

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 154 - Juin 2016 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 154 - été 2016



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 2016

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

## Responsables des groupes

**Vie associative** : Jean-Michel Vienney

**Cahiers Clairaut** : Christian Larcher

**Productions Pédagogiques** : Pierre Causeret

**Communication** : Charles-Henri Eyraud

**École d'Été d'Astronomie** : Danièle Imbault

## Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



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

Thomas Appéré, Francis Berthomieu, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Lucienne Gouguenheim, Éric Josselin, Lucile Julien, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Daniel Paupart, Jean-Claude Pecker, Ronan Perron, Frédéric Pitout, Roseline Primout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Sylvie Thiault, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 154, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Monoceros R2 est une association de jeunes étoiles massives et chaudes. La photo montre également plusieurs nébuleuses par réflexion illuminées par ces étoiles jeunes. Image prise dans l'infrarouge proche par le télescope VISTA de l'ESO au Chili (Cerro Paranal). Crédit ESO / J. Emerson / VISTA.

# Les Cahiers Clairaut

## Été 2016

### Éditorial

« Les étoiles sont nos ancêtres ; nous sommes des poussières d'étoiles. C'est une des grandes découvertes de l'astronomie contemporaine » dit l'astrophysicien Trinh Xuan Thuan.

Nous vous proposons de faire cap vers les étoiles. Elles se distinguent nettement dans le ciel nocturne par leur éclat et parfois aussi par leur couleur. L'éclat, qui dépend de l'éloignement, est mesuré par la magnitude apparente mais l'on sait également déterminer des magnitudes absolues. L'ensemble des valeurs mesurées permet d'effectuer des classements par grandes catégories dans un diagramme reliant magnitude et température (diagramme HR). En vous aidant du catalogue Hipparcos et du logiciel Stellarium proposez à vos élèves de construire ce diagramme puis d'en exploiter les données.

Cette lumière issue des étoiles voyage parfois pendant des millions d'années, sans subir d'altération, avant de nous parvenir. Elle nous permet de voir loin dans l'espace et dans le passé en nous livrant une grande quantité d'informations que l'on peut déchiffrer grâce à la spectroscopie : composition chimique, vitesse par rapport à la Terre, vitesse de rotation, champ magnétique etc.

Il n'y a pas d'astrophysique ou même de physique tout court sans mesures. Chaque paramètre physique : masse, température, charge électrique... est mesurée à l'aide d'unités définies très précisément. Ces unités sont décidées par la « Conférence générale des poids et mesures » (CGPM) qui se réunit tous les quatre ans. La prochaine aura lieu en 2018, elle doit décider d'une nouvelle définition du kilogramme, qui ne soit pas liée, comme actuellement, à un objet matériel unique, altérable et destructible. Plusieurs projets sont en compétition.

Au collège les élèves doivent « savoir extraire et trier des informations » ; un article d'actualité scientifique dans un journal peut servir de support d'apprentissage. Un exemple vous est proposé avec la prédiction récente d'une neuvième planète. Une occasion de revenir sur la prédiction historique de Neptune par Le Verrier en 1846.

Neptune c'est aussi le souvenir de la découverte des 3 arcs nommés « Liberté, Égalité, Fraternité » par André Brahic qui vient de nous quitter récemment. Le CLEA perd un ami fidèle, un être animé d'un dynamisme exceptionnel dont ses nombreux amis rendent témoignage.

**Christian Larcher, pour l'équipe.**

### Histoire

**Le SI, système international d'unités, des origines jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle**  
Lucile Julien p 2

### Avec nos élèves

**Histoire des sciences, actualité et évaluation en 3<sup>e</sup>**  
Roseline Primout p 6

**Thème : LES ÉTOILES** p 9

### Histoire

**Le (s) diagramme(s) Hertzsprung-Russell**  
Éric Josselin p 10

### Avec nos élèves

**Magnitude apparente d'une étoile**  
Sylvie Thiault p 14

### Avec nos élèves

**Comment réaliser son diagramme HR**  
Pierre Causeret p 17

### Avec nos élèves

**Synthèse de documents : la classification des étoiles**  
Thomas Appéré p 20

### Histoire

**Que savait-on des étoiles en 1803 ?**  
Pierre Causeret p 24

### Ciel d'été

Pierre Causeret p 28

### Témoignage

**Où va l'astrophysique française ? 1. L'Univers lointain et les galaxies**  
Frédéric Pitout p 29

Nouveauté : HS 12 l'Astronomie à l'école p 32

### Lecture pour la Marquise

**Guide pratique pour bien débiter et spectroscopique astronomique**  
Jean-Michel Vienney p 33

### Jeux

**Mots croisés : Mercure**  
Pierre Causeret p 34

### Avec nos élèves

**Utilisation de photos du passage de Mercure en exercice**  
Ronan Perron p 35

### Vie associative

**André Brahic et le CLEA** p 37

**Lionel Muller** p 40

**Passage de Mercure** p 40

**Solutions mots croisés** p 40

# HISTOIRE

## Le SI, système international d'unités, des origines jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle

Lucile Julien Professeure émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)  
Laboratoire Kastler Brossel

*Le système international d'unités n'est pas figé. Il a une histoire et les définitions de ses unités de base s'adaptent aux besoins de chaque époque. La dernière redéfinition d'une d'entre elles est celle du mètre en 1983. Une redéfinition de quatre autres se prépare pour 2018.*

*Ce premier article présente le SI aujourd'hui et retrace brièvement son histoire, depuis ses origines jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle.*

### Le SI aujourd'hui

Le système international d'unités (SI) est né en 1960. Il est fondé sur sept unités de base : le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd). Les grandeurs physiques exprimées avec ces unités sont la longueur, la masse, le temps, l'intensité de courant électrique, la température, la quantité de matière et l'intensité lumineuse. Les unités de toutes les autres grandeurs physiques sont des unités dérivées, qu'on peut écrire en fonction des unités de base. Par exemple l'ohm, unité de résistance électrique, est donné par le  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$ . Écrire l'équation aux dimensions d'une grandeur physique, c'est exprimer celle-ci en fonction des sept grandeurs de base ci-dessus.

Le SI n'est pas statique : il évolue en fonction des besoins croissants des utilisateurs. La définition de chaque unité est fixée par convention entre les états représentés à la *Conférence générale des poids et mesures* (CGPM), conférence qui se réunit actuellement environ tous les quatre ans. Les 24<sup>e</sup> et 25<sup>e</sup> CGPM, réunies en 2011 et 2014, ont acté un projet de redéfinition des unités de base maintenant prévu pour 2018, qui devrait concerner tout particulièrement le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole. Pour comprendre ce projet, il est utile de revenir sur l'évolution passée du SI.

### Petite histoire du SI, du système métrique au système MKS

Le système international est le descendant du système métrique décimal, créé et adopté en France en 1795. Avant cette époque, chaque région possédait son propre système de mesure, et une

même unité – la toise par exemple comme unité de longueur – pouvait avoir des valeurs différentes selon les époques ou les lieux : toise de Charlemagne, toise du Châtelet, toise du Pérou... Enfin, selon les cas, les unités pouvaient se diviser par exemple en 20, en 12, en 8, en 6, ou en 3... Les cahiers de doléance proposés aux Français en 1788 mentionnent partout la demande qu'il n'y ait plus "deux poids, deux mesures", expression qui est restée dans le langage courant. L'unification demandée alors dans ces termes est celle des unités de masse, non distinguée du poids à l'époque, et de longueur.

En mars 1790, l'Assemblée nationale vote la suppression des droits féodaux sur les poids et mesures et l'idée de créer des unités nouvelles est lancée. Ces unités doivent être universelles, c'est-à-dire faites pour tous les peuples de la Terre. L'année suivante, il est décidé par les révolutionnaires français que la nouvelle unité de longueur serait le mètre, défini comme « la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre » et que le kilogramme – d'abord appelé le grave – s'en déduirait, comme le poids d'un décimètre cube d'eau à la température où sa densité est maximale.

Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain quittent Paris en mai 1792 pour aller chacun de son côté mesurer par triangulation une partie du méridien terrestre entre Dunkerque et Barcelone. Ils ne seront de retour ensemble à Paris qu'en novembre 1798, après avoir affronté des conditions matérielles et politiques particulièrement difficiles. Pendant le même temps, Lavoisier réalise des mesures très précises de volumes et de masses d'eau, mais est guillotiné en mai 1794 !

Sans attendre le retour de Delambre et Méchain, le système métrique décimal est institué en avril 1795 et des copies d'un mètre étalon et d'un kilogramme étalon provisoires sont diffusées dans toute la France, accompagnées d'explications et d'instructions (figure 1).

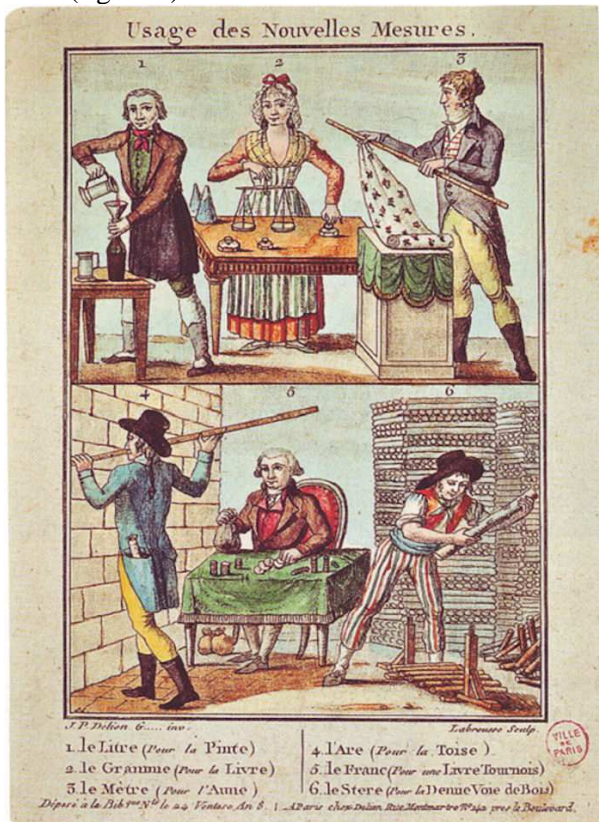


Fig.1. Instructions diffusées en 1795 dans toute la France lors de l'instauration du système métrique décimal.

En 1799, deux prototypes « définitifs » du mètre et du kilogramme sont réalisés en platine et déposés aux Archives de la République.

Au cours du 19<sup>e</sup> siècle, de nombreux pays adoptent le système métrique. En 1875, est signée la *Convention du mètre*, traité international qui réunit 17 pays (ils sont 55 actuellement) et qui crée le *Bureau international des poids et mesures* (BIPM), sous l'autorité de la *Conférence générale des poids et mesures*. En 1889, à l'occasion de la 1<sup>ère</sup> CGPM, deux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme (figure 2) sont réalisés en platine iridié (90 % Pt, 10 % Ir) et déposés à Sèvres, au siège du BIPM.

Avec la seconde dite « des astronomes », ces trois unités forment le système d'unités mécaniques MKS. Le mètre et le kilogramme sont définis respectivement comme la longueur et la masse des deux prototypes internationaux, tandis que la seconde est « la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen ».



Fig.2. Photo d'une des copies du prototype international du kilogramme, déposé au BIPM.

## Des unités électriques au système MKSA

Le développement de l'électromagnétisme au cours du 19<sup>e</sup> siècle s'est accompagné de la définition de grandeurs physiques nouvelles : intensité de courant, résistance, tension électrique, champs électrique et magnétique... Pour les mesurer, il a fallu s'entendre sur le choix des unités appropriées, tâche à laquelle s'est attelée la *British Association for the Advancement of Science* dès le milieu du siècle. Elle s'est appuyée sur le constat qu'il est possible d'exprimer toutes les grandeurs électriques et magnétiques en fonction des trois grandeurs fondamentales de la mécanique : longueur, masse et temps. En pratique en effet, la mesure de ces grandeurs utilise des dispositifs mécaniques. La *British Association* adopte donc en 1873 le système CGS (centimètre, gramme, seconde), système qui sera repris ensuite par tous les congrès internationaux d'électricité qui suivront. Ainsi donc, comme son nom ne l'indique pas, le système CGS est un système d'unités électriques créé, à côté du système MKS, par les anglo-saxons.

En réalité il n'y a pas un système CGS, mais plusieurs, selon la loi physique utilisée pour relier grandeurs électriques et mécaniques, et selon le choix de la définition du champ magnétique (le champ électrique est toujours défini comme le rapport d'une force à une charge). Comme loi physique, on peut utiliser la force s'exerçant entre deux charges (loi de Coulomb)  $F = k_1 q q' / r^2$  où  $k_1$  est sans dimension et vaut 1, ce qui donne le système CGS électrostatique ; on peut aussi utiliser la force s'exerçant entre deux éléments de conducteurs (loi d'Ampère)  $F = k_2 I I' dl dl' / r^2$  où  $k_2$  est sans dimension et vaut 1, ce qui donne le système CGS électromagnétique. Les différentes grandeurs électriques n'ont pas même dimension dans l'un ou l'autre système : par exemple une

résistance électrique est homogène à l'inverse d'une vitesse dans le premier et à une vitesse dans le second (dans tous les cas, on a la relation  $k_1/k_2 = c^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide). Dans le système de Gauss, qui est une variante du système CGS électrostatique, les champs électrique et magnétique ont même dimension. Selon les grandeurs qu'ils mesurent, les utilisateurs privilégient un système ou un autre.

En 1901, Giovanni Giorgi propose un nouveau système unifié, qui est celui que nous connaissons maintenant, dans lequel  $k_1 = 1/4\pi\epsilon_0$  et  $k_2 = \mu_0/4\pi$ , où  $\epsilon_0$  et  $\mu_0$  ont chacun une dimension et sont respectivement la permittivité et la perméabilité du vide. On a alors  $\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$ . Après de nombreuses discussions, ce système unifié est adopté en 1948 par la 9<sup>e</sup> CGPM : l'ampère est pris comme unité fondamentale aux côtés du mètre, du kilogramme et de la seconde, ce qui constitue le système MKSA.

L'ampère est défini comme « l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur ». La constante  $\mu_0$  se trouve ainsi fixée à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ .

La Conférence adopte également le newton comme unité de force (force capable de procurer à une masse de 1 kg une accélération de  $1 \text{ m/s}^2$ ). Le joule, alors défini comme l'énergie dégagée pendant une seconde par un courant d'un ampère traversant une résistance d'un ohm, devient également le travail d'une force d'un newton déplaçant son point d'application d'un mètre dans sa direction. Les unités mécaniques et électriques sont enfin unifiées.

## Les trois autres unités de base du SI : la candela, le kelvin et la mole

Unité de base du système international depuis ses débuts, la candela (cd) est définie depuis 1979 comme « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $1/683$  watt par stéradian » ( $\text{W sr}^{-1}$ ). Elle est donc définie en termes strictement physiques, comme une grandeur énergétique. Elle est cependant nécessaire pour la photométrie, dont l'objectif est de mesurer la lumière en rendant compte de la sensation visuelle d'un observateur humain. À cet effet, la

Commission internationale de l'éclairage (CIE) utilise une fonction d'efficacité spectrale  $V(\lambda)$  qui rend compte de la sensibilité spectrale relative de l'œil humain, et dont la valeur maximale vaut 1 pour  $\lambda = 555 \text{ nm}$ , c'est-à-dire pour une fréquence de 540 THz. Les unités dérivées de la candela sont le lumen (lm) homogène à une puissance, unité de flux lumineux telle que  $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$ , et le lux (lx) unité d'éclairement telle que  $1 \text{ lx} = 1 \text{ cd sr m}^{-2}$ .

D'abord degré kelvin ( $^\circ\text{K}$ ) en 1954, puis kelvin (K) depuis 1968, le kelvin est l'unité de température, définie comme « la fraction  $1/273,16$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». Cette définition, complètement indépendante de celles des autres unités du SI, est réalisée en pratique par l'échelle internationale de température : pour chaque domaine de température, des très basses aux très élevées, une loi physique est utilisée qui donne une relation entre une grandeur physique et la température. Cette grandeur peut être la pression d'un gaz, la résistance d'un conducteur, le rayonnement du corps noir, etc.

La dernière unité du système international, d'une grande utilité pour les chimistes, est la mole (mol). « La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Les entités élémentaires doivent être spécifiées ; elles peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. Avec cette définition, la masse molaire du carbone 12 s'écrit ( $^{12}\text{C}$ ) =  $12 M_u$ , où la constante de masse molaire  $M_u$  vaut exactement  $10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ .

## Les atomes pour définir la seconde et le mètre

Lors de la naissance du SI en 1960, la 11<sup>e</sup> CGPM redéfinit la seconde non plus à partir du jour solaire moyen, mais comme une fraction de l'année tropique 1900 (l'année tropique est l'intervalle de temps pour que le Soleil, vu de la Terre, retourne à la même position dans le cycle des saisons). Plus précise que la précédente définition, celle-ci se révèle rapidement insuffisante pour les besoins de la métrologie.

Elle est donc remplacée en 1967 par une définition atomique : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Le besoin d'universalité est toujours satisfait

puisque tous les atomes d'un même élément chimique sont identiques entre eux. L'horloge à césium, nouvel étalon de temps et de fréquences, peut être réalisée dans chaque laboratoire, en suivant les recommandations de la *mise en pratique* diffusée par le BIPM.

Le mètre lui aussi est redéfini en 1960 à partir d'un atome, en abandonnant comme étalon le prototype international en platine iridié de 1889. Il s'exprime alors en fonction de la longueur d'onde dans le vide de la transition orangée du krypton 86. Mais cette nouvelle définition, elle aussi, est vite dépassée. La même année en effet, le premier laser voit le jour et dès les années suivantes des lasers variés et de plus en plus performants sont mis au point. Asservis sur des transitions atomiques étroites, les lasers fournissent des références de fréquence dont on peut mesurer très précisément à la fois la longueur d'onde  $\lambda$  par interférométrie et la fréquence  $f$  par des dispositifs complexes appelés chaînes de fréquences. Dans les années 1970, de telles mesures sont réalisées sur un laser hélium-néon à 3,39  $\mu\text{m}$  stabilisé sur une raie du méthane. Le produit  $\lambda \times f$  est égal à  $c$ , la vitesse de la lumière dans le vide. Il donne une mesure de  $c$  dont la précision est améliorée d'un facteur 100 par rapport aux mesures antérieures, mais qui est limitée par celle de l'étalon de longueur, la lampe à krypton, c'est-à-dire par le choix de la définition du mètre. C'est pourquoi en 1983, la 17<sup>e</sup> CGPM choisit de redéfinir le mètre en attribuant une valeur exacte à la vitesse de la lumière : « Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1 / 299 792 458 seconde ». On a donc  $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$  et il n'y a plus qu'un seul étalon pour les longueurs et les temps/fréquences : l'horloge à césium.

De toutes les unités du SI, la seconde et le mètre sont celles qui sont définies avec la meilleure exactitude. On sait à ce jour réaliser des horloges à césium qui ont une exactitude relative de quelque  $10^{-16}$ , ce qui correspond à moins d'une seconde d'erreur sur 300 millions d'années ! Mais la recherche continue et d'autres candidats atomiques sont bien placés pour détrôner un jour le césium.

Des atomes, comme par exemple le strontium Sr ou le mercure Hg, et des ions comme  $\text{Al}^+$  ou  $\text{Hg}^+$  possèdent des raies dans le domaine optique qui pourraient à l'avenir permettre de réaliser des horloges encore 100 fois plus performantes ou mieux.

## Le SI bientôt redéfini

Si la redéfinition de la seconde n'est pas pour l'instant à l'ordre du jour, celles du kg, de l'ampère, de la mole et du kelvin, sont maintenant d'actualité. C'est ce que nous discuterons dans un deuxième article dans lequel nous présenterons les motivations de ces redéfinitions et la méthode qui sera suivie.

Pour conclure, la figure 3 montre l'interconnexion actuelle entre les unités de base du système international. Ces unités s'appuient soit sur un artefact matériel (le kg), soit sur l'attribution d'une valeur numérique à une quantité ou un phénomène physique de référence (structure hyperfine du césium, masse molaire du  $^{12}\text{C}$ , point triple de l'eau) ou enfin à une constante fondamentale de la physique ( $c$  ou  $\mu_0$ ). Comme nous le verrons, c'est cette dernière voie qu'il est prévu de suivre en 2018 pour redéfinir quatre des unités de base du SI.

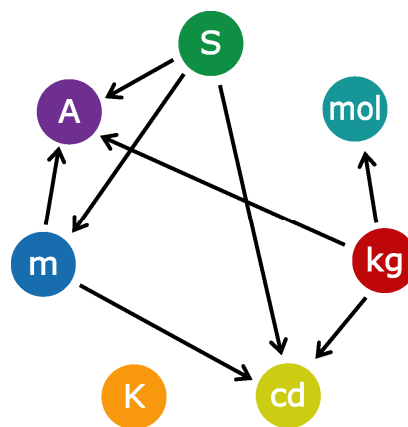


Fig.3. Représentation des interconnexions entre les 7 unités de base du SI actuel.

