sept saisons.

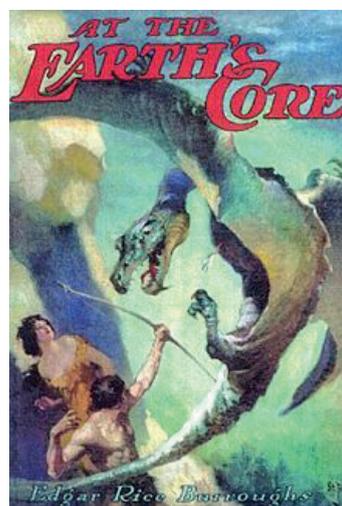


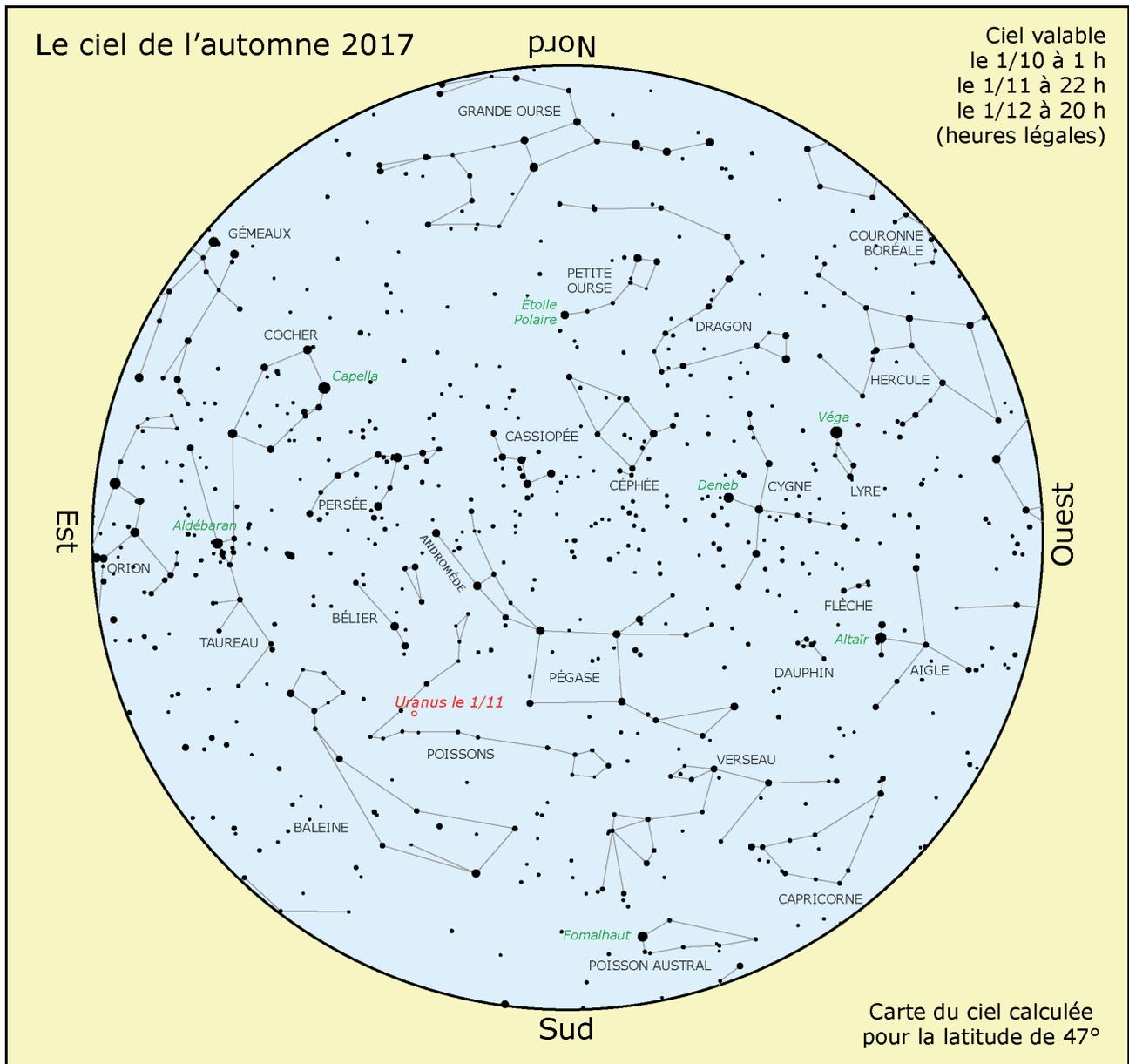
Fig. 3. *At the Earth's Core*, E. R. Burroughs, 1922.

