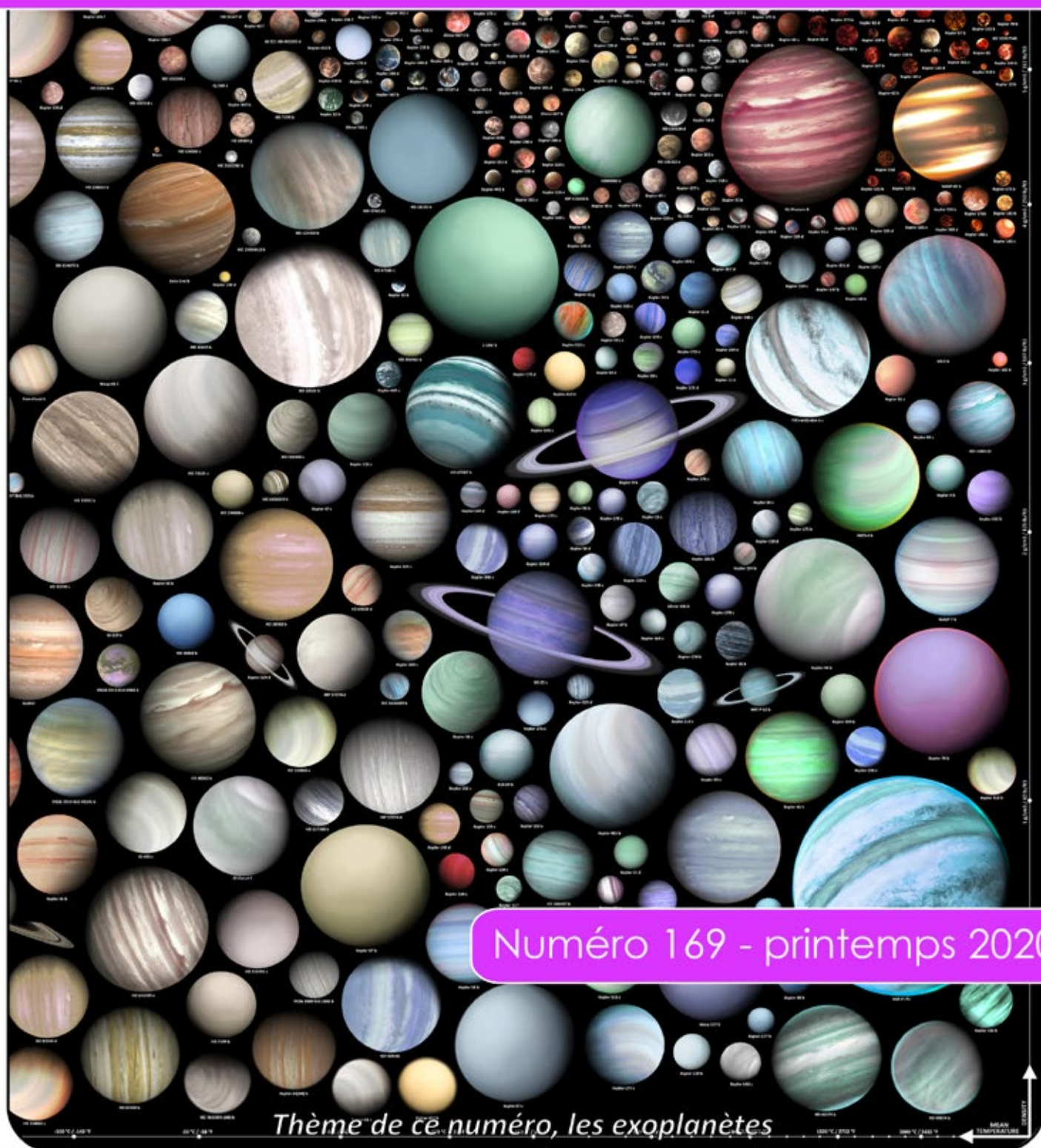


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 169 - Mars 2020 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 169 - printemps 2020

Thème de ce numéro, les exoplanètes



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 2019

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjointe : Nathalie Cartier

Responsables des groupes

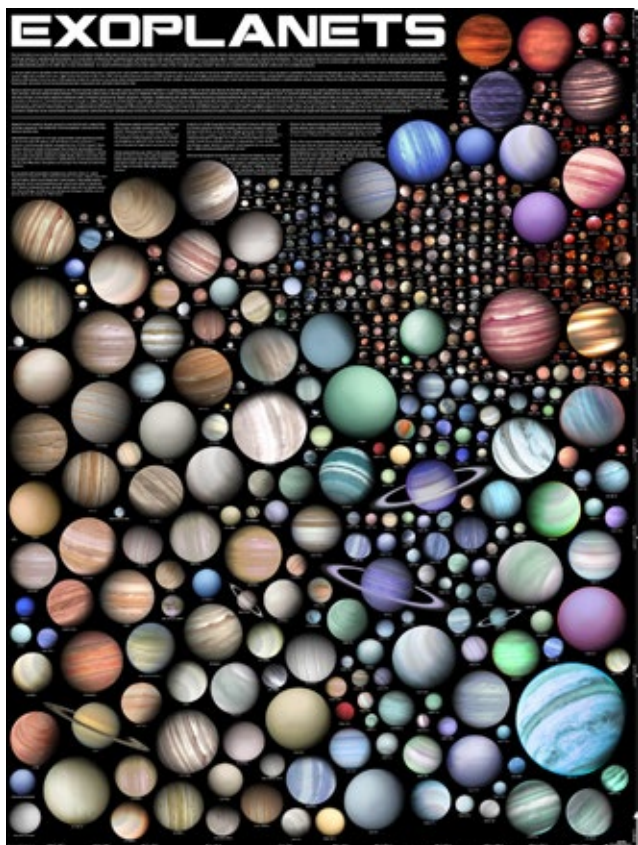
Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site : Jean-Michel Vienney



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

Samuel Boissier, Pierre Causeret, Jean-Luc Colas, Christine Daloubeix, Michèle Gerbaldi, Guillaume Hébrard, Lucienne Gouguenheim, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Anika Lekic, Anne-Marie Louis, Floriane Michel, Jérôme Ozouf, Caroline Peron, Frédéric Pitout, Roseline Primout, Jean Ripert, Sylvie Thiault, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 169 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Ce poster a été réalisé par Martin Vargic pour montrer l'incroyable diversité des mondes extra terrestres, à partir des 500 exoplanètes découvertes avant octobre 2015. Elles sont disposées ici en fonction de leur température et de leur densité estimées. On peut y découvrir des jupiters chauds, des superterres, des planètes océans... Toutes ces images sont des vues d'artistes sauf pour les planètes du Système solaire qui sont aussi représentées sur le poster d'origine. Jupiter, par exemple, est visible sur la couverture. Certaines exoplanètes sont représentées avec des anneaux, ce qui reste encore hypothétique. Vous pouvez découvrir le poster complet à l'adresse <https://www.halcyonmaps.com/infographics#/exoplanets>.

Avec l'aimable autorisation de Martin Vargic.

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2020

Éditorial

Il y aura 25 ans, le 6 octobre 2020, deux astronomes suisses, Michel Mayor et Didier Queloz, découvraient expérimentalement, à l'Observatoire de Haute Provence, la première planète extrasolaire gravitant autour d'une étoile (51 Pegasi). En 2019 ils ont reçu le prix Nobel pour cette découverte qui venait confirmer ce que beaucoup pensaient depuis plus de 2 000 ans.

Il y a vingt-quatre siècles déjà, Épicure écrivait à Hérodote : « Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents »

Au XVI^e siècle Giordano Bruno, dans *L'Infini, l'Univers et les Mondes* (1584), notait : « Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept «terres»¹ que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche ».

Enfin, pour n'en citer que quelques-uns, Fontenelle, dans son ouvrage *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) affirmait « **Les étoiles fixes sont autant de Soleils dont chacun éclaire un Monde** ».

Le thème de ce numéro concerne les exoplanètes. À ce jour, on en dénombre 4 183, mais on en découvre de nouvelles presque chaque jour. Quand on sait que l'étoile la plus proche de la Terre est à 4,24 al (soit 270 000 UA) il est surprenant d'être capable de recueillir autant d'information sur ces astres.

Avec des élèves de 3^e on peut partir de ce thème pour apprendre à distinguer réalité et science-fiction. À la BNF une exposition était consacrée à J.R.R. Tolkien, l'auteur du *Seigneur des Anneaux*. On peut également s'appuyer sur le livre de Roland Lehoucq intitulé *Tolkien et les sciences*.

Dans l'enseignement supérieur, l'observation directe du transit d'une exoplanète devant son étoile hôte, permet aux étudiants de l'IPSA (Institut Polytechnique de Sciences Avancées) de s'initier à la recherche scientifique d'une manière captivante.

À partir de documents fournis par les chercheurs, des élèves de lycée apprendront à déterminer la composition de l'atmosphère d'une exoplanète gazeuse.

En dehors de ce thème, un professeur de SVT propose de dresser une carte géologique de la Lune en utilisant un télescope et un logiciel de traitement d'image.

L'astronomie peut s'aborder indirectement, par exemple à partir de la philatélie. L'article « L'astronomie et les timbres (II) » propose de répondre à des questions ciblées.

Enfin vous partagerez le cri de révolte poussé par l'ANPCEN² : « Où sont passées les étoiles ? On nous a volé la nuit ! »

Christian Larcher (pour l'équipe)

¹ En fait il incluait la Lune parmi ces « terres ».

² Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes.

Sommaire

Avec nos élèves

Carte géologique de la Lune au télescope

Jérôme Ozouf

p 2

Thème : les exoplanètes

p 5

Notions de base

Détection et calcul des caractéristiques des exoplanètes

Pierre Causeret

p 6

Article de fond

La grande diversité

des systèmes planétaires extrasolaires

Guillaume Hébrard

p 8

Mots croisés

Pierre Causeret

p 12

Avec les enseignants

Abordons les exoplanètes avec

les enseignants et les élèves

Roseline Primout

p 13

Avec nos élèves

Observation d'un transit planétaire

Anica Lekic

p 17

Avec nos élèves

Détection et analyse de l'atmosphère des exoplanètes

Floriane Michel

p 21

Avec nos élèves

Exoplanètes et science-fiction

Roseline Primout

p 23

Observation

Ciel de printemps 2020

Pierre Causeret

p 25

Curiosité

L'astronomie dans les timbres (2)

Anne-Marie Louis

p 26

Hommages

Hommage à Jean-Claude Pecker

Lucienne Gouguenheim

p 31

Hommage à Francette

Lucienne Gouguenheim, Michèle Gerbaldi

p 32

Avec nos élèves

Tolkien et l'astronomie

Samuel Boissier et Caroline Péron

p 33

Lecture pour la marquise

Sauver la nuit

Sylvie Thiault

p 39

Réflexion

Vol de nuit : la pollution lumineuse

Jean-Luc Colas

p 41

Solutions des mots croisés

p 48

Obtenir une carte géologique de la Lune au télescope : protocole d'acquisition et de traitement d'image

Jérôme Ozouf, professeur de SVT lycée Marcel Gambier Lisieux

La surface de la Lune apparaît dépourvue de coloration : à l'œil nu ou à l'oculaire d'un instrument d'astronomie ce ne sont que nuances de blancs et de gris. Cependant, un traitement approprié d'image permet de mettre en évidence l'existence de nuances de couleurs qui témoignent des variations subtiles de la composition des roches lunaires.

Cet article propose un protocole simple permettant d'accéder à la géologie lunaire au télescope. Il a été réalisé avec des élèves de l'option Méthodes et Pratiques Scientifiques (MPS) au lycée Marcel Gambier de Lisieux à l'aide du matériel prêté à l'établissement dans le cadre du programme « Astro à l'école ».

Acquisition d'une vidéo

La première étape consiste à réaliser une vidéo de la Lune à l'aide d'un dispositif d'acquisition d'image. Le matériel utilisé dans le cadre de notre projet était un Canon 600D placé au foyer d'un Celestron 8. La vidéo a été réalisée le 20 janvier 2019, quelques heures avant l'éclipse totale de Lune. La pleine Lune est traditionnellement réputée peu intéressante pour l'observateur. En effet, éclairée de face et en absence d'ombres projetées, celle-ci ne montre aucun relief apparent.

Néanmoins, la pleine Lune apparaît bien comme la meilleure période pour explorer sa géologie. Quel que soit le capteur utilisé, l'objectif est d'obtenir un fichier au format avi exploitable par Registax. Avec l'appareil Canon, nous avons utilisé le logiciel EOS Camera Movie Record téléchargeable en ligne.

Ce travail est réalisable à l'aide d'un capteur type webcam. On peut alors utiliser le logiciel d'acquisition AMCap qui génère également des fichiers au format AVI.

L'utilisation d'un réducteur de focale nous a permis d'obtenir une image entière de la pleine Lune.

Traitement d'image avec Registax

On se reportera au cahier d'activités proposé par le réseau « Astro à l'école » et disponible en ligne (1). La procédure utilisée est largement automatisée et facile à réaliser avec des élèves. À la fin du traitement avec Registax, et avant de passer à l'étape suivante, il est fondamental de réaliser un équilibrage des blancs (figure 1). L'oubli de cette étape rend impossible tout traitement ultérieur : tout déséquilibre initial, si léger soit-il, conduit immédiatement à générer une image avec des couleurs aberrantes aux étapes suivantes. On se gardera également de compresser l'image obtenue à la fin du processus sur Registax.

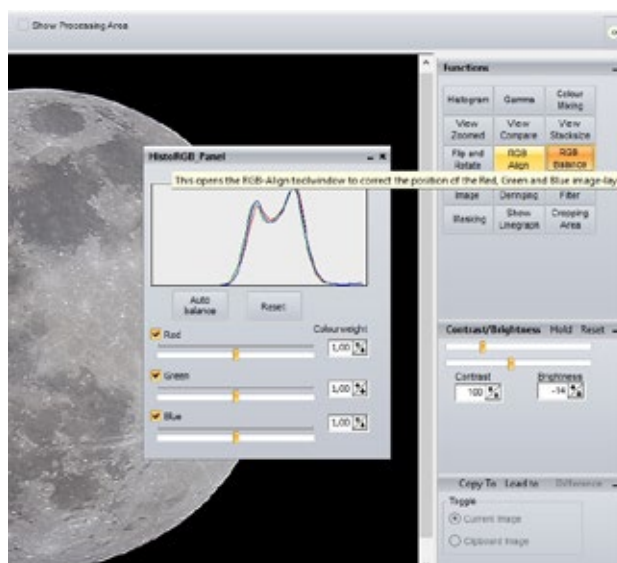


Fig.1. : Capture d'écran du logiciel Registax, module de réglage de la balance des blancs.

Une fois l'équilibrage des blancs réalisé, il s'agit donc d'accentuer la saturation des couleurs. Ceci est aisément réalisable avec n'importe quel logiciel de traitement d'image.

Traitement d'image avec un logiciel de retouche

Le principe du traitement est donné pour deux logiciels gratuits (Artweaver et GIMP), téléchargeables, et aisément utilisables au lycée. Il peut être adapté à n'importe quel logiciel de retouche d'image.

Équilibrage de la balance des blancs

ARTWEAVER
IMAGE/ADJUSTMENTS/LEVELS/AUTO
GIMP
COULEURS/NIVEAUX/AUTO

Duplication de l'image en deux calques

ARTWEAVER
LAYER/DUPLICATE LAYER
Pour contrôler l'affichage des deux calques : ouvrir une fenêtre spécifique : Ctrl+6
GIMP
CALQUE/DUPLIQUER LE CALQUE
Pour contrôler l'affichage des deux calques : ouvrir une fenêtre spécifique : Maj+Ctrl+D

Accentuation progressive de la balance des couleurs

On agit uniquement sur l'un des deux calques

- sous Artweaver : *le calque « Background copy » doit être sélectionné.*
- sous GIMP : *le calque « Copie » doit être sélectionné.*

On procède par itération en augmentant la saturation des couleurs de manière parcimonieuse à chaque fois. Par exemple, il est préférable d'augmenter la saturation de 10 % plusieurs fois, plutôt qu'une seule fois de 40 %.

ARTWEAVER
IMAGE/ADJUSTMENTS/HUE-SATURATION
→ Agir sur le curseur Saturation
note : il est possible d'agir sur la saturation de l'ensemble des couleurs ou bien sur une couleur spécifique.
GIMP
COULEURS/TEINTE SATURATION
→ Agir sur le curseur Saturation
note : il est possible d'agir sur la saturation de l'ensemble des couleurs ou bien sur une couleur spécifique.

Créer un masque flou

Lorsque la saturation des couleurs est satisfaisante, il s'agit de « lisser » les nuances de couleurs.

ARTWEAVER
FILTER/BLUR/GAUSSIAN BLUR
GIMP
FILTRE/FLOU/FLOU GAUSSIEN
Régler le niveau de flou selon votre convenance à l'aide du curseur et de l'aperçu sur l'image

Réajuster le niveau de détail

Le principe est de superposer l'image originale à l'image saturée/floutée en agissant sur le niveau de transparence du calque copie.

ARTWEAVER
Sur le calque « background copy »
→ Agir sur le curseur Opacity
GIMP
Sur le calque « Copie »
→ Agir sur le curseur Opacité

Réunir les deux calques en une seule image

ARTWEAVER
LAYER/FLATTEN IMAGE
GIMP
CALQUE/FUSIONNER VERS LE BAS

Interprétation des résultats obtenus

Le principe de travailler sur la saturation des couleurs afin d'obtenir une interprétation géologique du résultat a été proposé par Felipe Alves dans un article publié dans la revue « Sky and telescope » en 2005 (2). Le résultat obtenu par cet auteur et son interprétation sont aisément accessibles sur internet sous la forme d'une carte complète de la surface de la Lune.

Nous présentons ici le résultat obtenu avant (figure 2) et après traitement (figure 3). D'après Alves, les terrains aux nuances bleues correspondent à des basaltes riches en métaux, notamment titane ($> 7\%$ de la masse totale – M_T) et fer ($> 15\% M_T$). Les tons orangés désignent des basaltes pauvres en titane ($< 2\% M_T$) et en fer ($< 15\% M_T$). Les tons magenta correspondant à des basaltes intermédiaires ($Ti > 3\% MT$ et $FeO > 15\% MT$).



Fig.2. Image de la Lune obtenue après équilibrage des blancs.



Fig.3. Image obtenue par Alysson Olive, élève de seconde au lycée Gambier; après accentuation de la saturation des couleurs selon le protocole proposé dans cet article.

Ces résultats sont comparables aux données accessibles sur un site de la NASA compilant les données sur la géologie lunaire, notamment celles de la sonde Clementine (3). On y apprend de plus l'âge des terrains lunaires. La légende indique aussi l'âge des différentes formations rocheuses : 4,5 Ga pour les zones très cratérisées (anorthosite) en jaune sur nos images, 3,9 à 1 Ga pour les basaltes des mers lunaires.

Bibliographie :

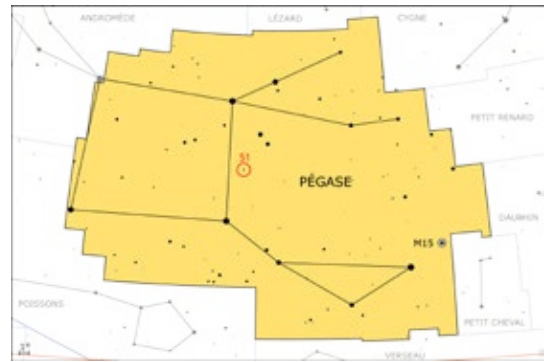
- (1) <http://www.sciencesalecole.org/plan-astro-a-lecole-ressources-pedagogiques-ressources-scientifiques/>
- (2) Alves F., Capturing the color of the moon, Sky and Telescope, vol. 110, num. 7, p. 120.
- (3) <https://quickmap.lroc.asu.edu/>

■

THÈME : LES EXOPLANÈTES



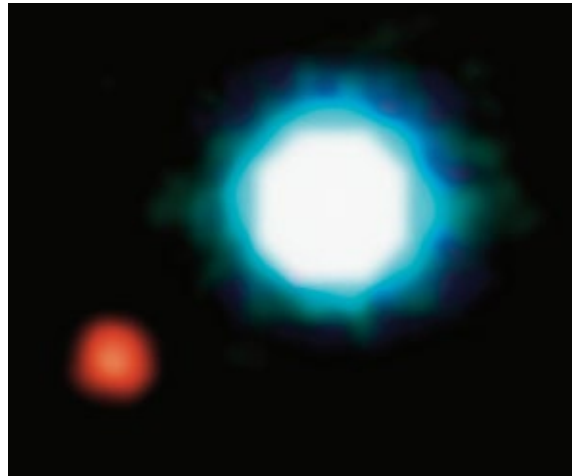
Didier Queloz et Michel Mayor interrogés par la chaîne suisse RTS après leur prix Nobel de physique pour leur découverte en 1995 de la première planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil.



51 Peg est une étoile semblable au Soleil (type G2 V) de la constellation de Pégase située à 50 années-lumière. La surprise fut de découvrir un « jupiter chaud », une grosse planète très proche de son étoile, qui en fait le tour en 4 jours seulement.



ÉLODIE, le spectroscopie qui a permis cette découverte à l'observatoire de Haute-Provence par la méthode des vitesses radiales



2M1207 b, la première exoplanète photographiée, ici par le VLT dans le proche infra rouge. (credit ESO).

Les exoplanètes dans les productions du CLEA

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC).

Lecture critique d'un roman de science-fiction. CC n° 157 (2017)

Les planètes dans le cinéma de science-fiction. CC n° 146 (2014)

Le coin des petits curieux. De la vie sur 186f ? CC n° 146 (2014)

Calcul de la masse de 51 Pegasi b. CC n° 137 (2012)

L'effet Doppler et les lois de Kepler, les clés de la découverte d'autres terres. CC n° 136 (2011)

La vie dans l'Univers : de la chimie à l'astronomie. Article en 2 parties. CC n°s 135 et 136 (2011)

Tutoriel pour observer le transit d'une exoplanète. CC n° 135 (2011)

E-ELT futur télescope géant européen au sol. CC n° 128 (2009)

Détection de planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales. CC n° 117 (2007) avec la correction dans le n° 118

Exoplanètes et exobiologie. CC n° 113 (2006)

Où sont-ils ? CC n° 89 (2000)

A la recherche des planètes extrasolaires. CC n° 72 (1995)

À la recherche de planètes autour d'autres étoiles. CC n° 58 (1992)

Sur le site du CLEA (www.clea-astro.eu), onglet lunap puis onglet exoplanètes (texte un peu ancien)

Détection et calcul des caractéristiques des exoplanètes

Pierre Causeret, Esbarres

Comment détecter une exoplanète ? Et comment calculer sa masse, son rayon... ? Voici un court résumé des principales méthodes utilisées.

La méthode des vitesses radiales

Le principe

Lorsqu'une planète tourne autour d'une étoile, elle ne la laisse pas insensible et va l'obliger à se déplacer. Une image souvent donnée est celle du lanceur de marteau où l'on voit bien que le sportif et son boulet tournent autour de leur centre de masse.

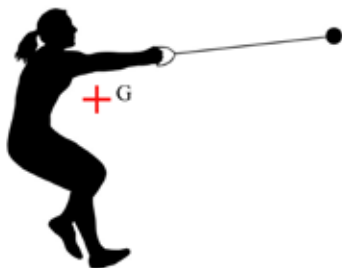


Fig.1. Le marteau et sa lanceuse tournent autour de leur centre de masse G .

Remplaçons la lanceuse par une étoile et le marteau par une planète : l'étoile et sa planète tournent autour d'un même point. Si on prend l'exemple du Soleil et de Jupiter, leur centre de masse se situe à 740 000 km du centre du Soleil, donc à l'extérieur du Soleil mais très près de sa surface.

Si nous ne considérons que l'attraction de Jupiter, le Soleil se déplace ainsi autour de ce point en un peu moins de 12 ans, la période de révolution de Jupiter. Imaginons un habitant d'une planète lointaine située approximativement dans le plan de l'écliptique. La planète Jupiter sera sans doute trop peu lumineuse à côté du Soleil pour qu'il puisse l'observer directement. Par contre, il pourra voir notre étoile parfois s'approcher et parfois s'éloigner de lui suivant une période de 12 ans. Les vitesses d'approche et d'éloignement sont appelées vitesses radiales car elles se trouvent le long du rayon observateur-étoile.

Ces vitesses radiales sont repérables grâce à l'effet Doppler-Fizeau et au déplacement des raies d'absorption dans le spectre de l'étoile. Ce phénomène a été décrit dans le n° 161 des Cahiers Clairaut.

La figure 2 décrit le principe de détection d'une planète extra solaire par un déplacement périodique des raies d'absorption d'une étoile. Plus la planète est massive, plus le déplacement est important et donc repérable. Plus la planète est proche de son étoile, plus sa période est courte et moins il faut de temps pour la détecter. C'est pour ces deux raisons que les premières exoplanètes découvertes furent des grosses planètes proches de leur étoile, des « jupiters chauds ».