### Pour en savoir plus sur la naissance du mètre et la mesure du méridien terrestre sous la Révolution

- *La méridienne* de Denis Guedj, Robert Laffont (1997) et poche "Points" (2008)
- *Le mètre du monde* de Denis Guedj, Seuil (2000) et poche "Points" (2011)
- *Mesurer le Monde. L'incroyable histoire de l'invention du mètre 1792-1799* de Ken Adler, Flammarion (2005)

À consulter sur la définition des unités et leur histoire : <http://www.bipm.org/fr/about-us/>

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Histoire des sciences, actualité et évaluation en classe de 3<sup>e</sup>

Roseline Primout, enseignante en physique-chimie au collège

*Aussi bien au collège qu'au lycée, les élèves doivent savoir extraire et trier des informations. Les sujets donnés ces dernières années au BAC en sont une démonstration ainsi que les Annales zéro DNB (Diplôme national du brevet) à compter de la session 2017 parues le mois dernier au BO.*

*À partir de 2017, l'épreuve du DNB portera sur les sciences et la technologie en plus des mathématiques. Parmi la physique-chimie, les SVT et la technologie, deux de ces disciplines seront tirées au sort. Dès septembre 2016, les enseignants devront entraîner leurs élèves à savoir exploiter des documents variés.*

La difficulté pour l'enseignant(e) est de trouver des documents divers autres que des écrits sur un thème donné. Le contrôle donné en annexe présente un texte, un graphique et un tableau de données dont volontairement, beaucoup sont inutiles.

L'évaluation a été réalisée en classe de 3<sup>e</sup>, après avoir traité la partie « poids et masse d'un corps ». La 9<sup>e</sup> planète faisait parler d'elle sur les médias. Utiliser l'actualité dans un sujet de contrôle marque mieux les esprits des élèves qu'un diaporama présenté en début de cours.

Ce sujet fait appel à des connaissances en physique mais aussi en mathématiques avec la lecture graphique et la proportionnalité. À ce stade de l'année, les élèves n'ont pas encore abordé les applications affines, ils ne savent pas calculer le coefficient directeur d'une droite.

L'intérêt du texte est multiple car, outre l'actualité, il parle de l'évolution de la découverte des dernières planètes du Système solaire montrant l'importance des mathématiques et le fait que la science dépend des instruments d'observation. Ainsi, il réunit histoire des sciences et actualité.

Lors de cette évaluation, les difficultés des élèves ont porté sur :

- la précision de la signification de termes comme la différence entre une prédiction et une découverte, la confusion entre la date de la découverte de Pluton et la date des premières photos prises ;

- les justifications par citations incomplètes ou hors sujet ;

- l'inutilisation du graphique en remplaçant les lectures graphiques par des calculs en reprenant la valeur de l'intensité de la pesanteur calculée à l'exercice 2 ;

- l'inutilisation du tableau en ne récupérant pas la valeur de l'intensité de la pesanteur de Neptune ou l'unité de l'intensité de la pesanteur en cas de trou de mémoire ;

- l'oubli que la masse ne change pas selon le lieu si bien que sur la 9<sup>e</sup> planète le robot a toujours une masse de 950 kg ; certains élèves n'ont pu terminer la question 2 de l'exercice 2.

Peut-être ce contrôle pourrait-il être élargi en intégrant des documents de géologie ? Un texte sur la vie extraterrestre ? ...

### Bibliographie

[http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/6/DNB\\_2017\\_Sujet\\_zero\\_MathsSciences1\\_MSVT\\_T\\_563816.pdf](http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/6/DNB_2017_Sujet_zero_MathsSciences1_MSVT_T_563816.pdf)

[http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/4/DNB\\_2017\\_Sujet\\_zero\\_MathsSciences2\\_MPCT\\_563814.pdf](http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/4/DNB_2017_Sujet_zero_MathsSciences2_MPCT_563814.pdf)

[http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/6/DNB\\_2017\\_Sujet\\_zero\\_MathsSciences3\\_MSVT\\_T\\_563816.pdf](http://cache.media.eduscol.education.fr/file/DNB/81/6/DNB_2017_Sujet_zero_MathsSciences3_MSVT_T_563816.pdf)



Nom :  
Prénom :

## DEVOIR SUR LA GRAVITÉ

**Toute réponse doit être rédigée en reprenant l'intitulé de la question et sans abréviation.  
Vérifier l'orthographe avec l'accord sujet / verbe ;  
déterminant / nom / adjectif ...**

### Exercice n° 1 : (7 points)

- |                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1) Qui a prédit l'existence de Neptune ?                                                                                                                                                                                                             | /1 |
| 2) Depuis les années 1990, quel type d'astre est découvert en grand nombre ?                                                                                                                                                                         | /1 |
| 3) En quelle année les premières photos de Pluton ont-elles été prises par la sonde New Horizons ?                                                                                                                                                   | /1 |
| 4) La neuvième planète a-t-elle été découverte ? Justifiez vos propos en citant le texte.                                                                                                                                                            | /1 |
| 5) Sachant que la sphère de comètes terminant le Système solaire a un rayon compris entre 3 000 milliards* de km et 15 000 milliards* de km, la neuvième planète est-elle plus proche ou plus loin du Soleil que les comètes ? Justifiez vos propos. | /1 |
| 6) La neuvième planète est en orbite autour du Soleil. Que signifie l'expression « être en orbite » ?                                                                                                                                                | /1 |
| 7) Quelle différence existe-t-il entre une planète et une planète naine ?                                                                                                                                                                            | /1 |

\*1 milliard = 1 000 000 000

### Exercice n° 2 : (5 points)

Sur Terre, un robot a un poids de 9 310 N et une masse de 950 kg.

- |                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1) Calculer le poids de ce robot de 950 kg posé sur Neptune.                                                                                                                                                           | /2 |
| 2) On suppose que ce robot a un poids d'environ 10 260 N posé sur la neuvième planète. Calculer l'intensité de pesanteur de la neuvième planète.                                                                       | /2 |
| 3) Pour déposer un robot sur la surface d'un astre, il est transporté par une sonde qui le largue, suspendu à un filin. Lors de cette descente, le robot est-il en pesanteur ou impesanteur ? Justifiez votre réponse. | /1 |

### Exercice n° 3 : (6 points)

- |                                                                                                                                           |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1) Le poids et la masse sont-ils proportionnels sur la neuvième planète, pourquoi ?                                                       | /2   |
| 2) a. Par lecture graphique, trouver le poids sur la neuvième planète d'un objet ayant une masse de 175 kg.                               | /0,5 |
| b. Placer ce point A sur le graphique.                                                                                                    | /0,5 |
| 3) a. Par lecture graphique, trouver la masse d'un objet sur la neuvième planète ayant un poids de 1 200 N.                               | /0,5 |
| b. Placer ce point B sur la courbe.                                                                                                       | /0,5 |
| 4) La courbe du poids d'un objet sur Neptune en fonction de sa masse, serait-elle située au-dessus ou en-dessous de la droite, pourquoi ? | /2   |

<b>Je sais extraire et trier des informations : compétence n° 1</b>	
<b>Je sais effectuer et présenter un calcul : compétence n° 2</b>	
Présentation, soin de l'écriture ... :	/2
<b>NOTE :</b>	<b>/20</b>

#### **Document 1**

Astre	Terre, à Paris	Terre, à Kourou	À la surface d'Uranus	À la surface de Neptune	Sur le sol lunaire
Masse de l'astre en kg	$5,97 \times 10^{24}$		$8,68 \times 10^{25}$	$1,02 \times 10^{26}$	$7,35 \times 10^{22}$
Rayon de l'astre à l'équateur en km	6 400		25 560	24 760	1 700
Distance astre / Soleil en km	150 millions		2 880 millions	4 500 millions	
Valeur de l'intensité de la pesanteur en N/kg	9,8	9,7	8,9	11,2	1,6

## Document 2

### Cinq choses à savoir sur la nouvelle « neuvième planète »

Le Monde.fr | 22.01.2016 à 19h22 • Mis à jour le 26.01.2016 à 13h38 | Par [Gary Dagorn](#)

Les travaux de Brown et Batygin reposent essentiellement sur une démonstration mathématique. Depuis les années 1990 et l'avènement des très grands télescopes, les astronomes ont découvert plusieurs petites planètes bien au-delà de l'orbite de Pluton, telles Sedna ou Éris, découvertes en 2003. Chose curieuse : à mesure que l'on observait ces planètes naines, on remarqua qu'elles décrivaient des orbites similaires, très allongées, en forme d'ovale (qu'on qualifie d'elliptiques).

Ces orbites partagent également à peu près le même plan, c'est-à-dire qu'elles sont toutes comprises dans un plan incliné, ce qui a étonné les astronomes.

La présence d'une planète à proximité permet d'expliquer la similarité de ces orbites : un corps suffisamment massif peut en effet avoir une forte influence gravitationnelle sur ces planètes naines. Pour le vérifier, M. Brown et M. Batygin ont calculé quelles devaient être la masse et l'orbite de cette planète pour correspondre aux observations faites depuis plusieurs années.

Ce genre de calculs n'a rien de nouveau : c'est en effet de cette façon que Neptune a été découverte en 1846.

Remarquant des anomalies dans l'orbite d'Uranus, le mathématicien et astronome français Urbain Le Verrier déduisit que ses mouvements pouvaient être causés par une huitième planète plus lointaine. Il calcula précisément la masse et la position de la planète en question, permettant à Johann Galle, un confrère allemand, d'observer pour la première fois le bleu éclatant de Neptune quelques jours après la publication de ses résultats.

Si cette neuvième planète existe, la repérer sera probablement long et difficile pour plusieurs raisons. La distance la séparant du Soleil est si grande (entre 30 et 180 milliards de kilomètres, soit entre 6 et 40 fois la distance Neptune-Soleil) qu'elle ne réfléchirait que très peu de lumière.

La planète X a souvent été représentée et imaginée comme une planète rocheuse, à l'instar de la Terre. Pourtant, s'il s'avère que la neuvième planète décrite par M. Brown et M. Batygin existe bel et bien, elle sera gazeuse. Aucune chance d'y atterrir donc.

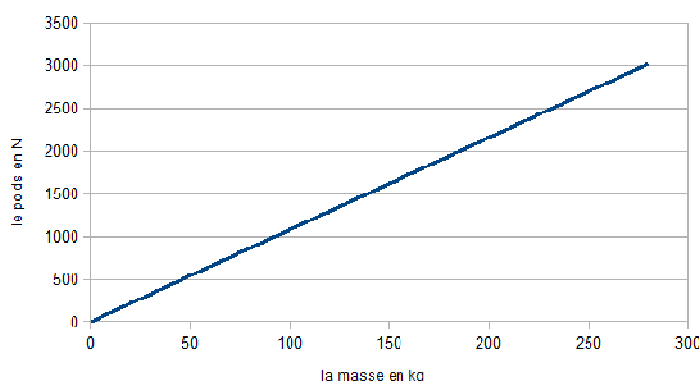
Pourquoi ? Parce que cette planète a une masse 10 fois plus importante que celle de la Terre. Elle devrait avoir un diamètre de deux à quatre fois supérieur à celui de notre planète bleue. Avec une telle taille, il est improbable qu'elle soit rocheuse. Plusieurs études scientifiques ont conclu que la taille maximale d'une planète rocheuse ne pouvait excéder environ deux fois le diamètre de la Terre. Il s'agirait donc plus probablement d'une planète gazeuse d'une taille intermédiaire entre la Terre et Neptune.

Il est possible que, dans un avenir proche, nous puissions observer cette neuvième planète. Le successeur du télescope spatial Hubble, le télescope James-Webb – dont la mise en service est prévue pour 2018 – sera probablement en mesure de fournir des images d'un corps si lointain. Mais ces images se résumeront probablement à quelques pixels de faible luminosité au milieu du ciel.

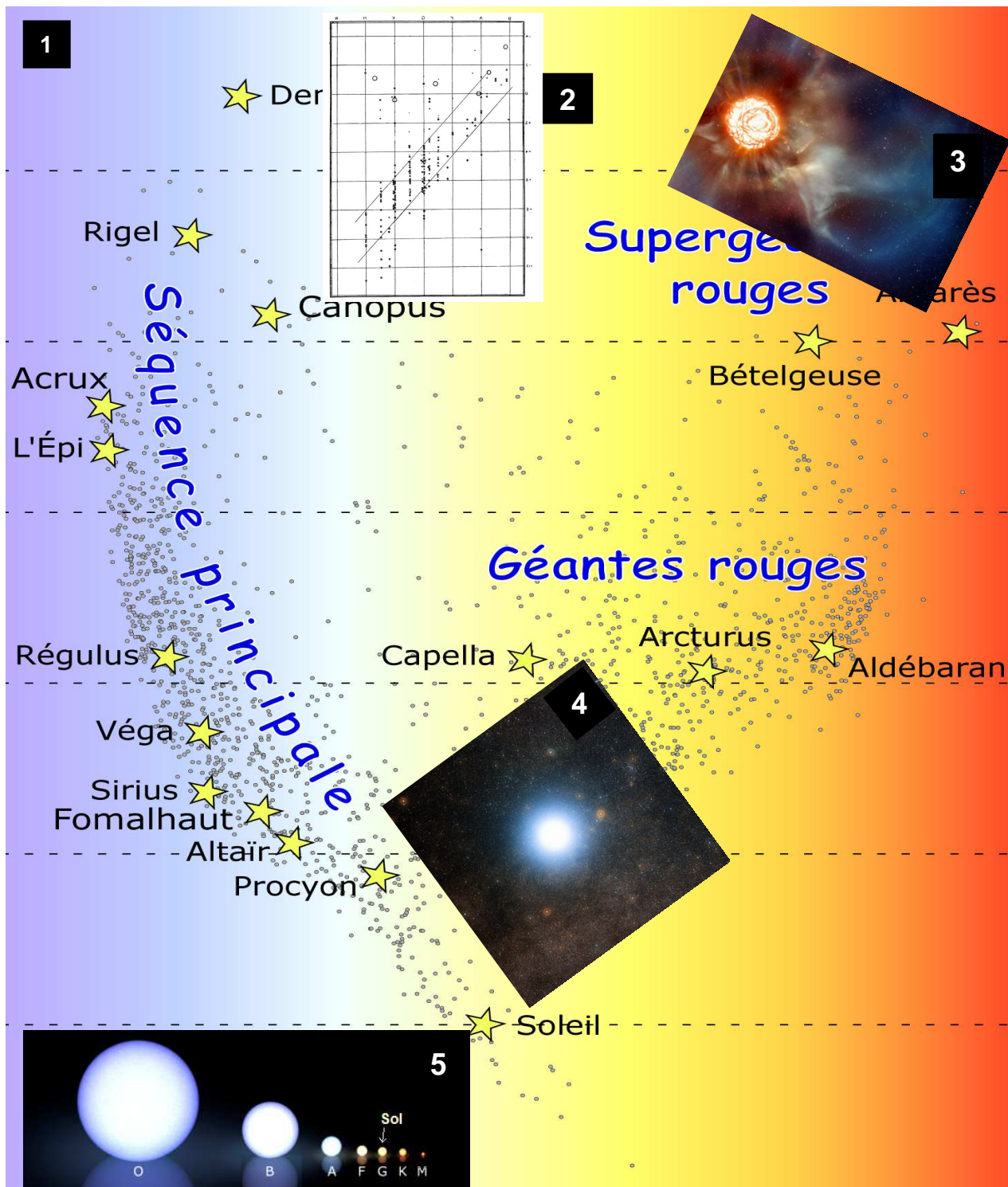
Il a fallu patienter 85 ans entre la découverte de Pluton, en 1930, et les premières photographies prises par la sonde américaine New Horizons.

## Document 3

Le poids en fonction de la masse sur la 9<sup>e</sup> planète



# THÈME : LES ÉTOILES



1. Diagramme HR des 1 600 étoiles les plus brillantes du ciel. On remarque l'absence de naines rouges, trop peu lumineuses.
2. Diagramme de Henry Norris Russell tel qu'il fut publié par Nature en 1914.
3. Vue d'artiste de l'étoile supergéante Bételgeuse, d'après les dernières images du VLT. L'étoile possède un vaste panache de gaz presque aussi grand que notre Système solaire et une gigantesque bulle bouillante à sa surface.
4. Vue à grand champ du ciel autour de l'étoile Alpha Centauri. La taille de l'étoile sur la photo est due à la diffusion de la lumière. Alpha Centauri est le système stellaire le plus proche du Système solaire (crédit ESO/Digitized Sky Survey 2).
5. Taille des étoiles de la séquence principale (image Fernando de Gorocica/Wikimedia Commons).

## Le(s) diagramme(s) Hertzsprung-Russell

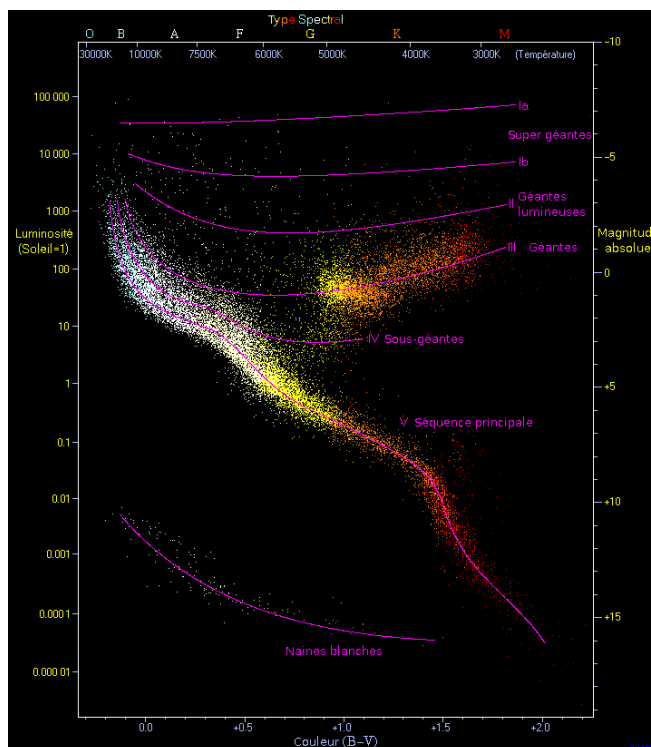
Eric Josselin, LUPM, Université de Montpellier

*Le diagramme HR, introduit au début du XX<sup>e</sup> siècle, est un outil puissant en astrophysique, permettant de suivre l'évolution des étoiles, mais aussi de mesurer la distance et l'âge des amas stellaires. Mais sa construction est moins aisée qu'il n'y paraît...*

### Un peu d'histoire...

En 1911, Ejnar Hertzsprung, un astronome danois, construit un diagramme dans lequel il reporte un indice de couleur (indicateur de température) en fonction de la magnitude photographique apparente (mesure de l'éclat apparent, cf. ci-dessous) pour les étoiles de l'amas des Hyades, dont l'extension est suffisamment petite par rapport à la distance pour qu'on puisse considérer que les différences d'éclat apparent entre les étoiles membres reflètent des différences de luminosité intrinsèques. Deux ans plus tard, Henry Russell construit un diagramme similaire. Il considère cette fois 220 étoiles pour lesquelles la distance est connue (via la mesure de leur parallaxe), et reporte donc le type spectral en fonction de la magnitude absolue. Dans les deux cas, ils constatent que les étoiles se retrouvent très majoritairement le long d'une bande allant des étoiles froides et peu lumineuses aux étoiles chaudes et lumineuses. Hertzsprung baptise cette bande la séquence principale, et Russell, la séquence des naines. Les étoiles en dehors de cette bande sont essentiellement des étoiles froides et lumineuses, des étoiles géantes (le terme est aussi introduit par Russell) rouges. Le diagramme Hertzsprung-Russell, ou diagramme HR, était né. L'histoire retient la dénomination d'Hertzsprung. À noter que le diagramme de Russell comporte également une étoile chaude très peu lumineuse, omicron Eridani B, qui s'avérera être une naine blanche.

L'idée que ce diagramme représente un outil pour suivre l'évolution des étoiles émerge rapidement, mais il faudra attendre les années 1950 pour qu'une théorie cohérente de l'évolution stellaire émerge. Entre temps, différentes théories circulent. L'une des premières suggère que les étoiles évoluent le long de la séquence principale, des types spectraux chauds vers les types froids. De cette époque datent les appellations erronées, mais toujours employées, de type « précoce » et de type « tardif ».



*Fig.1. Exemple de diagramme HR. En abscisse, on place la température de surface de l'étoile (décroissante de gauche à droite), qui correspond à sa couleur ou à son type spectral ; en ordonnée, sa luminosité ou sa magnitude absolue. Chaque point représente une étoile.*

### Propriétés de base

Le diagramme HR moderne consiste à représenter la luminosité (ou un indicateur de luminosité) en fonction de la température effective (ou d'un indicateur). La température effective, c'est à dire la température du corps noir rayonnant le même flux que l'étoile, correspond approximativement à la température de la photosphère (mais cette dernière définition devient ambiguë pour les étoiles de faible gravité de surface, les géantes, qui ont une atmosphère très étendue) ; elle croît de droite à gauche.