L'auteur de *Tarzan* imagine dans le cycle *Pellucidar* que la Terre est creuse, que l'on peut y pénétrer par le pôle Nord et qu'y survivent outre des dinosaures, des créatures intelligentes et des hommes... même *Tarzan* ira s'y promener !

Conclusion

Ce rapide aperçu de l'histoire de la science-fiction a, j'espère, permis de voir que ce genre littéraire est très ancien, et particulièrement riche. On ne saurait le restreindre aux seuls récits ou films de batailles dans l'espace. La science-fiction, grâce au décalage provoqué par ses thèmes et sous-thèmes (voyages dans le temps, l'espace, confrontation à d'autres civilisations...), se veut avant tout une réflexion sur notre époque. Il ne s'agit plus d'anticiper, comme chez Jules Verne, un futur meilleur, mais d'imaginer parfois les conséquences de décisions technologiques ou politiques prises à notre époque et qui risquent de fortement impacter l'avenir. Toutefois, pour ce qui concerne l'heroic fantasy, il s'agit la plupart du temps d'un simple divertissement qui privilégie le dépaysement et le suspense. La science-fiction est à chaque instant un reflet assez fidèle de l'époque qui l'a fait naître. ■

LE CIEL DE L'AUTOMNE 2017



Visibilité des planètes

Mercury peut être aperçue le matin fin septembre et fin décembre et difficilement le soir en novembre (élongation maximale le 24).

Vénus est encore visible le matin jusqu'en octobre. Elle disparaît ensuite dans les lueurs de l'aube. Elle passera derrière le Soleil le 9 janvier.

Mars commence à être visible le matin mais reste éloignée et peu lumineuse. Il faut attendre l'été prochain pour la voir au plus près de la Terre.

Jupiter passe derrière le Soleil le 26/10. On peut encore la deviner le soir fin septembre et on la retrouve le matin en décembre.

Saturne est encore observable le soir jusqu'en octobre, elle passe derrière le Soleil le 21/12.

Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 22 h 01 min.

21/10 : maximum des Orionides (étoiles filantes).

13/11 : conjonction serrée Vénus Jupiter le matin (16') dans les lueurs de l'aube.

17/11 : maximum des Léonides (étoiles filantes).

14/12 : maximum des Géménides (étoiles filantes).

21/12 : solstice de décembre à 17 h 27 min.

Pour les maxima d'étoiles filantes, il est conseillé de surveiller le ciel quelques jours avant et quelques jours après.

Lune

Pleine Lune : les 5/10, 4/11, 3/12.

Nouvelle Lune : les 19/10, 18/11, 18/12.

VIE DE L'ASSOCIATION

Notre première école d'été

par Domitille et Jean-Louis Coustillet

Couple d'enseignants en primaire, nous avons entendu parler du CLEA et de son école d'été par Danièle Imbault, qui habite la même petite ville que nous. Sa passion communicative, notre envie d'approfondir nos connaissances en astronomie pour mieux l'enseigner à nos élèves, l'idée que vacances ne signifie pas oisiveté de l'esprit nous ont conduits à nous inscrire à cette école d'été.

Nous sommes donc arrivés le 12/07/2017 au centre d'oxygénation du col Bayard, dans un cadre accueillant et un paysage magnifique. Nous pouvons l'avouer maintenant, nous avons un peu d'appréhension : allons-nous être à la hauteur ? Nos études scientifiques paraissaient bien lointaines...