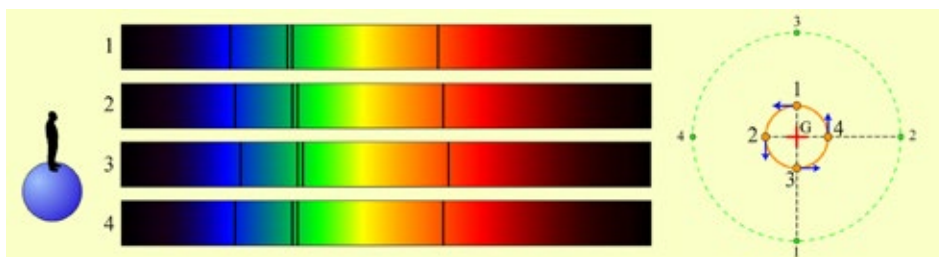


Fig.2. À droite, l'étoile orange et la planète verte tournent autour de leur centre de masse G . Lorsque la planète verte est en position 1, l'étoile orange est en 1, elle s'approche de l'observateur situé à gauche qui voit alors les raies spectrales de l'étoile décalées vers le bleu par effet Doppler-Fizeau (spectre 1). Lorsque étoile et planète sont en 3, l'étoile s'éloigne et les raies spectrales sont décalées vers le rouge (spectre 3). En 2 et 4, l'étoile ne s'approche ni ne s'éloigne, il n'y a pas de décalage spectral.

51 Peg b

En 1994 et 1995, Michel Mayor et Didier Quéloz, deux astronomes de Genève, ont étudié le spectre de l'étoile 51 Peg (51 de la constellation de Pégase) grâce à un spectroscopie d'une très grande sensibilité appelé ÉLODIE, depuis l'Observatoire de Haute-

Provence. Ils ont pu observer un léger déplacement des raies spectrales suivant une période de 4,2 jours. Ils en ont déduit l'existence d'une planète dont la masse valait au moins 0,46 fois la masse de Jupiter et tournant autour de son étoile en 4,2 jours. On l'appelle 51 Peg b.

Cette découverte leur a valu le prix Nobel de physique à l'automne 2019 avec un autre astronome, James Peebles.

Calcul du demi-grand axe de l'orbite

Le demi-grand axe de l'orbite de l'exoplanète se détermine à partir de la 3^e loi de Kepler

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2}$$

m, la masse de la planète est négligeable devant M, la masse de l'étoile, supposée connue. La période T est donnée par l'observation du phénomène. On en déduit directement a, le demi-grand axe de l'orbite de l'exoplanète.

Calcul de la masse de la planète

On considère dans un premier temps que l'observateur est situé dans le plan de l'orbite de la planète comme sur la figure 2. Les orbites sont supposées circulaires. La mesure du décalage spectral permet de calculer la vitesse radiale v de l'étoile (en position 1 ou 3), avec la formule classique de l'effet Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Si on appelle r la distance centre de masse - étoile et T la période, on a

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

On connaît v et T, on peut calculer r.

Le centre de masse est placé de telle manière que $M \times r = m \times a$

On connaît M, r et on a calculé a, on en déduit m, la masse de l'exoplanète.

En réalité, ils'agit d'une valeur minimale pour cette masse car l'observateur n'a aucune raison d'être précisément dans le plan de l'orbite de la planète. La vitesse mesurée grâce au décalage est une valeur inférieure ou égale à la vraie vitesse dans le plan de l'orbite. Au lieu d'indiquer la masse, les catalogues donnent souvent la valeur $\text{masse} \times \sin(i)$ où i est l'angle entre le plan de l'orbite et le plan perpendiculaire à la ligne de visée.

La méthode des transits

Le principe

Si une planète passe devant son étoile, elle va occulter une petite partie de sa surface et ainsi faire baisser sa luminosité (figure 3). Si un extraterrestre voit Jupiter passer devant le Soleil, il verra la luminosité de celui-ci baisser de 1 %.

Pour détecter une exoplanète, il suffit donc de surveiller une étoile et d'observer une baisse périodique de sa luminosité.

On peut alors calculer le demi grand axe de l'orbite comme dans le cas précédent, à partir de la masse de l'étoile et de la période observée.

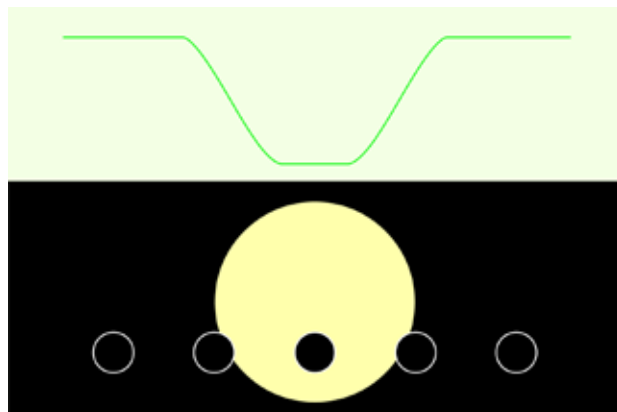


Fig.3. Baisse de luminosité d'une étoile due au transit d'une exoplanète devant cette étoile. Schéma simplifié réalisé pour une luminosité de l'étoile uniforme.

La forme de la courbe de luminosité permet de savoir si la planète va passer devant le centre de l'étoile ou plutôt devant un bord, ce qui permet de déterminer l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport à la ligne de visée.

Calcul du rayon de la planète

Si on connaît le rayon de l'étoile r_E , la mesure de la baisse de luminosité va permettre de calculer le rayon de l'exoplanète r_P .

Une baisse de luminosité de 1 % correspond à une occultation de 1 % de la surface de l'étoile donc à un rayon de l'exoplanète valant 10 % du rayon de l'étoile. En effet la surface est proportionnelle au carré du rayon :

Si $r_P = 0,1 \times r_E$, la surface occultée vaut $0,1^2$ donc 0,01 fois la surface du disque de l'étoile.

Compléments

L'idéal est d'observer une exoplanète par les deux méthodes.

L'observation par transit donne une indication de l'inclinaison de l'orbite donc permet de préciser sa masse.

De plus, si on a déterminé le rayon de l'exoplanète, on peut calculer sa masse volumique.

Nous avons considéré dans les exemples ci-dessus une seule exoplanète autour de son étoile. Il est courant qu'il y en ait plusieurs, ce qui complique bien évidemment les calculs.

Nous n'avons présenté que deux méthodes de détection d'exoplanètes, il en existe d'autres, mais ces deux méthodes ont permis de détecter plus de 90 % des 4 172 exoplanètes connues au 4 février 2020...

La grande diversité des systèmes planétaires extrasolaires

Guillaume Hébrard, directeur de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris, hebrard@iap.fr

Actuellement plus de quatre mille exoplanètes sont répertoriées. De quoi permettre à l'auteur de cet article de procéder à un classement par grandes catégories, de transmettre des informations sur les périodes orbitales, les masses, les conditions potentielles, relatives à l'apparition et au développement de la vie.

Des exoplanètes par milliers

En 1995, les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz annonçaient leur découverte de 51 Peg b, première planète détectée autour d'une étoile similaire au Soleil. Ce résultat, obtenu à l'Observatoire de Haute-Provence et pour lequel ils se sont vus attribuer le Prix Nobel de physique en 2019, a provoqué une véritable révolution en astrophysique. Les exoplanètes, dont pas grand monde ne doutait de l'existence mais qui restaient inobservables jusque-là, sont par la suite devenues un sujet de recherche pour des astronomes de plus en plus nombreux à travers le monde. Les programmes d'observation visant à détecter et caractériser de nouvelles exoplanètes se sont multipliés, de même que les études théoriques et les simulations visant à mieux comprendre leurs modes de formation et d'évolution.

C'est la méthode des vitesses radiales qui a tout d'abord permis les détections les plus nombreuses, cette première place étant par la suite prise par la méthode des transits. De nombreuses caractéristiques des systèmes exoplanétaires peuvent être déduites au moyen de ces deux techniques d'observation. D'autres méthodes, comme l'imagerie directe ou les microlentilles gravitationnelles, permettent également de détecter des exoplanètes, en nombre plus faible mais en apportant d'autres types de contraintes.

En vingt-cinq ans, ce sont plus de 4 000 planètes extrasolaires qui ont été détectées et caractérisées avec ces différentes méthodes. Ces détections très nombreuses montrent l'omniprésence des planètes dans notre galaxie ; il semblerait que la plupart des étoiles en hébergent. Ces résultats révèlent également une très grande diversité de planètes. Si certaines sont similaires aux planètes du Système solaire, beaucoup d'autres montrent des propriétés très différentes, certaines parfois surprenantes et insoupçonnées.

La figure ci-dessous présente la masse des exoplanètes connues en fonction de leur période orbitale. Trois catégories d'exoplanètes apparaissent clairement sur cette figure : les planètes géantes et tempérées (en haut à droite), les jupiters chauds (en haut à gauche), et les petites planètes (en bas). Ces trois familles sont discutées ici, tout en gardant en tête que la classification des planètes est appelée à évoluer à l'avenir, avec les nouvelles découvertes et leurs probables surprises.

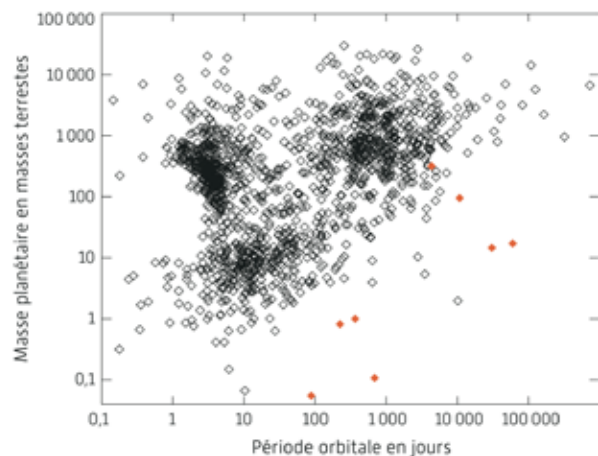


Fig.1. Masses et périodes orbitales des planètes extrasolaires connues. On voit trois grandes populations d'exoplanètes : les planètes géantes et tempérées (en haut à droite), les jupiters chauds (en haut à gauche), et les petites planètes (en bas). Les huit planètes du Système solaire sont indiquées en rouge pour comparaison (© Guillaume Hébrard).

Les exoplanètes géantes et tempérées Des planètes similaires à nos Jupiter et Saturne ?

Les géantes tempérées sont des planètes ayant une taille similaire à celle de Jupiter ou Saturne, et une masse voisine ou même supérieure à celles de ces deux planètes du Système solaire ; elles peuvent atteindre des centaines ou des milliers de masses terrestres. Elles mettent plusieurs centaines de jours ou même plusieurs années à faire le tour de leur étoile. Les géantes tempérées ont donc des propriétés

apparemment semblables à Jupiter ou Saturne et constituent ainsi les exoplanètes connues les plus analogues à celles du Système solaire.

Peu chauffées par leur étoile du fait de leur éloignement à celle-ci, ces planètes restent froides, à des températures généralement en dessous de 0 °C. Il doit probablement s'agir de géantes gazeuses composées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, avec éventuellement un noyau solide.

Des exoplanètes ordinaires...

Il semble que 5 à 15 % des étoiles hébergent ce type de planètes géantes tempérées. Elles sont donc assez communes, sans être omniprésentes. Leur fréquence reste difficile à établir précisément. On les trouve préférentiellement autour d'étoiles riches en éléments chimiques lourds, ce qui pourrait être la signature de leur formation par accrétion.

La plupart des planètes géantes tempérées connues ont été décelées au moyen de mesures de vitesses radiales réalisées sur plusieurs années. Quelques-unes ont également été trouvées par microlentilles gravitationnelles. On n'en connaît encore peu identifiées grâce à leurs transits, ceux-ci étant d'autant moins probables que la planète est éloignée de son étoile. Quant aux planètes observées en imagerie directe, elles sont toutes de ce type. Avec la poursuite de tous ces programmes d'observation, des géantes de périodes de plus en plus longues vont continuer à être découvertes à l'avenir.

À l'instar de Jupiter et Saturne, il est possible que des exoplanètes géantes et tempérées hébergent des satellites ou des anneaux. L'environnement proche de certaines d'entre elles est donc sondé au moyen de différentes techniques pour tenter de détecter ces petits corps. Aujourd'hui cependant, aucune détection de satellites ou d'anneaux n'a été confirmée autour d'une planète extrasolaire ; ces objets ne sont observés pour l'instant que dans le Système solaire.

...mais sur des orbites souvent perturbées

Beaucoup de ces planètes géantes tempérées sont dans des systèmes multiplanétaires, comme dans le Système solaire. Mais alors que Jupiter ou Saturne ont des orbites quasicirculaires, beaucoup des exoplanètes géantes et tempérées ont des orbites excentriques, parfois même extrêmement allongées. Cela pourrait être la signature d'histoires mouvementées pour beaucoup d'entre elles, qui ont pu subir les interactions gravitationnelles d'autres planètes ou d'étoiles associées.

En effet, si on adopte une approximation simple, un système planétaire est composé d'une étoile et d'une planète en interaction gravitationnelle mutuelle, l'orbite de la planète autour de l'étoile suivant les lois de Kepler et étant parfaitement périodique et stable. Dans la réalité, les choses sont souvent plus compliquées. Des effets de marées peuvent se produire entre la planète et son étoile, plusieurs planètes peuvent être présentes autour de l'étoile et interagir gravitationnellement entre elles, ou encore la planète peut être perturbée par la présence de satellites, d'un disque circumstellaire ou d'une autre étoile. Des études dynamiques tentent de comprendre et de modéliser ce type d'effets, et de prédire les variations des paramètres orbitaux qu'ils peuvent produire sur de longues échelles de temps.

Enfin, une autre particularité est la faible abondance des planètes géantes sur des périodes orbitales de quelques mois, bien qu'elles soient *a priori* plus facilement détectables que celles ayant des orbites plus longues. Les géantes sont de nouveau plus nombreuses sur des périodes de quelques jours, c'est-à-dire dans le domaine des jupiters chauds discuté ci-dessous. Ce manque de planètes géantes entre le domaine des jupiters chauds et celui des géantes tempérées a été baptisé la « Vallée des périodes ».

Les jupiters chauds

Des exoplanètes extrêmes

Les jupiters chauds sont des planètes géantes, avec des tailles et des masses similaires à celles de Jupiter, mais sur des orbites très proches de leur étoile. Elles en font le tour en quelques jours alors que Jupiter a une période orbitale de près de 12 ans. Les jupiters chauds reçoivent donc beaucoup d'énergie de leur étoile hôte et leur température avoisine les 1 000 °C, contrairement aux géantes tempérées qui sont bien plus froides. Elles subissent également la forte gravité de leur étoile ce qui a pour effet de circulariser leur orbite ; les jupiters chauds sont quasiment tous sur des orbites très peu excentriques.

Du fait de leurs propriétés, la détection des jupiters chauds est particulièrement efficace par les méthodes des vitesses radiales ou des transits. Ces exoplanètes ont donc été les premières à être découvertes et étudiées, et elles continuent à l'être abondamment. Aujourd'hui, des centaines de jupiters chauds ont été identifiées par des programmes d'observation les visant plus particulièrement. Seule une étoile sur cent accueille un jupiter chaud cependant : ce type de planète n'est donc en fait pas particulièrement fréquent autour des étoiles.



Fig.2. L'Observatoire de Haute-Provence. C'est avec le télescope de 193 cm (au deuxième plan) de cet observatoire qu'a été découverte en 1995 la première exoplanète, le jupiter chaud 51Peg b (© OHP / OSU Institut Pythéas / CNRS / AMU).

Des planètes inattendues

Étant inexistant dans le Système solaire, les jupiters chauds sont des planètes dont la découverte a constitué une surprise. De plus, les modèles théoriques semblent interdire la formation de géantes gazeuses si proches de leur étoile hôte, leurs constituants principaux devant alors être vaporisés. Ces planètes se sont donc vraisemblablement formées plus loin de leur étoile, par exemple à la position actuelle des géantes tempérées, puis ont migré par la suite vers leur étoile.

Différents processus sont à même d'expliquer que des planètes puissent se rapprocher (ou même s'éloigner) de leur étoile hôte au cours du temps. Ces phénomènes sont dus à des interactions de la planète avec son étoile, avec un disque circumstellaire, avec d'autres planètes ou une seconde étoile dans le système. Étudiée depuis longtemps dans le cas du Système solaire, la migration des planètes l'est d'autant plus depuis que les exoplanètes sont observées, notamment les jupiters chauds.

Le disque de gaz et de poussière qui entoure l'étoile après sa formation peut freiner les planètes peu massives et ainsi les faire migrer vers leur étoile. Mais la planète peut être suffisamment massive pour absorber de la matière du disque et y créer une tranchée ; le freinage cesse alors mais la planète peut reprendre sa migration, vers l'intérieur ou l'extérieur suivant les propriétés du disque. Par la suite, des interactions gravitationnelles entre une planète et d'autres planètes ou étoiles dans le système peuvent également modifier son orbite. Dans certaines configurations extrêmes, une planète peut même se faire éjecter de son système.

Ainsi, il est probable que les planètes géantes tempérées aient migré pour devenir des jupiters chauds, et qu'elles en soient donc les précurseurs.

Mais si cette migration vers l'intérieur semble bien établie, de nombreuses inconnues demeurent concernant les détails de ses différentes étapes. On ne sait pas bien, par exemple, quels processus principaux gouvernent l'arrêt de la migration qui permet de les observer à leur position actuelle. On peut de plus se demander quels résidus de planètes pourraient survivre à l'évaporation d'une planète géante s'approchant trop de son étoile. Il est également possible que beaucoup de jupiters chauds soient finalement tombés sur leur étoile.

Les pionniers de l'exoplanétologie

Les jupiters chauds ont joué un rôle important dans l'histoire de l'exoplanétologie et ont notamment montré la grande synergie entre la méthode des vitesses radiales et celle des transits. Elles ont également permis de nombreuses « premières », à commencer par la découverte de la première exoplanète, mais également la première planète en transit, le premier système multiplanétaire, les premières détections de la lumière émise par une exoplanète et même de ses phases...

Ce sont également les jupiters chauds qui ont permis les premières études d'atmosphères exoplanétaires. On peut ainsi observer des espèces chimiques dans ces atmosphères parfois en évaporation, y mesurer la température ou la pression, étudier les processus physiques qui s'y produisent. Ces observations se font notamment lorsque la planète passe juste devant ou derrière son étoile hôte ; ces configurations particulières peuvent en effet permettre de distinguer le spectre de la planète de celui de l'étoile. Dans des atmosphères d'exoplanètes, on a ainsi déjà détecté plusieurs dizaines d'espèces atomiques, ioniques et moléculaires, identifié des processus de chauffage ou de refroidissement, ou encore décelé des variations qui pourraient s'apparenter à des phénomènes météorologiques...

Les jupiters chauds ont d'autre part permis les premières mesures d'obliquités de systèmes exoplanétaires. L'obliquité est l'angle entre le plan orbital d'une planète et le plan équatorial de son étoile hôte, ce dernier étant déterminé par la rotation stellaire¹. Si les orbites planétaires sont généralement alignées avec le plan équatorial de leur étoile², des orbites non alignées ont fini par être décelées, notamment pour des jupiters chauds. Certaines

1 À ne pas confondre avec l'obliquité d'une planète, angle entre le plan de son orbite et le plan de son équateur.

2 On peut mesurer l'angle entre le plan orbital d'une planète et le plan équatorial de son étoile hôte en observant spectralement le transit de la planète devant son étoile, profitant du fait que la rotation stellaire a une signature spectrale.

planètes sont même en orbite polaire, passant au dessus des pôles de leur étoile ; d'autres sont en orbite rétrograde, c'est-à-dire tournant autour de leur étoile dans le sens contraire de la rotation stellaire.

Différents phénomènes pourraient expliquer ces orbites obliques. Ceux qui provoquent la migration des planètes pourraient également modifier leur obliquité, et ainsi désaligner une orbite initialement parallèle au disque protoplanétaire. À l'inverse, l'étoile pourrait avoir basculé par rapport à son orientation initiale.

Les petites exoplanètes

Des super-terres aux neptunes tièdes

Si les planètes géantes présentent deux populations distinctes, à courtes et longues périodes orbitales, les petites planètes semblent elles être abondantes dans toutes les gammes de périodes.

Ces petites exoplanètes ont des tailles caractéristiques allant de une à cinq fois celle de la Terre, et des masses comprises entre une et trente masses terrestres. Au-delà de cette masse supérieure limite, correspondant à dix pour cent de la masse de Jupiter, les planètes sont moins abondantes, jusqu'à devenir de nouveau abondantes dans le domaine des géantes. En masse comme en taille, les petites planètes sont donc bien distinctes des planètes géantes.

Mais ces petites planètes montrent une grande diversité de propriétés. Il y a d'une part des planètes telluriques, semblables à la Terre ou souvent un peu plus grosses et massives, et d'autre part des planètes de taille et masse similaires à celles de Neptune ou Uranus ou légèrement plus faibles, mais plus chaudes et pour l'essentiel gazeuses. Ces petites exoplanètes, que l'on peut nommer super-terres ou neptunes tièdes, sont totalement absentes du Système solaire.

La grande majorité des petites planètes a été identifiée par vitesses radiales et transits, sur des orbites qui ont tendance à être plus circulaires que celles des planètes géantes. Leurs périodes s'étalent de quelques jours à quelques mois. Elles existent certainement également sur de plus longues périodes mais leur détection demandera beaucoup de temps. Quelques petites planètes éloignées de leur étoile hôte ont cependant déjà été découvertes notamment par microlentilles gravitationnelles. Enfin, les petites planètes sont souvent situées dans des systèmes multiplanétaires.

L'omniprésence des petites planètes

Difficiles à déceler et à caractériser précisément, les petites planètes sont cependant clairement les plus abondantes dans notre galaxie. Si on considère

toutes les exoplanètes connues, puis que l'on tente de corriger des différences de sensibilité de chacune des méthodes utilisées pour les repérer, on constate que les planètes sont d'autant plus abondantes que leurs masses et leurs tailles sont petites. Cette tendance est la même quelle que soit la méthode de détection considérée.

Cette répartition en masse et en taille des planètes favorisant les petites planètes est en accord avec les modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires, qui prédisent une plus grande efficacité à former de petites planètes.

Si les chiffres ne sont pas encore connus avec une très bonne précision, il semble que l'on puisse d'ores et déjà conclure que la plupart des étoiles de notre galaxie hébergent une ou plusieurs petites planètes. La découverte de ces petites planètes, super-terres ou neptunes tièdes, apparemment très communes mais totalement absentes du Système solaire, constitue un résultat majeur de l'exoplanétologie.



Fig.3. Trois super-Terres en orbite autour d'une étoile. Cette vue d'artiste présente trois exoplanètes telluriques un peu plus grosses et massives que la Terre, qui font le tour de leur étoile en quelques jours (© ESO).

La densité des petites planètes

Ces petites exoplanètes présentent une gamme de densités très étendue. Les plus denses sont des planètes telluriques, probablement composées de fer, de roches, éventuellement en fusion, les plus massives d'entre elles étant les super-terres. Certaines pourraient être entourées d'une fine couche atmosphérique. D'autres petites planètes ont une densité dix fois plus faible et sont donc probablement composées d'une épaisse atmosphère d'hydrogène et d'hélium entourant un noyau solide ; ces planètes auraient ainsi une structure voisine de celle de Neptune ou Uranus.

Une planète de quelques masses terrestres peut donc être une super-terre ou une mini-neptune, suivant que sa densité est plus ou moins élevée. Les

planètes grosses comme un peu moins de deux fois la Terre pourraient constituer la limite entre ces deux régimes. Il existe également des petites planètes de densité intermédiaire ; certaines pourraient être des planètes-océans, avec un cœur solide et une épaisse couche d'eau liquide entourée d'une atmosphère.

Les petites exoplanètes regroupent probablement des astres de natures bien différentes. L'exploration de cette population de petites planètes ne fait que commencer.

Vers des planètes potentiellement habitables ?

Parmi ces nombreuses et diverses petites exoplanètes, on peut se demander lesquelles pourraient présenter des conditions permettant l'apparition et le développement de formes de vie. Il semble qu'une planète potentiellement habitable devrait tout d'abord être tellurique afin que la vie puisse se développer à sa surface sans être écrasée par une trop grande gravité. Elle devrait de plus être entourée d'une atmosphère pour protéger cette surface et permettre les échanges. Du fait de son orbite, elle devrait également n'être ni trop proche, ni trop éloignée de son étoile pour permettre la présence d'eau liquide à sa surface.