Ces deux paramètres, température effective  $T_{eff}$  et luminosité  $L$ , sont reliés par la relation :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

où  $\sigma$  désigne la constante de Stefan-Boltzmann et  $R$  le rayon de l'étoile. Dans le diagramme HR, les axes étant en échelle log - log, les lignes d'iso-rayon sont donc des droites<sup>1</sup>, comme indiqué sur la figure 2. Les appellations des différentes classes d'étoiles se justifient alors clairement. Les étoiles naines de la séquence principale ont un rayon proche du rayon solaire. Les géantes et supergéantes ont des rayons de quelques dizaines à quelques centaines de rayons solaires (les plus grosses étoiles, des supergéantes rouges tel que VY Canis Majoris, ont des rayons allant jusqu'à 1500 rayons solaires !). Les naines blanches ont des rayons comparables à ceux des planètes. Dans cette figure est aussi indiquée la correspondance entre température et type spectral (établi par Cecilia Payne dans les années 1920).

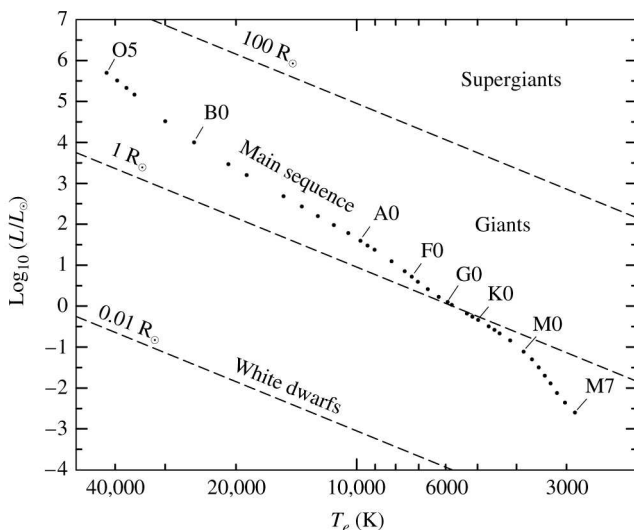


Fig.2. Diagramme HR théorique, où apparaissent les droites d'iso-rayon en pointillés. Les types spectraux sont notés sur la séquence principale.

La séquence principale correspond en fait à une séquence de masse. Les étoiles chaudes sont des étoiles massives, jusqu'à 100 masses solaires environ. Les étoiles froides sont des étoiles de (très) faible masse, les moins massives ayant une masse d'environ un dixième de masse solaire. Ces étoiles sont toutes dans le même stade évolutif : elles sont dans la phase de combustion de l'hydrogène en hélium au cœur, la réaction de fusion ayant le plus grand rendement énergétique. C'est donc la phase évolutive la plus longue (jusqu'à 90 % de la vie

<sup>1</sup> En passant aux logarithmes, la formule  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  devient  $\log L = \log(4\pi R^2 \sigma) + 4 \log T$ . Si  $\log T$  est en abscisse ( $x$ ) et  $\log L$  en ordonnée ( $y$ ), on obtient une équation de droite ( $y = 4x + b$ ) où  $b$  dépend du rayon  $R$ .

d'une étoile) : c'est pour cette raison que la majorité des étoiles s'y trouvent. Les géantes rouges sont des étoiles de faible masse (moins de 10 masses solaires, les plus nombreuses à la naissance) dans un stade évolué (fusion de l'hydrogène en couche, puis fusion de l'hélium au cœur ou en couche autour du cœur qui finit par devenir inerte d'un point de vue nucléaire).

## Construction d'un diagramme HR

La luminosité et la température effective ne sont pas mesurables directement. Un diagramme HR observationnel est donc basé sur des indicateurs de ces deux grandeurs.

### Petit rappel : les magnitudes

L'éclat apparent (ou flux reçu sur Terre)  $E$  d'une étoile est généralement exprimé en magnitude :

$$m = -2,5 \log (E/E_0) \text{ (voir note } ^2)$$

où  $E_0$  est un éclat de référence, choisi en fonction l'échelle de magnitude choisie. La plus courante est basée en prenant l'étoile Vega ( $\alpha$  Lyrae) comme référence. Le choix d'une échelle logarithmique est basé sur la perception visuelle (échelle de Pogson, 1859). Le facteur  $-2,5$  permet de se raccorder à l'échelle établie par Hipparque au II<sup>e</sup> siècle av. J.-C.

On peut définir la magnitude bolométrique, basée sur le flux intégré sur l'ensemble du spectre électromagnétique. En pratique, on ne peut mesurer la magnitude que dans un domaine limité, défini par un filtre. Historiquement, on mesurait les magnitudes photographiques, correspondant approximativement au filtre bleu (B) moderne. Le filtre V, autour de 550 nm, est le plus courant. Pour remonter à la magnitude bolométrique à partir de celle mesurée dans un filtre donné, il faut appliquer une correction bolométrique, qui dépend du type spectral de l'étoile. On peut également calculer un indice de couleur qui est simplement la différence de magnitudes dans deux filtres. Une couleur peut être un indicateur de température, mais là aussi la conversion n'est pas universelle.

Enfin, on peut calculer la magnitude absolue  $M$  si on connaît la distance (par la méthode des parallaxes, par exemple). Cette magnitude absolue correspond à la magnitude qu'aurait l'étoile à une distance de référence, choisie à 10 pc. On définit alors le module de distance :

$$m - M = 5 \log (\text{distance en parsec}) - 5$$

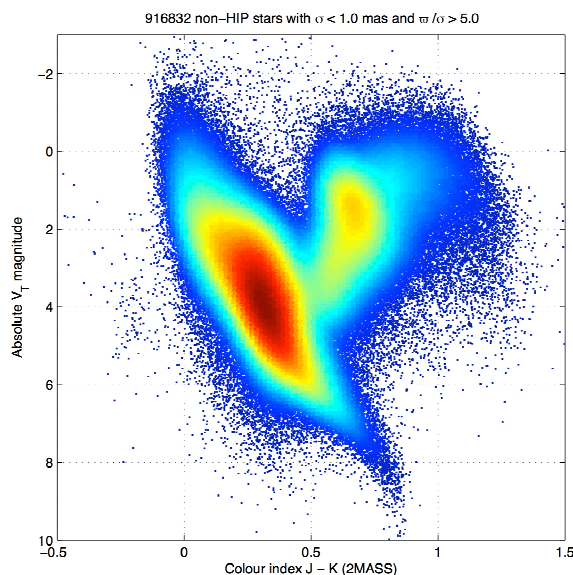
<sup>2</sup> Il s'agit bien ici, comme dans la suite, du logarithme décimal.

Enfin, il ne faut pas oublier de corriger les magnitudes de l'extinction interstellaire, pour avoir des mesures qui reflètent bien les propriétés intrinsèques de l'étoile observée.

## Diagramme photométrique

À partir de mesures de magnitudes, on peut construire un diagramme HR photométrique. Le plus classique est la magnitude absolue en bande V en fonction de l'indice de couleur B-V.

Un exemple récent de diagramme photométrique est donné figure 4. En ordonnée, on a la magnitude V absolue, obtenue grâce aux premières mesures de parallaxes provenant de la mission spatiale Gaia, lancée en décembre 2012 (la photométrie en bande V avait été obtenue avec HIPPARCOS, le prédécesseur de Gaia, lancé en 1989). La couleur en abscisse est une couleur infrarouge (les filtres J et K correspondent à des longueurs d'onde de 1,25 et 2,2  $\mu\text{m}$  approximativement), issues du relevé complet du ciel 2MASS (2 Micron All Sky Survey) réalisé dans les années 1990 (cette couleur infrarouge est sensible à la température, et l'infrarouge est peu affecté par l'extinction interstellaire). Plus de 900 000 étoiles y sont reportées. On reconnaît bien la séquence principale et la région des géantes rouges. La forme de ces régions diffère cependant de celles qu'on verrait dans un diagramme température – luminosité, puisque la conversion n'est pas constante. Étant donné le nombre d'étoiles, on a choisi de représenter plutôt la densité d'étoiles par une couleur, du bleu (peu d'étoiles) au rouge sombre (le plus dense).



© ESA

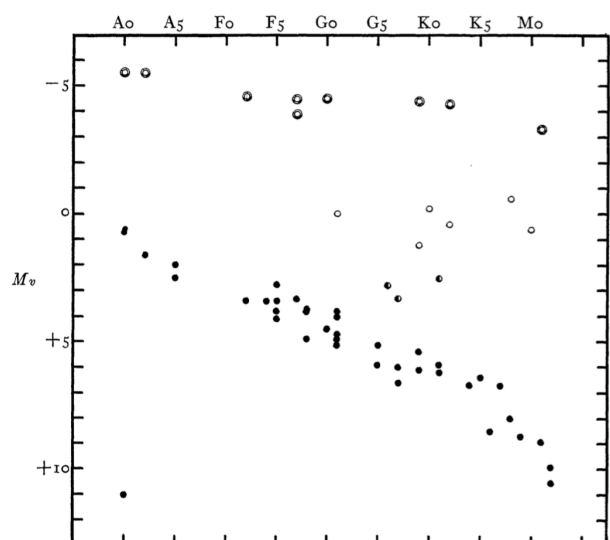
**Fig.3.** Premier diagramme HR issu des données obtenues avec le satellite GAIA, mission astrométrique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Ce diagramme est essentiellement limité en magnitude : les étoiles naines rouges sont très nombreuses, mais peu lumineuses, et donc observables uniquement dans le voisinage solaire. Au contraire, les étoiles bleues, massives, sont très rares mais détectables à beaucoup plus grande distance. La densité de points dans ce diagramme ne reflète donc pas l'importance relative de chacune des populations stellaires dans la Galaxie ! Les étoiles de type solaire se situent dans la zone la plus dense, représentée en rouge foncé.

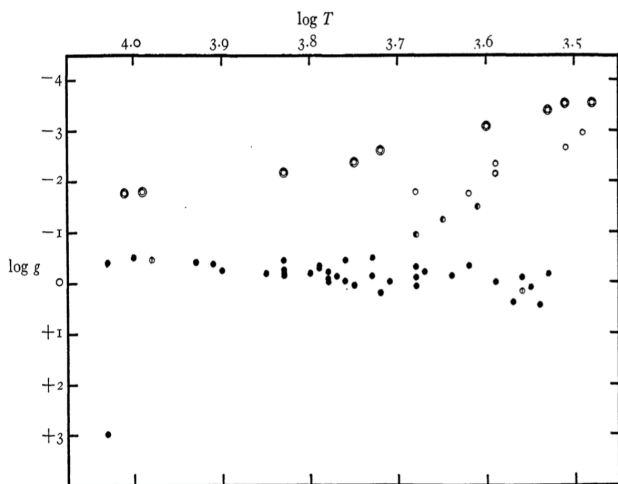
## Diagramme spectroscopique

Les données spectroscopiques, analysées via la comparaison avec des spectres synthétiques (issus de modèles d'atmosphères stellaires), fournissent aussi des paramètres permettant de construire un diagramme HR. La température effective étant un des paramètres qui définissent les modèles d'atmosphère, l'abscisse est immédiate.

Par contre, les spectres sont très peu sensibles à la luminosité totale des étoiles. On reporte donc en ordonnée la gravité de surface ( $g = GM/R^2$ , où  $G$  est la constante de gravitation universelle,  $M$  la masse de l'étoile et  $R$  son rayon). Une faible gravité de surface va correspondre à une atmosphère stellaire plus diluée, et donc des collisions entre atomes plus rares. Or les collisions engendrent un élargissement spécifique des raies spectrales ; on peut donc déterminer la gravité à partir des profils de raies (ceci nécessite donc des spectres à très haute résolution spectrale, de l'ordre de quelques km/s). Comme mentionné ci-dessus, la connaissance de la température et du rayon de l'étoile permet de calculer la luminosité. Mais comme la masse des étoiles est l'un des paramètres les plus difficiles à déterminer, on se contente de la gravité...



**Fig.4a.** Diagramme HR classique.



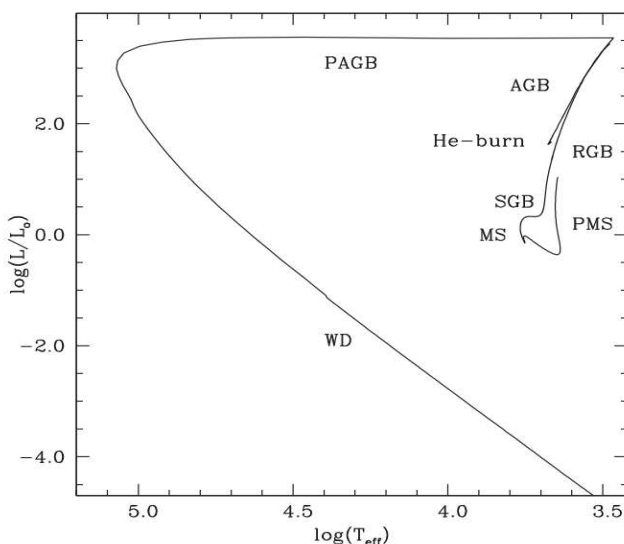
**Fig.4b.** Diagramme HR des mêmes étoiles mais gradué en gravité de surface ( $g$ ). On voit la différence d'allure avec le précédent mais la séparation des catégories est maintenue.

Les symboles correspondent aux naines (points), sous-géantes (cercles à moitié remplis), géantes (cercles vides) et supergéantes (cercles doubles). L'étoile tout en bas est une naine blanche, la même que celle de Russell. La gravité est en unités solaires. (W. W. Keenan, 1973).

L'intérêt de ce diagramme est qu'il peut aussi être produit par les codes d'évolution stellaire, ce qui permet d'effectuer des comparaisons directes entre observations et modèles.

## Utilisation d'un diagramme HR

L'intérêt immédiat du diagramme HR est de suivre l'évolution des étoiles. La figure 5 permet de suivre l'évolution d'une étoile comparable au Soleil.



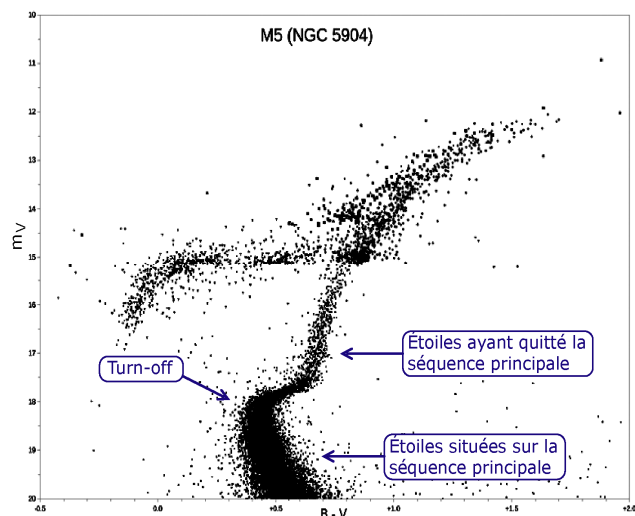
**Fig.5.** Tracé évolutif d'une étoile de 1 masse solaire dans le diagramme HR.

Les stades évolutifs mentionnés sur la figure sont, dans l'ordre chronologique :

- pré-séquence principale (PMS) ;
- séquence principale (MS) ;
- branche des sous-géantes (SGB) ;
- branche des géantes rouges (RGB) ;
- début de la combustion de l'hélium (He-burn) ;
- branche asymptotique des géantes (AGB) ;
- post-AGB (ou pré-nébuleuse planétaire) ;
- naine blanche (WD).

Le diagramme HR des amas stellaires permet aussi de mesurer la distance et l'âge de ces amas. En effet, si on compare le diagramme HR de deux amas, leurs séquences principales sont parallèles, avec un décalage vertical qui ne dépend que de la distance relative de ces deux amas. Si on dispose d'un diagramme calibré en distance, on peut déduire de ce décalage la distance de tout autre amas.

Concernant l'âge, on utilise le fait que la durée de vie des étoiles diminue quand leur masse augmente (approximativement, la durée de vie est inversement proportionnelle au carré de la masse). Dans un amas (ouvert ou globulaire), toutes les étoiles se sont formées à peu près à la même époque. Au cours du temps, la séquence principale va donc se dépeupler progressivement, en partant du haut, des étoiles les plus massives. Le point le plus haut de la séquence principale encore peuplée (appelé point de « turn-off ») est donc un indicateur de l'âge de l'amas.



**Fig.6.** Diagramme HR des étoiles de l'amas globulaire M5. L'amas a un module de distance  $m - M$  d'environ 14,5 (ce qui correspond à une distance d'environ 8 000 parsecs) et un âge de 11,5 milliards d'années.

Ces deux aspects sont illustrés dans l'un des exercices conçus par l'ESA et l'ESO, directement utilisables en classe (niveau lycée). Il vise à déterminer la distance et l'âge de l'amas globulaire M12, à partir d'observations obtenues au VLT ([http://www.eso.org/public/products/education/edu\\_0042/](http://www.eso.org/public/products/education/edu_0042/))

## Magnitude apparente d'une étoile

Sylvie Thiault, professeur de mathématiques au lycée J-P Sartre de Bron

Je propose ce travail en accompagnement personnalisé en mathématiques à une classe de Terminale S après l'étude des fonctions logarithmes, en janvier. Il est précédé d'une observation du ciel à l'œil nu, quand la météo le permet... à défaut une brève introduction à la différence d'intensité et de couleur des étoiles à l'aide du logiciel Stellarium.

BO n° 8 du 13 octobre 2011, extrait des commentaires : « On évoque la fonction logarithme décimal pour son utilité dans les autres disciplines... » ;

« [SPC] Intensité sonore, magnitude d'un séisme, échelle des pH ».

Les élèves avaient déjà étudié en physique l'intensité sonore et connaissaient également l'échelle des pH. J'ai choisi d'étendre les suggestions d'utilisation des logarithmes décimaux aux magnitudes des astres.

### Magnitude apparente

Hipparque, mathématicien et astronome grec du II<sup>e</sup> siècle av J.-C., avait proposé de classer les étoiles en fonction de leur éclat, sur une échelle de 1 à 6. Les étoiles les plus brillantes sont de grandeur 1 et les moins lumineuses de grandeur 6.



Au XIX<sup>e</sup> siècle, Fechner montre que si on double la puissance reçue, que ce soit pour un son ou un rayonnement, nous percevons non pas une puissance double, mais une variation logarithmique. Une suite de puissance lumineuse comme 1, 2, 4, 8, 16 sera perçue par l'œil et le cerveau comme 1, 2, 3, 4, 5.

Pogson, astronome anglais adapte cette loi aux magnitudes des astres.

La magnitude  $m$  en fonction de l'éclat perçu  $E$  doit donc être de la forme :

$$m = k \log(E) + k'$$

(l'éclat est la puissance reçue par unité de surface)  
Pour rester en accord avec la classification ancienne, on a décidé qu'entre une étoile de magnitude 1 et une étoile de magnitude 6, le rapport des éclats apparents est 100.

1. Soit  $E_1$  l'éclat d'une l'étoile  $S_1$  de magnitude 1 et  $E_2$  l'éclat d'une l'étoile  $S_2$  de magnitude 6.

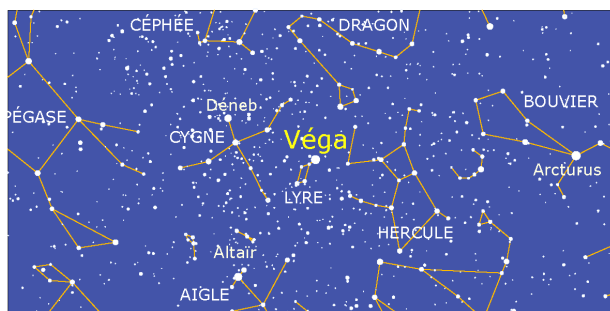
On a donc :  $E_1/E_2 = 100$ .

On peut alors écrire :  $1 = k \log(E_1) + k'$   
et  $6 = k \log(E_2) + k'$ .

En utilisant les deux relations ci-dessus, calculer  $k$ .

2. L'étoile Véga, de la constellation de la Lyre, est très brillante. On a fixé sa magnitude apparente à 0.

On notera  $E_0$  l'éclat apparent de Véga.



Carte d'identité de l'étoile Véga (source : Stellarium).

Véga (alpha Lyr - 3 Lyr) - HIP 91262

Type : étoile variable pulsante

Magnitude : 0.00

Magnitude absolue : 0.57

Type spectral : A0Vvar

Distance : 25.04 années-lumière

Parallaxe : 0.13023"

Période : 0.19 days



Exprimer  $k'$  en fonction de  $E_0$ .

En déduire  $m$ , la magnitude apparente d'une étoile d'éclat apparent  $E$ .

3. Montrer que si  $m$  et  $m'$  sont les magnitudes apparentes de deux étoiles d'éclat respectifs  $E$  et  $E'$ , on a :  $m < m'$  si et seulement si  $E > E'$ .

Interpréter.

Que peut-on dire d'une étoile qui a une magnitude apparente négative ?