Nous avons été rapidement rassurés par l'équipe du CLEA qui nous a accueillis chaleureusement et nous a expliqué qu'à l'école d'été, chacun prenait ce qu'il voulait...

Nous sommes donc retournés sur les « bancs » de l'école, faisant fi des jours fériés et autres dimanches, au CLEA quand on aime on ne compte pas ! Cours théoriques le matin, ateliers pratiques l'après-midi, toujours avec une organisation réglée comme une montre suisse.

Nous savons l'importance de bien préparer ses cours, nous avons pu admirer le sérieux et la qualité des

cours / ateliers. Une question s'est quand même vite posée : mais comment les formateurs ont-ils fait pour apporter tout leur matériel au col Bayard ? Avaient-ils des remorques ?

Nous avons donc fait travailler nos neurones (notre cerveau, à l'instar d'une étoile, oscillant entre effondrement gravitationnel et pression de radiation) dans une ambiance studieuse et très détendue, l'alchimie a merveilleusement fonctionné entre les participants, des novices aux formateurs, des enseignants de maternelle à ceux de classes préparatoires, des plus jeunes aux retraités, des nordistes aux sudistes (peuchère ces Parisiens !!).

Notre point commun, au-delà de nos différences, était notre intérêt pour les étoiles.

Bilan de la semaine : nous sommes ravis, nous avons appris des tas de choses dans la bonne humeur, nous avons rencontré des personnes différentes et remarquables par leur savoir et leur disponibilité.

Juste un conseil : méfiez-vous de la « balade matinale de 7 h » autour du golf. En langage CLEA, balade signifie marche rapide et ne permet pas d'avoir le temps d'admirer les petites fleurs et les vaches ;-). L'espace d'un instant, nous avons cru nous être trompés d'école et participer à un stage de marche nordique.

Au moins, à la fin de cette « balade », le corps et l'esprit sont bien réveillés !!!!



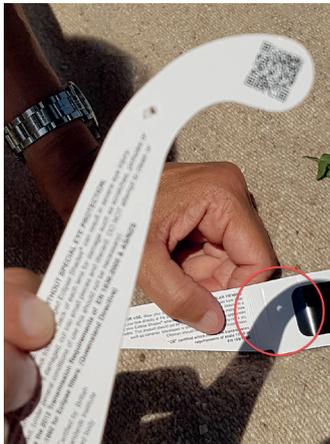
VIE DE L'ASSOCIATION

L'éclipse totale de Soleil du 21 août 2017

Plusieurs de nos adhérents sont partis observer l'éclipse aux États-Unis. Voici le compte-rendu de Bettina Goy et François Hurter, deux de nos adhérents helvètes.

Dimanche soir 20 août 2017 : nous quittons Atlanta, destination Kingston, une petite ville du Tennessee. Nous avons réservé depuis plusieurs mois une petite chambre dans un motel pour la modeste somme de \$68. En cherchant le lieu exact sur le site web du motel, nous constatons qu'il ne reste plus qu'une seule chambre disponible, au prix de \$465 !

À notre arrivée vers minuit, le motel annonce complet et le parking déborde de voitures dont les plaques d'immatriculation indiquent des provenances de tout le pays : Tennessee, Arizona, Alabama, New York, Missouri, Ohio, Floride, Géorgie, Kentucky, Virginie ...



La lumière passant par un trou d'une branche des lunettes « éclipse » forme l'image du Soleil partiellement éclipsé ici.

Lundi matin : je ne sais si je dois tout d'abord consulter les prévisions météorologiques ou jeter un coup d'œil par la fenêtre. Après tout, les statistiques annuelles pour le mois d'août ne

sont pas très favorables pour cette partie des États-Unis !

Incredibly, le ciel n'a qu'une seule couleur, celle des éclipses réussies, à savoir le bleu immaculé !

Vers 10 heures, nous repérons un parc public au bord d'une large étendue d'eau provenant des méandres de la Clinch River, où s'installe gentiment tout ce qu'il faut pour un événement réussi : stand de boissons, musique, rôtisserie, astronomes impatients de décrire l'événement au public qui arrive tranquillement.