Les conditions nécessaires à cette habitabilité demeurent cependant multiples et complexes. Elles sont reliées à l'impact du rayonnement de l'étoile hôte, ce dernier dépendant du type d'étoile et pouvant varier avec le temps. Elles peuvent

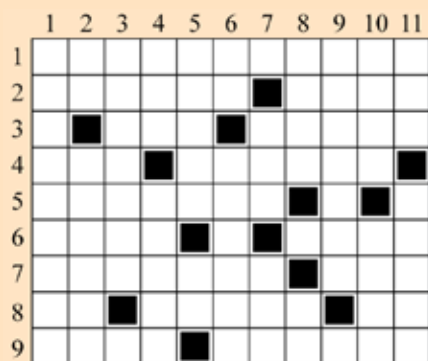
également dépendre de processus atmosphériques sur la planète, par exemple l'effet de serre, ou encore de mécanismes géologiques ou d'interactions entre différentes espèces.

Dans ce contexte, les petites étoiles revêtent un intérêt particulier pour la recherche des planètes habitables. Il est en effet plus aisé de déceler des planètes telluriques autour d'étoiles moins massives et plus petites que le Soleil. Ces étoiles, les naines rouges, sont les plus abondantes dans notre galaxie. Étant d'autre part moins chaudes que le Soleil, leurs planètes peuvent en être assez proches tout en permettant la présence d'eau liquide à leur surface. Des planètes potentiellement favorables à l'apparition de la vie pourraient donc être en orbite proche autour d'étoiles naines rouges. De nombreux instruments et programmes d'observation sont mis en place pour étudier les planètes autour de ce type d'étoiles.

Les progrès vont sans aucun doute se poursuivre dans ces thématiques, en associant l'astrophysique avec d'autres disciplines scientifiques, et en mêlant observations, théories, modèles, simulations, expérimentations... S'il est bien sûr difficile d'être trop affirmatif sur ce point particulièrement spéculatif, il semble cependant aujourd'hui raisonnable d'anticiper que ces recherches pourraient permettre, peut-être d'ici à quelques décennies seulement, de déceler les signatures de formes de vies extraterrestres sur des planètes extrasolaires. ■

Mots croisés exoplanétaires

(solution page 48)



Verticalement

1. Comme une analyse qui a permis à Francis Mayor et Didier Quéloz de découvrir des exoplanètes.
2. Université qui possède deux télescopes sur le Mauna Kea. De la cuisine.
3. Transit d'une exoplanète devant son étoile.
4. Elle a conçu CHEOPS, le satellite d'étude des exoplanètes, avec les Suisses. C'est là que fut fixée la date de Pâques.
5. Parfois de vrais cauchemars. Numéro de Jean-Dominique Cassini.
6. Environ 31 688 ans. Bords d'une planète.
7. Attendu chez le nourrisson, déconseillé ensuite. Direction du coucher d'Aldébaran.
8. Capitale asiatique. On peut y faire de l'astro au lycée.
9. Vitesse à mesurer pour détecter des exoplanètes.
10. Entre États-Unis et Canada. Cor.
11. Il surveille notre plus proche étoile. On peut la confondre avec une exoplanète quand elle est brune.

Horizontalement

1. Exoplanètes comme Gliese 876 d ou HD 40307 g.
2. Une exoplanète peut en présenter, comme Vénus. Peut-on dire que c'est un trépid ?
3. Si votre télescope a un problème, appelez-le. C'est grâce à ces ondes que l'on a détecté la première exoplanète autour d'un pulsar en 1990.
4. Commission de la SAF qui s'intéresse au temps. Nom du spectromètre qui a repéré la première exoplanète depuis l'OHP.
5. Méthode de détection d'une exoplanète.
6. Hurlé. Il n'est pas prévisible.
7. C'est là qu'on a détecté la première exoplanète autour d'un pulsar en 1990. Une étoile de magnitude 1.
8. S'utilise pour une planète mais pas pour une exoplanète. Passage d'air. Finit six rares.
9. Caroline Herschel l'a été à la Royal Astronomical Society. Détecteur d'exoplanètes qui a remplacé ELODIE à l'OHP.

AVEC LES ENSEIGNANTS

Abordons les exoplanètes avec les enseignants et les élèves

Roseline Primout, enseignante en physique-chimie et formatrice

L'article décrit une formation destinée aux enseignants du secondaire afin de les familiariser avec les exoplanètes. Une liste de questions est proposée dont les réponses sont à chercher sur un site dédié qui archive les principales caractéristiques. Un article de presse est l'occasion de vérifier la validité des informations annoncées.

Cet article présente un atelier portant sur l'étude des exoplanètes, réalisé lors de la formation *Du Système solaire aux trous noirs* organisée par les Maisons pour la science en Aquitaine¹. Cette formation était destinée aux enseignants du secondaire, toutes disciplines confondues, dans l'objectif de leur apporter des connaissances, des savoir-faire et des outils pour concevoir leurs séquences et la réalisation de travaux dirigés auprès de leurs élèves, lycéens ou collégiens. Cet atelier a été reproduit lors de l'école d'été d'astronomie du CLEA 2019.

L'outil utilisé est le catalogue *exoplanet.eu* qui permet d'obtenir des données sur les exoplanètes afin d'aborder des connaissances sur ces astres. Pour des élèves, extraire et analyser des données à partir d'un outil professionnel peut être motivant : le travail demandé a un sens car rattaché au milieu de la recherche. L'inconvénient est que certaines données changent régulièrement, si bien qu'entre le moment de préparation de la séance et celle de sa réalisation il faut savoir rebondir. Ce désavantage peut être présenté comme un atout auprès des jeunes car il illustre la science en construction au quotidien. Ce catalogue offre aussi la possibilité d'obtenir des graphes utiles pour la préparation des cours comme celui de la masse de l'étoile en fonction du demi-grand axe de l'orbite de la planète qui permet d'illustrer les différents groupes d'exoplanètes trouvés à ce jour comme les jupiters chauds ou froids et les super-terres.

Cet atelier a été conçu à partir d'une proposition faite par l'association Eu-Hou² lors d'une précédente formation. Il a été remanié pour plusieurs raisons.

Comme dit ci-dessus, du fait de l'évolution

quotidienne du catalogue, le choix des exoplanètes fait par Eu-Hou ne nous semblait plus pertinent car les exoplanètes non confirmées le sont devenues et celles supposées en zone habitable ne le sont plus toujours.

En outre, comme le catalogue est facile d'utilisation, nous avons préféré le présenter de manière moins « presse-bouton », pour favoriser la réflexion. Nous avons deux présentations possibles destinées aux enseignants et à adapter éventuellement pour des élèves. L'une plus guidée qui présente les multiples possibilités d'exploitation du catalogue à travers une liste de questions. L'autre très ouverte, portant sur l'analyse critique d'articles de presse mais plus limitée sur les nombreuses possibilités d'extraction des données comme l'étude de l'article *Ils découvrent 114 exoplanètes, dont plusieurs potentiellement habitables* (voir l'encadré à la fin de cet article).

De plus, la proposition faite par Eu-Hou concernant la 3^e loi de Kepler ne nous semblait pas pertinente puisqu'ils demandent de vérifier cette loi en utilisant le demi-grand-axe issu du catalogue, or celui-ci a été lui-même calculé via la 3^e loi de Kepler. Pour finir, nous avons valorisé cet atelier par l'utilisation du logiciel en ligne NASA's eyes³ du *Jet Propulsion Laboratory* qui permet de visualiser les systèmes stellaires, de comparer leurs tailles avec celle du Système solaire afin de mieux faire comprendre que la majorité des exoplanètes découvertes actuellement sont très proches de leur étoile, de cerner les exoplanètes présentes dans la zone d'habitabilité et d'appréhender l'échelle des distances en déterminant la durée possible d'un voyage pour s'y rendre selon divers modes de transport.

Le catalogue *exoplanet.eu* présente de multiples données qu'il faut sélectionner selon ce que l'on veut aborder avec les élèves, et si ces informations

1 <https://www.maisons-pour-la-science.org/formations/>

2 Europe Hands-On Universe <http://www.fr.euhou.net/>

Ce document à télécharger sur le site du CLEA.

3 <https://eyes.nasa.gov/>

servent uniquement pour illustrer une séquence ou entrent dans le cadre d'un projet interdisciplinaire. Dans l'article *Exoplanètes et science-fiction*, un exemple est traité dans le cadre d'un projet EAC (Éducation artistique et culturelle) sur le thème de la science-fiction.

Le catalogue

Le catalogue est disponible en ligne à l'adresse exoplanet.eu. Un seul bémol, les axes sont par défaut logarithmiques et, selon le niveau des élèves, c'est difficile de leur expliquer.

Attention, le site est dynamique, par exemple, des planètes peuvent passer de l'état « non confirmé » à celui de « confirmé » entre le moment où l'on prépare son cours et celui où on le donne. Il faut y penser ! C'est aussi un atout, une façon de montrer que la science n'est pas figée.

Présentation d'un atelier

Informations et apports sur le catalogue

Le nom de la planète

Le nom d'une planète comme HD 286123 b commence par le nom de son étoile⁴, ici HD 286123, suivi d'une lettre minuscule. La lettre b ou c ou d... donne soit l'ordre de découverte, soit l'ordre des planètes de la plus proche à la plus lointaine de l'étoile si elles sont découvertes en même temps. La lettre a correspondrait à l'étoile, mais elle n'est jamais utilisée,

La masse (en masse de Jupiter) et le rayon (en rayon de Jupiter) de la planète

Si une planète a une masse de 0,398 cela signifie que sa masse vaut 0,398 fois celle de Jupiter. Selon les méthodes de détection, certaines caractéristiques peuvent ne pas être connues : ainsi, la méthode de transit ne donne pas accès à la masse.

Les caractéristiques de l'orbite de la planète

Le catalogue donne la période orbitale (en jours), le demi-grand axe (en unité astronomique⁵), l'excentricité (sans unité) et l'angle entre le plan de l'orbite et le plan perpendiculaire à l'axe Terre étoile.

Découverte du catalogue

Ouvrir le catalogue.

4 Il y a de nombreuses manières de nommer une étoile. On peut utiliser le nom d'un catalogue (comme HD pour Henry Draper) suivi d'un numéro, un numéro suivi du nom de la constellation (comme 51 Peg), le nom d'un satellite suivi d'un numéro (comme CoRoT 7)...

5 Approximativement la distance moyenne Terre-Soleil, fixée maintenant à 149 597 870,7 km.

Cliquer sur l'onglet «Tous les catalogues» situé dans la barre des tâches en haut.

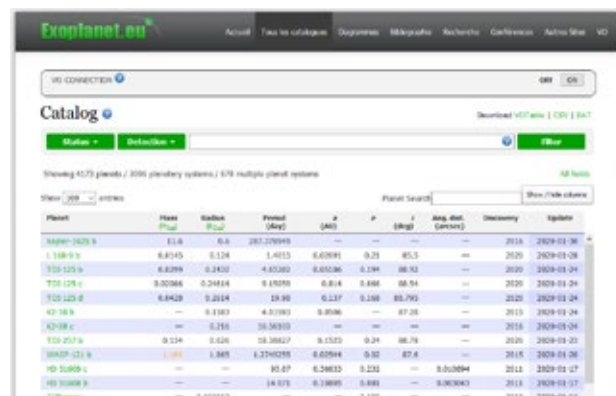


Fig.1. Le site exoplanet.eu. On arrive sur cette page après avoir cliqué sur «Tous les catalogues». Pour chaque exoplanète, on indique son nom ainsi qu'un certain nombre de paramètres s'ils sont connus (masse, rayon, période, demi-grand axe, excentricité...).

1. Combien d'exoplanètes sont répertoriées à ce jour ?

Pour quelle raison ce nombre est plus élevé que celui de systèmes extra-solaires ?

(Les réponses aux questions sont données page 16.)

2. Recherche d'exoplanète

Pour rechercher une exoplanète, utilisez l'onglet «Planet Search», situé sur la droite en haut du tableau. Il faut respecter la casse, les espaces... Vous pouvez afficher toutes les données en cliquant sur «All fields», situé sur la droite en haut du tableau.

L'étoile Kepler-19 possède combien d'exoplanètes ? Ont-elles été découvertes la même année ?

3. Création de diagramme

Cliquer sur l'onglet «diagrammes» situé dans la barre des tâches en haut. La page s'ouvre sur le diagramme de la période orbitale en fonction de la masse de l'exoplanète.

Vous pouvez modifier la grandeur de chaque axe selon ce que vous recherchez. Vous pouvez cliquer sur une exoplanète pour obtenir des informations à son sujet.

D'après le diagramme de la distance étoile -exoplanète (demi-grand axe ou semi-major axe) en fonction de la masse de l'exoplanète, quel type d'exoplanètes sont essentiellement détectées à ce jour ? Cette information corrobore-t-elle le fait que les données sur les exoplanètes soient indiquées en fonction de la masse de Jupiter dans le catalogue ?

Utiliser le diagramme de la masse de l'exoplanète en fonction du demi-grand axe pour identifier les groupes des jupiters chauds, des jupiters froids et des super-terres.

4. Création d'histogramme

Vous êtes toujours sur la page des diagrammes, Cliquer sur «*histogram plot*» en haut à droite, vous obtenez un diagramme sous forme d'histogramme. Modifiez les axes pour obtenir la « fréquence » (le nombre de découvertes) en fonction de l'année de la découverte.

En quelle année a-t-on découvert le plus d'exoplanètes ?

Pour enregistrer un diagramme ou un histogramme, cliquer sur la droite sur «*save figure*» et choisissez la qualité de l'image que vous souhaitez.

Cliquer sur «*scatter plot*» en haut à droite, pour revenir sur un diagramme en nuage de points.

Utilisation simple du catalogue

5. À l'aide du catalogue, recherchez en quelles années les sept exoplanètes de l'étoile Trappist-1 ont été découvertes.

Sont-elles des jupiters chauds ? des jupiters froids ?

6. Certaines exoplanètes ont été découvertes par plusieurs méthodes et d'autres par une seule.

Comparez les systèmes WASP-12 et HR 858.

Quelle information n'est plus donnée pour HR 858 ? Pourquoi ?

Calcul du demi-grand axe de l'orbite des exoplanètes

7. Le demi-grand axe de l'orbite des exoplanètes est une valeur calculée.

Quelle loi est utilisée pour le déterminer et à partir de quelles données ?

Vérifier pour les exoplanètes K2-18 b et Kepler-62 f. (l'utilisation d'un tableur est possible)

Données :

$$1 \text{ ua} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$$

$$m_{\text{Soleil}} = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$1 \text{ j} = 86\,400 \text{ s}$$

$$m_{\text{Jupiter}} = 1,8986 \times 10^{27} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Soleil}} = 696\,342 \text{ km}$$

Recherche d'exoplanètes habitables

8. Parmi les critères pour être habitable, l'exoplanète doit posséder un sol solide, rocheux ou gelé, et une température de l'ordre de 300 K afin que l'eau à sa surface soit sous forme liquide et elle doit être confirmée.

La densité de l'exoplanète est obtenue grâce à sa masse et à son rayon.

La température absolue de l'exoplanète est calculée selon la formule mathématique :

$$T = (1 - A)^{0,25} \sqrt{\frac{R_*}{2a}} \cdot T_*$$

- a est la distance étoile/exoplanète en mètres,
- T_* est la température de l'étoile en kelvins ;
- R_* est le rayon de l'étoile en mètres (*inconnu pour la majorité des systèmes Gliese - GJ*) ;
- A est l'albédo de l'exoplanète. L'albédo est la fraction de lumière reçue de l'étoile que l'exoplanète réfléchit dans l'espace. Ainsi, une exoplanète parfaitement réfléchissante a un albédo de 1 et une exoplanète complètement noire a un albédo de 0.

Calculer les températures de surface des exoplanètes K2-18b et Kepler-62f (l'utilisation d'un tableur est possible).

Données

Pour trouver l'albédo de ces exoplanètes sur le catalogue, il faudrait rechercher le système, cliquer sur l'exoplanète puis sur «Observability Predictor» situé en bas de page. En fait, cette valeur ne peut être mesurée actuellement et la valeur donnée est 0,367, calquée sur l'albédo de la Terre.

Utilisation du logiciel NASA's eyes du Jet Propulsion Laboratory

Télécharger puis ouvrir le logiciel NASA's eyes.

Cliquer sur «START» de l'onglet « EYES on EXOPLANETS».

À l'aide de l'onglet «Search» situé en haut, sélectionner «By name».

Vérifier si les exoplanètes K2-18b et Kepler-62f sont bien dans la zone habitable de leur système extrasolaire.

La lumière qui nous parvient de ces exoplanètes a voyagé pendant combien d'années pour chacune ?

Évolution des données au cours du temps

Lire l'article *Ils découvrent 114 exoplanètes, dont plusieurs sont potentiellement habitables* écrit par Xavier Demeersman en février 2017 (page suivante).

À l'aide du catalogue *exoplanet.eu* et du logiciel *NASA's eyes* vérifier les informations apportées en 2017 au sujet de GJ 411b. Cette exoplanète est-elle considérée comme étant dans la zone habitable de son système en 2019 ?

Ils découvrent 114 exoplanètes, dont plusieurs potentiellement habitables

Article de Xavier Demeersman publié le 17 février 2017

Plus de 20 années de données collectées sur plus de 1 600 étoiles épiées avec le spectromètre Hires viennent d'être publiées. Une somme considérable que les chercheurs ont souhaité partager dans la perspective de nouvelles découvertes. Parmi les 357 exoplanètes détectées, plus d'une centaine sont nouvelles. L'une d'elle gravite autour de la quatrième étoile la plus proche de la Terre. [...]



Illustration de la superterre GJ 411b. Son étoile hôte, distante de seulement 8,1 années-lumière, est plus de deux fois moins massive que notre Soleil. © Ricardo Ramirez.

L'un des cas les plus intéressants mis en avant par les chercheurs est la planète GJ 411 b. Située à seulement 8,1 années-lumière (presque deux fois la distance qui nous sépare de Proxima du Centaure), son étoile hôte également désignée Lalande 21185, environ 40 % de la masse du Soleil, est la quatrième étoile la plus proche de notre Système solaire.

Avec une masse équivalent à 3,8 fois celle de la Terre, l'objet, qui lui gravite autour en un peu moins de 10 jours, ressemble plus à une superterre qu'à une Terre bis.

Est-elle habitable ? Il est encore trop tôt pour le dire. Les auteurs soulignent néanmoins que la tendance à trouver les petites planètes (donc rocheuses) généralement autour des étoiles plus petites, se confirme.

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-20-exoplanetes-potentiellement-habitable-decouvertes-62762/>

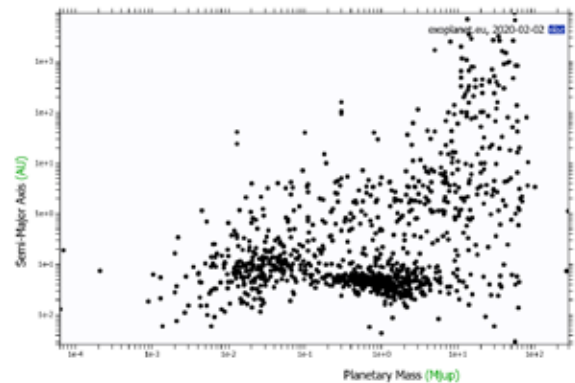
Solutions

1. Au 28/01/2020, 4173 exoplanètes sont répertoriées (ce nombre augmente au fil des jours).

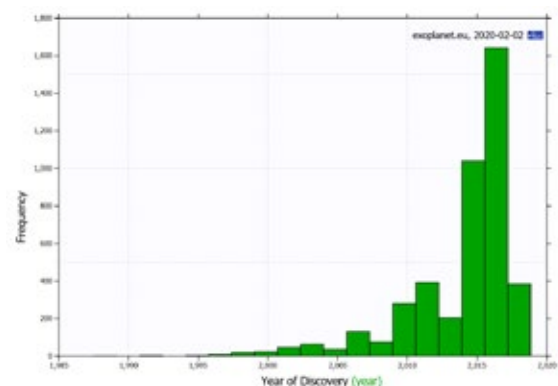
De nombreux systèmes extra-solaires contiennent plusieurs planètes.

2. Trois exoplanètes : b et c découvertes en 2011 et d en 2017.

3. Les exoplanètes de type Jupiter sont les plus faciles à trouver de par leur taille.



4. À partir de 2015 le nombre d'exoplanètes a nettement augmenté suite au traitement des données du satellite Kepler.



5. 2016 et 2017 ; de petites tailles et très proches de leur étoile donc ne sont ni des jupiter chauds ni des froids.

6. WASP-12 a été découverte par la méthode des vitesses radiales donnant la masse des exoplanètes contrairement à HR 858 découverte par la méthode du transit. On n'a donc pas accès à sa masse.

7. Utiliser la loi de Kepler

8. Températures : 250 K pour K2-18 b et 413 K pour Kepler-62 f.

Logiciel NASA's eyes :

K2-18b est à la limite de la zone habitable et située à 124 al ; Kepler-62f est dans zone habitable et située à 1 200 al.

Article : informations correctes mais GJ 411b n'est pas dans la zone habitable. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Observation d'un transit planétaire

Anica Lekic, Institut polytechnique des sciences avancées (école d'ingénieurs de l'air et de l'espace).

L'astronomie est une des composantes de la formation des ingénieurs de l'IPSA, Institut Polytechnique de Sciences Avancées. L'astronomie amateur y est pratiquée. La mission exposée ici se déroule au télescope Jean-Marc Salomon à Buthiers à proximité de la forêt de Fontainebleau. L'article décrit minutieusement le protocole mis en œuvre.

L'IPSA est une école d'ingénieurs en aéronautique et spatial, située sur 2 sites, Paris et Toulouse. L'astronomie y est enseignée dans le cadre des cours dans le pôle spatial et dans le cycle ingénieur. Ce n'est pas la thématique la plus importante mais elle reste indispensable pour pouvoir travailler dans le secteur spatial.

L'astronomie à l'IPSA c'est aussi l'astronomie amateur que l'on peut pratiquer dans l'association Ipsa Vega depuis 2016. En dehors des conférences et cours d'initiation à l'astronomie pratique, l'association propose deux missions de recherche scientifique amateur : le projet « fil rouge : validation de transit d'exoplanètes » et le projet « spectre : étude des étoiles à haute métallicité ». Les données collectées sont celles issues du télescope Jean-Marc Salomon de Planète Sciences (TJMS Buthiers) pour les transits et le télescope Bernard Lyot (TBL Pic du Midi) pour les spectres. Régulièrement, des sorties sont organisées au TJMS afin de collecter des données de transit d'exoplanètes et les étudiants peuvent monter au Pic comme observateur associé.

C'est dans le cadre d'un programme d'initiation à la recherche et à l'innovation que j'ai pu proposer un cours intitulé « photométrie de transit d'exoplanètes » pour les étudiants. Nous disposons de 5 séances de 4 heures au printemps pour mener à bien notre projet de A à Z : découvrir ce qu'est une exoplanète, les moyens de la détection, choisir une date pour l'observation, préparer la nuit avec les cibles potentielles, observer, dépouiller les données et conclure. Les 20 étudiants du cours sont répartis en 4 groupes de 5. Dans chaque groupe, 2 étudiants font de la bibliographie sur le protocole que nous utilisons pour faire de la photométrie d'un transit d'exoplanète. Deux autres s'entraînent sur les logiciels de pré-traitement et de traitement d'image et le dernier s'occupe de préparer la nuit d'observation. L'objectif est simple : il faut qu'au bout des deux nuits d'observation prévues,

chaque groupe puisse avoir la validation du transit d'une exoplanète, en ayant réalisé ce que l'on appelle une « courbe de lumière ».

La méthode que nous utilisons pour détecter une exoplanète qui passe devant son étoile hôte et qui se trouve sur notre ligne de visée est la photométrie différentielle. Il s'agit de mesurer la variation relative de magnitude au cours du temps d'une étoile, autour de laquelle gravite une exoplanète, afin de déterminer ses caractéristiques. On trace alors la courbe de lumière caractéristique de cette baisse de luminosité par rapport à une étoile étalon : c'est la photométrie différentielle. Il s'agit d'une méthode indirecte pour détecter une exoplanète. Elle a l'avantage d'être réalisable depuis le sol et par des amateurs mobiles, réactifs et disponibles, disposant d'un télescope de bon diamètre.

Les étapes suivies par les élèves

Pour obtenir une courbe de lumière il faut tout naturellement trouver du matériel de bonne qualité et surtout un télescope avec une taille suffisante. Avec un diamètre de 600 mm et équipé d'une caméra CCD STL 8300, le télescope Jean-Marc Salomon (TJMS) situé au centre astronomique Jean-Marc Salomon (CAJMS) remplit parfaitement ces critères.



Fig.1. Les coupoles du CAJMS : au premier plan le TJMS de 600 mm de diamètre.

L'avantage de ce centre est son accessibilité depuis Paris. En effet, il se trouve à un peu plus d'une heure de route au sud de Paris à la lisière de la forêt de Fontainebleau. Pour piloter le télescope, il faut qu'un des membres du groupe possède un agrément, certificat attestant que l'on sait se servir du télescope et du logiciel de pilotage PrismV9. Je possède cet agrément et chaque année, le président d'Ipsa Vega le passe également.