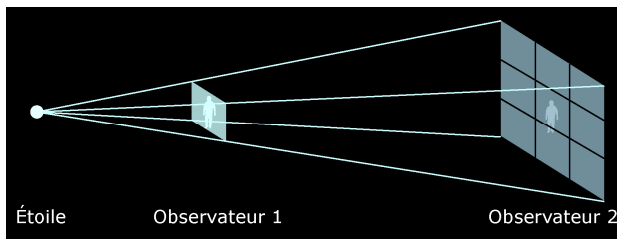
4. L'étoile la plus brillante, après le Soleil, est Sirius, dans la constellation du grand Chien. Son éclat est 3,8 fois celui de Véga. Calculer sa magnitude apparente.

La magnitude apparente du Soleil,  $m_s$ , est  $-26,7$ . Calculer le rapport entre l'éclat apparent du Soleil,  $E_s$ , et celui de Véga,  $E_0$ .

## Magnitude absolue

Pour une étoile située à une distance  $d$  de l'observateur,  $E$ , l'éclat de l'étoile qu'il perçoit, est la quantité d'énergie qui arrive à la distance  $d$  par unité de temps et par unité de surface perpendiculaire à son rayonnement. Si  $L$  est la luminosité intrinsèque d'une étoile, c'est à dire la puissance rayonnée par l'étoile dans toutes les directions, on a :

$$E = \frac{L}{4\pi d^2}.$$



Si on triple la distance étoile-observateur, l'éclat reçu par unité de surface est divisé par 9. L'éclat  $E$  est inversement proportionnel au carré de la distance  $d$ .

Pour comparer la luminosité intrinsèque des étoiles, les astronomes utilisent la magnitude absolue. Par définition, la magnitude absolue  $M$  d'une étoile serait sa magnitude apparente si elle était à une distance de 10 parsecs (voir encadré).

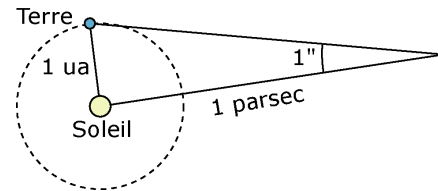
1. Exprimer la magnitude apparente  $m$  d'une étoile située à une distance  $d$ , en fonction de sa distance  $d$ , de sa luminosité intrinsèque  $L$  et de  $E_0$ , l'éclat de Véga.

En déduire l'expression de  $M$  en fonction de  $L$  et de  $E_0$ .

## Les unités de longueur des astronomes

L'unité astronomique (UA) est le demi-grand axe de l'orbite terrestre (distance moyenne Terre-Soleil). L'année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an.

Le parsec (pc) est la distance à laquelle on verrait une unité astronomique sous un angle de 1 seconde d'arc.



1 UA =  $1,5 \times 10^8$  km ;

$c$  = vitesse de la lumière =  $3 \times 10^5$  km.s<sup>-1</sup>.

1 al =  $3 \times 10^5 \times 3600 \times 24 \times 365,25$  km =  $9,5 \times 10^{12}$  km

1pc = 206 265 UA =  $3,1 \times 10^{16}$  m = 3,26 al

2. Montrer que pour une étoile située à une distance  $d$ , on a :  $m - M = 5 \log(d) - 5$ .

Cette quantité s'appelle le module de distance de l'étoile. On le note  $\mu$ .

Vérifier que les données fournies sur Véga vérifient la formule du module de distance.

Exprimer  $d$  en fonction de  $\mu$ .

3. Calculer les distances des étoiles suivantes (calculer en pc, puis en km et en al).

Magnitude	absolue	apparente
Aldébaran	-0,69	0,86
Bételgeuse	-5,5	0,42
Capella	-0,51	0,08

(source SIMBAD)

## Compléments possibles

4. Placer Véga dans le diagramme de Hertzsprung-Russel (H.R.) page suivante.

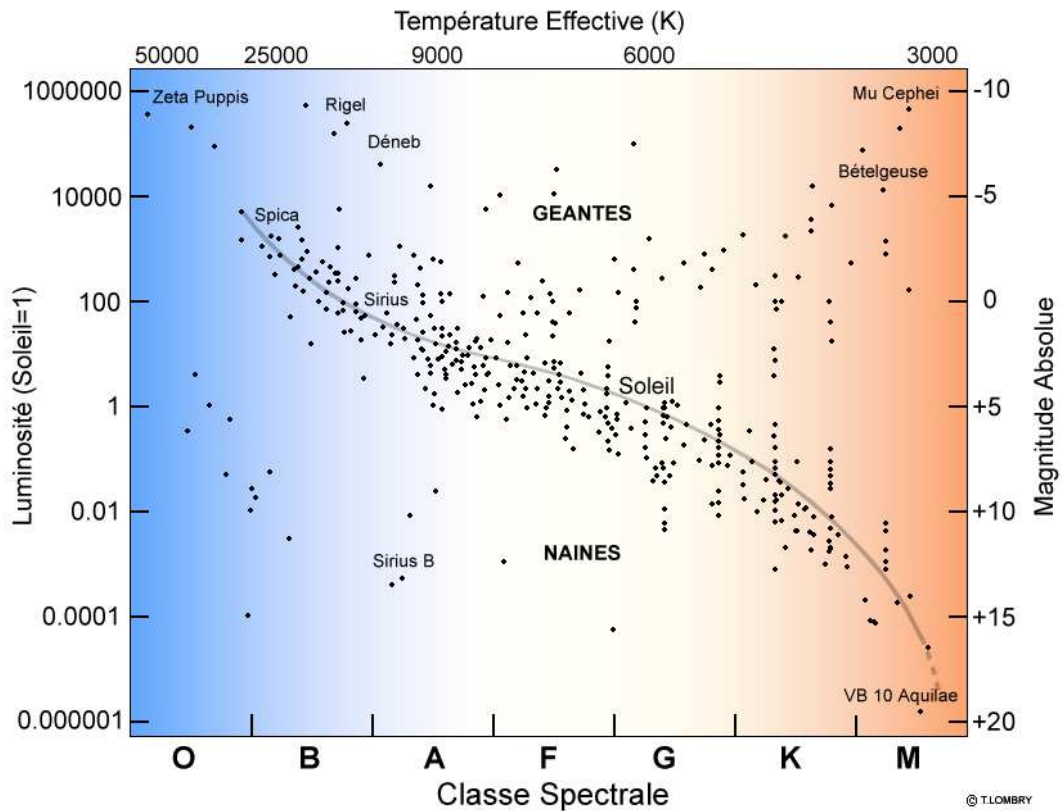
5. Loi de Stefan. Si on appelle  $L$  la luminosité intrinsèque d'une étoile (puissance rayonnée dans toutes les directions), on a :

$$L = 4 \times \pi \times R^2 \times \sigma \times T^4,$$

où  $R$  est le rayon de l'étoile,  $\sigma$  une constante et  $T$  la température de surface de l'étoile.

Cette loi permet de calculer le rayon d'une étoile connaissant sa luminosité mais les fonctions puissances ne sont plus au programme de TS

## Le diagramme HR pour placer Véga



### Les solutions

#### Sur la magnitude apparente

1.  $k = -2,5$

2.  $k' = 2,5 \log(E_0)$  ;  $m = -2,5 \log(E/E_0)$

3.  $m < m' \Leftrightarrow \log(E/E_0) > \log(E'/E_0) \Leftrightarrow E > E'$

Plus l'étoile a une luminosité faible, plus sa magnitude est grande.

Si  $m < 0$ , alors  $E > E_0$ . Une étoile de magnitude négative est plus brillante que Véga.

$E_{\text{Sirius}} = 3,8 E_0 \Leftrightarrow m_{\text{Sirius}} = -2,5 \log(3,8) = -1,45$

$m_S = -26,7 \Leftrightarrow -2,5 \log(E_S/E_0) = -26,7 \Leftrightarrow E_S/E_0 = 10^{(26,7/2,5)} \approx 10^{10}$

#### Sur la magnitude absolue :

1. On a  $m = -2,5 \log(E/E_0)$  et  $E = \frac{L}{4\pi d^2}$  d'où :  $m = 2,5 \log(E_0) - 2,5 \log(L/4\pi d^2)$ .

Pour  $d = 10$  pc, on a :  $M = 2,5 \log(E_0) - 2,5 \log(L/400\pi)$ .

2. On en déduit :  $\mu = m - M = -2,5 \log(L/4\pi d^2) + 2,5 \log(L/400\pi) = -2,5 \log(100/d^2) = 5 \log d - 5$ .

Pour Véga :  $\mu = m - M = -0,57$  et  $5 \log(d) - 5 = 5 \log(25,04/3,26) - 5 = -0,57$ .

$\mu = 5 \log d - 5 \Leftrightarrow d = 10^{(\mu+5)/5}$ .

Magnitude	absolue	apparente	Module de distance	d en pc	d en km	d en al
Aldébaran	-0,69	0,86	1,55	20	$6,3 \times 10^{14}$	67
Bételgeuse	-5,5	0,42	5,92	153	$4,7 \times 10^{15}$	498
Capella	-0,51	0,08	0,59	13	$4 \times 10^{14}$	43

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Comment réaliser son diagramme HR ?

Pierre Causeret, Esbarres

À partir du fichier du satellite Hipparcos du centre de données astronomiques de Strasbourg, Pierre Causeret vous propose de réaliser votre propre diagramme HR et en profite pour rappeler quelques notions de base sur le sujet.

Certains astronomes amateurs mesurent des indices de couleur et font de la classification spectrale. Il ne s'agit pas de cela ici, mais simplement de créer son diagramme Hertzsprung-Russell à partir de données de professionnels.

Dans un diagramme HR, on peut trouver en abscisse le type spectral de l'étoile, sa température de surface ou encore son indice de couleur B-V. En ordonnée, c'est l'éclat de l'étoile, en général en magnitude absolue. Ces différentes notions sont définies dans l'encadré en fin d'article.

Une fois le repère fixé, chaque étoile peut être placée dans le diagramme. Il peut être intéressant de faire plusieurs diagrammes pour différents ensembles d'étoiles : les étoiles brillantes puis les étoiles proches par exemple.

Voici les différentes étapes à suivre pour réaliser votre diagramme HR.

### Obtenir un fichier d'étoiles

Le centre de données astronomiques de Strasbourg (CDS) regroupe tous les catalogues possibles et imaginables d'étoiles. Nous utiliserons le fichier du satellite Hipparcos qui contient plus de 100 000 étoiles.

1. Aller sur le site [cdsweb.u-strasbg.fr](http://cdsweb.u-strasbg.fr).
2. Cliquer sur [VizieR](#).
3. Taper Hipparcos dans la première fenêtre et cliquer sur [I/239/hip\\_main](#) (The Hipparcos Main Catalogue)
4. Choisir les cases à cocher. Il faut au minimum :
  - Vmag (magnitude visuelle entre 500 et 600 nm) ;
  - Plx (parallaxe en milliseconde d'arc, notée « mas » pour milli arc second) ;
  - B-V (indice de couleur).

On pourra demander d'autres renseignements comme les erreurs sur la parallaxe (e\_Plx) et sur le B-V (e\_B-V) ou encore le type spectral, ce qui permettra de vérifier le diagramme HR avec certaines étoiles.

Pour éviter d'avoir toutes les étoiles du catalogue Hipparcos, il faut faire un choix.

On peut ne prendre que les étoiles visibles à l'œil nu. Dans ce cas, taper dans la ligne Vmag, colonne Constraint : <6.5 (il y en a quand même plus de 8 000).

<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	DEdms	<input type="text"/>	(char)	Declination in (pos.eq.dec.m)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	Vmag	<6.5	mag	(n) Magnitude (phot.mag:em)
<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	VarFlag	<input type="text"/>		(n) [1,3] Coars

Si on veut n'avoir que les étoiles proches, de distance inférieure à 50 parsecs, donc de parallaxe supérieure à 0,02" ou 20 mas (voir encadré parallaxe), on tapera dans la ligne Plx, colonne Constraint : >20 (après avoir supprimé la contrainte sur la magnitude). On obtiendra un peu plus de 7000 étoiles dont 20 % seulement sont dans le fichier des étoiles de magnitude <6,5. Ce qui montre qu'il y a énormément d'étoiles faibles proches.

Il faut maintenant télécharger le fichier. Pour cela, dans la colonne de gauche préférence, on peut choisir un nombre maximal d'étoiles (vous pouvez mettre unlimited) puis un format (prendre par exemple XML + CSV). Il faut cliquer ensuite sur [SUBMIT](#) (en haut ou en bas de la page) pour enregistrer le fichier.

### Préparer le fichier

On obtient un fichier d'extension tsv. Il s'agit d'un fichier texte, les données sont séparées ici par des points-virgules. Vous pourrez l'ouvrir avec Open Office, Libre Office ou Excel. Il faut choisir données délimitées par des points virgules (tous les tableurs savent le faire).

Première opération, nettoyer le fichier :

- supprimer les premières lignes d'explication. Pour le tri futur, on peut ne garder qu'une ligne de titre (RAJ2000...) et supprimer les lignes d'unités ;
- supprimer les colonnes A et B (ascension droite et déclinaison, sans intérêt ici).

Ensuite, pour pouvoir traiter les données, il faudra peut-être remplacer tous les points par des virgules,

suivant la configuration de votre ordinateur. Pour cela, sélectionner le fichier, puis dans Edition cliquer sur remplacer.

Il faut aussi nettoyer le fichier des lignes contenant des valeurs aberrantes ou inexploitables :

- trier les lignes suivant le critère plx et supprimer toutes les lignes avec une parallaxe négative (au début) ou sans parallaxe (à la fin) ;
- trier les lignes suivant le critère B-V et supprimer les quelques étoiles sans B-V.

Il restera quelques valeurs erronées. On pourra supprimer les lignes affectées de trop grandes erreurs ( $e_{B-V} > 0.1$  ou  $e_{plx}/plx > 1$ ) mais il y en a beaucoup.

Enregistrer alors votre fichier avec une extension classique (ods, xls...). Il est prêt à l'emploi.

## Réaliser les calculs

Pour placer une étoile dans le diagramme HR, il nous faut son abscisse, c'est l'indice de couleur B-V que l'on a récupéré, mais aussi son ordonnée, c'est la magnitude absolue M, et celle-ci nous manque. Il nous faut la calculer. Deux formules sont à utiliser (expliquées dans l'encadré en fin d'article) :

- la première pour calculer la distance d, en parsec :

$$d = 1/(plx \text{ en } ") \text{ ou } d = 1\,000/(plx \text{ en mas}) ;$$

- la seconde pour calculer la magnitude absolue M connaissant sa magnitude visuelle m et sa distance d (formule du module de distance) :

$$m - M = 5 \log d - 5.$$

On pourra créer deux colonnes dans notre tableur, la première pour calculer d ( $=1\,000/plx$ ) et la seconde pour calculer M ( $= Vmag - 5 \log d + 5$ ).

Ceux qui veulent trouver directement M montreront que  $M = m - 10 + 5 \times \log plx$  (plx en mas).

Les formules ayant été recopiées vers le bas, nous avons maintenant tous les renseignements pour réaliser notre diagramme.

A	B	C	D	E
Vmag	Plx	B-V	d	M
6,32	1,23	-0,31	813,00813	-3,23047444
5,18	2,52	-0,274	396,825397	-2,8129973
2,21	2,33	0,269	429,184519	5,96322039

Le fichier étant lourd, on peut l'alléger en ne gardant que ce qui sera utile. Avant de supprimer les colonnes Vmag et plx, il faut copier les valeurs de la magnitude absolue dans une nouvelle colonne (sélectionner la colonne magnitude absolue puis faire un collage spécial « valeurs »). Vous pouvez alors supprimer les colonnes inutiles (Vmag, plx et les calculs de d et de M) tout en gardant la colonne B-V ainsi que la valeur de M.

## Tracer le diagramme HR

Pour placer plusieurs milliers d'étoiles, un graphique tracé à la main risque de prendre du temps. C'est l'avantage de notre époque qui connaît l'informatique...

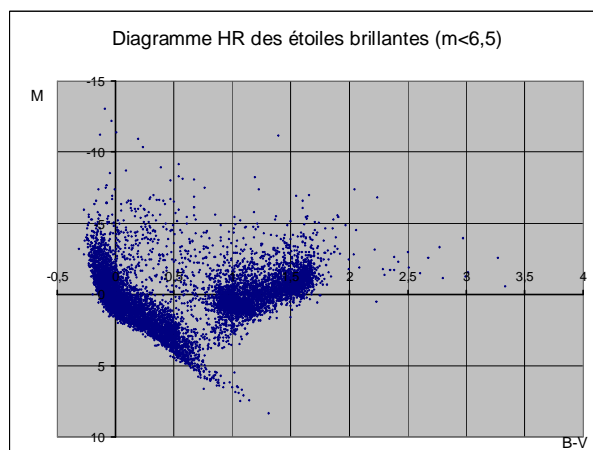
Plusieurs outils existent, les tableurs, qui savent tracer des graphiques, mais aussi divers logiciels qui sont capables de lire des données et de faire du dessin.

### Avec le tableur

Sélectionner les deux colonnes, B-V et M et demander à votre tableur de vous faire le diagramme. Vous choisirez « nuage de points ».

Problème : l'axe des ordonnées (M) est gradué dans le sens croissant, alors que, traditionnellement, les faibles magnitudes (étoiles les plus brillantes) sont en haut. Pour pallier ce problème, une fois le graphique affiché, cliquer sur l'axe des Y (bouton droit, format de l'axe) et choisir valeurs en sens inverse (dans Échelle).

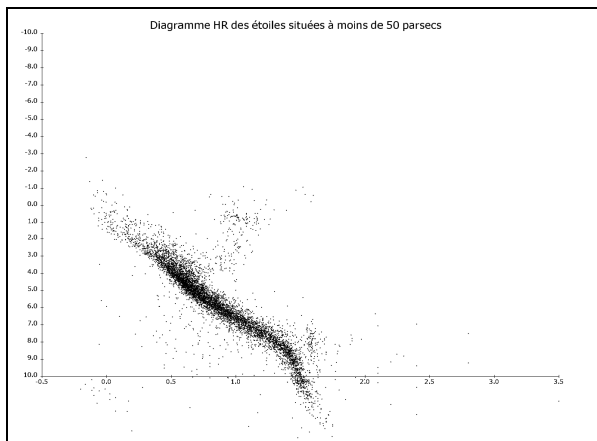
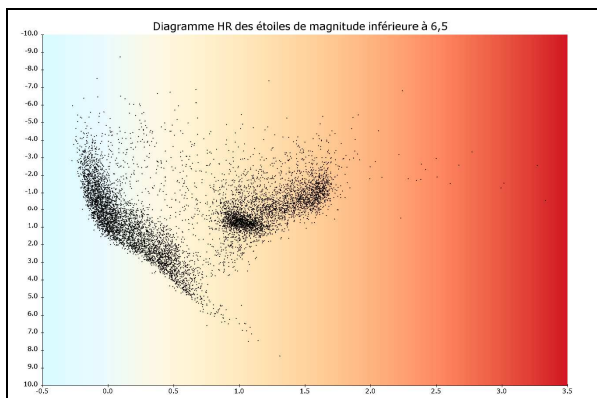
Pour que le diagramme soit plus clair, on peut diminuer la taille de chacun des « points » (clic droit sur le graphique, format des séries de données, taille).



### Avec processing

Processing est un logiciel gratuit de programmation orienté sur le dessin. Sa programmation est beaucoup plus facile que le C et il possède de nombreuses possibilités. Le premier diagramme a été réalisé avec le fichier des étoiles brillantes ( $Vmag < 6,5$ ). On y a ajouté de la couleur, de manière approximative. Il faudrait trouver une correspondance précise entre l'indice de couleur et la couleur de l'étoile pour tenter de faire un fond réaliste.

Le deuxième diagramme représente les étoiles proches ( $plx > 20$ ). On peut être surpris de la différence entre les deux.



## Exploitation des tracés

On peut se demander pourquoi il existe une telle différence entre le diagramme HR des étoiles brillantes et celui des étoiles proches. Sur le deuxième diagramme, on a volontairement laissé les axes au même emplacement que sur le premier.

Prenons par exemple les étoiles bleues ( $B-V < 0$ ) : elles sont nombreuses et brillantes sur le 1<sup>er</sup> diagramme, quasiment absentes sur le second. Pour les étoiles rouges ( $B-V > 1$ ), elles sont nombreuses sur les deux diagrammes mais de nature différente : brillantes sur le premier ( $M < 3$ ), peu lumineuses sur le second ( $M > 5$ ). C'est évidemment l'échantillon qui a changé.

Comment conclure ? Les étoiles rouges sont-elles majoritairement brillantes ou peu lumineuses ? Et quelle est la différence entre une étoile rouge brillante et une rouge peu lumineuse ?

Pour répondre tout d'abord à la deuxième question, prenons deux étoiles rouges de même indice de couleur (1,6), mais de magnitude absolue très différente :

- HIP104060 (ksi du Cygne) avec  $M = -4,1$  ;
- HIP74995 avec  $M = 11,6$ , une étoile faible de la Balance située à 6 parsecs.