Bien à l'ombre de quelques arbres, Bettina est la première à remarquer l'arrivée de la Lune dans la



Jeu d'ombres et de lumière

partie supérieure droite du disque solaire. Lunettes sur le nez, nous suivons sa lente progression, tout en surveillant les quelques cumulus qui se développent, heureusement bien loin sur l'horizon.

Alors que seul un mince croissant est encore présent à gauche du Soleil, un énorme bruit monte en

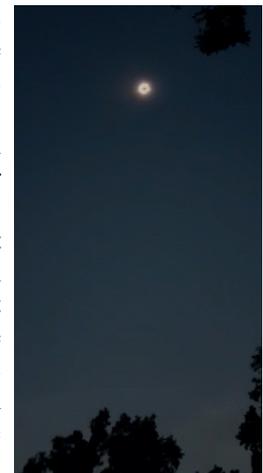
quelques secondes de la végétation environnante : les cigales et les « Tree frogs » (grenouilles arboricoles) provoquent soudainement un tintamarre incroyable qui ne sera dépassé que quelques instants plus tard par les exclamations et les applaudissements de tout un chacun, abasourdi par le spectacle.

C'est magique, surnaturel : passer du disque solaire, orangé dans les lunettes, à la couronne entourant le Soleil noir dans un ciel turquoise profond, c'est tout simplement quelque chose à laquelle nous ne nous attendions pas !

J'essaie de prendre quelques images avec mon appareil de photo et mon smartphone, sans trop de succès. Et je renonce, l'éclipse ne dure que deux minutes et je préfère utiliser mes yeux et ma mémoire...

Soudain, le diamant apparaît indiquant le début de l'émersion du Soleil. Tout le monde remet ses lunettes en hâte. Derrière nous, une maman a bien des difficultés à expliquer à son petit de cesser de regarder le spectacle avec ses seuls yeux.

Apparemment, il ne comprend pas que c'est bien terminé, et qu'il faut songer à planifier un prochain déplacement pour pouvoir à nouveau contempler ce spectacle inoubliable !



La couronne solaire



Éclipse partielle et taches solaires

Daniel Jewers de Calgary, Alberta Canada
envoyé par Jean Ripert.



Couronne et anneau de diamant

Daniel Jewers de Calgary, Alberta Canada
envoyé par Jean Ripert.



Couronne et protubérances

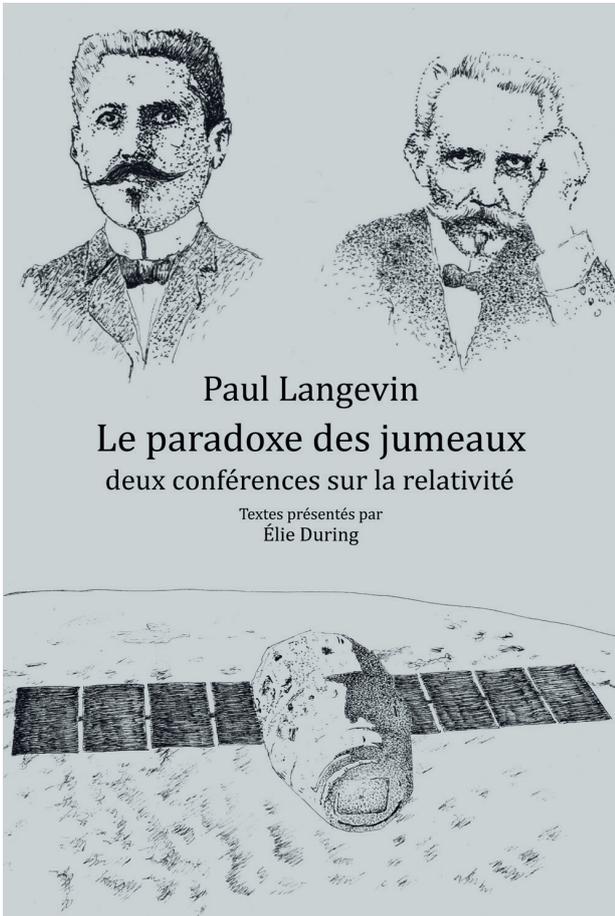
Georges Lecoutre.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Paul Langevin