Fig.2. L'équipe d'Ipsa Vega prépare la terrasse pour animer la partie « ludique » de la soirée, au programme Jupiter !

Nous allons maintenant détailler les étapes suivies par les étudiants afin d'obtenir une courbe de lumière validant un transit d'exoplanète.

Les observations ont été réalisées au printemps dernier. Deux groupes avaient été mis en place pour effectuer deux nuits d'observations. Cela permet de ne pas avoir 20 personnes à gérer sur le site du CAJMS en même temps. De plus, cela augmentait nos chances d'obtenir des transits si jamais les conditions météorologiques se dégradaient.

Les quatre groupes de 5 ont préparé un programme d'observation pour chacune des deux nuits. Il fallait qu'ils s'inscrivent pour l'un des deux créneaux. Les élèves étaient en possession d'un protocole de validation de transit d'exoplanète par photométrie, gentiment transmis par Planète Sciences et régulièrement amélioré par Ipsa Vega. Une rigueur absolue était nécessaire de notre part pour que chaque minute de cette nuit soit utile à notre projet. Un programme de la soirée fut élaboré à partir des étoiles que chaque groupe de travail voulait observer. Les prévisions météorologiques étant parfois imprécises, il fallut donc envisager tous les scénarios possibles pour une nuit qui ne laissait guère la place à l'improvisation.

En amont

Les élèves préparent les deux nuits. La météo et la phase de la Lune sont étudiées de près. Le protocole est lu en entier et calmement.

Les étudiants doivent choisir leurs cibles, en noter les éphémérides et éditer les « cartes de champ » permettant leur repérage. Pour ce faire, ils passent par Exoplanet Transit Database (ETD), une base de données gérée par la société astronomique tchèque, mettant en relation des amateurs et des professionnels pour trouver les transits observables en fonction des coordonnées GPS du lieu, ici le CAJMS. Ce site permet ensuite de contribuer à la recherche en postant des données. En mai dernier, la cible choisie pour notre première nuit était WASP-48 b, une exoplanète autour d'une étoile brillante, détectée par un programme d'observation systématique du ciel.

D'un point de vue pratique, on utilise Stellarium (planétarium virtuel), Aladin Simbad (afin d'avoir la position exacte de l'objet en faisant l'astrométrie), les logiciels de prétraitement des photos (Prism) et les logiciels pour la photométrie (Muniwin, SIRIL ou AstroImageJ) ; on vérifie grâce au site de l'association américaine d'étude des étoiles variables (AAVSO), et on trouve l'étoile de référence non variable et de même couleur que Wasp-48, par rapport à laquelle on étudiera sa variation de luminosité. Le protocole nous donne des informations sur les filtres à utiliser, les temps de pose. En règle générale pour les transits étudiés au TJMS, nous avons utilisé des temps de 30 à 45 s en filtre rouge. On ajuste cela en réponse à ces critères, qui sont importants car la réussite de l'observation et la qualité des photos en dépendent. On se fixe alors une bande de magnitude de 10 à 14 pour les étoiles cibles dont on souhaite étudier la courbe de lumière. En dehors de cette bande, on pourra difficilement observer le transit au TJMS. Le « puits » de la courbe de lumière caractéristique du passage d'une planète devant son étoile doit être au maximum de 0,02 ou 0,03 magnitude, pour notre matériel de 600 mm de diamètre. Après avoir choisi la cible, les élèves font la bibliographie de l'objet et regardent la visibilité de l'étoile et sa hauteur dans le ciel.

Le jour J

Nous arrivons à 17 h pour accéder au TJMS. Une fois que le télescope est mis en route, avec les étudiants nous effectuons les calibrations classiques en début de nuit (flat ou plage de lumière uniforme PLU, environ 35). On ajuste alors le temps de pose aux alentours de 30 ou 45 s. L'étoile étant assez brillante au 600 mm, nous prenons un filtre rouge R afin d'améliorer la photométrie, ainsi que le plus petit temps de pose pour ne pas saturer le capteur.

Ensuite, on lance une série de bias (offset) et darks automatiques, générés par PRISMV9. Pour notre étoile, il faudra 25 bias et 100 darks afin de rendre les images plus exploitables. La première expérience au TJMS par les élèves est un mélange d'observations ludiques et du travail rigoureux d'un astronome amateur. Une fois que les images de calibration sont prêtes et que la nuit est tombée, les étudiants souhaitent que l'on pointe notre exoplanète. La focalisation ayant été réalisée avant les tests des temps de pose, on lance l'autoguidage pour maintenir autant que possible les étoiles sur les mêmes pixels de la caméra de suivi.



Fig.3. Concentration maximale pour les étudiants

Ensuite, le télescope pointe l'étoile sélectionnée durant plus de 3 heures. On lance alors une boucle de plusieurs centaines de clichés (le nombre de clichés doit avoir été calculé en amont, en fonction du temps de pose et de la durée estimée du transit) et on lance le programme d'acquisition automatique : les élèves sont impatients de voir le transit... mais il faudra encore attendre quelques heures avant qu'il ne débute. On prévoit de commencer les acquisitions avant l'heure prévue, sachant que l'heure de début du transit donnée par l'ETD est une estimation entachée d'une incertitude qui peut atteindre 1 h. Ensuite, on enchaîne les poses sur l'étoile : une centaine est prévue pour cette acquisition de WASP-48. Bien que le télescope Jean-Marc Salomon réalise l'observation et que le traitement des images se fasse à l'IPSA un autre jour, il y a encore de quoi s'occuper. Tout d'abord, à l'aide du logiciel Stellarium, software destiné à donner une carte du ciel réaliste en temps réel, nous pouvions suivre l'étoile. De plus, ce logiciel nous a permis de trouver et d'étudier le champ d'étoiles où se situe notre cible ainsi que les potentielles étoiles de référence pour la photométrie différentielle. Une partie du groupe continue la bibliographie de la cible et l'autre partie est sur la terrasse du TJMS et s'occupe à pointer les planètes comme Jupiter afin de s'initier à l'astronomie pratique sur un petit instrument.

Une fois que l'acquisition est terminée, on lance les calibrations de fin de nuit ; on peut lancer des photos de galaxie pour le côté ludique et esthétique puis on range le site et toute l'équipe rentre tranquillement à Paris en voiture.

En aval

L'analyse des données se passe en deux temps :

1. Le pré-traitement destiné à réduire le bruit instrumental et à corriger la réponse des pixels doit être très soigné.

Le logiciel doit faire le tri des photos et rejeter des photos non exploitables. Le logiciel Prism fait la moyenne des photos et nous donne des fichiers moyennés appelés « masters » que nous utiliserons pour traiter nos données brutes ; ensuite on peut passer au 2.

2. Cette deuxième étape correspondant à la photométrie où le logiciel (pour nous Muniwin) va comparer les photos entre elles, en tenant compte des critères importants comme le seuil de détection des étoiles trouvées sur l'image par le logiciel et le rapport signal sur bruit ou SNR. Il faut prendre son temps et persévérer pour trouver la bonne combinaison correspondant à la taille des diaphragmes sous Muniwin afin d'effectuer la photométrie : plus le diaphragme entoure bien l'étoile cible et plus le flux lumineux détecté sera grand. Une fois trouvée, cette combinaison de valeurs de paramètres intrinsèques de Muniwin ne change pas en fonction de la photo considérée de l'étoile Wasp-48. La dernière étape sera la courbe de lumière qui s'affiche ! Les élèves ont pris l'initiative de démarrer une heure avant le début du transit et d'arrêter une heure après la fin du transit. Ceci a été très utile pour analyser les photos de WASP-48. En effet, la courbe de lumière possède alors 2 plateaux qui forment, en se joignant, la ligne de base. Certains d'entre nous ont souhaité tout de suite obtenir une première courbe brute des données sous PrismV9. Formidable ! On voit le « puits de lumière » traduisant le passage de la planète devant son étoile ! Les élèves et moi-même sommes fiers d'être arrivés au bout de cette analyse ! On peut publier le transit sur une base de données ! Nous avons donc publié le transit de Wasp-48 b sur ETD et notre contribution a été acceptée par les astronomes tchèques comme n'étant pas trop mauvaise.

Les étudiants étaient fiers d'avoir pu participer à améliorer la connaissance des exoplanètes, grâce à notre petite contribution. Ce transit de Wasp-48 b a été publié sur la base de données correspondant à la

campagne d'observations TRESCA (site Exoplanet Transit Database).

Quatre observations sont encore en attente de publication, tandis que deux sont publiées au nom d'Ipsa Vega.

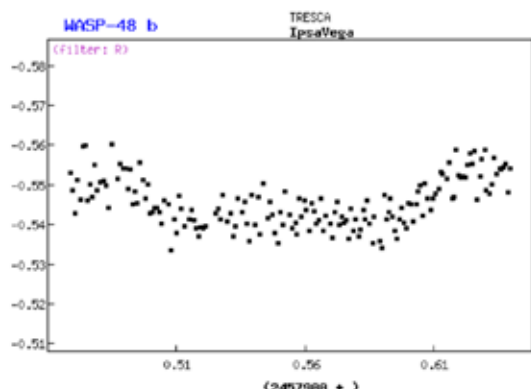


Fig.4. Courbe de lumière brute de Wasp 48 obtenue par les élèves.

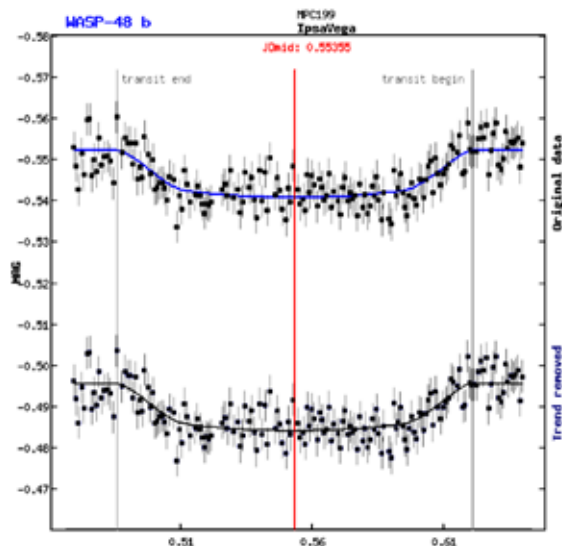


Fig.5. Données ajustées par une courbe de tendance interne au serveur de l'ETD.

Ressenti des élèves

Le transit avec la courbe de lumière fut le moment le plus appréciable de la soirée car c'est à partir de cet instant là que l'on voyait le travail de la nuit. « En effet, c'est réellement à cet instant que l'on voyait ce que l'on allait devoir faire mais aussi que l'on pouvait commencer à faire de la recherche ».

« L'utilisation d'un télescope semi-professionnel était une occasion unique d'observer les astres et d'apporter notre pierre au catalogue mondial d'exoplanète ».

« En étant nous-même les acteurs de l'acquisition de nos données, nous avons réellement expérimenté la démarche technique et scientifique que les

astronomes du monde entier mettent en œuvre ». « Cette nuit représentait une première occasion unique d'observer les astres du ciel profond ».

D'autres encore étaient particulièrement intéressés pour observer à l'oculaire et non sur un écran et en savoir davantage au sujet des constellations, galaxies et exoplanètes. « Nous devons rester en vigilance permanente afin d'assurer la réussite du transit », « Afin de mettre en lumière la variation de luminosité de l'étoile Wasp-48 (l'étoile visée durant la nuit), nous devons trouver au minimum 3 autres étoiles avec un type spectral semblable à la nôtre. Ce fut une recherche assez laborieuse mais très gratifiante, nous nous sommes sentis utiles ! »

« L'utilisation de PrismV9 donne l'impression que trouver une exoplanète est quelque chose de facile, bien que nous sachions que cela représente des mois de travail ».

Conclusion : Une expérience enrichissante en tant que chercheur « amateur »

Le travail d'équipe réalisé en amont de l'observation par chacun a permis une nuit d'observation efficace et ludique. Malgré des facteurs anxiogènes tels que la fatigue ou la recherche de l'étoile de référence, le pointage et l'autoguidage à assurer, nos résultats à la fin de la soirée ont su récompenser les attentes des étudiants. Ces nuits nous auront permis de réaliser un travail approfondi de recherche consacré aux exoplanètes, mais surtout de réaliser un rêve d'enfant : observer le ciel profond et en élucider les mystères. Les étudiants effectuent un véritable travail d'expérimentateur en plus de l'ingénieur qui peut développer des outils pour l'astronomie.

Finalement, après cette belle nuit, les élèves ont obtenu d'autres résultats qu'ils ont présenté à l'oral. Certains ont fait des codes MATLAB ou Python pour retrouver les courbes de tendance, des tutoriels pour manipuler les logiciels pour les prochains membres d'Ipsa Vega. La publication sur ETD est visible par des professionnels du monde entier. Elle permet de valoriser cette expérience de recherche amateur en astrophysique sur le CV. Ce cours permet donc de s'ouvrir au monde de la recherche et de contribuer à la science à l'échelle d'une école d'ingénieurs comme l'IPSA. Certains ont utilisé cette expérience pour obtenir des stages. L'astronomie dans une école d'ingénieur peut être un tremplin vers le monde de la recherche, n'hésitez plus les étudiants ! ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Détection et analyse de l'atmosphère des exoplanètes

Floriane Michel, Canberra

Inspiré du travail fait avec Marion HALAS, Alejandra ALCALDE AZUMA, Isabelle HARRIS et Laure PETITDIDIER pour les Olympiades de Physique 2020.

Le passage d'une exoplanète devant son étoile hôte permet d'estimer son diamètre apparent. Si en plus la planète possède une atmosphère, on peut en déduire des informations sur sa composition.

Les transits

Le passage d'une exoplanète devant son étoile est appelé transit. Au cours de celui-ci, l'intensité lumineuse de l'étoile diminue. Ils peuvent être observés grâce aux télescopes spatiaux Hubble et Spitzer mais également à l'aide des télescopes terrestres.

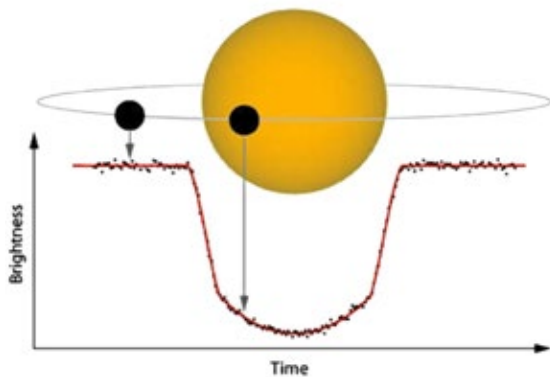


Fig.1. Transit et baisse de luminosité.
© Institute for Astronomy-University of Hawai.

La profondeur de cette baisse de luminosité permet de calculer le rapport entre le rayon de l'exoplanète et le rayon de l'étoile. Plus l'exoplanète bloque la lumière de l'étoile, plus ce rapport est grand.

Grâce à des filtres optiques, les scientifiques peuvent observer les transits dans différentes longueurs d'onde. Si l'exoplanète possède une atmosphère, il est possible d'observer une variation de la profondeur de la baisse de luminosité en fonction de la longueur d'onde. Ce phénomène s'explique par la présence de gaz constituant l'atmosphère qui vont absorber certaines longueurs d'onde plus que d'autres. L'atmosphère va donc paraître plus opaque dans certaines couleurs que dans d'autres ; la profondeur du transit et donc le rayon apparent de la planète seront donc plus grands pour les longueurs d'onde les plus absorbées par les gaz et plus petits pour les

longueurs d'onde les moins absorbées.

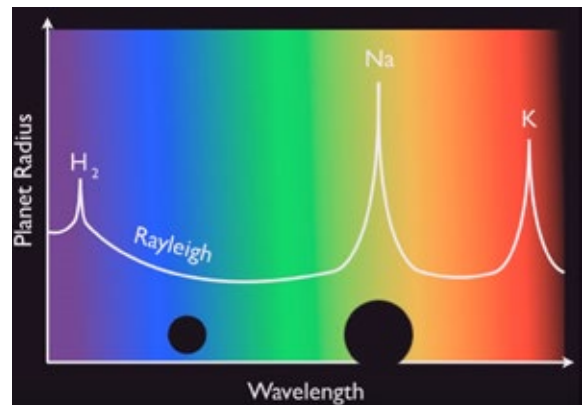


Fig.2. Une planète apparaît plus grande dans une longueur d'onde absorbée par son atmosphère comme ici dans la bande d'absorption du sodium (crédit Paul Wilson, ExoClimes.co).

La figure 3 montre un exemple pour l'étoile HD 209458 pour des longueurs d'onde allant de 300 nm (violet) à 100 nm (rouge).

Ses données sont ensuite regroupées sur un graphique montrant le rapport entre le rayon apparent de l'exoplanète et le rayon de l'étoile en fonction de la longueur d'onde (figure 4).

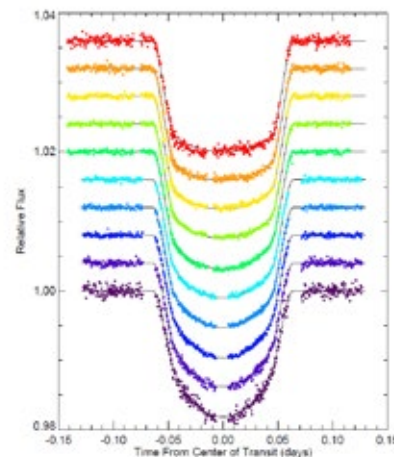


Fig.3. La baisse de luminosité lors d'un transit varie en fonction de la longueur d'onde (Knutson et al.2007 ApJ 655, 564).

Composition de l'atmosphère

Le graphique en bas de page montre des données expérimentales obtenues à partir de plusieurs télescopes terrestres pour l'exoplanète GJ 3470B. Les mesures se font dans le visible et l'infrarouge et permettent de mettre en évidence la présence ou l'absence de certains phénomènes atmosphériques et ainsi d'en apprendre plus sur les caractéristiques de l'atmosphère étudiée.

La diffusion Rayleigh

Un phénomène bien connu dans l'atmosphère terrestre pour son implication dans la couleur bleue du ciel est la diffusion Rayleigh. Elle a lieu lorsque la lumière en provenance de l'étoile interagit avec les molécules gazeuses de l'atmosphère : les rayons lumineux sont absorbés et rediffusés dans toutes les directions. Ce phénomène est prépondérant dans le visible et en particulier pour les longueurs d'onde courtes telles que le bleu. Ainsi, si la diffusion Rayleigh a lieu, le rayon apparent de l'exoplanète apparaîtra plus grand dans le bleu (plus absorbé) que dans le rouge (moins absorbé). Elle est caractérisée sur le graphique par la pente constante dans le visible. Ce phénomène est cependant masqué en présence de nuages : les gouttelettes d'eau étant plus grandes que les molécules gazeuses, toutes les longueurs d'onde sont alors absorbées. On peut observer ce phénomène sur la courbe bleu foncé sur le graphique.

L'absorption moléculaire et atomique

Lorsqu'elles reçoivent de la lumière, les molécules absorbent certaines longueurs d'onde qui correspondent à l'énergie nécessaire pour vibrer. Chaque molécule possède différents modes de vibration (différents types d'étirement, pliage...)

et absorbe donc différentes longueurs d'onde qui lui sont propres. En étudiant les longueurs d'onde absorbées, il est possible d'en déduire la composition de l'atmosphère. Les modélisations sur le graphique en bas de page montrent par exemple la signature de l'eau.

Les atomes absorbent également certaines longueurs d'onde en fonction de leurs niveaux d'énergie. On retrouve ici par exemple la présence de sodium et de potassium.

Les aérosols

Les aérosols sont des particules en suspension qui peuvent être dues à l'activité humaine (résidus de la combustion des voitures) ou à des phénomènes naturels (sable, cendres volcaniques). Ils ont tendance à augmenter le phénomène d'absorption de la lumière notamment dans le visible. On peut voir ici que la courbe bleu clair (clouds + haze) est plus élevée que les autres dans le visible.

Résultats expérimentaux et modélisation

Les données expérimentales ci-dessous proviennent de plusieurs télescopes terrestres. Il est cependant possible d'obtenir des valeurs avec des incertitudes beaucoup plus faibles à partir d'observations faites avec les télescopes spatiaux Hubble ou Spitzer (voir par exemple les données obtenues pour WASP-39 b). Ces données sont ensuite comparées à plusieurs modèles qui prennent en compte les différents types d'absorption exposés ici.

Avec la nouvelle sonde ARIEL de l'ESA qui sera lancée en 2028 pour étudier l'atmosphère des exoplanètes, ce sujet d'étude a de beaux jours devant lui ! ■

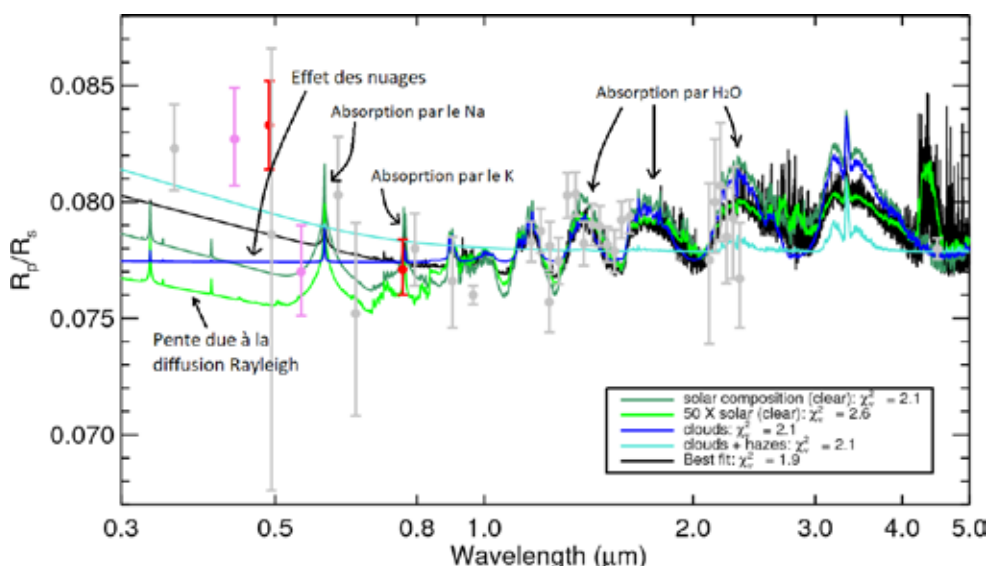


Fig.4. Rayon observé de la planète sur le rayon de l'étoile en fonction de la longueur d'onde.

La modélisation pour laquelle le χ^2 se rapproche le plus de 1 est la modélisation qui représente le mieux l'atmosphère étudiée.

Diana Dragomir - Rayleigh Scattering in the Atmosphere of the Warm Exo-Neptune GJ 3470b.

AVEC NOS ÉLÈVES

Exoplanètes et science-fiction

Roseline Primout, enseignante en physique-chimie et formatrice.

Comment procéder, avec des élèves de troisième, pour écrire en petits groupes une nouvelle de science-fiction alliant littérature, physique et arts plastiques. L'auteur décrit cinq grandes phases : découverte, approfondissement, intervention d'un astrophysicien, création du groupe, restitution. Un programme attrayant.

Cet article présente un projet à l'EAC (Éducation Artistique et culturelle) sur le thème de la science-fiction, alliant littérature, physique et arts plastiques mené auprès d'élèves de 3^e.

L'objectif est l'écriture de nouvelles de science-fiction avec la réalisation d'une illustration en concordance avec le texte. En utilisant le catalogue exoplanet.eu et le logiciel NASA's eyes¹, les élèves doivent choisir une exoplanète située dans la zone habitable de son système stellaire à partir d'une liste proposée par l'enseignant de science². Ils doivent extraire les données leur permettant de prendre en compte des points scientifiques qu'ils choisissent pour écrire leur fiction.

En amont du travail d'écriture, pour la **phase de découverte**, en science, les élèves analysent des articles de presse parlant d'exoplanètes habitables comme l'article écrit par Franck Selsis au sujet de K2-18b³. Ils exercent ainsi leur esprit critique en comprenant la confusion faite par les médias entre les expressions «exoplanète habitable», laissant croire que nous pourrions y vivre, et «exoplanète située dans la zone habitable» qui signifie qu'une forme de vie s'est peut être développée sur cette exoplanète. Actuellement, il est difficile de déterminer comment la vie pourrait avoir pris forme dans des conditions autres que celles terrestres. Il faudrait avoir d'autres modèles d'apparition de la vie. L'eau liquide est-elle indispensable ? Fixer cette condition est peut-être une erreur ? Le but est de créer un effet médiatique pour obtenir un public le plus nombreux et large possible.