Les deux étoiles ayant le même indice de couleur, elles ont la même température de surface.

La loi de Stefan indique que la puissance émise par unité de surface d'une étoile est proportionnelle à la puissance 4 de la température. HIP104060 et HIP74995 ont la même température, elles ont donc la même puissance au m<sup>2</sup>. Si la première est plus brillante que la deuxième, c'est donc qu'elle est plus grosse. On peut même calculer le rapport de leur rayon. On trouve 1000 ! (voir encadré). La première est une géante rouge, la seconde une naine rouge.

### Rapport des rayons de HIP104060 et de HIP74995

On appelle  $E$  l'éclat d'une étoile,  $S$  son aire,  $M$  sa magnitude absolue et  $R$  son rayon.

Pour HIP104060  $M_1 = -2,5 \log E_1 + \text{constante}$

Pour HIP74995  $M_2 = -2,5 \log E_2 + \text{constante}$

$M_1 - M_2 = -2,5(\log E_1 - \log E_2) = -2,5 \log(E_1/E_2)$  ;

$M_1 - M_2 = -4,1 - 11,6 = -15,7$

donc  $-15,7 = -2,5 \log(E_1/E_2)$

d'où  $E_1/E_2 = 10^{(15,7/2,5)} \approx 10^6$

L'éclat est proportionnel à la surface de l'étoile donc au carré du rayon :

$E_1/E_2 = (R_1/R_2)^2 = 10^6$  d'où  $R_1/R_2 = 10^3$

HIP104060 est donc 1 000 fois plus grosse que HIP74995 !

On peut répondre maintenant à la première question, les étoiles rouges sont-elles majoritairement brillantes ou peu lumineuses ?

Tout dépend de quelles étoiles on parle :

- dans les étoiles visibles à l'œil nu, les rouges sont principalement des géantes rouges, lumineuses ;
- mais dans un volume donné, on a beaucoup plus de naines rouges, des petites étoiles de la séquence principale, peu lumineuses. Et pourtant, le catalogue Hipparcos a sans doute oublié des naines rouges proches trop peu lumineuses.

Il est d'ailleurs surprenant de voir que l'environnement proche du Soleil est rempli de naines rouges invisibles à l'œil nu.

Deux remarques pour terminer :

Si vous voulez retrouver dans le ciel une étoile de votre fichier, le plus simple est de relever son numéro du catalogue Hipparcos et de l'indiquer dans un logiciel de type planétarium comme Stellarium. Vous cherchez par exemple quelle est l'étoile la plus à gauche dans notre diagramme HR (donc la plus bleue et la plus chaude) ; le fichier du CDS vous indique HIP27204, code que vous tapez en recherche dans Stellarium et vous trouvez  $\mu$  de la Colombe, sous Orion.

Si vous désirez refaire ces diagrammes, vous trouverez les fichiers ainsi que le programme sous Processing sur le site du CLEA (pour les abonnés numériques, à l'adresse clea-astro.eu).

## Quelques notions de base pour comprendre le diagramme HR

### Magnitude apparente d'une étoile, notée $m$

Comme pour le son, il s'agit d'une échelle logarithmique de la puissance reçue. Plus précisément :

$$m = -2,5 \log E + \text{constante}$$

où  $E$  est l'éclat de l'étoile (puissance reçue par unité de surface) appelé aussi éclairement énergétique ou irradiance.

Ce  $-2,5$  a été choisi pour correspondre approximativement aux grandeurs d'Hipparque. Si on augmente de 5 magnitudes, l'éclat est divisé par 100.

### Magnitude absolue d'une étoile, notée $M$

Pour comparer l'éclat intrinsèque des étoiles, il faudrait les placer toutes à la même distance. La magnitude absolue d'une étoile est sa magnitude à une distance de 10 parsecs<sup>3</sup>.

### Module de distance

Le module de distance relie la magnitude apparente  $m$ , la magnitude absolue  $M$  et la distance  $d$ . Il s'obtient à partir de ces deux formules :

$$m = -2,5 \log E + \text{constante} \quad (1)$$

$$\text{et } M = -2,5 \log E' + \text{constante} \quad (2)$$

où  $E$  est l'éclat de l'étoile vue depuis la Terre (à une distance  $d$  en parsecs) et  $E'$  l'éclat de la même étoile vue à 10 parsecs. L'éclat d'une étoile étant inversement proportionnel au carré de la distance, on a  $E/E' = 10^2/d^2$  (3).

En soustrayant membre à membre les formules (1) et (2), et en utilisant la formule (3), on arrive à la formule du module de distance :

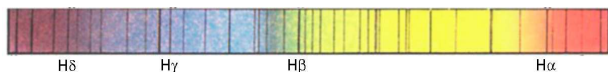
$$m - M = 5 \log d - 5$$

### Type spectral

Le spectre d'une étoile montre des raies d'absorption dues à son atmosphère. Ces raies dépendent principalement de la température : par exemple, la raie H-alpha de l'hydrogène sera plus ou moins importante suivant l'état d'excitation des atomes d'hydrogène donc suivant la température de surface de l'étoile.

Les astronomes ont déterminé différents types spectraux et les ont classés par ordre décroissant de température :

O B A F G K M.

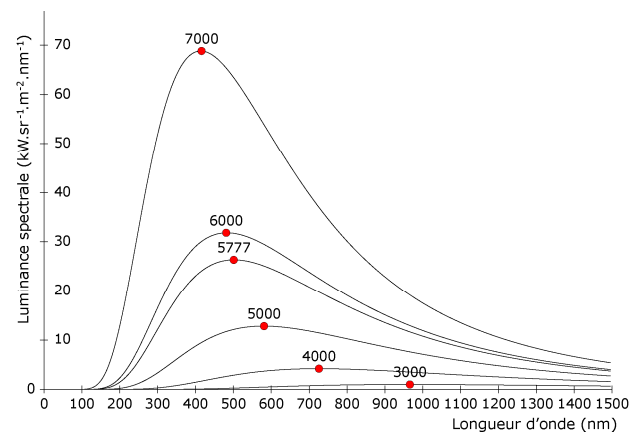


Spectre du Soleil et raies de l'hydrogène

### Température de surface et corps noir

Le rayonnement d'une étoile dépend principalement de sa température de surface. On peut assimiler une étoile à un « corps noir », ce qui peut sembler paradoxal puisqu'une étoile brille, mais le modèle est assez correct. En physique, un corps noir est un corps idéal totalement absorbant à toute radiation électromagnétique. Son spectre d'émission ne dépend que de sa température.

L'écart entre un spectre d'émission d'étoile et le spectre d'un corps noir provient principalement des raies d'absorption de l'atmosphère de l'étoile.



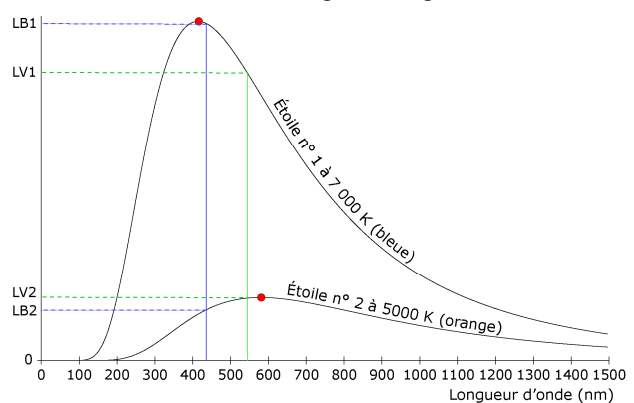
Émission d'un corps noir à différentes températures (de 3 000 à 7 000 K) en fonction de la longueur d'onde. Le point rouge représente le maximum d'émission. À 4 000 K, il est dans le rouge (725 nm) et à 7 000 K dans le violet (415 nm). La courbe à 5 777 K est la courbe théorique du Soleil.

### Indice de couleur

Pour déterminer la température d'une étoile, on pourrait établir la courbe d'émission en fonction de la longueur d'onde. Mais, pour simplifier, on peut se contenter d'effectuer deux mesures dans deux longueurs d'onde différentes, par exemple le bleu et le vert. On appelle  $B$  et  $V$  les magnitudes mesurées dans le bleu (autour de 436 nm) et le vert (autour de 545 nm). L'indice de couleur est la quantité  $B - V$ .

Si  $B - V < 0$ , l'étoile est bleue.

Si  $B - V > 1$ , l'étoile est orange ou rouge.



Émission de corps noir et indice de couleur

Sur la figure, l'étoile n°1 émet davantage dans le bleu que dans le vert, donc  $LB1 > LV1$ . Mais, en magnitude, l'échelle est inversée par rapport à la puissance reçue, une étoile plus lumineuse a une magnitude plus faible donc  $B1 < V1$  et  $B1 - V1 < 0$ .

L'étoile n°2 émet moins dans le bleu que dans le vert donc  $LB2 < LV2$ , mais  $B2 > V2$  et  $B2 - V2 > 0$ .

<sup>3</sup> Voir la définition du parsec dans l'encadré page 15.

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Synthèse de documents : la classification des étoiles

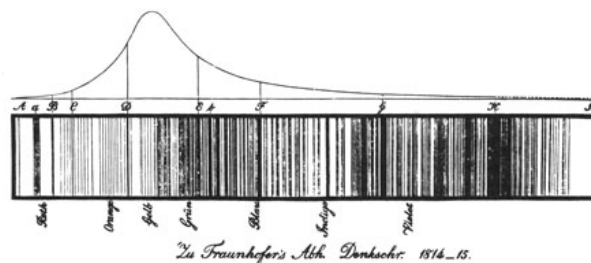
**Thomas Appéré**, enseignant agrégé de physique-chimie au lycée St-Paul (Vannes),  
docteur en planétologie et chercheur associé à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

*Thomas Appéré nous propose ici un exemple de travail réalisé avec des lycéens sur le thème des étoiles.*

### Document 1 - Un peu d'histoire

La compréhension de la nature des étoiles est intimement liée à celle de leur composition et de leur source d'énergie. Concernant le Soleil, Anaxagore (V<sup>e</sup> s. av. J-C) y voit « une pierre incandescente plus grande que le Péloponnèse ». Emmanuel Kant (XVIII<sup>e</sup> s.) considère que nul ne peut objecter qu'il est constitué en partie d'oxygène, puisqu'il brûle.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, Auguste Comte et les philosophes positivistes considèrent, à propos des astres, que « nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition ». Le XIX<sup>e</sup> siècle est (heureusement) aussi celui de l'invention de la spectroscopie. William Wollaston observe des raies sombres dans le spectre du Soleil. En 1814, Joseph von Fraunhofer enregistre ce spectre et établit un premier catalogue de raies. [...] Ces raies sont progressivement associées à différents éléments chimiques. [...]



*Spectre du Soleil enregistré par Fraunhofer.*

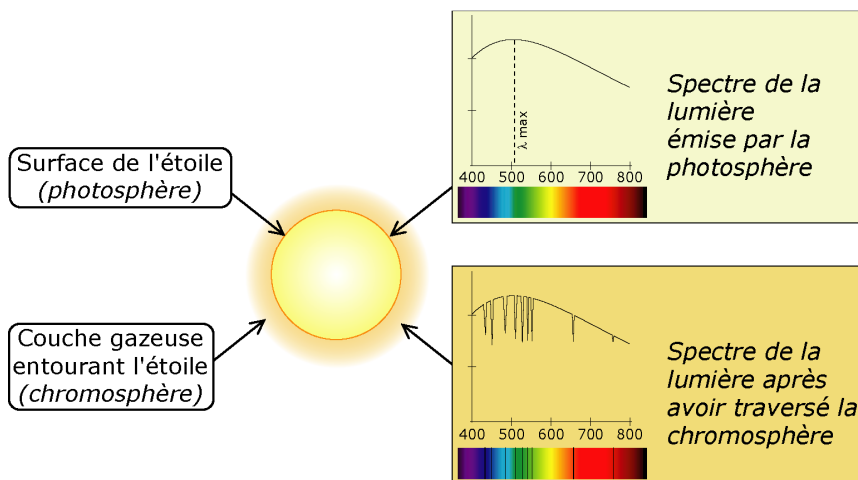
Vient alors le temps de l'observation des spectres d'étoiles autres que le Soleil, la découverte de leur diversité... et les tentatives de classification. De 1866 à 1877, P. A. Secchi propose 3, puis 4 et enfin 5 classes de spectres. Henry Draper affine cette classification et aboutit à ... 17 classes de spectres ! Il faut attendre le début du XX<sup>e</sup> siècle et les travaux de Annie Cannon et Cecilia Payne [...] pour trouver une interprétation physique à ces différents types, ramenés à 7.

*D'après Introduction à la physique stellaire, E. Josselin pour Les Cahiers Clairaut n°145 mars 2014 - CLEA*

### Document 2 - Le spectre des étoiles

Le spectre de la lumière émise par une étoile contient un *spectre continu* auquel se superposent des *raies sombres*.

• Le *spectre continu* est émis par la surface de l'étoile, la *photosphère*, qui est très chaude. La température de cette photosphère influence directement l'allure globale du profil spectral de l'étoile : plus la température de l'étoile est élevée, plus sa couleur tirera vers le bleu, moins la longueur d'onde du maximum d'intensité  $\lambda_{\max}$  sera grande. Cette longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  et la température de l'étoile  $T$  sont reliées par la *loi de Wien* :  
 $\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$



- Les **raies sombres** correspondent aux radiations absorbées par l'atmosphère de l'étoile, la **chromosphère**, bien moins chaude que la photosphère. Ces raies sombres correspondent aux raies d'absorption des éléments chimiques présents dans la chromosphère. Elles permettent donc de connaître la composition de l'étoile.

### Document 3 - La classification des étoiles

Les étoiles sont classées en fonction de leur température et des raies d'absorption présentes dans leur spectre. **7 classes** ont été définies, repérées par une lettre allant de O à M par ordre de température décroissante. Le tableau ci-dessous indique pour chaque classe la gamme de température correspondante, les raies d'absorption principales et le type de spectre observé.

Classe	Gamme de température (K)	Raies d'absorption principales	Spectre typique
O	> 28000	hélium azote, carbone, oxygène	
B	10000 - 28000	hélium, hydrogène	
A	7500 - 10000	hydrogène, calcium	
F	6000 - 7500	hydrogène, métaux : fer, titane, calcium, strontium, magnésium	
G	5000 - 6000	hydrogène, calcium et métaux	
K	3500 - 5000	métaux et monoxyde de titane	
M	< 3500	métaux et monoxyde de titane	

**Remarque :** Pour se souvenir de l'ordre des classes, les astrophysiciens utilisent la phrase suivante : "Oh Be A Fine Girl Kiss Me" (ou "Oh Be A Fine Guy Kiss Me" pour les astrophysiciennes).

Le spectre d'une étoile permet également de déterminer la luminosité  $L$  de l'étoile (en Watts). Elle est

directement reliée au rayon et à la température de l'étoile par la formule :  $L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$

où  $R$  est le rayon de l'étoile (en mètres),  $T$  est la température de l'étoile (en Kelvins) et  $\sigma$  est la constante de Stefan avec  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

Ainsi, plus une étoile est grosse et chaude et plus elle est lumineuse.

Une étoile est donc aussi classée par sa luminosité. **5 classes de luminosité** ont été définies, repérées par un chiffre romain comme indiqué ci-contre.

I	Supergéantes
II	Géantes brillantes
III	Géantes
IV	Sous géantes
V	Naines

Le Soleil, étoile naine de température 5780 K, est donc une étoile de type G V.

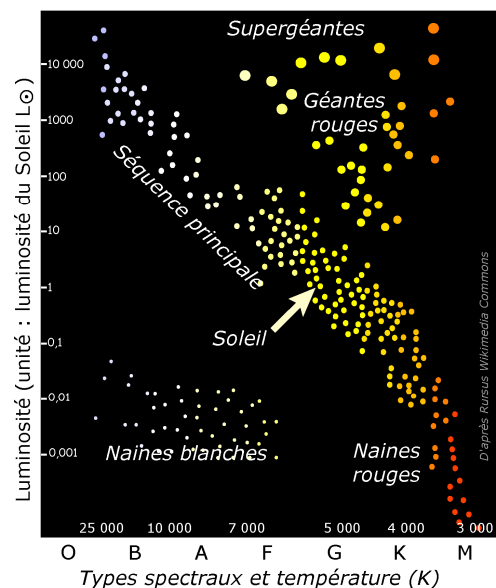
### Document 4 - Le diagramme de Hertzsprung-Russell

Le diagramme de Hertzsprung-Russell est un graphique dans lequel les étoiles sont repérées par leur température en abscisse et par leur luminosité en ordonnée. Ce diagramme permet d'étudier l'évolution des étoiles.

La luminosité d'une étoile est généralement notée en unités solaires  $L/L_{\odot}$  avec  $L_{\odot} = 3,846 \times 10^{26} \text{ W}$ . Ainsi, le Soleil a une luminosité de 1 unité solaire.

Les étoiles passent 90 % de leur vie dans la séquence principale. C'est la diagonale allant du coin supérieur gauche (chaud et lumineux) au coin inférieur droit (froid et peu lumineux). On trouve ainsi le Soleil au milieu de la séquence principale.

Puis les étoiles évoluent en géantes rouges (coin haut droit) avant d'éjecter leur enveloppe gazeuse et de devenir des naines blanches (coin bas gauche).

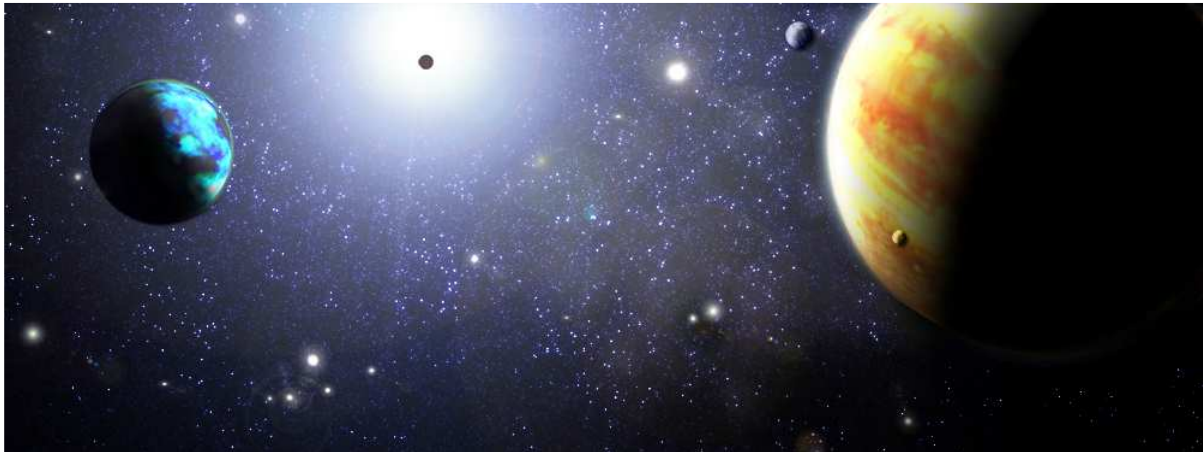




## Document 5 - L'étoile Upsilon Andromedae

Upsilon Andromedae est un couple d'étoiles situé à 44 années-lumière du Soleil, dans la constellation d'Andromède. L'étoile principale, Upsilon Andromedae A, est une étoile naine de la séquence principale. Son compagnon, Upsilon Andromedae B, est une naine rouge.

Depuis 1997, quatre exoplanètes ont été découvertes autour d'Upsilon Andromedae A, dont une orbiterait dans la zone habitable de l'étoile.