Le paradoxe des jumeaux Deux conférences sur la relativité

Presses universitaires de Paris Ouest. 2016



Paul Langevin

Le paradoxe des jumeaux deux conférences sur la relativité

Textes présentés par
Élie During

Généalogie d'un paradoxe introuvable

Le paradoxe des jumeaux de Langevin a fait couler beaucoup d'encre, la littérature sur le sujet est immense et contribue largement à brouiller les esprits. Un ouvrage récent a cherché à revenir aux sources. On découvre alors que Paul Langevin n'a jamais parlé de jumeaux ni de paradoxe. Cet ouvrage publie les deux conférences sur la relativité faite

par Paul Langevin respectivement le 10 avril 1911 et le 19 octobre 1911 donc avant l'établissement de la relativité générale. En réalité, dans ces textes historiques, Langevin s'inspire des écrits de Jules Verne et ne parle que d'un « voyage en boulet ». Aux pages 49 et 50 du document d'époque, on peut lire : «[...] il suffirait que notre voyageur consente à s'enfermer dans un projectile que la Terre lancerait avec une vitesse suffisamment voisine de la lumière, quoique inférieure » [...] « Revenu à Terre, ayant vieilli de deux ans, il trouvera notre globe vieilli de deux cents ans si la vitesse est restée inférieure de un vingt-millième seulement à la vitesse de la lumière ».

Le paradoxe apparaît lorsque l'on veut introduire une notion de réciprocity qui n'a pas lieu d'être. L'observateur en mouvement par rapport à la Terre et l'observateur sur Terre ne sont pas interchangeables. On ne peut pas raisonner comme si « l'observateur voyageur » s'estimait immobile relativement à une Terre qui voyage. Dans ce cas, on arriverait effectivement à une absurdité car, en définitive, chacun des deux personnages se trouverait plus jeune que l'autre...

Paul Langevin prend la précaution de dire qu'il existe une dissymétrie essentielle entre les deux situations car le voyageur a subi une accélération au milieu de son voyage qui change sa vitesse pour revenir à son point de départ. La relativité restreinte ne concerne que les mouvements uniformes. La personne qui présente le livre (Elie During) estime que la situation brouillée dont nous héritons provient de l'obstination de Bergson à refuser la situation d'un point de vue physique, comme le lui avait fait remarquer Albert Einstein lors de l'échange du 06 avril 1922 au Collège de France. Il n'y a pas de mesure commune entre les deux observateurs tant qu'ils sont séparés. Chacun suit sa propre ligne d'Univers. Bergson pourtant ne peut s'empêcher de les penser ensemble, comme réunis dans le temps par un fil ténu.

Christian Larcher

Solutions des mots croisés

Horizontalement

1. Elliptiques. 2. Persée. Urgo. 3. AA (format de pile). Spirales. 4. IVC. ENOS. éi. BSion. Tian. 6. Struve. Rocs. 7. Étoiles. Yé. 8. NTT (New Technology Telescope, à La Silla au Chili). Grand (voir le grand débat p. 20) 9. Rias. Trou.

Verticalement

1. Épaisseur. 2. Leavitt (voir en 1908 p. 19). 3. LR. Corona. 4. ISS. Nuits. 5. Pépé. VLT (lui aussi au Chili). 6. Teintée. 7. Roi. Sgr (abréviation du Sagittaire). 8. Quasars (voir p. 21). ro. 9. URL. Noyau. 10. Égée. Cen (abréviation du Centaure). 11. Sosies. Dé.



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :
aces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.

Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Ecoles d'Été d'Astronomie).

Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



ISSN 0758-234X

Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalizations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu

ou

www.ac-nice.fr/clea

Siège social :

CLEA, c/o CAPE
case courrier 7078
Université Paris Diderot
5, rue Thomas Mann
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

<http://ventes.clea-astro.eu/>

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2017 :	10 €
Abonnement CC pour 2017 :	25 €
Adhésion + abonnement CC :	35 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	40 €

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 159 automne 2017