En parallèle, des professionnels de la maison d'édition Milathéa⁴ viennent rencontrer les élèves

pour échanger autour des métiers du livre et leur expliquer les contraintes qui devront être respectées pour l'éditorialisation puis l'impression du fascicule qui regroupera les nouvelles qu'ils auront écrites et illustrées.

Puis, dans la **phase d'approfondissement**, les jeunes étudient des œuvres de science-fiction en sciences physiques et en littérature. C'est l'occasion de revoir des connaissances en science (*le jour et la nuit, les saisons, les éclipses, les spectres, la composition du Système solaire et de l'Univers*) ou d'en apporter (*l'attraction gravitationnelle, les conséquences des mouvements synchrones d'un astre, la diffusion de l'atmosphère, le type des étoiles*).

En science, à partir d'extraits de différents volumes de la BD de *Yoko Tsuno*, les élèves doivent décrire le système stellaire créé par Roger Leloup, vérifier les données scientifiques traitées comme "un système binaire est-il plausible ?", "la galaxie M33 existe-t-elle ?" etc. En lisant des parties de *Cantoria* de Danielle Martinigol, les jeunes découvrent un autre système stellaire imaginaire mais qui décrit un phénomène qu'ils connaissent sous un autre terme et qu'ils ont étudié les années précédentes : une syzygie. *49302* de Nathalie Le Gendre, plus poétique, explicite comment créer une atmosphère sur une exoplanète, en décrivant un paysage coloré inexistant sur Terre et toxique pour les humains. Avec *Spire 1*, les élèves continuent à traiter l'information et vont plus loin car l'auteur, Laurent Genefort, détaille la vie sur l'exoplanète *Arrhénius* en prenant en compte l'effet de la gravité, le type d'étoile qui émet un rayonnement nocif pour les êtres vivants, la composition de l'atmosphère qui nécessite un appareillage pour que les êtres y respirent, etc.

D'autres extraits d'œuvres ou de nouvelles sont examinés en littérature afin que les élèves comprennent comment construire leur nouvelle : *Et la lune qui luit* de Bradbury, *Hypérion* de Dan Simmons, *Potentiel humain 0,487* de Fabrice Colin, *Une ville futuriste* de Norman Spinrad, *Ambre* issu de *Songeurs de Monde* de Ugo Bellagamba (livre

1 Dans certains établissements, la gestion de l'informatique est sous-traitée ; il faut demander l'installation du logiciel, ce qui peut prendre plusieurs mois, voire une année. Dans l'attente, il faut motiver les élèves à l'utiliser chez eux et se contenter de copies d'écran en classe !

2 Documents sont téléchargeables sur le site du CLEA.

3 <http://astrophys.u-bordeaux.fr/k2-18b-une-exoplanete-entre-monde-tellurique-et-geante-gazeuse/>

4 <http://milathea.fr/>

richement illustré par Christophe Dougnac) ainsi que des extraits de films (*L'Odyssée de l'espace*, *Les envahisseurs*, *La Guerre des étoiles*, *Alien*, *E.T.*, *Mars attacks*, *La Guerre des mondes* et *Interstellar*).

L'intervention d'un astrophysicien du LAB⁵, Franck Selsis, vient en complément. Les élèves peuvent, à travers l'échange, découvrir les métiers au sein du LAB, accéder au fonctionnement de la recherche fondamentale et obtenir des informations supplémentaires concernant les exoplanètes et leur découverte. Par exemple, Franck Selsis leur a expliqué qu'une exoplanète surnommée super-terre a une taille inférieure à celle de Jupiter et supérieure à celle de la Terre. Il n'y a pas de planètes de taille similaire dans le Système solaire. Contrairement à ce que laisse croire certains médias, une «super-terre habitable» n'est pas une Terre sur laquelle il ferait bon vivre car toutes les conditions y seraient «supers». Actuellement, les chercheurs ne savent rien au sujet de ces super-terres et ils ne pensaient même pas qu'elles pouvaient exister puisque les projections faites sont très souvent issues de nos connaissances sur le Système solaire.

Ensuite, dans **la phase de création**, les élèves mis par groupe de quatre ou cinq, doivent utiliser les outils proposés en science pour sélectionner leur exoplanète et extraire les informations pour connaître ses particularités. Pour consigne, ils choisissent une exoplanète rocheuse ou gelée ce qui implique la connaissance de sa densité et sa taille. Par ailleurs, ils doivent être au fait de la durée du jour et de la nuit et regarder si ces durées sont égales. En effet, si l'exoplanète possède une période de rotation synchrone, elle montre alors toujours la même face à son étoile ce qui entraîne qu'il fait jour et très chaud sur une moitié durant l'année entière et nuit et très froid sur l'autre moitié. Les élèves déterminent alors sur quelle moitié ils écrivent leur nouvelle. Ils peuvent aussi choisir comme lieu le terminateur, terme vu à travers la lecture de *Spire*. Ainsi, pour réaliser l'illustration de leur texte, ils ne peuvent pas représenter un lever ou un coucher de soleil si leurs personnages vivent uniquement du côté jour ou du côté nuit. D'autre part, ils doivent prendre en compte l'angle d'inclinaison des pôles par rapport au plan assimilé au plan de l'écliptique pour savoir s'il existe ou non des saisons sur «leur» exoplanète. De plus, le type d'étoile doit être connu. Les exoplanètes actuellement confirmées et étant dans la zone habitable de leur système, tournent généralement autour de naines rouges. Pour simplifier l'écriture, les élèves doivent considérer que si leur exoplanète

possède une atmosphère, celle-ci a une composition proche de l'atmosphère terrestre qui ne diffuse pas la lumière rouge... pas de ciel bleu dans une journée terrestre et les étoiles deviennent alors visibles ! De plus, la valeur de la gravité implique une taille maximale possible pour la végétation et les êtres vivants.

Chaque groupe écrit une nouvelle. Elles seront regroupées dans un fascicule. Le coût de l'impression réalisée par la maison d'édition Milathéa impose le nombre de pages par nouvelle et la réalisation d'une seule illustration. Le livre sera aussi publié numériquement sur le site du collège⁶.

La phase de restitution se déroulera en deux temps. La première, lors de la semaine *Lecture*, les élèves liront leurs nouvelles à d'autres classes selon un planning bien précis. En juin 2020, les élèves présenteront leurs créations à leurs parents sous forme de pièce de théâtre, d'un montage vidéo ou d'une lecture...

Durant ce projet EAC, l'implication des élèves est évaluée. Selon leurs qualités, ils ne vont pas développer les mêmes compétences. Dans chaque groupe formé, il faut au moins un littéraire, un scientifique et un illustrateur. Les élèves et les enseignants se découvrent sous un nouveau jour car certains élèves vont développer des compétences qu'ils n'utilisent pas forcément dans toutes les matières enseignées. Les élèves constatent qu'il n'existe pas de limites entre les disciplines. Un enseignant scientifique peut aimer lire, celui littéraire peut posséder des connaissances scientifiques, etc. Ils voient leurs professeurs sous un autre angle.

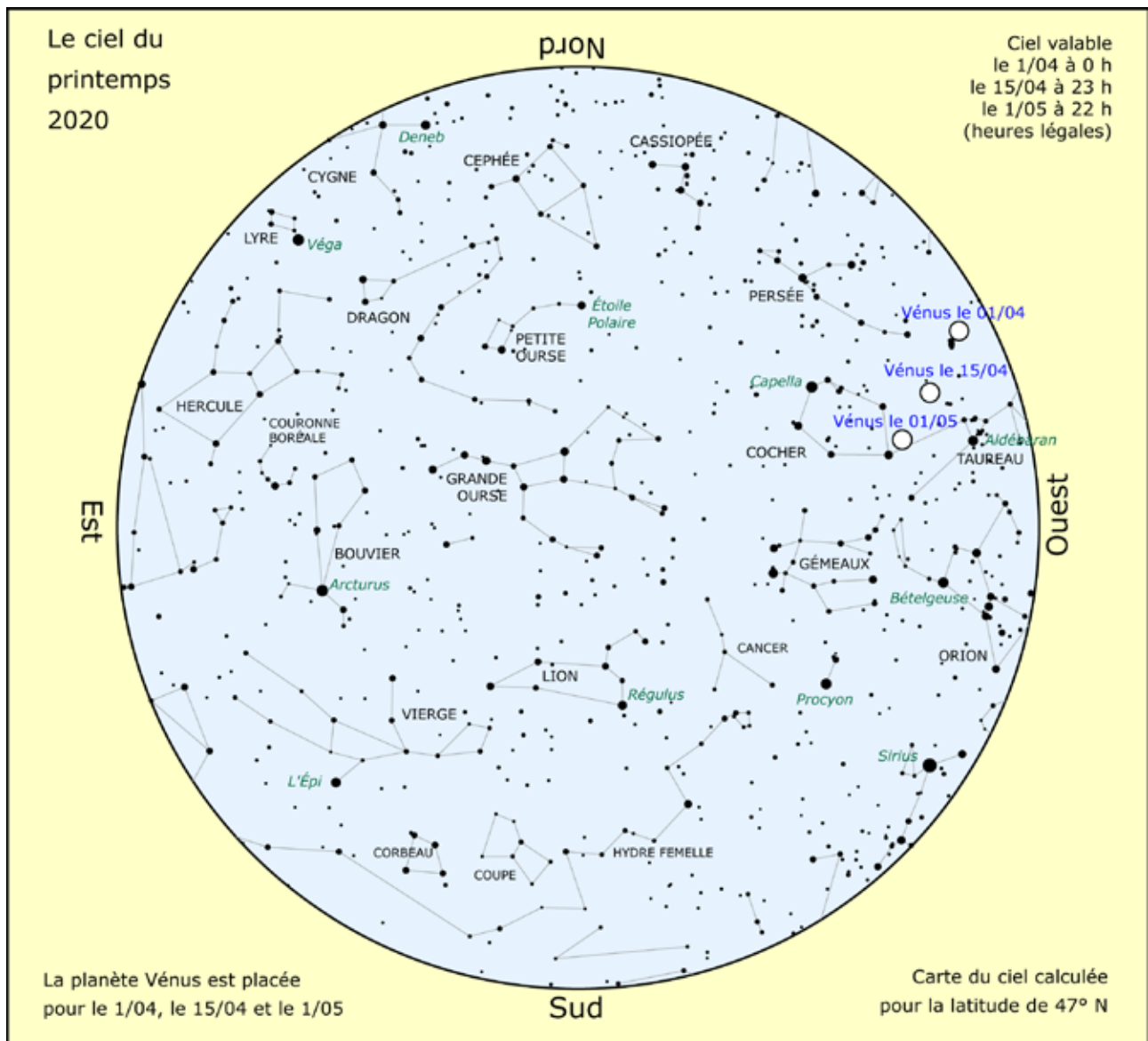
L'étude de la science-fiction facilite le travail en interdisciplinarité. Une bonne coordination entre les professeurs est nécessaire surtout lors de la phase créative car l'enseignant en science doit relire au fur et à mesure les écrits pour valider les informations scientifiques traitées. Le choix des disciplines engagées est lié ici à l'entente entre les enseignants et au choix de ne pas avoir plus de trois domaines sinon le projet devient trop lourd à gérer ; de plus, les élèves peuvent s'y perdre. D'autres disciplines auraient pu être intégrées comme la biologie ou la musique (étude de l'œuvre *Cantoria*, basée sur un champ lexical lié à la musique, étude de la musique de certains films de science-fiction) par exemple.

■

⁵ Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux

⁶ Livre accessible courant juin 2020 via le lien : <https://clg-camille-claudel-latresne.fr/>

OBSERVATION



Visibilité des planètes

Mercure pourra être observée le soir fin mai début juin.

Vénus est toujours bien visible le soir jusqu'en mai. Élongation maximale le 24 mars, éclat maximal le 30 avril et conjonction inférieure le 3 juin.

Mars est visible le matin, elle s'approche petit à petit de la Terre et devient un peu plus lumineuse, en attendant son opposition en octobre prochain.

Jupiter est toujours planète du matin mais elle se lève de plus en plus tôt. Elle sera visible toute la nuit en juillet (opposition le 14 juillet).

Saturne est aussi du matin, elle suit Jupiter de peu (opposition le 20 juillet). Les deux planètes géantes restent proches l'une de l'autre, éloignées seulement de quelques degrés.

Quelques évènements (heures légales)

20/03 : équinoxe de printemps à 4 h 49 min.

20/03 (matin) : rapprochement Mars Jupiter.

29/03 : passage à l'heure d'été.

31/03 (matin) : rapprochement Mars Saturne.

03/04 (soir) : Vénus traverse les Pléiades.

09/04 (matin) : alignement Mars Saturne Jupiter.

22/04 : Lyrides (étoiles filantes).

22/05 (soir) : rapprochement Mercure Vénus.

20/06 : solstice d'été à 23 h 43 min.

21/06 : éclipse annulaire de Soleil visible depuis l'ouest de l'Afrique et l'Asie.

Lune

Nouvelle Lune : les 24/03, 23/04, 22/05, 21/06.

Pleine Lune : les 8/04, 7/05, 5/06.

L'ASTRONOMIE dans les TIMBRES (2)

Anne-Marie Louis, anne-marie.louis@wanadoo.fr

La série se poursuit selon un ordre chaotique : rien n'est chronologique, les choix sont aléatoires et bousculés au fil des nouvelles parutions. Mais vous y trouverez des histoires jamais publiées, des timbres rares, et même des propositions d'activités. D'où l'originalité de cette tentative.

L'article (1) aurait dû s'achever sur une page de **références** qui n'avait pu figurer faute de place. Dans cette **sitographie** <https://tinyurl.com/rcdm5cj>, ou via ce QR code, vous trouverez les liens des sites et blogs intéressants, et vous pourrez voir les timbres les plus anciens.

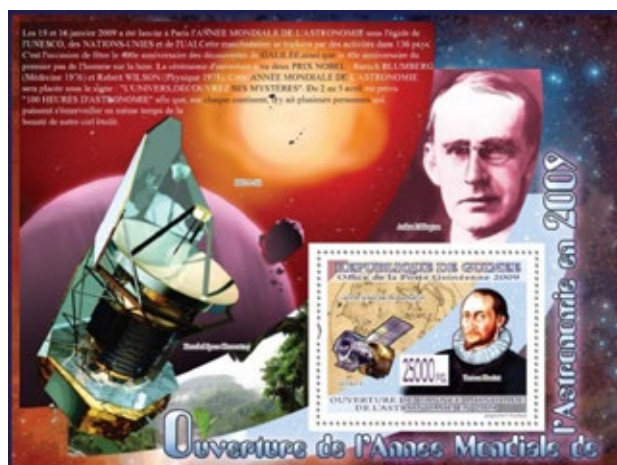


Pour pouvoir flasher un QR code sur un téléphone, il suffit d'installer l'appli gratuite : Lecture de QR code

La **bibliographie** sur cette page était assez réduite, mais Roland Trotignon m'a fait découvrir l'ouvrage le plus complet sur la question : **Stamping Through Astronomy** de Renato DICATI (Springer), fabuleuse encyclopédie publiée en 2013, qui comporte plus de 1 300 illustrations et détaille toute l'histoire et tous les domaines de l'astronomie.

Et il m'a signalé que, contrairement à ce que j'avais écrit dans le numéro précédent, il existait bien un **timbre** rappelant les premières cartes de la Lune dues à **Thomas Harriot**. En effet la République de **Guinée** a émis un timbre, faisant partie d'un superbe bloc-feuillet. Sur le bloc on voit **Herschel Space Observatory** ou FIRST, télescope spatial infrarouge de l'ESA en service entre 2009 et 2013 ainsi que le portrait d'**Arthur Eddington**, astrophysicien britannique cité à la fin de l'article (1). Sur le timbre à 25 000 francs guinéens : un portrait supposé de **Thomas Harriot**, sa carte de la Lune et **ASTRO-F**, anciennement IRIS (Infrared Imaging Surveyor) ou Akari, qui est japonais.

L'auteur a encore ajouté neuf lignes de texte, sans



doute parce qu'il n'avait pas pu tout représenter ! Et ce qui est intéressant, ce sont les petites lettres au-dessous : **HAT-P-11 b** (ou Kepler-3 b), **exoplanète** deux fois plus volumineuse que Neptune, découverte... le 2 janvier 2009, qui est en orbite autour de **HAT-P-11**, **naine** orange située dans la constellation du Cygne.

Activité : Cherchons à identifier les astres représentés sur ce bloc-feuillet...

Mais les travaux et découvertes de Thomas Harriot ont été honorés aussi en 2009 par la **Guinée-Bissau** dans le cadre de l'Année mondiale de l'astronomie.



Sur le timbre à 3 500 francs CFA figure Galilée tandis que Harriot qui le devança (de 4 mois) est représenté sur le bloc-feuillet, sans que sa physionomie soit confirmée, répétons-le. Quant aux deux sondes spatiales soviétiques Luna 1 et Luna 3, elles furent lancées en 1959, c'était donc une double et habile commémoration : si Luna 1 rata sa cible, Luna 3 fut le premier engin spatial à transmettre des photos de la face cachée de la Lune.

Erratum illustré – CC 168 p. 36 à propos d'Émilie du Châtelet, j'ai perdu mon latin : le titre de l'ouvrage de Newton qu'elle traduisit est bien sûr *Philosophiæ naturalis principia mathematica* et non *Philosophia* car c'est un génitif (*rosa rosa rosam rosae...*).



Pour Newton nous aurons l'embarras du choix et il fera plus tard l'objet d'une étude approfondie. Mais verrons-nous d'autres femmes sur des timbres ? Je commence à en douter car je n'en trouve guère, à part la déesse Europe, Iris, Urania et quelques Muses... Pour la parité faudra-t-il évoquer la brave chienne Laïka (timbres nombreux et faciles à trouver), et pour ne vexer personne, voir aussi l'aspect féliniste ?

2^e partie - Les gens, connus ou méconnus

Voici trois exemples montrant ce que les timbres peuvent nous apprendre, ou pas.

1 - Deux frères

François ARAGO est bien connu du grand public. Il était sans doute difficile de résumer toute sa carrière sur ce timbre-poste (faisant partie d'un bloc-feuillet émis en 1986 consacré à cinq savants).



Activité : Quelle constellation figure sur le timbre et sur le cachet ? À quelle découverte peut-on relier la petite sinusoïde représentée en bas à droite ?

Mais c'est son frère, **Étienne ARAGO**, Directeur général des Postes qui, en 1848, fit adopter le timbre-poste en France. Le *Cérès noir* édité en 1849 a d'ailleurs été réédité récemment à l'occasion de ses 170 ans. Et Cérès aura droit à un paragraphe ultérieurement !



2 - Copernic

Il existe probablement des centaines de timbres, mais les portraits de Copernic sont en réalité beaucoup moins nombreux. En France en 1957 une série de sept timbres a été émise, représentant des *personnages étrangers célèbres*. Copernic y est associé à Newton (et aussi à Cervantès, Goethe, Michel-Ange, Mozart, Rembrandt !). Pour la gravure J. Piel s'est inspiré de celle de F. Bonneville qui vécut approximativement trois siècles après Copernic.



Activité : Que peut-on dire de l'illustration à gauche sur l'enveloppe ?!

Mais sur des timbres polonais à partir du même portrait, on trouvera comme signature H. Chylinski. Et Nicolas ou Nikolaus Copernicus devient bien sûr **Mikołaj Kopernik**. La date de décès a été remplacée par la date de son 500^e anniversaire (?) mais le timbre a été émis en 1969. Cherchons...

Activité : Allez sur wikitimbres.fr puis sur **Archives / Collections du monde**. Parmi 248 albums, sélectionnez Pologne (1919 - 1991) et allez page 129 pour voir la série de trois timbres.

Sur le timbre à 2,50 zlotys à droite on peut distinguer la représentation du système héliocentrique. Sur celui à 40 groszy à gauche on peut lire la phrase célèbre : *Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię*. Vous n'avez plus qu'à googler pour traduire !



Réponse : erreT al écalpéd te lieloS el étërta a II

Sur le timbre à 60 groszy, à côté de Copernic est représenté le globe céleste présenté par Marcin **Bylica**, astrologue à la cour du roi Matthias 1^{er} Corvin, à l'Académie de Cracovie alors que Copernic y était jeune étudiant. Ce globe fait partie de la collection du Musée de l'Université Jagellonne à Cracovie.



Autre belle série de quatre timbres au bas de la page 153. Sur le timbre à 3,40 zł on peut lire *Theophilacti scolastici Simocatti epistolae morales, rurales et amatoriae, interpretatione latina*. À élucider ?



Réponse : C'est la couverture du tout premier livre de 22 pages publié par Copernic à Cracovie en 1509, une traduction latine des lettres grecques d'un auteur byzantin du VII^e siècle, Théophylacte Simocatta, ou Simokatès (en grec « museau de chat ») : *Épîtres morales, pastorales et amoureuses*.

Continuons la recherche sur le même album : page 157 vous trouverez la série de cinq timbres édités précisément en 1973 pour le 500^e anniversaire, et en dessous, le timbre montrant le tableau peint en 1872 par Jan **Matejko** intitulé *Conversation avec Dieu*, rappelant que Copernic était aussi *chanoine* ; et puis ce timbre à 4,00 zł qui reproduit le tableau de Tobias **Zimmer**, où Copernic tient en main du muguet, attribut des guérisseurs, rappelant que Copernic, avant d'être astronome, était *médecin*. Pour en savoir plus, recherchez sur journaldespeintres.com l'excellent article « L'homme et le végétal » page 2.



La France a-t-elle commémoré le 500^e anniversaire de la naissance de Copernic ? Dans wikitimbres.fr un clic sur **Parcourir / Par année** permet de voir l'ensemble des timbres français, où seule la quantité est... astronomique mais où on trouve à peine une petite dizaine de timbres en relation avec l'astronomie... (Ah bonne nouvelle, une belle sphère armillaire sera émise en mars 2020 !) Recherchez «*Copernic*» : il y a deux réponses. Le deuxième timbre commémoratif signé C. Andreotto a été émis en octobre 1974. Mais que sont donc ces six sphères de même taille éclairées par le Soleil ? Probablement la Terre et les *cinq étoiles errantes*... Vous pouvez cliquer sur le timbre, puis sur **Documents** pour lire la notice philatélique du timbre et sur **Usages** pour voir les cachets premier jour et les cartes.



On retrouve un dessin du même style sur un timbre du Congo.



Encore plus de fantaisie du côté de la Polynésie française !



Peut-être est-il plus intéressant de regarder ce qui a été émis par l'Allemagne, car si le timbre n'est pas extraordinaire, l'enveloppe donne à voir la reproduction du système héliocentrique de Copernic (*De Revolutionibus orbium coelestium*).



3 - L'observatoire de Meudon sur un timbre de Slovaquie



En mai 2003 il y eut une émission commune France-Slovaquie, en l'honneur de **Milan Rastislav Štefánik**, personnage fascinant, le plus français des slovaques, à la fois astronome, aviateur, diplomate, général et ministre, l'un des trois fondateurs de la Tchécoslovaquie. Né en 1880, il vient en France en 1904 après des études scientifiques pour les poursuivre dans son domaine de prédilection, l'astronomie. À l'observatoire de Meudon il devient l'assistant de Jules Janssen et durant dix années il fait de nombreuses publications. Il organise à maintes reprises des expéditions scientifiques notamment au sommet du mont Blanc et à Tahiti en 1910 à l'occasion du passage de la comète de Halley.

Hélas 1914 marque la fin de sa carrière d'astronome. Désormais aviateur il participe aux combats, il monte rapidement en grade, il est chargé de la création du service météorologique de l'Armée française ! Sa carrière diplomatique et politique, ainsi que son rôle dans l'indépendance de son pays d'origine sont également remarquables.



Štefánik a passé près d'un an à Tahiti. Il a créé sur les hauteurs de Papeete au Mont Faiere le premier observatoire astronomique de l'hémisphère sud, tout en bois, pourvu d'une coupole et d'un télescope, afin d'observer la comète de Halley. Il est surnommé «*Taata hi'o feti'a*», l'homme qui regarde les étoiles. En 1919 son avion s'écrase près de Bratislava. Le cachet slovaque représente son mausolée en Slovaquie. Il y a une place Štefánik à Paris dans le 16^e et sa statue est à Meudon depuis 1999. L'astéroïde (3571) Milanštefánik découvert en 1982 porte son nom.



Il avait observé l'éclipse solaire du 28 avril 1911 à Vav'au (Tonga). Il y a de nombreux timbres représentant les éclipses solaires. Cherchons une illustration un peu originale...



Ce timbre américain a été émis à l'occasion de l'éclipse du 21 août 2017. Il s'agit du premier timbre **thermosensible** : un léger chauffage révèle le disque lunaire.