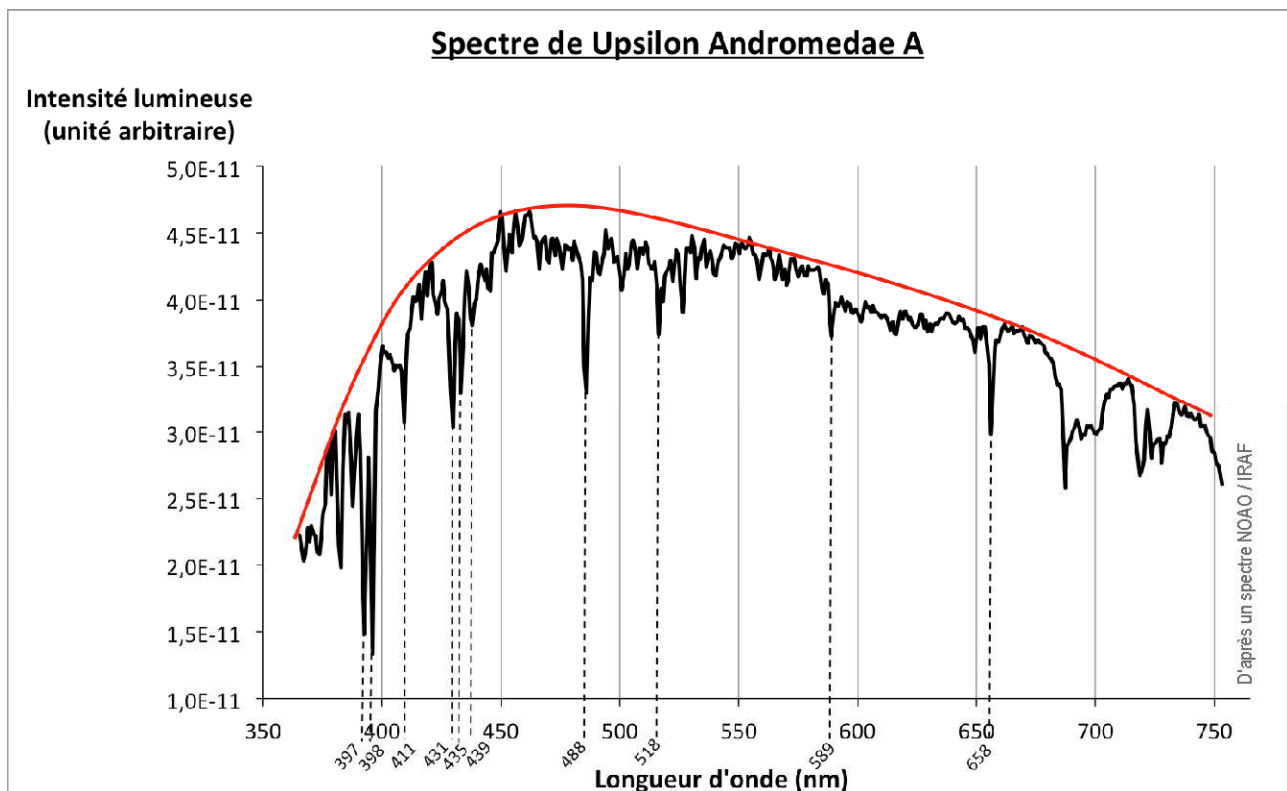


crédit : Sylvia Waleys, Northwestern University

Simulation d'artiste du système planétaire de Upsilon Andromedae

La courbe en noir ci-dessous est un spectre de l'étoile Upsilon Andromedae A acquis à l'observatoire du Mont Hopkins (États-Unis). La courbe rouge correspond au spectre de la lumière émise par la photosphère de l'étoile. La longueur d'onde des principales raies d'absorption est indiquée en abscisse.

À partir de ces données, les astrophysiciens ont pu déterminer que la luminosité de l'étoile Upsilon Andromedae A est  $L = 1,308 \times 10^{27}$  W.



## Document 6 - Base de données spectrales

Le tableau ci-dessous regroupe les longueurs d'onde des raies d'absorption des éléments chimiques fréquemment rencontrés dans la chromosphère des étoiles.

Élément chimique	Longueur d'onde des raies d'absorption (nm)
He	439, 471, 505, 706
Fe	431, 467, 496, 527
Mg	518
Na	589
Ca	397, 423
C	597, 581
O	556

La chromosphère des étoiles contient également des atomes d'hydrogène dont l'énergie du niveau  $n$  est donné par la relation  $E_n = -E_0 / n^2$  où  $n$  est un entier strictement positif et  $E_0 = 13,6$  eV.

On note  $H\alpha$  le passage d'un atome d'hydrogène du premier vers le deuxième niveau excité,  $H\beta$  le passage d'un atome d'hydrogène du premier vers le troisième niveau excité, et ainsi de suite avec  $H\gamma$ ,  $H\delta$  et  $H\epsilon$ .

### Données :

- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s
- Vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>
- 1 eV =  $1,60 \times 10^{-19}$  J

### Consignes :



À l'aide des documents fournis et de vos connaissances, vous rédigerez la **carte d'identité de l'étoile**

**Upsilon Andromedae A.** Cette carte d'identité doit comprendre :

- La température de l'étoile ;
- Le rayon de l'étoile ;
- La classe de l'étoile (exemple pour le Soleil : G V) ;
- La composition chimique de la chromosphère de l'étoile ;
- La place de l'étoile dans le diagramme de Hertzsprung-Russell et l'évolution que va suivre cette étoile.

Vos réponses doivent être justifiées. Une comparaison entre l'étoile Upsilon Andromedae A et le Soleil sera la bienvenue.

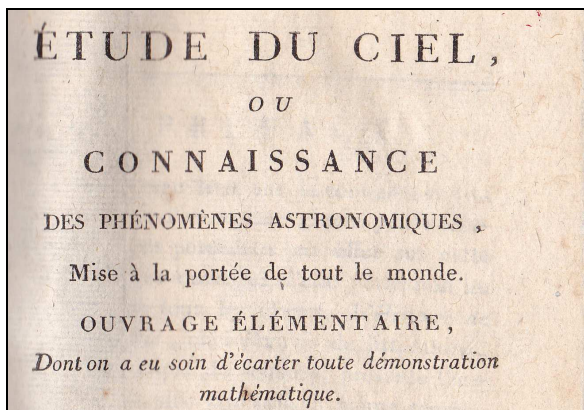
Extrait d'un devoir d'élève (1<sup>ère</sup> S).

	Étoile Upsilon Andromedae A		Soleil
Température	6 095 K		5 780 K
Rayon	1,153 x 10 <sup>9</sup> m		6,980 x 10 <sup>8</sup> m
Classe	Type FV		Type GV
Diagramme H-R	Les deux étoiles se situent dans la séquence principale.		
Composition chimique	Propre à l'étoile		Propre à l'étoile
	Sodium, Calcium	En commun Hydrogène, Fer, Magnésium	Hélium, oxygène, carbone, azote, silicium, soufre
Photo			

## Que savait-on des étoiles en 1803 ?

Pierre Causeret, Esbarres

*Que savait-on des étoiles au début du XIX<sup>e</sup> siècle, avant l'invention de la spectroscopie et avant la première mesure de distance d'une étoile ? Pas grand chose mais cela n'empêchait pas les curieux du ciel de se poser des questions. Voici quelques extraits d'un ouvrage de 1803, écrit par Joseph Mollet de l'Académie de Lyon et joliment intitulé : Étude du ciel ou connaissance des phénomènes astronomiques mise à la portée de tout le monde – ouvrage élémentaire dont on a eu soin d'écarter toute démonstration mathématique. Les intertitres et les passages en italiques sont ajoutés.*



### **Les étoiles la journée**

Quelle idée faut-il se faire de ces points brillants qui étincellent dans le ciel avec tant de vivacité pendant l'absence du Soleil, et que la lumière du jour semble éteindre tout à fait ? Quelques anciens ont cru que les étoiles étaient semblables à des flambeaux, qui s'allumaient le soir après le coucher du soleil, et qui s'éteignaient réellement le matin avant son lever. [...] Il est clair que la lumière des étoiles étant incomparablement plus faible que celle du Soleil, ne peut être sensible que dans l'absence de cet astre ; et qu'elle doit, sans cesser pourtant de luire, s'éclipser totalement, dès qu'il commence à paraître. Ainsi les étoiles ne brillent pas moins pendant le jour qu'au milieu de la nuit : mais leur faible lumière est dans le premier cas imperceptible pour nos yeux éblouis par la vive clarté du Soleil.

*Demandez à un enfant de 8 ou 10 ans où sont passées les étoiles quand il fait jour, vous obtiendrez sans doute de savoureuses réponses comme par exemple : les étoiles restent toujours du côté nuit....*

### **La lumière des étoiles**

Mais quelle est l'origine de cette lumière des étoiles ? La tirent-elles de leur propre fonds, ou bien l'emprunteraient-elles du Soleil, qui nous paraît infiniment plus grand et plus lumineux qu'elles ? Nous ne pouvons répondre encore qu'indirectement à cette question. La lumière des étoiles est d'une telle vivacité, quoique très faible, qu'il n'est pas probable que ce ne soit qu'une lumière réfléchi. Elles paraissent à nos yeux comme des corps très brillants, et qui lancent la lumière de leur propre sein ; et lorsque nous connaîtront leur distance et celle du Soleil, nous verrons qu'il est tout à fait impossible qu'elles doivent leur clarté à la lumière de cet astre. Il faut donc que les étoiles aient en elles-mêmes le principe de l'éclat dont elles brillent à nos yeux.

*Il faudra encore attendre plus d'un siècle pour que l'on commence à comprendre que les étoiles tirent leur énergie de la fusion nucléaire.*

### **La couleur des étoiles**

On remarque dans la couleur de certaines étoiles principales des couleurs différentes. Celle appelée la Lyre<sup>1</sup> est parfaitement blanche ; le cœur du Scorpion, l'œil du Taureau<sup>2</sup> ont une couleur rougeâtre ; Sirius et le Bouvier<sup>3</sup> nous offrent les couleurs de l'arc-en-ciel. Ces différences de couleur tiennent sans doute à la nature de ces astres ; et comme ils sont tout à fait hors de notre portée, nous ne pouvons pas espérer avoir sur cet objet des connaissances certaines.

*Sirius et Arcturus sont données comme ayant les couleurs de l'arc-en-ciel, cela surprend. Mais ces étoiles – surtout Sirius – sont si brillantes que la*

<sup>1</sup> Il s'agit de Véga.

<sup>2</sup> Antarès et Aldébaran.

<sup>3</sup> Arcturus.

*réfraction atmosphérique peut donner cette impression, surtout lorsqu'elles sont assez bas. La relation température couleur sera établie par la loi de Wien à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.*

### **La scintillation**

On peut rendre plus aisément raison du tremblement qu'on aperçoit dans la lumière des étoiles, et que l'on appelle scintillation. On croit qu'il est dû aux vapeurs qui flottent dans l'air auprès de la surface de la Terre ; car on assure que cette scintillation n'a point lieu dans les climats où l'air est parfaitement pur, ni sur le sommet des hautes montagnes. [...]

Il arrive de là qu'il passe continuellement entre notre œil et l'étoile que nous observons, de petites molécules de vapeur, qui interceptent ou détournent à chaque instant le rayon de lumière que cette étoile nous envoie ; ce qui fait que nous la perdons de vue à tout moment, et qu'à tout moment aussi nous la voyons reparaître. C'est cette succession rapide d'apparition et de disparition qui fait, dit-on, la scintillation.

Cette explication qui paraît d'abord rendre une raison si satisfaisante du phénomène dont il est ici question, n'est pourtant pas aussi complète qu'on pourrait le désirer. En effet, parmi les corps célestes, il en est quelques-uns qui, à juger par les apparences, ressemblent parfaitement aux étoiles. Ils ne sont visibles que pendant la nuit ; leur petitesse apparente est la même ; et ils semblent également réduits à l'étendue d'un point lumineux<sup>4</sup>. Toute la différence qu'on remarque entre eux et les étoiles, c'est que leur lumière n'est pas sujette au même tremblement. Or, si la raison alléguée était la seule et véritable cause du phénomène de la scintillation, il est clair que ces astres si semblables aux étoiles devraient scintiller comme elles. Il manque donc quelque chose à l'explication qu'on vient de donner ; et il paraît que c'est dans la nature même de ces corps célestes qu'il faut chercher la solution de cette difficulté. [...] La scintillation paraît donc tenir aussi à la nature même de la lumière ; et ne pourrait-on pas croire que ce fluide brillant s'élançait du corps lumineux non comme un courant continu mais par jets successifs et intermittents.

*On sait que la scintillation est un effet de la turbulence de l'atmosphère terrestre sur les sources lumineuses quasiment ponctuelles. Cette turbulence provient de la déviation des rayons*

---

<sup>4</sup> Vous l'avez deviné, l'auteur parle des planètes, qu'il aborde plus loin dans le livre.

*lumineux due à des variations de densité donc d'indice de réfraction. Le début de l'explication est presque correct bien que le terme de « molécules de vapeur » soit assez surprenant. L'auteur s'égare ensuite pour les planètes. On explique la quasi absence de scintillation des planètes par le fait que leur diamètre apparent est beaucoup plus important que celui des étoiles. De ce fait, plusieurs rayons lumineux suivant des trajets différents arrivent de la planète à notre œil. Si l'un d'eux est dévié, les autres nous permettront de voir toujours la planète.*

### **Distance et diamètre des étoiles**

On a déjà supposé plus haut que les étoiles étaient dans un grand éloignement. Serait-il possible de s'en faire quelque idée ? Et n'y aurait-il pas de la folie à prétendre mesurer des objets qu'il ne nous est pas permis d'atteindre ? Les étoiles ne nous offrent que l'apparence de points brillants extrêmement petits. Sans doute qu'elles sont plus grandes qu'elles ne paraissent ; car personne n'ignore qu'un objet semble devenir plus petit à mesure qu'il s'éloigne de nous. Si la grandeur réelle des étoiles nous était connue, nous pourrions peut-être, au moyen de leur grandeur apparente, déterminer leur distance ; mais grandeur, distance, tout nous est inconnu ici et nous serions condamnés à une entière ignorance si l'industrie humaine, par une de ces découvertes infiniment heureuses, ne nous avait fourni un moyen de juger au moins de la distance qui nous sépare des étoiles, s'il ne nous est pas permis de la déterminer avec justesse.

[...] Il y a des télescopes qui grossissent mille fois et même davantage ; c'est-à-dire donc, que les objets sont vus au moyen de ces instruments, comme ils le seraient à la vue simple, s'ils étaient placés à une distance mille fois plus petite. Or, si l'on se sert d'un pareil télescope pour observer les étoiles, l'on ne sera pas peu surpris de voir que l'image de ces astres, des plus brillants même, et que pour cette raison nous jugerions les plus voisins de nous, ne se trouve pas le moins du monde amplifiée. [...] Ainsi ces astres supposés mille fois plus près de nous, ne nous paraîtraient pas plus grands pour cela, et leur éloignement serait en quelque sorte toujours le même. Qu'on se fasse d'après cela, s'il est possible, une idée de l'immense et prodigieux intervalle qui les sépare de notre Terre.

*La première mesure d'une distance d'étoile fut faite 35 ans plus tard, par Bessel par la méthode des parallaxes, sur l'étoile 61 Cygni. Comme la*

*Terre tourne autour du Soleil, on doit observer un léger déplacement d'une étoile supposée proche par rapport au fond d'étoiles lointaines. Bessel trouva une parallaxe de 0,3". Les distances des étoiles proches sont toujours déterminées par des mesures de parallaxe. Le satellite Hipparcos avait une précision de l'ordre de 0,001", le nouveau satellite Gaia est au moins 50 fois plus précis.*

*Le diamètre d'une étoile est plus difficile à déterminer. La première mesure fut faite en 1921 par interférométrie avec le télescope du Mont Wilson, par Michelson et Pease, sur l'étoile Bételgeuse. Ils trouvèrent un diamètre de 3,7 unités astronomiques, 400 fois le diamètre du Soleil. Il a été réévalué depuis à 1000 fois le diamètre du Soleil...*

## La forme des étoiles

Les étoiles étant à une si grande distance de notre Terre, on ne sera pas surpris que nous ne puissions rien savoir de positif sur leur véritable forme. Cependant, il est probable qu'elles ont une figure sphérique ; du moins, tous les grands corps de la nature, la Terre que nous connaissons déjà et un grand nombre d'autres que nous ferons connaître quand il en sera temps<sup>5</sup>, sont arrondis en globe. Quelques philosophes ont pensé cependant que cela n'était pas aussi général pour les étoiles ; et ils ont imaginé pour expliquer certains phénomènes, que quelques-uns de ces astres avaient une forme lenticulaire plus ou moins aplatie. On a remarqué, dans certaines parties du ciel, des étoiles qu'on appelle changeantes, parce que leur lumière n'est pas toujours la même, et qu'elle a des périodes plus ou moins régulières d'accroissement et de diminution. [...] Selon monsieur de Maupertuis, les changements périodiques que l'on a observé dans la lumière de certaines étoiles, peuvent venir de ce que les astres, supposés un peu aplatis, ont un balancement régulier autour de leur axe. Au moyen de ce mouvement d'oscillation, on voit qu'ils doivent nous présenter, tantôt leur plus grande largeur ; c'est alors qu'ils nous paraîtront le plus brillants ; et tantôt leur plus petite surface : c'est dans cette circonstance que leur lumière nous paraîtra la plus affaiblie. [...] Pour rendre raison des mêmes phénomènes, d'autres philosophes ont supposé que les étoiles qui nous offrent ces singularités, n'étaient pas également brillantes sur toute l'étendue de leur surface ; et même, qu'il y en avait quelques-unes dont une moitié était lumineuse et l'autre obscure. Mais l'on sent que

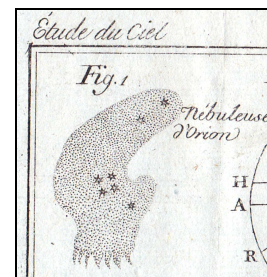
tout ceci est purement conjectural, et qu'il n'est pas possible d'avoir rien de certain sur cet objet.

*Le texte commençait correctement, les étoiles sont bien globalement sphériques. Mais pour les étoiles variables, on sait maintenant que différents mécanismes en sont à l'origine : instabilité à certaines époques de leur évolution (RR Lyrae, Céphéides...), étoiles doubles à éclipses (comme Algol), et pour quelques rares étoiles et de faibles variations d'éclat, rotation de l'étoile dont la surface est inégalement lumineuse ou déformée.*

## Voie Lactée et nébuleuses

On remarque encore dans le ciel une large bande mal terminée, et d'inégale largeur, qui le traverse tout entier, et qui se distingue par une lumière légère qui se répand sur toute sa surface : c'est ce qu'on appelle la voie lactée. L'on y découvre aussi, dans quelques parties, mais seulement avec le secours des lunettes d'approche, de petites taches blanchâtres, d'une forme irrégulière, et faiblement éclairées, auxquelles on a donné le nom d'étoiles nébuleuses.

La plus remarquable de ces nébuleuses est celle que l'on voit dans la constellation d'Orion et dont M. Joseph Lalande a donné la figure, telle que la voici (fig. I).



On soupçonnait que la lumière faible et diffuse qu'on aperçoit dans ces différents endroits du ciel était produite par un très grand nombre d'étoiles que leur extrême éloignement empêchait de distinguer. Cette conjecture a été confirmée par les découvertes de Herschel, qui, au moyen du magnifique télescope qu'il a construit lui-même, est parvenu à voir ces très petites étoiles. Le ciel n'est donc plus à présent pour nous qu'un espace sans bornes, où sont répandus des millions de corps lumineux, dans un ordre qui nous est inconnu.

*Là encore, une partie des affirmations se sont trouvées confirmées (la Voie lactée est constituée d'étoiles) et d'autres infirmées (la nébuleuse d'Orion est avant tout un vaste nuage de gaz même s'il contient aussi des étoiles). Il faudra attendre la spectroscopie pour vérifier que cette nébuleuse, qui présente des raies d'émission, est bien gazeuse. D'autres « étoiles nébuleuses » comme les galaxies sont, par contre, bien constituées d'étoiles.*

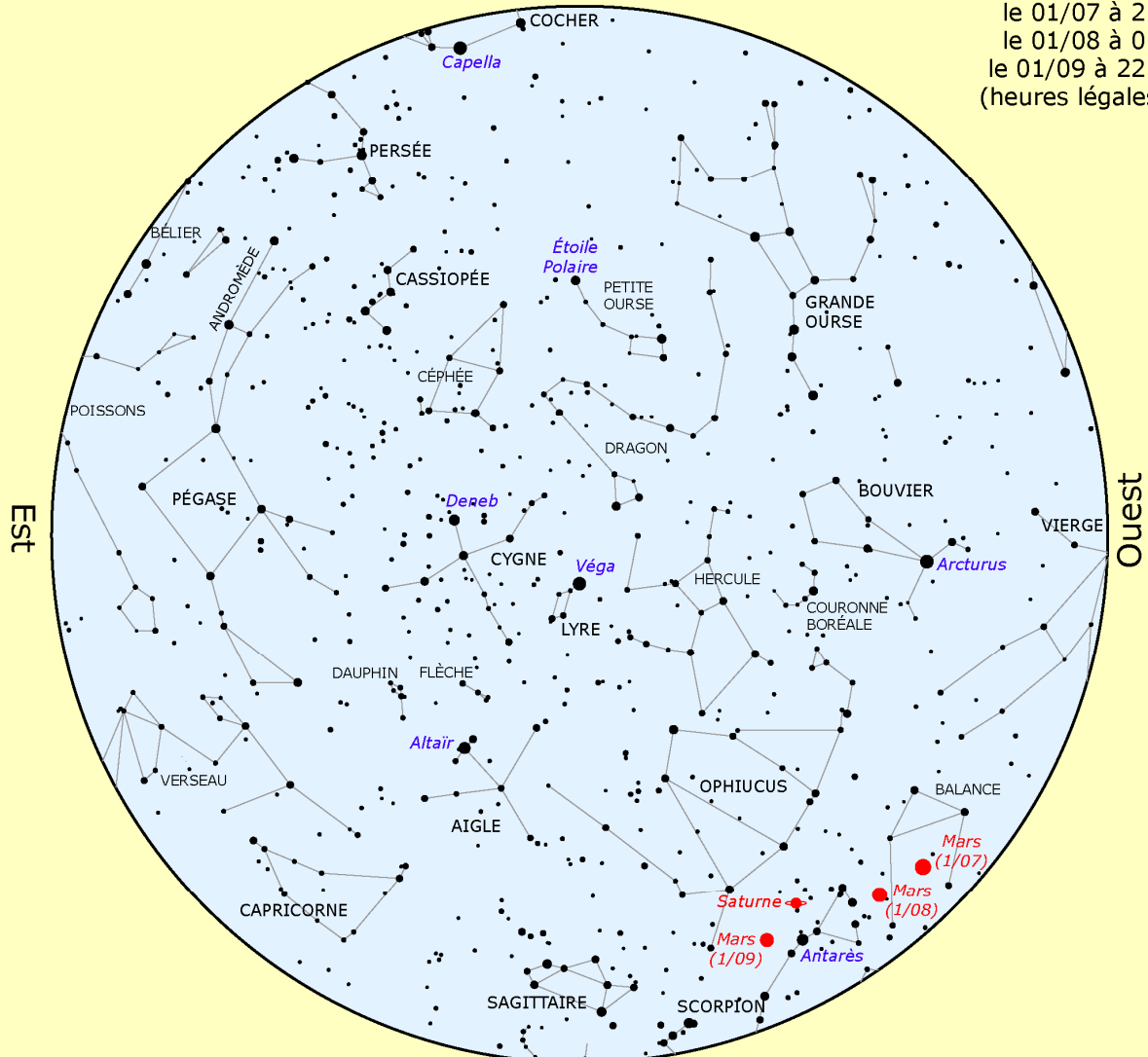
<sup>5</sup> L'auteur doit là encore parler des planètes.

# LE CIEL DE L'ÉTÉ 2016

Le ciel de l'été 2016

NOÛN

Ciel valable  
le 01/07 à 2 h  
le 01/08 à 0 h  
le 01/09 à 22 h  
(heures légales)



Saturne est placée pour le 1/08/16  
et Mars pour le 1er de chaque mois

Sud

Carte du ciel calculée  
pour la latitude de 47°

## Visibilité des planètes

Les cinq planètes visibles à l'œil nu pourront être observées cet été.

**Mercuré** peut être trouvée le soir début août mais elle sera surtout visible le matin fin septembre.

**Vénus** vient de passer derrière le Soleil. Elle réapparaît dans le ciel du soir mais reste encore proche angulairement du Soleil.

**Mars** est toujours bien visible le soir mais elle s'éloigne de la Terre et diminue de diamètre apparent. La planète rouge va croiser Saturne et Antares fin août.

**Jupiter** est encore visible le soir au début de l'été.

**Saturne** est à observer de préférence au début de l'été mais elle sera visible jusqu'en septembre assez bas au-dessus de l'horizon.

## Quelques événements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 0 h 34.

4/07 : la Terre au plus loin du Soleil, à 152 103 776 km.

12/08 : maximum de l'essaim des Perséides (étoiles filantes). À observer de préférence le matin après le coucher de la Lune.

23-24/08 : Mars traverse la ligne Antares-Saturne.

27/08 (soir) : rapprochement Jupiter – Vénus (0,1°).

1/09 : **éclipse annulaire de Soleil** visible à La Réunion, invisible en métropole.

22/09 : équinoxe d'automne à 16 h 21.

## Lune

Nouvelle Lune : les 4/07, 2/08, 1/09.

Pleine Lune : les 20/07, 18/08, 16/09.

## Où va l'astrophysique française ?

### 1. L'univers lointain et les galaxies

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse

#### Introduction

Tous les 4 ou 5 ans, l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), branche du CNRS qui coordonne et structure la communauté de l'astrophysique française, fait le point sur la période écoulée et réfléchit aux orientations à prendre pour la suivante. Le dernier en date de ces exercices a été effectué entre 2013 et 2014. Le document de prospective INSU 2015 – 2020<sup>1</sup> issu de ces réflexions traite essentiellement de trois préoccupations : la science (les thématiques de recherche, les orientations, l'enseignement), les moyens (développements instrumentaux, bases de données) et la structuration de la discipline (affectation de moyens, recrutements).

Depuis la fin des années 90, l'astrophysique française s'articule autour de six programmes nationaux (PN) qui couvrent les grands domaines : la cosmologie, les hautes énergies, le milieu interstellaire, la physique stellaire, la planétologie et l'héliosphère. À cela s'ajoutent quelques actions spécifiques (AS). Alors que les PN sont stables et pérennes (avec quelques redéfinitions de contour à l'occasion), les AS sont plus provisoires et répondent à un besoin plus ciblé pas forcément couvert par un ou des PN.

L'objectif de cet article en deux parties est de présenter les grandes lignes du bilan et de la prospective scientifique détaillés dans le rapport en mettant l'accent, pour chaque PN, sur certains résultats, pistes de recherche et projets futurs. Dans cette première partie, on s'intéressera à l'univers lointain, aux galaxies (dont la nôtre) et aux hautes

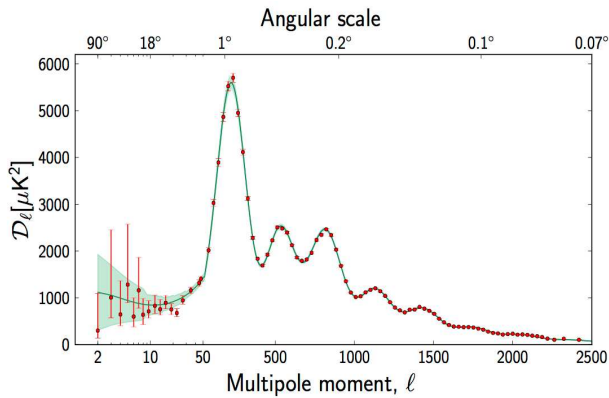
énergies. Dans un second temps, on traitera de la physique stellaire, de la planétologie et des relations Soleil-Terre.

#### Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG)

La cosmologie, les galaxies et les grandes structures de l'Univers font l'objet des recherches du PNCG. Le programme tente de répondre par ses activités à des questions fondamentales de l'astrophysique : dans quel univers vivons-nous ? Quels processus physiques régissent les galaxies ? Cette communauté exploite les sondages du ciel profond obtenus par de grands instruments au sol (VLT, CFHT, ALMA) ou spatiaux (HST, Spitzer, Planck, Herschel).

Ces dernières années, l'observatoire spatial Planck a apporté son lot de résultats, particulièrement dans la caractérisation plus précise du fond diffus cosmologique (*Cosmic Microwave Background* ou CMB), le rayonnement fossile du *Big Bang* dans le domaine des micro-ondes. Ce rayonnement n'est pas uniforme mais présente d'infimes variations spatiales/angulaires en fonction de la direction dans laquelle on l'observe. Ces variations, qui sont prévues par le modèle cosmologique, rendent compte de la structuration de l'univers jeune pendant les instants qui ont suivi le *big bang*. La *Fig 1* montre le spectre angulaire de puissance de la température du CMB, c.-à-d. la variation typique de température pour un écart angulaire donné. On remarque que les plus grandes variations de températures se mesurent sur des échelles angulaires de l'ordre du degré.

<sup>1</sup> <http://www.insu.cnrs.fr/files/documentcomplet.pdf>

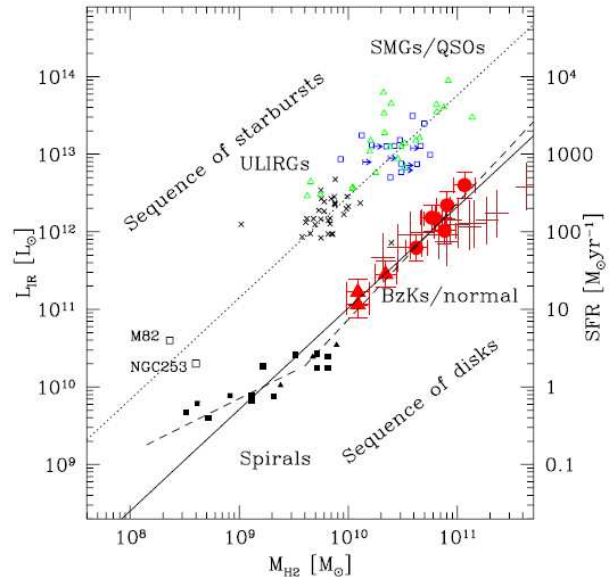


**Fig.1.** Spectre de puissance de la carte de température du rayonnement du fond diffus cosmologique mesuré par Planck (en rouge) avec ajustement du modèle  $\Lambda$ CDM (en vert (© Planck/ESA)).

On observe par ailleurs que les mesures de Planck ont permis d'obtenir un spectre jusqu'à une précision angulaire de  $0,07^\circ$  et d'y détecter les sept premiers pics du spectre angulaire de puissance. Ces résultats sont en accord avec le modèle théorique en vigueur ( $\Lambda$ CDM pour les intimes) au niveau du pourcentage et modifient légèrement ceux des précédentes mesures. La conséquence directe est une modification des paramètres du modèle cosmologique : nombre de neutrinos limité à trois, constante de Hubble légèrement plus faible et âge de l'univers porté à 13,8 milliards d'années.

Autre sujet dans lequel les chercheurs français se sont illustrés est la physique des galaxies et plus précisément la mise en évidence de deux modes de formations d'étoiles dans les galaxies. Un mode dit séculaire principal, les galaxies ont un taux de formation stellaire quasi constant, et un mode à flambée de formation d'étoiles (*starburst*). Le gaz interstellaire, réservoir de matière pour la formation d'étoiles, joue un rôle essentiel dans la détermination du mode qui domine (figure 2) et une équipe française a montré que le taux de formation stellaire croît avec le décalage spectral (*redshift*) : plus une galaxie est jeune, plus elle dispose de gaz interstellaire pour la formation d'étoiles.

L'observation extragalactique passe par des instruments de plus en plus performants et donc des télescopes aux miroirs de plus en plus grands. En Europe, outre les quelques instruments nationaux encore en service, l'observatoire européen austral (*European Southern Observatory*, ESO) assure la coordination des moyens et l'exploitation des grands télescopes installés au Chili.



**Fig.2.** Diagramme montrant la luminosité infrarouge des galaxies en fonction de leur masse en  $H_2$ . Le taux de formation d'étoiles (axe vertical à droite) et le contenu en gaz moléculaire des galaxies à divers décalages spectraux montrent comment les galaxies distantes « BzK/normal » (séquence principale) sont les versions agrandies des galaxies spirales proches, tandis que les galaxies submillimétriques « SMGs » sont les versions agrandies des galaxies locales à flambées de formation stellaire. (Daddi et al., *ApJL*, 714, 2010)

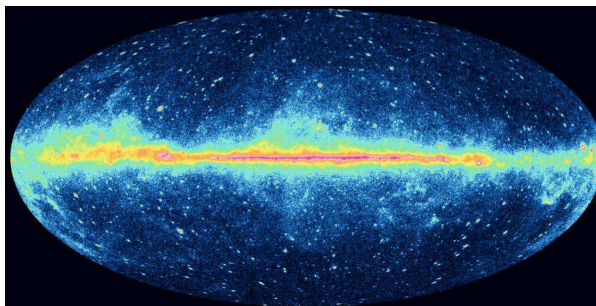
En plus des instruments déjà en fonctionnement (VLT, ALMA), le grand projet de l'ESO est le *European Extremely Large Telescope*, l'E-ELT, télescope géant de 39 m de diamètre. Dans l'espace, Le *James Webb Space Telescope* (NASA) remplacera le HST.

## Programme National Hautes Énergies (PNHE)

Le PNHE, jeune PN puisqu'il a été créé en 2012, étudie les objets les plus extrêmes et les phénomènes les plus violents de l'univers. Parmi les grands défis auxquels s'attaque le PNHE citons la nature de la matière noire, l'influence des objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs) sur leur environnement, l'explosion d'astres, l'origine du rayonnement cosmique à ultra-haute énergie, l'observation de l'univers grâce aux neutrinos et aux ondes gravitationnelles. Outre les considérations théoriques et modèles numériques, les activités du PNHE s'appuient en grande partie sur des observatoires spatiaux X (Integral, XMM, Chandra) et  $\gamma$  (Fermi). Rappelons que les ondes électromagnétiques des domaines X et  $\gamma$  sont absorbées par l'atmosphère et ne peuvent donc être observées que depuis l'espace.



Les données du satellite Fermi ont permis de construire des catalogues de sources  $\gamma$  (figure 3) et la détection d'une cinquantaine de pulsars millisecondes dont beaucoup étaient inconnus. La comparaison avec des sources radio a mis en évidence que les émissions provenaient des magnétosphères externes des pulsars. Par ailleurs, ces détections viennent enrichir la liste de pulsars très stables nécessaires à la détection d'ondes gravitationnelles par chronométrage.



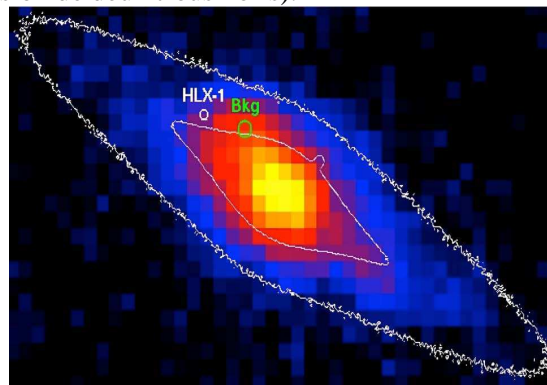
**Fig.3.** Carte des sources gamma supérieures à 1 GeV mesurées par le satellite Fermi. La zone rouge/jaune médiane est le disque galactique (Nolan et al., *ApJ*, 199:31, 2012).

Bien que les trous noirs piègent la lumière en leur sein par la gravité extrême (d'où leur nom), ils peuvent être observés dans le domaine X. En effet, quand la matière attirée par l'attraction gravitationnelle de ces objets accélère, elle émet des rayons X. Des observations combinées avec les télescopes spatiaux XMM, Integral (ESA) et Chandra (NASA) du trou noir super-massif Sgr A\* qui se trouve au centre de notre Galaxie ont permis de caractériser ses éruptions et de déterminer qu'il était 1 million de fois plus lumineux il y a seulement une centaine d'années. Toujours concernant les trous noirs, on distingue les trous noirs d'origine stellaire (de masses inférieures à 100 masses solaires) et les trous noirs super-massifs (masses supérieures à  $10^6$  masses solaires). Une incertitude planait sur l'existence de trous noirs de masses intermédiaires. En étudiant la source X ultra-lumineuse HLX-1 (

Figure 4), une équipe toulousaine a identifié un objet qui peut prétendre à ce titre.

Le prochain grand projet de la communauté des hautes énergies est la mise en orbite de l'observatoire X Athena (ESA). Des instruments de physique plus fondamentale sont aussi à l'étude comme la détection des ondes gravitationnelles par exemple : l'installation européenne VIRGO va être remise en service (advanced VIRGO) et le projet d'interféromètre laser spatial eLISA est à l'étude (notons que depuis la publication du rapport, l'interféromètre américain LIGO a mis en évidence

la déformation de l'espace-temps générée par la fusion de deux trous noirs).

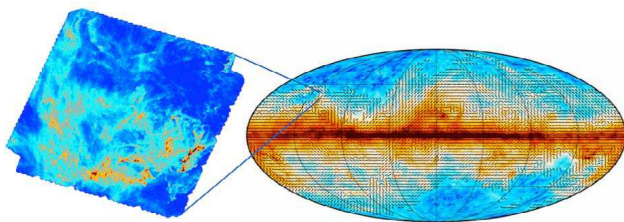


**Fig.4.** Galaxie hôte de HLX-1 observée dans l'UV par le télescope spatial SWIFT (Farrell et al., *Astron. Nach.*, 332, 2010).

## Physique et Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI)

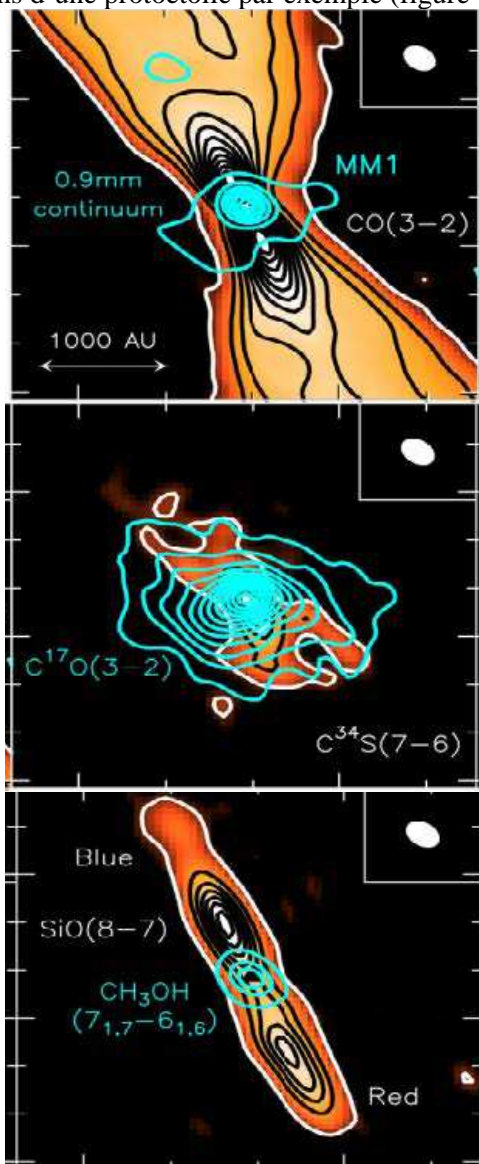
Le PCMI est un programme qui se trouve à la croisée de nombreuses thématiques scientifiques de l'astrophysique moderne. Il s'intéresse à la composition, à l'évolution et au rôle de la matière diffuse ou condensée dans les galaxies. Le milieu interstellaire (MIS) joue des rôles clés à petite échelle dans la formation des molécules complexes, briques des plus grandes structures, à moyenne échelle en constituant l'ingrédient de base de la formation stellaire et planétaire, et enfin à grande échelle dans la dynamique des galaxies. Précisément, le cycle de la matière dans les galaxies, la formation des protoétoiles et disques protoplanétaires, l'existence et le rôle de molécules organiques complexes constituent le cœur des préoccupations de cette communauté. Le milieu interstellaire étant froid, son observation se fait essentiellement dans les domaines des infrarouges (télescopes spatiaux Herschel, Spitzer et futur WFIRST) et (sub)millimétrique (réseaux d'antennes au sol IRAM et ALMA par exemple).

Le satellite Herschel a apporté de nouvelles indications sur la structuration du MIS. Ce dernier semble s'organiser en filaments dont l'épaisseur varie peu, quelle que soit la densité du filament. En confrontant les données Herschel et les données de polarisation des poussières fournies par Planck (Figure 5), les chercheurs ont apporté des éléments de réponse en considérant le rôle du champ magnétique et la diffusion ion-neutre dans la dissipation de la turbulence (notons que longtemps négligé, le rôle du champ magnétique dans la structuration du milieu interstellaire constitue un axe de recherche important et actif).



**Fig.5.** À gauche, la structure du MIS à 0.01 pc révélée par Herschel-SPIRE dans le nuage de gaz moléculaire Polaris Flare; à droite, la polarisation sur tout le ciel déduite de l'émission de la poussière observée par Planck (Planck collaboration, Planck intermediate results XIX, 2014).

Les radiotélescopes du réseau ALMA donne une précision appréciable lorsqu'il s'agit de déterminer la présence de molécules complexes dans le MIS et d'en tirer les informations sur leur distribution spatiale et leur rôle de traceur des différentes régions d'une protoétoile par exemple (figure 6).



**Fig.6.** Protoétoile HH212 observée par ALMA où chaque molécule observée est un traceur d'une région (flot bipolaire, jet, disque d'accrétion).

(Adapté de Codella et al., A&A, 2014)

Sous la houlette de l'ESO, le réseau d'antenne radio ALMA est en cours de déploiement. Sur le sol national, l'institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) agrandit ses installations du plateau de Bure avec des radiotélescopes supplémentaires (projet NOEMA).

# NOUVEAUTÉ



Comité de  
Liaison  
Enseignants et  
Astronomes  
www.clea-astro.eu

LES FICHES PÉDAGOGIQUES DU CLEA

## L'astronomie à l'école

Cycle 3 primaire-collège

Hors-série nouvelle formule des Cahiers Clairaut n° 12



Ce livret contient un CD

ISBN 978-2-9557092-0-7

Grandir, s'ouvrir au monde et aux autres. S'adapter aux rythmes de la nature, de la vie et de la société.

S'émerveiller, être et rester curieux. Enseignants de l'école primaire et du collège, médiateurs scientifiques et parents accompagnent les enfants dans leur découverte du monde et l'exercice de leur raisonnement : partir en classe alors que le jour est levé... ou pas, observer la Lune qui joue à cache-cache... de jour comme de nuit, vivre la succession des saisons, jouer avec les ombres et la lumière, déjouer les apparences trompeuses...

Les cycles célestes constituent de belles opportunités pour prendre conscience du monde qui bouge autour de nous, et pour commencer à le comprendre.