AMA09 : deuxième épisode

Plusieurs pays ont associé Galilée à des astronomes connus dans leur pays. En plus du bloc-feuillet, publié dans l'épisode 1, l'**Azerbaïdjan** a émis deux timbres. Le timbre à 20 qəpik (0,20 manat soit environ 0,1 €) représente **Nasir al-Din al-Tusi** (1201-1274), ou Nasireddin Tusi, philosophe, théologien, mathématicien et astronome persan, considéré comme un maître à penser de son époque. En particulier, al-Tusi a essayé de résoudre les problèmes soulevés par le modèle astronomique de Ptolémée. On voit sur le timbre le dessin du modèle qu'il a inventé, appelé couple d'al-Tusi, utilisant deux cercles, le plus petit roulant à l'intérieur d'un cercle de diamètre deux fois plus grand : la combinaison de ces deux mouvements circulaires permet d'obtenir un mouvement rectiligne oscillatoire. Al-Tusi a appliqué ce modèle au mouvement de la Lune et des planètes supérieures, pour lesquelles il entreprit un programme d'observations de longue durée et publia des tables permettant de calculer leurs positions. Pour lui rendre hommage, l'UAI a donné son nom à un cratère de 52 kilomètres de diamètre sur l'hémisphère sud de la Lune : *Nasireddin*.



Sur le timbre à 60 qəpik, juste sous la Lune, on distingue l'observatoire Nasir al-Din al-Tusi de Shamakhy, **Şamaxı Astrofizika Rəsədxanası**, situé à 150 km de Baku, inauguré en 1960.

À suivre



HOMMAGE A JEAN-CLAUDE PECKER

Jean-Claude Pecker, président d'honneur du CLEA, était un homme de grande culture, qui lisait Homère dans le texte. Il eut l'occasion de raconter, dans un entretien sur Canal Académie en 2007, comment, alors qu'il était petit élève de cinquième, un professeur lui fit découvrir que l'Odyssée est un texte fondateur, et que, disait-il, « Ulysse, chemin faisant, se reconstruit ». C'est pourquoi nous avons choisi cette citation du poète grec Cavafy (1863-1933), dans la traduction de Marguerite Yourcenar, pour évoquer le souvenir de celui qui fut un très grand ami.

Quand tu partiras pour Ithaque, souhaite que le chemin soit long, riche en péripéties et en expériences. Ne crains ni les Lestrygons, ni les Cyclopes, ni la colère de Neptune. Tu ne verras rien de pareil sur ta route, si les pensées restent hautes, si ton corps et ton âme ne se laissent effleurer que par des émotions sans bassesse. Tu ne rencontreras ni les Lestrygons, ni les Cyclopes, ni le farouche Neptune, si tu ne les portes pas en toi-même, si ton cœur ne les dresse pas devant toi.

Souhaite que le chemin soit long, que nombreux soient les matins d'été, où (avec quelles délices !) tu pénétreras dans des ports nus pour la première fois. Fais escale à des comptoirs phéniciens, et acquiers de belles marchandises : nacre et corail, ambre et ébène, et mille sortes d'entêtants parfums. Acquiers le plus possible de ces entêtants parfums. Visite de nombreuses cités égyptiennes, et instruis-toi avidement auprès de leurs sages.

Garde sans cesse Ithaque présente à ton esprit. Ton but final est d'y parvenir, mais n'écourte pas ton voyage : mieux vaut qu'il dure de longues années, et que tu abordes enfin dans ton île aux jours de ta vieillesse, riche de tout ce que tu as gagné en chemin, sans attendre qu'Ithaque t'enrichisse.

Ithaque t'a donné le beau voyage : sans elle, tu ne te serais pas mis en route. Elle n'a plus rien d'autre à te donner.

Même si tu la trouves pauvre, Ithaque ne t'a pas trompé. Sage comme tu l'es devenu à la suite de tant d'expériences, tu as enfin compris ce que signifient les Ithaques.



Jean Claude Pecker (10 mai 1923 - 20 février 2020)

La vie de Jean-Claude Pecker est présentée sous le lien : <https://www.college-de-france.fr/site/jean-claude-pecker/index.htm>

HOMMAGE A FRANCETTE

Francette ...

Pour nous, vous parler de Francette Delmas, c'est évoquer sa présence, son activité au sein de la petite équipe soudée, jeune et enthousiaste que nous étions dans la fin des années 1970. Cela s'appelait déjà le CLEA ; nous n'étions qu'une simple association, de fait, plus tournée vers l'action que vers une organisation formelle ; nous étions portés par la conviction profonde que la science donne accès à la compréhension du monde, que le champ de l'astronomie en est un accès privilégié et nous étions soucieux de répondre à l'appel que nous avaient manifesté les enseignants qui nous avaient réclamé des actions de formation, mentionnant tout particulièrement un « petit journal » (bulletin de liaison) et des écoles d'été. C'est ainsi que sont nés les Cahiers Clairaut et la première école d'été en 1977.

Nous avions entre nous des liens de travail tant au sein de l'enseignement universitaire (l'« équipe d'Orsay ») que de la recherche que les uns et les autres menaient soit à la Faculté des sciences d'Orsay (Jacky Dupré), à l'Observatoire de Paris-Meudon (Lucette Bottinelli et Lucienne) ou à l'Institut d'Astrophysique de Paris (Monique Gros et Michèle). Des liens d'amitié également.

Francette était ITA¹ au CNRS, spécialisée dans l'analyse d'observations photométriques et spectroscopiques stellaires, et faisait équipe avec Michèle à l'Institut d'Astrophysique de Paris participant également aux missions d'observations. Elle s'est tout de suite engagée au CLEA dans son temps libre et même un peu plus...

Dans ces premiers temps, la fabrication matérielle et la diffusion des Cahiers Clairaut n'avaient pas grand-chose à voir avec ce qu'elles sont aujourd'hui. Nous nous souvenons de Francette tenant à jour la liste manuscrite des abonnés sur un petit cahier, tirant et collant des étiquettes sur des bandes de papier kraft dont elle enveloppait les exemplaires de la revue, qu'elle portait ensuite à l'APF² pour le routage.

Mais évidemment, les souvenirs que les anciens



Photo Jean Mouette /IAP-CNRS-SU 2007

adhérents du CLEA ont de Francette sont liés aux écoles d'été, celles qui se sont déroulées entre 1977 et 1998, et à la grande responsabilité que Francette y exerçait concernant la gestion matérielle et financière des inscriptions, tant avec les participants qu'avec les gérants du centre où nous étions hébergés, à la fois dans la phase préparatoire et sur place pendant l'école. La qualité de l'accueil (et la disponibilité) qu'elle réservait aux participants ainsi que sa rigueur dans la tenue des comptes ont été légendaires : nous sommes nombreux à nous souvenir de sa mise en garde sur le dramatique franc manquant dans le bilan, soupçonné d'être l'indice d'une véritable catastrophe comptable...

Son implication dans les écoles d'été allait en fait au-delà. Les écoles d'été, à cette époque entre 1977 et 1998, se sont déroulées dans une succession de lieux différents, choisis en fonction de leur capacité d'accueil et de la qualité du ciel nocturne. Francette a joué un rôle majeur dans la recherche de lieux qu'elle allait visiter dans une première étape exploratoire.

Mentionnons enfin les épais volumes de comptes rendus exhaustifs qui ont été régulièrement publiés. Francette y a pris sa part, dactylographiant quelques-uns des cours, avec la précision et la rigueur qu'on lui connaissait.

Elle fait indissolublement partie de moments qui ont compté dans nos vies.

Lucienne Gouguenheim, Michèle Gerbaldi

¹ Ingénieur Technicien Administratif.

² Association des paralysés de France

Tolkien et l'astronomie

Samuel Boissier, directeur de recherche au CNRS, directeur-adjoint du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM),

Caroline Péron, bibliothécaire à la BU Sciences / INSPE Saint-Jérôme d'Aix-Marseille Université.

L'attrait des jeunes pour la littérature de science-fiction est un moyen indirect mais puissant pour leur proposer d'approfondir leurs connaissances scientifiques. Dans l'œuvre de l'auteur du « Seigneur des Anneaux » il existe de très nombreuses corrélations avec les phénomènes astronomiques, ce qui permet une recherche ludique.

Alors que la BNF qui vient de consacrer une grande exposition à Tolkien et que sortent de nombreux ouvrages à cette occasion, le traitement de l'astronomie par l'auteur du Seigneur des Anneaux a été quelque peu négligé, malgré le bel ouvrage « Tolkien et les sciences » (sous la direction de Roland Lehoucq, Loïc Mangin et Jean-Sébastien Steyer, illustrations d'Arnaud Rafaelian aux éditions Belin, 2019), et même si on trouve quelques éléments très intéressants dans le « Dictionnaire Tolkien » de Vincent Ferré (paru en 2012 CNRS Éditions, réédité en 2019 aux Éditions Bragelonne). À notre connaissance, les lecteurs francophones ne disposent que de peu d'informations sur le sujet, ce que cet article vise à corriger ! Pour les enseignants, nous y voyons une opportunité d'application interdisciplinaire (littérature, anglais, astronomie) et un produit d'appel pour intéresser aux sciences les adeptes de fantasy. On peut d'ailleurs trouver des exercices (en anglais) proposés dans « Lesson 06a- Middle-earth Astronomy (Fantasy & Sci-Fi in Classroom) » (Larsen, K. & Swank, K. 2013) et « Teaching Through Tolkien: The Astronomy of Middle-earth » L27.006 (Larsen, K. 2004). Dans la suite, nous nous appuyons surtout sur le « Dictionnaire Tolkien », sur les travaux de Kristine Larsen, astronome américaine, qui a publié de nombreux articles en anglais¹, sur les articles réunis dans les deux volumes parus sous la direction de Didier Willis, « Tolkien, le façonnement d'un monde » (Editions Le Dragon, 2011 et 2014) et, bien entendu, sur nos lectures des œuvres de Tolkien (essentiellement « le Silmarillion » et « le Seigneur des Anneaux »).

¹ En particulier, l'article «The Astronomy of Middle-earth.» RingCon, Bonn, Germany. November 23, 2002, dont le texte en anglais est disponible à cette adresse: http://www.physics.ccsu.edu/larsen/astronomy_of_middle.htm.

L'intérêt de Tolkien pour le ciel

Plusieurs éléments nous démontrent que Tolkien vouait un intérêt certain à l'astronomie, ou du moins à l'observation du ciel, ce qui va de pair avec la contemplation de la nature qui le caractérise. On trouve des traces de cet intérêt dans ses lettres, dans ses notes et dans de nombreux témoignages. En particulier, on sait que Tolkien avait offert à son fils Christopher un télescope, et à sa fille Priscilla un ouvrage de vulgarisation illustré, considéré comme un bon guide pour l'observation (« The Starry Heavens » d'Ellison Hawks, membre de la *Royal Astronomical Society*).

Les indices distillés dans l'œuvre

On peut s'amuser à rechercher les allusions aux phénomènes astronomiques distillés dans l'œuvre, que l'on ne remarque pas si l'on n'y prend pas garde. En particulier, les phases de la Lune dans le « Seigneur des Anneaux » ne sont pas laissées au hasard, mais suivent le calendrier de l'hiver 1941-1942, ce qui a été retrouvé dans des notes de l'auteur où les événements clefs de l'intrigue sont consignés avec les phases de l'astre. Ceci permet à Tolkien de savoir ce que vont voir dans le ciel les différents personnages selon le moment de l'histoire, et à Frodo dans « La communauté de l'anneau » d'y voir la pleine Lune décroître nuit après nuit, permettant de mieux distinguer les étoiles, ce que sait bien tout astronome amateur :

« The Hunter's moon waxed round in the night sky, and put to flight all the lesser stars. But low in the South one star shone red. Every night, as the Moon waned again, it shone brighter and brighter. »

Dans ce passage, un astre vers le sud brille d'une lueur rouge ; il préfigure l'œil de Sauron et les dangers

vers lesquels Frodo va devoir marcher. Alain Lefèvre propose cependant qu'il est aussi compatible avec la présence dans le ciel à ce moment de l'histoire de la planète Mars.

La Lune joue aussi un rôle dans l'histoire du Hobbit puisque des caractères runiques ne sont lisibles qu'à la lumière de l'astre, lorsqu'il se trouve dans la même phase que celle lors de leur écriture. On retrouve aussi la Lune dans un texte moins connu que les fameuses aventures en Terre du Milieu. Dans « Roverandom », un roman destiné en premier lieu à son fils, un chien-jouet vit diverses aventures sur notre satellite. À noter en particulier un paysage lunaire dessiné par Tolkien, dans lequel on peut voir dans le ciel lunaire à la fois le Soleil, et un clair de Terre. Cette illustration est reproduite dans Tolkien : Voyages en Terre du Milieu, le livre de l'exposition BNF.

D'autres exemples subtils de l'attrait de l'astronomie pour Tolkien apparaissent au cours du texte du Seigneur des Anneaux lorsque par exemple Aragorn parle de ses voyages :

« I have crossed many mountains and many rivers, and trodden many plains, even in to the far countries of Rhun and Harad, where the stars are strange. »

Si Aragorn dit que les étoiles y sont « étranges », il faut certainement en déduire que c'est la disposition des étoiles qui est inhabituelle. C'est bien le cas sur Terre : les constellations de l'hémisphère sud sont très différentes de celles de l'hémisphère nord, au point que l'on peut être dérouté en levant les yeux au ciel et en n'y trouvant pas nos astérismes habituels. Il suffit de regarder une carte de la Terre du Milieu pour constater que Harad est bien au sud de la Comté. Dans un autre passage, on fait référence à la gloire passée d'Isengard :

“A strong place and wonderful was Isengard, and long it had been beautiful; and there great lords had dwelt, the wardens of Gondor upon the West, and wise men that watched the stars.”

Parmi les quelques éléments de grandeurs donnés, on trouve les « hommes sages qui regardaient les étoiles ». Les astronomes sont donc particulièrement valorisés par Tolkien ! Les Elfes sont aussi appelés les « Eldar » : le « peuple des étoiles ». Ainsi nommés parce que lorsqu'ils s'éveillèrent et que le Vala Oromë les aperçut la première fois, ils étaient au bord du lac de Cuivenen, très loin dans l'Est de la

Terre du Milieu, et ils observaient le ciel et les étoiles avec émerveillement.

Finalement, Tolkien fait aussi explicitement ou implicitement référence aux météorites, comme lorsqu'il décrit la Pierre d'Erech qui semble être tombée du ciel, ou bien lorsqu'il mentionne des armes forgées dans le métal des météorites, comme les épées Anglachel et Anguirel.

L'association des astres fictifs de la Terre du Milieu et ceux bien réels de nos ciels nocturnes

La Terre du Milieu est bien notre planète, dans un passé « oublié ». À ces échelles de temps, les étoiles supposées éternelles sont les mêmes pour les créatures la peuplant, que pour nous. Il est intéressant de comprendre comment on peut procéder à l'association d'astres vu par les personnages de Tolkien et ceux que nous connaissons dans notre ciel aujourd'hui à partir du texte lui-même. Pour cette raison, nous en fournissons un exemple dans l'illustration ci-dessous.



Fig.1. Ciel réalisé à l'aide du logiciel Stellarium. [La vue est dirigée vers l'est, comme dans le texte, et le point de vue a été choisi à Oxford, lors de l'hiver 1941-1942, en accord avec les notes de Tolkien.]

La figure illustre une vue du ciel depuis Oxford, où Tolkien a pu observer le ciel, lors de l'hiver 1941-1942, comme suggéré par ses notes concernant les phases de la Lune. Le paragraphe décrit plusieurs astres qu'il est facile d'identifier. Au début, du brouillard (matérialisé par les nuages jaunes) masque l'horizon, mais haut dans le ciel on peut voir « Remmirath, the netted stars ». Voilà qui correspond parfaitement aux Pléiades, sept étoiles diffusant leur lumière au travers de poussière interstellaire, donnant l'impression qu'elles sont retenues dans une étoffe, un filet (« net »). « Red Borgil » se trouve juste dessous, correspondant parfaitement à Aldébaran. Quand le brouillard se lève, on voit un

épéiste se lever sur le bord, du monde, avec l'épée à sa ceinture. C'est la constellation d'Orion qui correspond là encore parfaitement à la description de Tolkien de « Menelvagor » dans ce court passage. Cette correspondance est frappante, et laisse à penser que les descriptions de Tolkien du ciel proviennent de ses propres observations (ou bien de l'utilisation très attentive de cartes du ciel). L'analyse de ce passage du Seigneur des Anneaux à l'aide d'une carte du ciel est d'ailleurs un des exercices proposés par K. Larsen dans le cadre de son enseignement.

C'est en procédant ainsi que des amateurs de Tolkien férus d'astronomie peuvent associer nos astres et

ceux de la Terre du Milieu. Pour autant, d'autres associations proviennent plutôt des archives de Tolkien, et ont été proposées en particulier par son fils Christopher. Ces éléments sont largement discutés dans l'article (en anglais) de K. Larsen, et nous résumons ci-dessous sous la forme d'un tableau toutes les associations qui ont pu être faites à notre connaissance (en utilisant les références déjà citées, et quelques autres « identifications » provenant de la page Wikipedia³ dédié à l'astronomie en Terre du Milieu ou bien d'autres sites web, en particulier Tolkiendil⁴, parfois sans sources très claires ou démonstration).

Chez Tolkien ²	Réalité	Catégorie	Discussions, autres notes
Alcarinquë, Silindo, Morwen	Jupiter	Syst. solaire	Le nom Alcarinquë signifie « glorieux ».
Anar, Anor	Soleil	Syst. solaire	On le retrouve dans le nom « Anarion », frère d'Isildur.
Arda, Ambar, Imbar	Terre	Syst. solaire	« Anar », introduit dans des textes « mythologiques », peut aussi représenter l'ensemble du Système solaire.
Carnil	Mars	Syst. solaire	Le nom indique lui-même un astre rouge.
Eärendil	Vénus	Syst. solaire	À noter que Tolkien s'est inspiré du mot « Earendel », en vieil anglais, signifiant « marcheur lumineux », qui désignait un astre, probablement Vénus.
Elwing	Mercure ?	Syst. solaire	K. Larsen propose cette association sur la base de textes du Silmarillion. Les planètes Vénus et Mercure sont toutes deux proches du Soleil, comme le sont les personnages Elwing et Eärendil dans la mythologie de la Terre du Milieu.
Isil, Ithil	Lune	Syst. solaire	On le retrouve dans le nom « Isildur ».
Lumbar	Saturne	Syst. solaire	Association pas tout à fait certaine car de nombreuses étoiles plus brillantes que Saturne ne sont pas mentionnées dans les textes de Tolkien. Le nom évoque « nébuleux ».
Borgil	Aldébaran	Étoile	Certains ont proposé Bételgeuse, mais Aldébaran est plus logique (voir le texte et la figure).
Helluin, Nielluin	Sirius	Étoile	Identification de Christopher Tolkien. Évoque un « bleu glacé ».
Morwinyon	Arcturus	Étoile	Identification de Christopher Tolkien.
Elemmírë	?	Étoile/Planète ?	Le nom indique un joyau des étoiles. Parfois associée à Mercure.
Luinil	?	Étoile/Planète ?	« Étoile bleue » pas clairement identifiée. Elle est parfois associée à Neptune, mais il n'y a pas d'argument très fort pour cela (hors la couleur bleue), et elle est parfois associée à Uranus.

2 Les récits concernant la « Terre du Milieu » faisant références à plusieurs langues, plusieurs cultures, et plusieurs légendes, un même astre peut s'y trouver sous plusieurs appellations. Nous en donnons parfois quelques-unes, sans être exhaustif !

3 https://fr.wikipedia.org/wiki/Astronomie_de_la_Terre_du_Milieu

4 <https://www.tolkiendil.com>

Chez Tolkien ⁵	Réalité	Catégorie	Discussions, autres notes
Nénar	?	Étoile/Planète ?	Parfois associée à Neptune, mais il n'y a pas d'argument très fort pour cela (hors le fait que le préfixe nen correspond à l'eau, et que Neptune est associé pour nous à cet élément). Parfois associée à Uranus.
Anarríma	?	Constellation	Le nom signifie le bord du Soleil. En essayant de regarder les constellations de l'écliptique ou les autres constellations citées par Tolkien, certains l'ont associé au Cocher ou bien à la Couronne Boréale. Voir le texte pour les éléments qui favorisent le Cocher.
Durin's Crown	C o u r o n n e Boréale ?	Constellation	Il s'agit des étoiles entourant la Couronne de Durin, dessinées en particulier sur la porte de la Moria. Parfois associée à la Grande Ourse du fait qu'elle contient sept étoiles particulièrement brillantes et d'un index du Seigneur des Anneaux l'associant à « La Charrue ». La Couronne Boréale semble par contre plus logique du point de vue de sa forme de couronne !
M e n e l v a g o r , Menelmacar	Orion	Constellation	Nom signifiant l'épéiste du ciel. Le passage discuté dans le texte de cet article laisse peu de doute quant à cette association, d'autant que pour nous aussi, Orion est un chevalier portant épée à sa ceinture !
Remmirath, the Netted Stars	Les Pléiades	Constellation	Parfois associée à « La Voie lactée », mais l'association aux Pléiades est à notre sens beaucoup plus logique (voir texte et figure).
Soronùmë	L'Aigle	Constellation	Le nom signifie « Aigle », mais K. Larsen suggère cependant que cela pourrait aussi être la Lyre qui a aussi été appelée « Aquila Cadens ». D'autres l'associent au Cygne.
Telumendil	?	Constellation	Le nom réfère à celui qui aime la voûte céleste. Sur le site internet <i>Tolkiendil</i> , elle est associée à Hercule, sans élément très convaincant.
Valacirca, The great bear, The buning briar, The sickle of the Valar, The seven butterflies, The seven stars, The wain, Ostelen	La Grande Ourse	Constellation	Une des constellations les plus remarquables du ciel vu depuis l'Angleterre (et la France), visible toute l'année dans son périple autour du pôle Nord, il est logique que les Hobbits et les Elfes lui ait trouvé plusieurs noms (comme l'ont fait les humains : la grande ourse, la grande casserole, les sept bœufs, la charrue, le grand chariot, la grande cuillère...).
Wilwarin	Cassiopee	Constellation	Le nom signifie « papillon ». On peut facilement imaginer les ailes d'un papillon dans la forme en W de la constellation.
Menelrond	Le dôme céleste	Cosmologie	En sindarin <i>menel</i> signifie « ciel », « firmament » + <i>rond</i> représente la «voûte».
Eä	L'Univers	Cosmologie	Les termes « ilu » ou « ilúve » sont aussi utilisés pour représenter « tout ce qui existe », « tout ce qui est ».

⁵ Les récits concernant la « Terre du Milieu » faisant référence à plusieurs langues, plusieurs cultures, et plusieurs légendes, un même astre peut s'y trouver sous plusieurs appellations. Nous en donnons parfois quelques-unes, sans être exhaustif !

Comme le démontre le tableau précédent, plusieurs étoiles et constellations ne sont pas définitivement identifiées. Il est tentant d'essayer de deviner ce que Tolkien avait en tête. Dans ce paragraphe, laissons-nous aller à la spéculation. Si on regarde une carte du ciel vu depuis l'hémisphère nord, certaines constellations sautent aux yeux mais ne sont pas identifiées dans le tableau. Telumendil et Anarríma pourraient-elles être de celles-là ? Manquent le Cygne, la Lyre, le Cocher et le Bouvier. Ces quatre constellations sont assez faciles à repérer dans le ciel et sont chacune associées à une étoile particulièrement brillante (respectivement Deneb, Véga, Capella, Arcturus). Parmi celles-ci, le Cocher est très proche de l'écliptique : cela correspondrait bien au nom d'Anarríma (bord du Soleil). On peut d'ailleurs trouver des suggestions de cette association sur Internet⁶. On trouve aussi la suggestion que Telumendil soit Hercule, mais il n'y a pas d'évidence très forte pour cela. Si Tolkien pensait aux constellations qu'il aimait observer la nuit, nous ne sommes pas certains que Hercule soit celle qui lui soit venue en premier à l'esprit. Comme les autres constellations qu'il a citées, le Cygne est facilement repérable, associé à une étoile très brillante (Deneb) et occupe une belle partie du ciel. La Petite Ourse avec l'Étoile polaire en clef de voûte est aussi remarquable. Il nous semblerait plus probable qu'il ait pensé à l'une de ces constellations. Nous n'avons cependant pas de réponse définitive.

Une carte du ciel montrant les étoiles et les constellations identifiées avec le plus de confiance est illustrée ci-dessous.

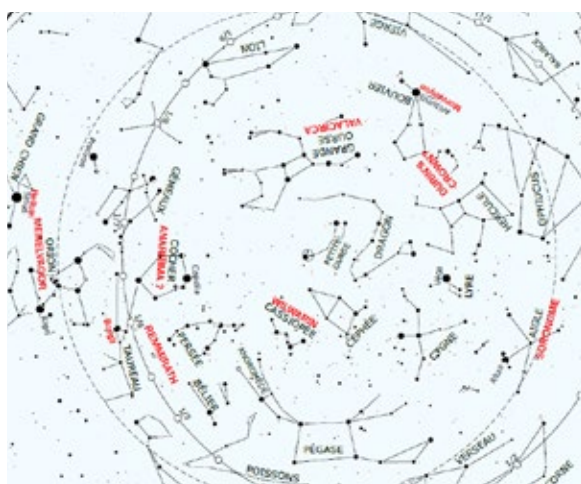


Fig.2. Carte du ciel indiquant les étoiles et constellations chez Tolkien (en rouge). L'original de la carte (nos constellations et étoiles) provient du site du CLEA dans le cadre de la réalisation d'une carte du ciel tournante : <http://clea-astro.eu/lunap/Constellations/les-cartes-tournantes-du-ciel>.

⁶ <http://www.skytonight.org/aur>

Concernant les astres eux-mêmes, on trouve parfois sur internet des associations entre *Elemmírë*, Luinil, Nénar et respectivement Mercure, Neptune, et Uranus. Ceci a l'avantage de nommer toutes les planètes du Système solaire (voir figure suivante) auxquelles pensait Tolkien et il est possible qu'il ait eu cette idée, au moins à un moment de son travail. Dans le *Silmarillion*, on peut d'ailleurs lire une « genèse » de Carnil, Luinil, Nénar, Lumbar, Alcarinquë, et Elemmírë, alors que les étoiles « plus anciennes » sont rassemblées dans des constellations. D'un autre côté, il est étonnant qu'il n'ait pas donné de nom aux étoiles très remarquables dans le ciel que sont Véga, Capella, Rigel (troisième, quatrième et cinquième étoiles les plus brillantes du ciel boréal), alors que Neptune et Uranus ne sont pas visibles à l'œil nu ! Parler de Véga comme le joyau du ciel ne serait pas choquant (*Elemmírë*) alors que Mercure est beaucoup moins évident à admirer dans le ciel. Parler d'une étoile bleue (Luinil) pour Rigel correspondait assez bien à sa teinte. Malheureusement, nous resterons dans l'incertitude.



Fig.3. Notre Système solaire, et les appellations correspondantes dans la Terre du Milieu. [Nous avons conservé un point d'interrogation pour celles qui nous semblent le moins bien établies].

La cosmogonie de la Terre du Milieu

Le *Silmarillion* nous offre un récit de l'origine de la Terre du Milieu et des astres qui l'éclairent. Dans cette cosmogonie, Tolkien raconte comment le monde apparaît à partir de mélodies chantées par un ensemble de créatures divines, qui forment ensemble un chant harmonieux, lui-même à l'origine du monde. La suite de l'histoire de la Terre du Milieu est racontée dans de nombreux textes que l'on peut considérer comme mythologiques, et qui vont raconter l'avènement des différentes créatures qui vont peupler cet univers (en particulier, elfes, hommes et nains). Il faut bien réaliser que même au sein de l'œuvre de Tolkien, ces textes ne sont pas à prendre au pied de la lettre. Ce sont des histoires transmises par des individus, qui proposent une cosmogonie, une origine du monde, et parfois une connexion entre celle-ci et les astres. Mais comme les autres textes mythiques qui sont parvenus à nous, ils ne décrivent pas forcément une réalité physique

ou historique (par exemple, le fait que la Terre du Milieu soit plate à l'origine, ou bien le fait que le Soleil et la Lune soient fabriqués a posteriori ne sont pas à considérer comme factuels). Pour cette raison, nous ne nous attardons pas dans cet article aux textes qui offrent à la Terre du Milieu des mythes liés à l'astronomie.

Pour autant, il est intéressant de réaliser que d'autres cosmogonies lient musique et création de l'Univers (par exemple, c'est par le son que Brahîa crée l'Univers selon la mythologie indienne). Les astronomes dès l'Antiquité ont eux aussi cherché à lier le mouvement des astres et la musique, en pensant que l'Univers devait être harmonieux. Kepler lui-même a composé des phrases musicales dont la hauteur des notes suit la vitesse des planètes sur leur orbite. Les notes de musique qui forment des accords harmonieux sont caractérisées par des fréquences liées les unes aux autres par des nombres entiers. On retrouve ce genre de rapport dans certaines configurations planétaires. Inutile d'aller loin : la Lune est en rotation synchrone autour de la Terre. Le rapport entre les vitesses de rotation de la Lune sur elle-même autour de son axe, et de son parcours autour de notre planète est égal à 1. On retrouve plusieurs cas similaires dans le Système solaire. Il ne s'agit pas cette fois de numérologie ou de volonté des astronomes de retrouver ces nombres entiers, mais des propriétés des systèmes gravitationnels qui y trouvent une meilleure stabilité.

Les hommages des astronomes

Finalement, les astronomes professionnels ont parfois trouvé leur vocation dans le côté merveilleux que suscite leur discipline, et ce goût pour le merveilleux a pu en faire des lecteurs de fantasy (au moins dans leur jeunesse). Naturellement, il leur arrive de connecter leurs deux intérêts et reconnaître dans une galaxie ou dans une étoile entourée d'un disque de poussière l'œil de Sauron. Ils baptisent volontiers des instruments d'observation ou des objets observés d'après leur auteur préféré ou son œuvre. Ainsi l'équipe (incluant des astronomes de Lyon) qui a conçu le spectrographe SAURON (Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae) n'a probablement pas choisi ses initiales

7 NGC 4151: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/11-029.html.

8 Formalhaut : <https://www.popularmechanics.com/space/a25396/the-star-that-looks-like-the-eye-of-sauron/>

au hasard, d'autant que le logiciel de traitement des données a été surnommé « Palantir » (le nom des globes permettant d'observer d'autres lieux et d'autres temps chez Tolkien). Le projet « BaLROG » (Bars in Low Redshift Optical Galaxies) constitue aussi un hommage récent à l'œuvre de Tolkien.

Très officiellement, de nombreux objets astronomiques ont été associés à l'auteur. Ainsi, Tolkien est un cratère à la surface de Mercure, et on trouve parmi les petits corps du Système solaire : 2991 Bilbo, 2675 Tolkien, 385446 Manwë et son satellite Thorondor, 174567 Varda et son satellite Ilmarë, 378214 Sauron. Certaines des formations géologiques à la surface de Titan, qui ont été pour la plupart découvertes par la sonde Cassini-Huygens, reprennent les noms de lieux et de personnages de la Terre du Milieu : les collines Arwen, Bilbo, Faramir, et les monts Destin, Erebor, Irensaga et Mindolluin. Finalement, la mission New Horizons a révélé en 2015 la surface de Pluton et son satellite Charon. Les scientifiques de ce projet ont donné des surnoms aux différentes régions qu'ils ont découvertes. Tolkien est à nouveau à l'honneur avec les régions sombres à la surface de Pluton « Balrog » et « Morgoth », alors que « Mordor » devient une de ces régions à la surface de Charon. Ces dernières appellations n'ont cependant pas encore été reconnues officiellement par l'Union Astronomique Internationale, qui fait référence dans le domaine.

Ainsi si Tolkien s'est inspiré de l'astronomie, les astronomes à leur tour se sont inspirés de son œuvre.



Fig.4. Quelques-uns des hommages rendus à Tolkien par les astronomes.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Sauver la nuit

(Comment l'obscurité disparaît, ce que sa disparition fait au vivant, et comment la reconquérir)

par Sylvie Thiault



Les images satellites de la Terre vue de nuit dessinent la géographie de notre planète.

Pas étonnant que beaucoup des habitants des grandes métropoles vivant « un jour sans fin », n'aient jamais vu la Voie lactée à l'œil nu !

De moins en moins nombreux sont les humains qui savent identifier les constellations.

Peut-être avez-vous participé à une campagne de test de la qualité du ciel nocturne et comparé le nombre d'étoiles attendu à celui des étoiles que vous pouviez effectivement distinguer...

C'est sûr, il est urgent de « Sauver la nuit ».

Avant d'être chercheur et géographe, l'auteur, Samuel Challéat, a animé des séances d'astronomie auprès des scolaires ou dans des centres de loisirs. Dans son introduction il relate l'émerveillement et l'émotion

ressentis par tous ces enfants découvrant le ciel grâce à un instrument d'observation, l'intérêt, la curiosité et le questionnement que cette rencontre avec la voûte céleste suscitent. L'émotion ressentie, la rencontre avec l'infiniment grand sont des constituants essentiels de l'être humain. Pourtant beaucoup de Terriens ne peuvent plus faire l'expérience de l'obscurité naturelle. L'éclairage public est en constante augmentation. Les constellations de satellites artificiels annoncées pour les années voire les mois prochains vont gêner les observations. Mais la prise de conscience de la perte du ciel étoilé et de l'obscurité gagne du terrain. L'obscurité est une ressource naturelle, il faut la préserver.

Dès la fin du XX^e siècle, les astronomes ont lancé l'alerte, bientôt rejoints par les biologistes, écologues, médecins. Les citoyens eux aussi revendiquent : il faut « sauver la nuit ».

Ils ont en face d'eux les politiques, les industriels et... les citoyens qui veulent voir, être vus, être en sécurité, mettre en valeur leur patrimoine... Bonne nouvelle, la réflexion est ouverte. Un excès de lumière est inutile : on peut agir en qualité, en quantité et en durée. Et quand on éteint la lumière, la pollution lumineuse disparaît !

La suite de l'ouvrage, comme annoncé dans le sous-titre, se décompose en trois parties : observer, s'organiser, atterrir.

Observer

Qu'est que la pollution lumineuse ? Faut-il la définir comme « l'émission excessive de lumière, due aux activités humaines, qui en modifiant l'obscurité de la nuit, gêne les astronomes dans leurs observations, perturbe la faune et la flore, affecte les rythmes biologiques chez certaines personnes et entraîne un gaspillage d'énergie » (dictionnaire de l'Académie française) ?

Mais comment définir le seuil de gêne, de perturbation ? Il propose de changer de point de vue et de considérer que la pollution lumineuse est la perturbation liée à l'usage de la lumière artificielle des usages humains et non humains de l'obscurité considérée comme une ressource naturelle permettant d'assurer des besoins fondamentaux interdépendants pour les humains, la flore et la faune.

En quoi l'obscurité est-elle une ressource indispensable ?

L'auteur nous rappelle que l'enfant se construit en dominant sa peur du noir. Il nous invite à renouer avec les sensations singulières liées à l'expérience de la nature nocturne : le ciel étoilé et son immensité, mais aussi les sons, les odeurs.

Il nous rappelle que 28 % des vertébrés et 64 % des invertébrés sont exclusivement ou partiellement nocturnes : eux aussi ont besoin de l'obscurité pour migrer, se nourrir... Les effets de la lumière artificielle sur les comportements de plusieurs espèces animales sont connus depuis de nombreuses décennies et maintenant largement documentés.

Samuel Challéat nous emmène avec les écologues pour nous apprendre à repérer tout ce qui contribue à la pollution lumineuse et à sa diffusion. Les effets des LED sont clairement exposés : composition spectrale, intensité lumineuse, durée d'exposition trois facteurs qui, cumulés, impactent notre sommeil et nos yeux.

S'organiser

Nous explicitons avec lui le cahier des charges des éclairagistes, souvent hérité des schémas de l'ère fonctionnaliste du début du XX^e siècle. Il s'agit d'éclairer nos villes et nos vies pour rassurer, surveiller, circuler.

Dès le milieu du XX^e siècle, les astronomes, en mettant en évidence la perte de visibilité du ciel étoilé au-dessus de leurs instruments, ont sensibilisé les villes voisines de leurs observatoires.

Les retombées économiques non négligeables de la présence d'un observatoire sur un territoire peuvent être un argument clef !

En 1976, l'Union astronomique internationale adopte une résolution visant la protection des sites astronomiques.

En France, Jean Kowalevsky et François Barlier dressent un rapport pour l'Académie des sciences,

Jean Claude Pecker et Bruno Morando sensibilisent les astronomes amateurs par des éditoriaux parus dans le bulletin de la Société astronomique de France.

Mais le milieu associatif peine à s'organiser jusqu'à la création en 1993 d'un précurseur de ce qui deviendra en 1998 l'Association nationale de protection du ciel nocturne. Aux États-Unis, à la fin des années 80, le dark-sky movement s'est structuré et l'International Dark-Sky Association (IDA) a vu le jour. Nous revivons les différentes étapes qui ont mené à l'ANPCEN jusqu'à l'adhésion à l'IDA. Ceci permettra de gagner en efficacité par le savoir-faire de lobbying développé par l'IDA.

Atterrir

Réduire la pollution lumineuse ne se réduit pas à une question de technique : « on sait à peu près tout faire en matière d'« éclairage » .

Supprimer l'éclairage, en limiter la durée, en limiter la puissance, éviter la déperdition d'énergie lumineuse, modifier la composition spectrale de la source... Mais cela coûte ! Il faut convaincre les décideurs qu'il y a des économies à faire, des bénéfices touristiques à en retirer, en dernière extrémité contraindre.

On peut considérer qu'il y a des zones perdues pour l'obscurité mais en protéger d'autres de manière volontariste (comme les Réserves internationales de ciel étoilé). L'auteur nous décrit les différents dispositifs en Europe et plus particulièrement en France. L'auteur milite pour une « trame noire » mais qui aurait évité les défauts de ces grandes sœurs les trames verte et bleue. D'ailleurs combien d'entre nous connaissent ces dernières ?

Le livre de Samuel Challéat est d'une lecture agréable. Même si quelques passages demandent une lecture un peu plus attentive, il est très abordable.

Vous-même n'avez probablement pas besoin d'être convaincu qu'il faut « Sauver la nuit ». Mais vous trouverez ici les arguments et les références nécessaires pour convaincre autour de vous.

Cet ouvrage s'accompagne de notes bibliographiques riches qui vous permettront d'approfondir le sujet.

En conclusion, l'auteur résume sa problématique et sa réponse : « pourquoi devons-nous agir contre la pollution lumineuse ? » « parce que le vivant a fondamentalement besoin de l'obscurité ».

VOL DE NUIT : LA POLLUTION LUMINEUSE

Jean-Luc COLAS, secrétaire de l'ANPCEN, Professeur (retraité) de sciences physiques

Où sont passées les étoiles ? On nous a volé la nuit ! Le cri d'alarme des amoureux du ciel nocturne.

C'est un sujet dont s'emparent de plus en plus les médias en recherche de sujets liés à l'environnement, et notre association, l'ANPCEN (Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes), est sollicitée très souvent pour répondre à des demandes d'interviews de la part de journalistes, et à des demandes de particuliers (adhérents ou pas) pour résoudre leurs problèmes de nuisances lumineuses.

L'ANPCEN a fêté ses vingt ans d'existence en 2019, mais le souci de la pollution lumineuse avait émergé avant sa naissance. Ce sont les astronomes professionnels et amateurs qui se sont les premiers rendu compte de la pollution lumineuse. Alors que les professionnels avaient depuis longtemps installé leurs instruments dans les régions éloignées de tout éclairage, ce sont les curieux du ciel qui ont fait prendre conscience à la société toute entière de cette pollution du ciel nocturne. Avec la baisse des prix du matériel astronomique provenant de Chine, les curieux du ciel ont pu s'équiper à bon compte par rapport aux coûts en vigueur dans les années 70-80. Et lorsqu'on pointe son instrument vers le ciel nocturne, la première chose que l'on découvre, surtout si l'on habite en ville, ce sont les lampadaires. Où sont passées les étoiles ? On nous a volé la nuit ! C'est le sentiment qu'éprouvent tous ceux qui se lancent dans l'aventure de l'observation du ciel. Sentiment de révolte et parfois d'impuissance face à la multitude des luminaires qui nous entourent.

Les astronomes ne sont pas les seuls à se dire lésés par les excès des éclairages extérieurs. L'ANPCEN reçoit tous les jours des messages de personnes dont les maisons ou les appartements sont illuminés par des lampadaires mal conçus et mal placés. On imagine la gêne produite : obligation d'avoir des volets étanches à la lumière pour obtenir une obscurité propice au sommeil, obligation de fermer les fenêtres en été pour éviter que les insectes attirés par la lumière ne pénétrant dans la maison.

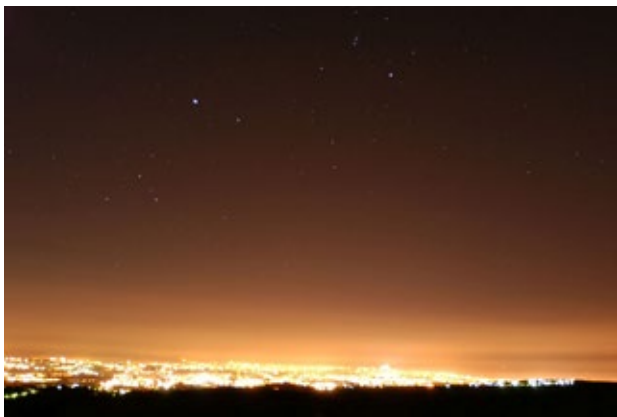


*Lumière intrusive, Chemillé en Anjou (49120),
photos Thomas Brifaut.*

La solution existe
pour limiter la
gêne :



Enfin il suffit de sortir la nuit en dehors de la ville pour voir de l'extérieur le halo lumineux produit par les éclairages orientés n'importe comment. La lumière orientée vers le ciel, bien qu'elle soit immatérielle, rencontre les molécules de l'air, les poussières et les gouttelettes en suspension dans l'atmosphère. Celles-ci diffusent la lumière dans toutes les directions, et d'autant plus loin que la lumière est plus blanche, selon la loi de Rayleigh. Les halos lumineux des villes, qui autrefois avaient la couleur jaune-orangé des lampes au sodium, prennent maintenant avec l'envahissement des luminaires à LED une teinte blanche beaucoup plus gênante.



Halo lumineux vu depuis un site éloigné d'une grande ville (ici Marseille).



Image prise en montagne dans la Drôme en août 2019. Malgré la qualité du ciel de montagne qui permet de photographier le ciel étoilé, on est gêné par les halos lumineux de villes situées à 150 et 200 km. De gauche à droite les halos de Valence, puis Lyon et Grenoble.

Photo JLuc Colas, Canon 6DII, objectif 15 mm/2.8, pose de 30 s à 1600 ISO.

Le constat étant fait de l'impact nuisible des éclairages extérieurs sur l'observation du ciel nocturne et sur la tranquillité des habitants dans leurs maisons, quelles solutions peut-on apporter à ces nuisances reconnues comme un problème sociétal ? Il a fallu d'abord faire reconnaître dans la loi l'existence même des nuisances lumineuses, qui étaient niées par les professionnels de l'éclairage. C'est ce qui a été fait en 2009 lors du Grenelle I de l'environnement. Pour cela il a fallu prendre conscience que les nuisances lumineuses n'impactaient pas seulement l'observation du ciel et la vie des citoyens, mais toute la vie nocturne sur Terre. La faune et la flore sont aussi perturbées par la présence de lumière alors que la vie terrestre s'est construite sur l'alternance jour/nuit depuis des milliards d'années. Les associations environnementales se sont alors jointes à nous pour faire entrer dans la loi la prise en compte des nuisances lumineuses. C'est à ce moment que notre association qui s'appelait auparavant ANPCN a

ajouté un E pour devenir ANPCEN. Quelques années plus tard, en 2014, le ministère de l'écologie nous a reconnu en tant qu'association d'intérêt général, puis nous avons reçu l'agrément national des associations de protection de l'environnement, renouvelé en 2019.

Une fois les éclairages extérieurs reconnus comme causes de nuisances lumineuses, comment faire pour diminuer voire supprimer celles-ci ? Il suffit d'appliquer les cinq critères suivants recommandés par l'ANPCEN et repris en partie dans l'arrêté du 27 décembre 2018 :

- le luminaire doit produire un faisceau orienté exclusivement vers le bas ;
- la température de couleur de la source doit être de 2700 K maximum ;
- l'éclairage au sol doit être adapté à la surface à éclairer (en général 20 lux maximum sont largement suffisants sauf exceptions) ;
- les mâts des lampadaires doivent avoir une hauteur et un espacement adaptés selon les lieux ;
- l'éclairage peut être coupé ou diminué une partie de la nuit.

Tout cela peut se résumer par le schéma ci-dessous.



Source : <http://ricemm.org/documentation/luminaires/>

Ces solutions semblent faciles à mettre en œuvre, alors pourquoi la pollution lumineuse est-elle en augmentation en France et partout dans le monde d'une manière explosive ?

En 20 ans, de 1995 à 2015, la quantité de lumière émise en France a augmenté de 94 %, le nombre de points lumineux a augmenté de 85 %, auxquels il faut ajouter toutes les autres sources lumineuses : enseignes, publicités lumineuses, vitrines, façades, bureaux non occupés, parkings éclairés inutilement, etc.

Et l'utilisation des LED n'a pas résolu le problème, bien au contraire : sous prétexte qu'elles consomment moins de puissance pour autant d'éclairage, les éclairagistes ont saisi l'opportunité d'installer des éclairages plus forts et plus blancs. Après les plaintes pour éclairage intrusif, nous recevons maintenant des plaintes pour éblouissement insupportable.

Personne ne songe à supprimer l'éclairage public, chacun reconnaît son utilité. Il est toutefois possible d'en minimiser les impacts négatifs par des mesures de bon sens. Déjà de plus en plus de villages et de villes d'importance moyenne prennent conscience de l'inutilité de l'éclairage public après une certaine heure. En effet, même si à notre époque nos modes de vie ne sont plus les mêmes qu'il y a un siècle, même si parmi nous existent des noctambules, nous faisons partie des animaux diurnes. Nous avons besoin de la nuit pour nous régénérer. Et plus la nuit est noire, plus notre système immunitaire travaille bien. Cela a été montré par des études publiées ou citées dans les rapports de l'ANSES. Par conséquent l'éclairage public devient inutile lorsque la plupart des gens sont rentrés chez eux. Il est alors possible de l'éteindre. Toutes les communes qui ont adopté une extinction en cours de nuit ont constaté que cette mesure était bien acceptée par la population, à condition d'être accompagnée par une information, des débats, et une expérimentation.

Nous avons recensé actuellement au moins 1/3 des communes françaises qui éteignent leur éclairage public en cœur de nuit. Parmi les villes moyennes on peut citer :

Saumur (28 000 hab.) qui éteint tout son éclairage public depuis 2012 de 1 h à 6 h – l'hyper-centre-ville ne s'éteint qu'à 2 h le weekend.

Dans la banlieue de Bordeaux des villes importantes coupent leurs éclairages : Pessac, Mérignac, Le Taillan-Médoc, Villenave d'Ordon, Eysines, Bègles, Blanquefort, Le Haillan, Bouliac...

Ailleurs : Haguenau, Rochefort, Lanester, Saint-Brieuc, Quimper, Givors, Bourg-en-Bresse, Saint Joseph (Réunion), Menecy, Trélazé, Foix, etc.

Certaines grandes villes éteignent certains de leurs quartiers (Strasbourg). Couper l'éclairage public est la première mesure à mettre en œuvre pour supprimer la pollution lumineuse et c'est la moins coûteuse et la plus simple.

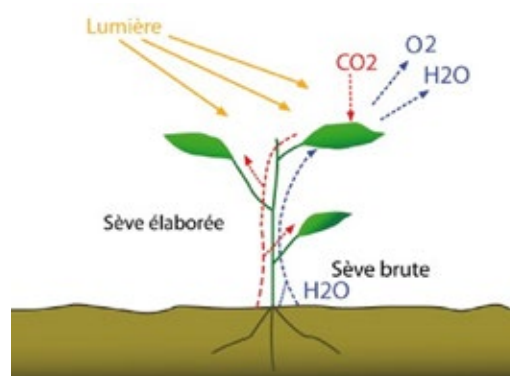
Les nuisances produites par les éclairages extérieurs ne gênent pas seulement les humains. C'est tout l'environnement nocturne qui est touché. Les insectes sont piégés par les luminaires, tournoient à proximité jusqu'à l'épuisement au lieu de se nourrir et de se reproduire. L'éclairage public est la deuxième cause de leur disparition, après les pesticides. Cela a des conséquences indirectes pour l'Homme. On le sait peu, les papillons nocturnes participent à la pollinisation des cultures autant que les abeilles. Leur disparition a des conséquences sur la production agricole.



Un lampadaire piège les insectes dans un rayon de 200 m autour de lui, les empêchant de se nourrir, de se reproduire et de polliniser.

Les oiseaux migrateurs, les batraciens, les poissons, les chauves-souris et toutes les espèces nocturnes sont impactées de diverses manières. Une synthèse des études sur ce sujet a été réalisée par l'ANPCEN et publiée en 2014 sous le titre « Éclairage du 21^e siècle et biodiversité »¹. La nature n'est pas seulement présente à la campagne. Luc Abbadie, professeur à l'université Sorbonne, souligne que la nature en ville joue un rôle important dans la lutte contre le réchauffement climatique, en particulier par la végétation².

Or celle-ci est très perturbée par l'éclairage nocturne. On sait que les plantes se développent en fabriquant leur cellulose à partir de l'eau aspirée par les racines, du dioxyde de carbone de l'atmosphère, et que le processus appelé synthèse chlorophyllienne nécessite l'apport de lumière solaire. Elles ont un cycle de vie alterné jour/nuit. Le fait de les éclairer la nuit les fait pousser plus vite, les épuise, les rend plus fragiles et plus sensibles aux maladies et parasites.



(Source :

<https://interstices.info/wp-content/uploads/jalios/modelisation-plantes/photosynthese.jpg>

1 document à télécharger : https://www.anpcen.fr/docs/20150705154513_gnxyp6_doc167.pdf

2 <https://www.lecese.fr/content/questions-luc-abbadie-sorbonne-nature-en-ville>

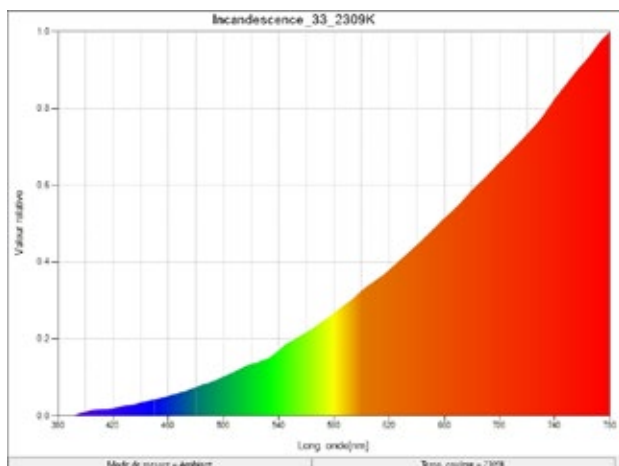
Les arbres éclairés toute la nuit ont un feuillage plus important face aux lampadaires, feuillage persistant en hiver côté lampadaire alors qu'il a quasiment disparu à l'opposé.



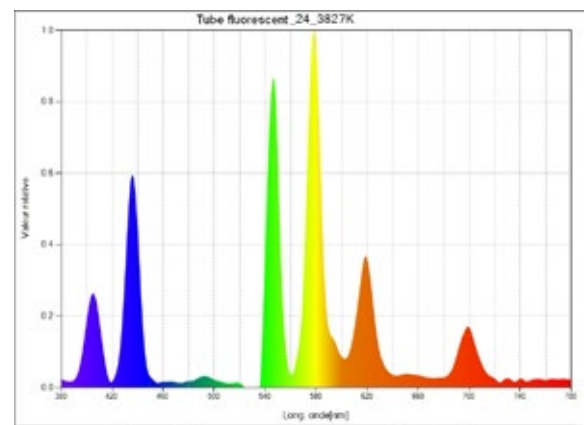
Photo prise par Dominique Carrière en décembre 2016 à Castries près de Montpellier.

Avec l'extinction, l'autre façon de faire diminuer la pollution lumineuse est d'agir sur la qualité des éclairages. Tous ne se valent pas. Les types de lampes utilisées dans l'éclairage public ont évolué au fur et à mesure des progrès techniques. Nous avons connu les lampes à incandescence à filament de tungstène, les lampes à décharge (tubes fluorescents ou ampoules à vapeur de mercure), les lampes à vapeur de sodium, les lampes à iodures métalliques (amélioration des lampes à incandescence par ajout d'halogène), et récemment les lampes à LED (utilisant des diodes électroluminescentes bleues). Chacun de ces types de lampe a un spectre particulier, une signature lumineuse qui lui est propre, et qui est caractérisée par une température de couleur. La lumière qu'elles émettent n'a pas le même impact sur l'environnement.

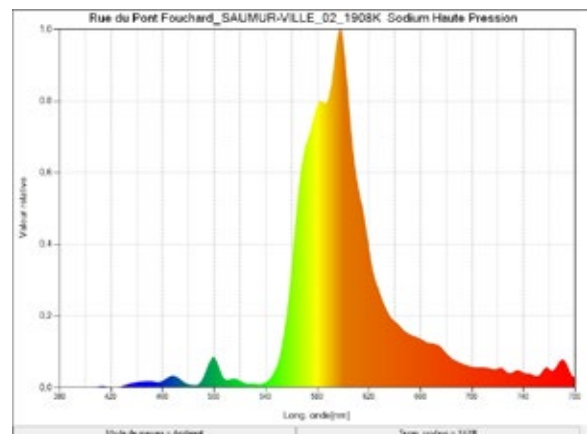
Images de spectres des 5 types de lampes (en ordonnée l'énergie en valeur relative – 1 pour le maximum –, en abscisse la longueur d'onde en nm).



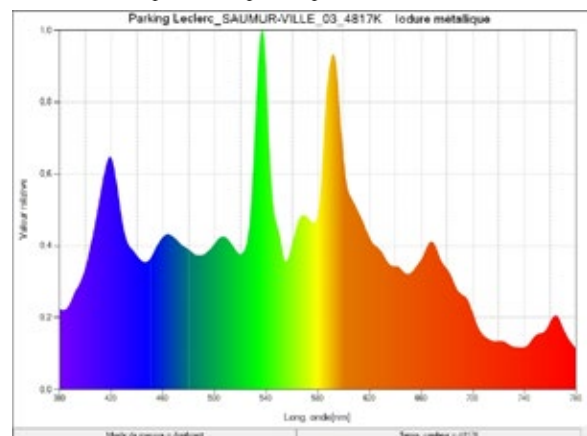
Spectre lampe à incandescence.



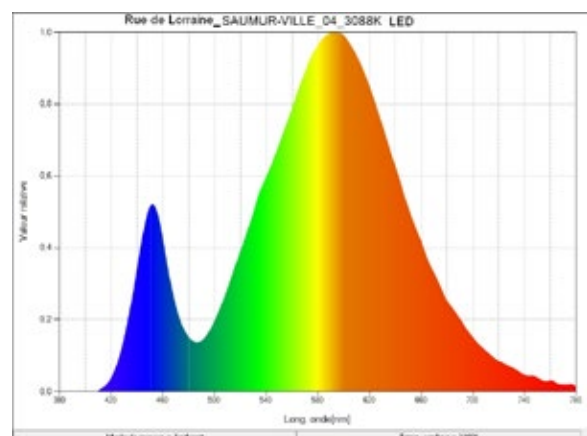
Spectre lampe à décharge.



Spectre lampe à vapeur de sodium.



Spectre lampe à iodures métalliques.



Spectre lampe à LED

Images JL Colas avec le spectromètre Sekonic C-800.

Les lampes à incandescence, les halogènes et les lampes fluo (avec ou sans mercure) sont appelées à disparaître, soit à cause de leur consommation trop importante, soit à cause du recyclage trop problématique, en tout cas à cause de la loi qui fixe une date limite de leur utilisation selon les modèles. Les lampes SHP (sodium haute pression) qui sont les plus répandues actuellement, ont le spectre le moins impactant sur l'environnement. Elles existent en puissances diverses : 35 W, 50 W, 75 W, 100 W et plus.

Les LED ont un spectre typique comportant toujours un pic bleu très important. Cela est dû à la technologie de fabrication : elles sont constituées par une diode électroluminescente bleue entourée d'une substance fluorescente (appelée luminophore) qui, excitée par le bleu de la LED, ré-émet une lumière jaune. L'ensemble donne l'apparence d'une lumière blanche dont le spectre est très différent de celui du Soleil.

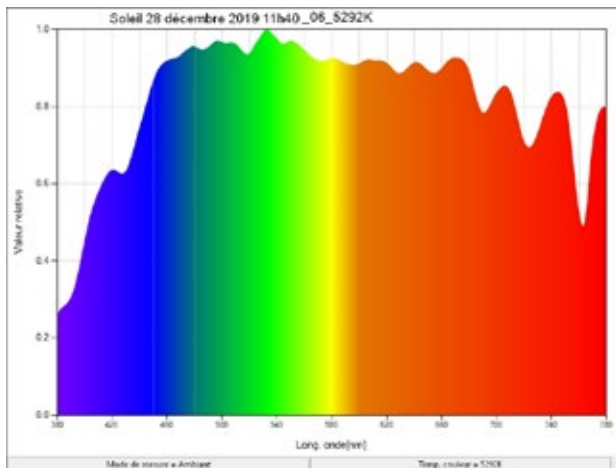


Image de spectre solaire.

Des études publiées par l'ANSES ont prouvé le caractère nocif de ce type de lumière, causé par le pic bleu, dont la longueur d'onde a une action destructrice sur les cellules de la rétine. De plus ces LED provoquent un effet d'éblouissement qui a été expliqué de la manière suivante. Lorsque l'intensité d'un éclairage est trop importante la pupille se contracte instinctivement : c'est le phénomène de la « constriction pupillaire ».



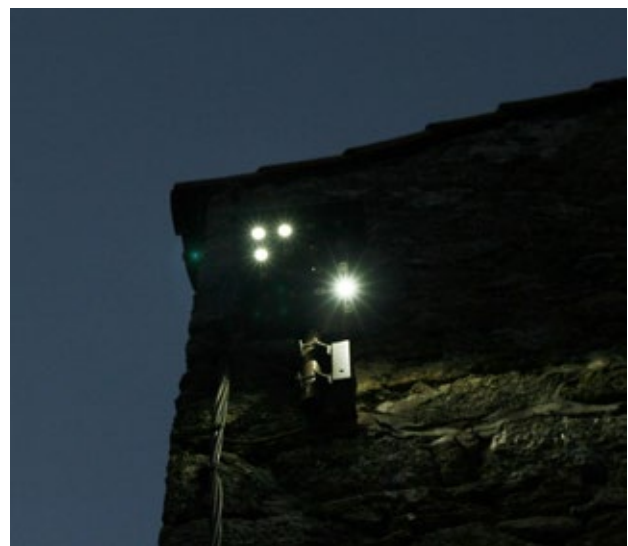
Ce phénomène est déclenché par une longueur d'onde bien précise : 480 nm. Or le spectre des LED présente malheureusement un creux profond à cette longueur d'onde, contrairement au spectre solaire³.

La folie des LED

De la même façon qu'on nous avait « vendu » les Compact Disc comme étant éternels et bien meilleurs que les disques vinyl, on nous vend maintenant les lampes LED avec l'argument de la moindre consommation d'énergie (ce qui n'est pas contestable) mais aussi de leur durée de vie de 70000 heures, plus du double de celle des autres types de lampes, ce qui est contestable au vu des pannes survenues dans certaines communes, et du manque de recul de leur utilisation.



Image d'un lampadaire à LED de la commune de Mandagout dans le Gard, photo Dominique Carrière.



Ci-dessus le même luminaire 4 ans plus tard : seules 4 LED fonctionnent encore... c'est loin des 20 années promises.

³ Source : <https://optiquepigeard.com/traitements-options-verres/>.

C'est ainsi que les LED ont été plébiscitées pour l'éclairage public par les syndicats d'énergie qui ont vanté leurs mérites auprès des communes, et ces dernières se sont laissées envahir par cet éclairage dont se plaignent maintenant les usagers.

Avec le recul, la consommation d'électricité n'est en général que de moitié par rapport aux lampes SHP à puissance lumineuse égale et le coût d'un luminaire à LED est beaucoup plus élevé. Le coût global (investissement + consommation + maintenance) est supérieur à celui d'un luminaire SHP (étude ANPCEN).

C'est pourquoi notre association recommande encore aux communes de choisir des lampes SHP pour leur éclairage public. L'argument que la lumière plus blanche des LED serait plus agréable car l'indice de rendu des couleurs (IRC) est proche de celui du Soleil ne nous paraît intéressant que pour les éclairages intérieurs (bureaux, expositions, salles de travail...). Personne ne demande que les rues soient éclairées la nuit comme en plein jour ! La voie publique n'est pas une scène de théâtre.

La température de couleur

Les sources de lumière utilisées par l'homme ont longtemps été des sources chaudes. Lorsqu'on chauffe une substance, elle émet un rayonnement dont le spectre dépend de la température de la source. Les lois de l'émission de lumière en fonction de la température ont été étudiées à la fin du XIX^e siècle, début XX^e, par différents physiciens : Rayleigh, Planck, Wien, Stefan, Boltzmann, et sont connues sous le nom de « lois du corps noir ». Pour ce qui nous concerne il nous suffit de savoir que la luminance de la source pour une longueur d'onde donnée est liée à sa température par la loi de Planck :

$$L(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(hc / \lambda kT)} - 1}$$

$$h = 6,26.10^{-34} \text{ J.s} \quad c = 3.10^8 \text{ m/s}$$

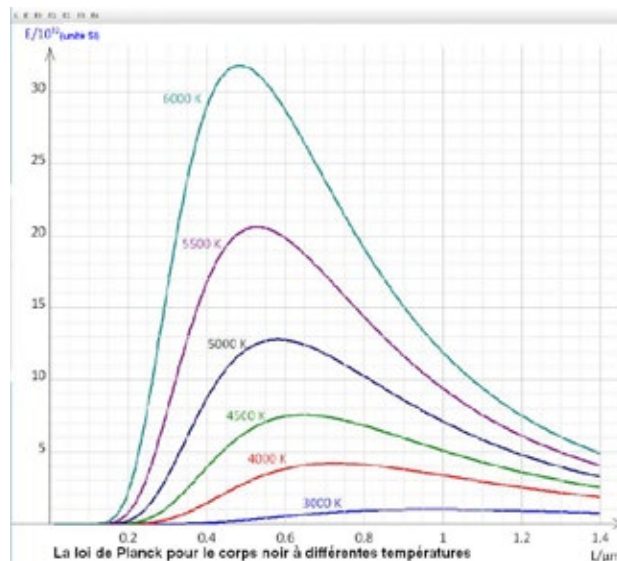
$$k = 1,38.10^{-23} \text{ J/K} \quad e = 2,71828$$

La loi de Wien exprime la longueur d'onde maximale en fonction de la température

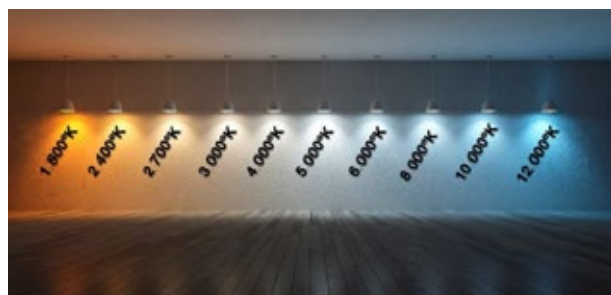
$$\text{Formule : } \lambda_{\max} = 2,898 / T$$

$\lambda_{\max}$ est en mètre et T en kelvin

Représentation graphique pour différentes températures de la source.



*E est la luminance L de la formule précédente et les abscisses représentent la longueur d'onde λ .
Graphes tracés avec le logiciel Regressi.*



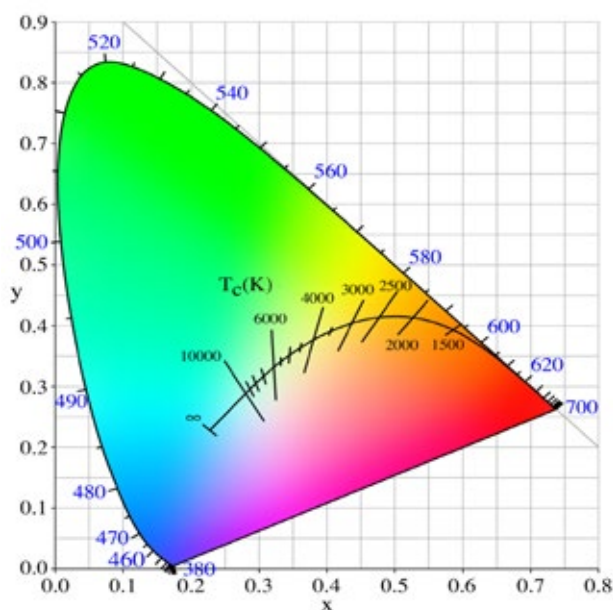
On voit que plus la température est élevée plus l'émission maximale se fait dans les courtes longueurs d'onde (vers le bleu). Température faible : lumière rouge orangé. Température élevée : lumière avec du bleu⁴.

Historiquement, après les sources chaudes, de nouvelles sources sont apparues avec les tubes à décharge dans les gaz (appelés « néons » de manière inappropriée). Une goutte de mercure est chauffée dans le tube, puis éclate un arc électrique qui émet surtout dans l'UV. L'intérieur du tube est tapissé d'un mélange de poudres fluorescentes qui ré-émettent dans le rouge, le vert et le bleu. Selon le dosage des poudres on obtient une lumière contenant plus ou moins de bleu, donc ressentie comme plus ou moins « chaude » même si ce type de lampe ne chauffe pas (ou très peu). L'usage est répandu de qualifier de froide la lumière émise par un tube émettant beaucoup de bleu, et de qualifier de chaude

⁴ <https://www.barcelona-led.fr/blog/blog-d-information-et-guides-sur-l-eclairage-led/guide-led-temperature-de-couleur-blanc-chaud-neutre-ou-froid/>

la lumière d'un tube ayant un aspect orangé. Cela rejoint l'usage des artistes peintres. C'est bien sûr contraire aux caractéristiques physiques, mais cela correspond au ressenti des humains.

On a été amené à qualifier les sources de lumière froide par une pseudo température de couleur T_c exprimée en kelvin. Une commission internationale de l'éclairage (CIE) a défini un indice de rendu des couleurs (IRC) pour qualifier chaque source par un nombre entre 0 et 100 afin de comparer objectivement les éclairages entre eux et par rapport au Soleil auquel est attribué l'indice 100.



Source Wikipedia (User:Part)

Les lampes à LED fonctionnent elles aussi sans chauffer, ce sont des sources froides, loin d'être assimilables à des corps noirs au sens physique. On peut cependant leur attribuer une température de couleur, dite température de couleur corrélée T_c ou CCT en anglais (correlated color temperature).

« On définit la température de couleur proximale comme celle du corps noir dont la couleur se rapproche le plus de celle de la lumière à caractériser. » (Wikipedia)

Il existe des appareils permettant de mesurer cette température, ce sont des spectromètres, ou spectrocolorimètres. Ils sont utilisés par les éclairagistes mais aussi par les photographes et cinéastes pour choisir les filtres en fonction des situations d'éclairage.

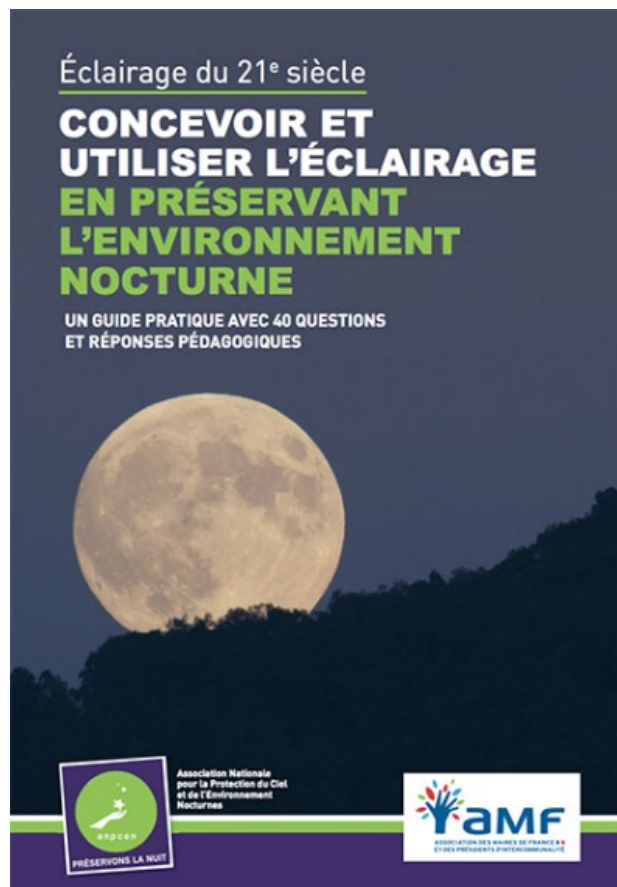
Les LED ont l'avantage de consommer moins d'énergie et d'avoir un meilleur rendement lumineux

que les sources chaudes. Mais elles ont l'inconvénient de cette émission dans le bleu dont la nocivité pour les rétines a été démontrée (cf. rapport de l'ANSES). La technologie évoluant, on trouve maintenant des LED dites ambrées dont la T_c est en dessous de 3 000 K. L'ANPCEN recommande de ne pas dépasser les 2 700 K pour l'éclairage public, à adapter selon les lieux. Des LED à 2 400 K sont maintenant sur le marché, elles donnent un éclairage chaud beaucoup plus agréable à l'œil, moins éblouissant et moins impactant pour l'environnement nocturne.

L'épidémie des LED blanches est peut-être derrière nous. Il n'est pas normal que soient mis sur le marché des éclairages qui n'ont pas été testés en condition réelle, juste parce que des fabricants les mettent en vente. Les pouvoirs publics doivent jouer leur rôle de régulateur pour éviter les catastrophes environnementales.

L'association ANPCEN a développé des outils efficaces pour lutter contre la pollution lumineuse.

Il s'agit d'agir auprès des élus puisque ce sont eux qui, en principe, font le choix de leurs éclairages. Bien souvent ce choix est laissé au syndicat d'énergie avec lequel la commune a passé un contrat. Les



maires ont cependant le dernier mot en matière de choix après consultation de leur syndicat. Ils doivent être informés des conséquences de leurs choix, c'est ce à quoi s'attache l'ANPCEN grâce à la publication avec l'Association des maires de France (AMF) du *Guide pratique avec 40 questions et réponses pédagogiques*, qui permet de concevoir et réaliser un éclairage en préservant l'environnement nocturne.

Depuis 2009 l'association ANPCEN a développé un autre outil original, le label « Villes et Villages Étoilés ». Il s'agit, après analyse de leur parc d'éclairage, en répondant à un questionnaire précis, de délivrer aux communes un label allant de 1 à 5 étoiles, accompagné d'un bilan indicatif de leur éclairage, afin de leur permettre si elles le désirent, d'améliorer celui-ci en vue de progresser dans le label. Le bilan est délivré aussi aux communes qui n'ont pas obtenu le label. Actuellement 574 communes sont labellisées et près de 200 communes ont été délabellisées pour diverses raisons (non renouvellement ou dégradation de leur éclairage). Le concours est ouvert tous les 2 ans, et la durée de la labellisation est valable durant 5 ans au bout desquels

la commune doit reconcourir.

Pour participer au label, il convient d'effectuer une demande d'inscription sur notre site *anpcen.fr* dans la rubrique « Participez à Villes et Villages Étoilés > S'inscrire ».

Le règlement et les critères de notation sont indiqués dans la rubrique :

« Participez à Villes et Villages Étoilés -> Règlement 2019 et critères de notation ».

Depuis cette année un nouveau label a été créé pour répondre aux demandes des Parcs ou d'autres structures plus vastes. C'est le label « Territoire de villes et villages étoilés »

Pour en savoir plus consulter le site de l'ANPCEN : <https://www.anpcen.fr>

■



Solutions des mots croisés page xx

Horizontalement

1. Superterres. 2. Phases. Yard (1 yard = 3 pieds). 3. SAV. Radio. 4. CCS (Commission des cadrans solaires). Elodie. 5. Transit. 6. Rugi. Aléa. 7. Arecibo. Épi. 8. La. Évent. On. 9. Élué. Sophie.

Verticalement

1. Spectrale. 2. UH (Université de Hawaïi). Crural. 3. Passage. 4. ESA. Nicée. 5. Rêves. IV. 6. TS. Limbes. 7. Rôt. ONO. 8. Ryad. TP. 9. Radiale. 10. Érié. Époi. 11. SDO (Solar Dynamics Observatory). Naine.

École d'Été d'Astronomie



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 :

<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

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, mathématique et astronomie, le Soleil, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

HS14 Le Soleil (2018)

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.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

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 web

Une information toujours actualisée

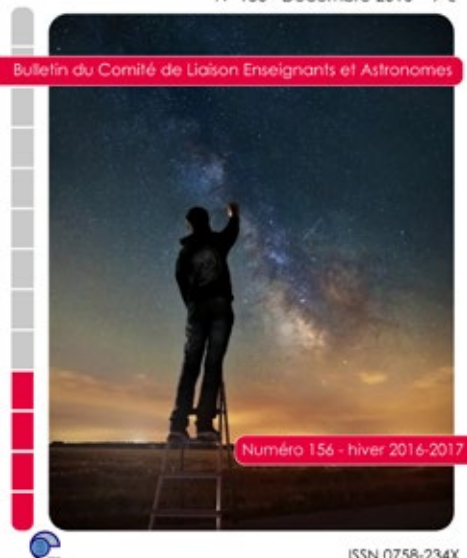
<http://www.clea-astro.eu>



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €



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
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

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

Siège social :

CLEA

Case courrier 7018

Université Paris Diderot - Paris 7

Bâtiment Sophie Germain

IREM de Paris

8, place Aurélie Nemours

75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

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

Site web :

contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2019 : **10 €**

Abonnement CC pour 2019 : **30 €**

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/>

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout

Rédacteur de publication : Christian Larcher

Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 169 printemps 2020