**Dans le livret :** Notions de base ; (ombre, Terre, points cardinaux, constellations) ; Jour, nuit, mouvement apparent du Soleil ; Les saisons ; Le système solaire ; Le temps ; Littérature ; Glossaire.

**Dans le CD :** Des compléments pour l'enseignant ; Des données, des films ; Sitographie ; Liste de logiciels ; Liste d'articles des Cahiers Clairaut.

# LECTURE POUR LA MARQUISE

## Guide pratique pour (bien) débiter en spectroscopie astronomique.

François Cochard ; [www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)  
ISBN 978-2-7598-1784-9 ; 258 pages ; 39€

Jusqu'à il y a quelques années, la pratique en amateur de la spectroscopie astronomique restait surtout réservée à quelques bricoleurs capables de concevoir et réaliser eux-mêmes leur instrument, mais depuis environ deux décennies, la situation a changé : le développement des capteurs électroniques et les possibilités offertes par le traitement numérique des images ont permis à quelques pionniers de développer toute une gamme de spectroscopes et des logiciels permettant à tout un chacun d'acquérir et exploiter des spectres stellaires.

François Cochard, nous propose ce « guide pratique » destiné à permettre à tous de se lancer dans l'aventure spectroscopique en maximisant les chances de succès.

Après avoir présenté la spectroscopie amateur, son articulation avec le travail des observatoires professionnels et précisé le matériel « minimal » requis, il nous parle de la lumière et des phénomènes liés à sa double nature ondulatoire et corpusculaire : interférences et diffraction, énergie du photon, émission thermique (profil de Planck), émission et absorption par les atomes (spectres de raies), décalage Doppler.

Quelques exemples concrets permettent ensuite de montrer ce que l'astronome peut tirer de l'étude du spectre d'un astre : température, composition chimique, vitesses ... sans oublier l'importance du choix du domaine spectral et de la résolution selon les caractéristiques de la source et du phénomène étudié.

Suit un exposé très clair et bien illustré s'appuyant sur l'exemple des spectroscopes ALPY et LHIRES commercialisés par la société Sheyliak dont il est l'un des co-fondateurs, des principes optiques généraux d'un spectroscopie : dispersion par un réseau, par un prisme, rappels d'optique géométrique : lentilles, focale, ouverture, rôle de la fente d'entrée (la spectroscopie sans fente est juste mentionnée) et importance du choix de l'ouverture

du télescope ou de la lunette pour exploiter au mieux la lumière recueillie.

Des explications claires et concrètes sur le pouvoir de résolution, l'ouverture (F/D), la dispersion spectrale, l'échantillonnage, le rendement quantique et la taille des pixels du capteur, sans oublier les questions liées au tirage mécanique, et au choix de la largeur de la fente d'entrée, permettront au lecteur d'adapter les différents éléments de la chaîne d'acquisition.



Un chapitre est consacré aux caractéristiques des caméras et aux logiciels d'acquisition, avec des procédures pratiques simples pour déterminer la taille de l'image, mesurer sa dynamique, la sensibilité et le bruit de lecture de la caméra, extraire les données utiles de l'entête des fichiers au format FITS, en utilisant le logiciel Iris

Après quelques conseils pour monter et régler votre spectroscopie, d'abord en plein jour en utilisant des sources artificielles (DEL, lampes diverses...) ou le Soleil, vous verrez comment réaliser votre premier spectre du Soleil, puis réduire les données obtenues

pour en extraire des profils spectraux exploitables et une courbe de réponse instrumentale.

Il ne vous restera plus, qu'à vous familiariser avec le système de pointage et de guidage de votre télescope pour enfin installer, en suivant de nombreux et excellents conseils, le spectroscopie complet et acquérir vos premiers spectres stellaires.

Vous trouverez pour finir de nombreux conseils destinés à bien préparer votre session d'observations, archiver vos données et améliorer progressivement la qualité de vos spectres en les soumettant à la critique et en partageant vos résultats.

L'ensemble de l'ouvrage est d'une lecture facile, abordable avec les connaissances de mathématiques et physique d'un bon élève de lycée. Les notions géométriques sont illustrées par des figures nombreuses et claires, le vocabulaire reste rigoureux, même quand la complexité de certaines notions nécessite des simplifications.

On pourrait à priori penser que ce livre ne s'adresse qu'à ceux qui, déjà munis du matériel nécessaire, voudraient débiter en spectroscopie.

Effectivement c'est d'abord à ces derniers que François Cochard s'adresse, ils y trouveront tout ce qu'il faut pour arriver avec un maximum de chances de succès à maîtriser leur matériel et à progresser. Ils y trouveront aussi des idées de projets scientifiques, certains plutôt didactiques comme l'identification des raies les plus intenses en absorption ou en émission et l'étude comparative de profils spectraux à basse résolution, d'autres plutôt en liaison avec des collaborations entre amateurs et professionnels comme le suivi des étoiles Be.

Mais on y trouve aussi sous une forme concise et bien organisée de nombreuses notions qui en font un panorama synthétique bien utile à tous ceux qui veulent en savoir un peu plus sur la spectroscopie astronomique, les techniques qu'elle met en œuvre, et comment elle permet de décoder les innombrables informations transportées par la lumière.

Et après avoir lu ce livre, on a vraiment envie d'emboîter le pas à son auteur et de se lancer dans l'aventure.

**J M Vienney**

<b>Horizontalement</b>											<b>Mots croisés étoiles</b>																																																																																																																								
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Son travail a permis de comprendre l'évolution des étoiles.</li> <li>2. Centre de fermentation.</li> <li>3. Peut être interstellar. Étoile blanche.</li> <li>4. Oiseau. Bouts de Lune éparpillés.</li> <li>5. Il vient des supernovae. Champion. Nom d'étoile ou de constellation.</li> <li>6. Âgée si elle est rouge. On l'a associée à Sirius.</li> <li>7. Il est à l'origine des classes de luminosité avec Keenan. Île.</li> <li>8. Encore plus âgée si elle est blanche. Carbone par exemple, mais seulement dans les étoiles et pour les astronomes.</li> <li>9. Périodes de visibilité du Scorpion. Carburant.</li> </ol>											<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Très courant dans les étoiles.</li> <li>2. Les exobiologistes la cherche partout. D. Arobase.</li> <li>3. Couleur que l'on trouve dans de nombreuses nébuleuses. Copine.</li> <li>4. Cacha. Ils braient.</li> <li>5. Élément chimique n° 40. Ce peut être une étoile.</li> <li>6. C'est une étoile. Dans Pégase.</li> <li>7. On y trouve le crêt de la Perdrix. 2009.</li> <li>8. Petite constellation introduite par La Caille. Vieux.</li> <li>9. On peut la confondre avec une étoile de magnitude 6. 10<sup>12</sup> octets.</li> <li>10. Buzz l'a suivi. Me rendrai.</li> <li>11. Son travail a permis de comprendre l'évolution des étoiles.</li> </ol>																																																																																																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td> </tr> <tr> <td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td> </tr> <tr> <td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>4</td><td></td><td>■</td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>5</td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td> </tr> <tr> <td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>7</td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td> </tr> <tr> <td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>■</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1												2											■	3					■							4		■		■				■				5			■			■				■		6							■					7		■								■		8						■						9					■							<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Très courant dans les étoiles.</li> <li>2. Les exobiologistes la cherche partout. D. Arobase.</li> <li>3. Couleur que l'on trouve dans de nombreuses nébuleuses. Copine.</li> <li>4. Cacha. Ils braient.</li> <li>5. Élément chimique n° 40. Ce peut être une étoile.</li> <li>6. C'est une étoile. Dans Pégase.</li> <li>7. On y trouve le crêt de la Perdrix. 2009.</li> <li>8. Petite constellation introduite par La Caille. Vieux.</li> <li>9. On peut la confondre avec une étoile de magnitude 6. 10<sup>12</sup> octets.</li> <li>10. Buzz l'a suivi. Me rendrai.</li> <li>11. Son travail a permis de comprendre l'évolution des étoiles.</li> </ol>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																																								
1																																																																																																																																			
2											■																																																																																																																								
3					■																																																																																																																														
4		■		■				■																																																																																																																											
5			■			■				■																																																																																																																									
6							■																																																																																																																												
7		■								■																																																																																																																									
8						■																																																																																																																													
9					■																																																																																																																														
<i>Solution page 40</i>																																																																																																																																			

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Utilisation de photos du passage de Mercure en exercice

Ronan Perron, St-Brieuc

*Deux jours après le passage de Mercure, Ronan Perron nous envoyait cet exercice réalisé pour ses élèves de cinquième qui avaient préparé l'observation du 9 mai. Les photographies sont de l'auteur.*

Prérequis mathématiques : proportionnalité.

Cette activité vient après une étude sous forme de recherches documentaires sur la planète Mercure (utilisation des posters de l'Observatoire de Paris par exemple). De plus la mise en place d'une maquette à l'échelle du système Terre-Mercure-Soleil peut permettre aux élèves de mieux appréhender les distances et les trajectoires.

Déroulement : (1 heure)

Le document est distribué aux élèves qui se mettent en démarche d'investigation (travail par petits groupes).

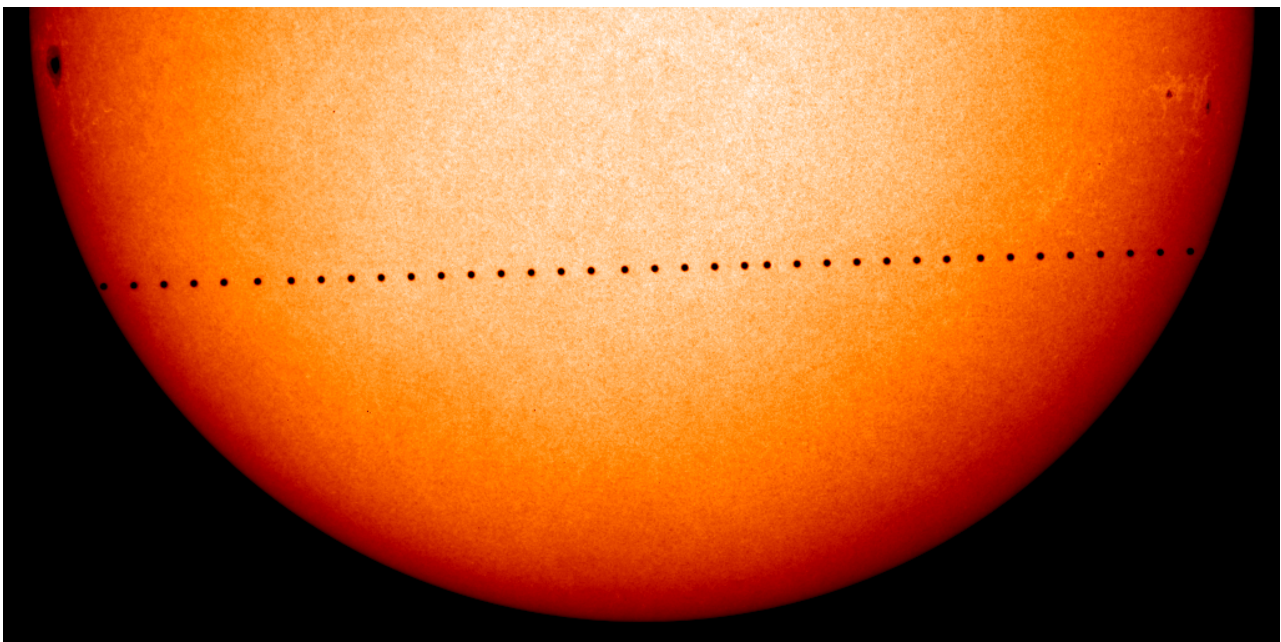
Lorsqu'ils ont tracé la trajectoire, on peut leur montrer une photo de passage prise par Soho et utiliser la maquette pour justifier que pour la durée du passage, on peut considérer la trajectoire rectiligne et le mouvement uniforme. Cela permet

de justifier l'utilisation de la proportionnalité dans la suite du travail (calculer les durées). Pour les élèves, l'utilisation de la proportionnalité est assez évidente.

Les élèves n'étant pas guidés, sauf en cas de difficultés, la diversité des procédures utilisées pour résoudre les problèmes est très enrichissante pour les élèves et pour l'enseignant. Une fiche méthode pour convertir les heures décimales en heures minutes peut être donnée.

Cela donne de bons résultats, les élèves retrouvent les données des posters à 15 minutes près.

On peut également réaliser la même activité sous forme informatique, en utilisant un logiciel de dessin (utilisation de calques pour superposer les images puis utilisation de l'outil mesure).



*Le passage de Mercure du 8 novembre 2006 vu par SOHO.*

## Passage de Mercure du 9 mai 2016

**Utilisation de photos pour retrouver des informations sur le phénomène.**

---

Photo n° 1 : 15 h 27 (TU)

Photo n° 2 : 16 h 27 (TU)

---

Vous disposez de deux photos du passage de Mercure le 9 mai 2016.

À l'aide de ces deux photos, déterminer la trajectoire de la planète sur le disque solaire.

Puis retrouver la durée totale du phénomène.

En déduire l'heure de début et l'heure de fin du passage.



Photo 1.



Comparez ces valeurs aux valeurs indiquées dans les documents étudiés dans les séances précédentes (poster de l'observatoire de Paris).

Photo 2

# LA VIE ASSOCIATIVE

## André Brahic et le CLEA



Pour tenter de vous dire la force des liens du CLEA avec André Brahic, au-delà des souvenirs que vous avez, lecteurs des Cahiers ou simples auditeurs de radio ou de télévision, de ses talents de conférencier, de son enthousiasme communicatif, il me faut revenir aux racines.

Il y a eu, à la naissance du CLEA, la conviction forte que le mode de penser et la méthodologie scientifiques ne sont pas réservés à quelques futurs spécialistes, mais sont des composantes nécessaires à la formation de tous et que l'astronomie est une porte d'entrée privilégiée, par la motivation qu'elle suscite chez des jeunes souvent rebutés par les enseignements disciplinaires scientifiques et peut-être aussi par son objet même qui nous interroge sur notre place dans le cosmos et dans son histoire.

Se sont alors retrouvés sur le projet, qui est devenu celui du CLEA, l'équipe soudée que nous formions à l'université Paris Sud-Orsay, Lucette Bottinelli, Jacky Dupré, Michèle Gerbaldi et moi-même, et une constellation d'enseignants, acteurs d'expériences pédagogiques concrètes, innovantes, dont ne pouvant citer ici tous les noms, je me limiterai à celui de Gilbert Walusinski, qui fut pendant de longues années tout à la fois le secrétaire du CLEA et le rédacteur en chef des Cahiers Clairaut ; que les autres me pardonnent.

Dans notre milieu scientifique, où les carrières se font toujours sur des critères liés aux activités de recherche, avec simple vérification que celles d'enseignement « se passent bien », beaucoup ont regardé notre projet avec une sympathie un peu lointaine, mais quelques-uns l'ont accompagné d'un soutien sans faille. Avoir nommé Jean-Claude Pecker et Évry Schatzman « présidents d'honneur du CLEA » dès sa formation signifiait l'étroite communion de pensée dans laquelle nous étions avec ces deux grands scientifiques et grands humanistes. Le « laboratoire Schatzman » a été en son temps un exemple assez unique où de très fortes personnalités, de grands chercheurs, créatifs, originaux, souvent atypiques se sont épanouis avant de prendre leur envol. Plusieurs d'entre eux ont été des soutiens convaincus du CLEA ; et parmi eux, tout particulièrement, André.

Dans « Un entretien à bâtons rompus » qu'il publia dans le numéro 39-40 de l'hiver 1987 des Cahiers Clairaut, Gilbert Walusinski écrivait « *Il y a dix ans que j'ai fait la connaissance d'André Brahic. C'était à l'école d'été de Lanslebourg où il nous avait fait un exposé lumineux sur les forces dans l'univers. Avec les autres stagiaires,*

*j'avais été aussitôt conquis par son enthousiasme. Des rencontres pour la rédaction des Cahiers Clairaut me convainquirent ouvert à ceux qu'il aime ou qu'il estime. » L'entretien se termina très difficile d'éviter que dans nos sociétés, la distraction ne réfléchisse, que les décisions politiques ne soient prises pour des réflexions rationnelles et surtout que le long terme soit toujours suivi plus pour lutter en faveur de la culture, de la culture scientifique poursuivie par le CLEA ? ».*



D. Bardin

Au CLEA, nous avons et partageons la conviction profonde qu'il faut comprendre pour agir et non savoir, ce qui nous conduit à participer à la diffusion des connaissances et de leur mode d'appropriation. J'aime personnellement citer la philosophe Simone Weil qui écrivait en 1934 : « On dit que la force est impuissante à dompter la pensée ; mais pour que ce soit vrai, il faut qu'il y ait une pensée. Là où les opinions irraisonnées tiennent lieu d'idées, la force peut tout. (...) C'est l'absence de pensée libre qui rend possible d'imposer par force des doctrines officielles entièrement dépourvues de signification. » Nos modes de pensée personnels sont conditionnés, inconsciemment, par la culture dans laquelle nous vivons et, sans que l'on en ait toujours conscience, la science contribue à apporter une vision du monde qui façonne et modifie nos schémas mentaux.

La grande aventure intellectuelle de la fin du XX<sup>e</sup> siècle aura été une nouvelle perception de la complexité et de la façon de l'appréhender. La pensée systémique est un dépassement nécessaire de la démarche analytique héritée de Descartes qui conduit à penser qu'un problème peut être compris et traité en le considérant comme isolé, qui imagine l'avenir en extrapolant le présent. Einstein disait : « Si nous ne changeons pas notre façon de penser, nous ne serons pas capables de résoudre les problèmes que nous créons avec nos modes actuels de pensée. » Ce nouveau mode de pensée nécessite le gros effort de s'ouvrir aux domaines extérieurs à sa propre recherche et la capacité d'extraire le général du particulier. Donc de la curiosité désintéressée et de la culture. André est l'un de ceux qui me l'ont fait découvrir parce qu'il en témoignait. David Elbaz, un de ses collègues du Service d'Astrophysique de Saclay, travaillant dans un domaine de recherche totalement différent, a prononcé ce témoignage lors de l'hommage rendu à André au Père-Lachaise le 20 mai. Il a dit en substance : « André passait parfois un moment avec moi dans mon bureau ; il me parlait de son travail, de ses idées, de ses projets, de ses réflexions. Il m'est souvent arrivé de me retrouver ensuite avec des perspectives nouvelles pour appréhender mon propre travail. »

Les Cahiers auront sans doute l'occasion de présenter toutes les facettes du chercheur, de l'enseignant, de l'écrivain et de l'homme que fut André Brahic. Notre présidente, Cécile Ferrari, témoignera certainement de leur collaboration scientifique et de la façon profonde dont il a marqué sa vie. J'ai envie d'insister ici sur la beauté du passage de témoin que représente le parcours de l'ancienne collégienne, dont Jean Ripert nous entretenait avec enthousiasme, puis étudiante d'une grande École d'ingénieur, qui fréquenta en même temps les enseignements d'astrophysique de notre équipe d'Orsay avant d'entreprendre une thèse sous la direction d'André et d'incarner l'idéal du CLEA, pour notre plus grand bonheur à tous, André inclus.

Lucienne Gougouenheim

La force du CLEA n'est-elle pas d'avoir su tisser, au cours des décennies, des liens étroits entre astronomes professionnels et enseignants, avec l'ambition commune d'enseigner l'astronomie très tôt et au plus grand nombre, et ancrer ainsi, chez les enfants et les adolescents, une certaine culture scientifique, voire un esprit critique ? Les succès du CLEA ne résident-ils pas dans son credo d'une formation continue centrée sur l'appropriation de savoirs et savoir-faire astronomiques, pour qu'un enseignant devienne le chef d'orchestre de sa pédagogie des étoiles, l'inspirateur, l'instigateur de curiosité et de questionnements auprès de ses élèves ? Ce tissu du CLEA, tel un champ gravitationnel, a réussi à relier professeurs de tous niveaux autour de ces objectifs et a aussi conduit, en de multiples occasions, de jeunes individus épris de ciel nocturne jusqu'aux portes de l'astronomie professionnelle.

La vie est telle une trajectoire, faite de rencontres gravitationnelles autour de personnages singuliers. Elle peut s'avérer être un merveilleux voyage interplanétaire. Je ne sais si Jean Ripert m'a poussée à lever la tête au-dessus de la ligne de faite des oliviers ou s'il a répondu, dans une conjonction étonnante, à mon vertige face à l'immensité de la voûte étoilée. Ce fut la première déflexion. Plus tard, Lucienne Gougouenheim a habilement orienté la trajectoire, par une diffusion gravitationnelle millimétrée, vers l'équipe d'André Brahic.



Capturée par une planète géante, de nouveaux mondes, ceux des anneaux planétaires, sont apparus. André m'a permis de trouver ma place dans le Système solaire, tout comme Jean et Lucienne dans le tissu du CLEA, mais pas seulement. Il m'a montré que « Liberté, Égalité, Fraternité » ne formaient pas qu'une simple devise de notre République mais aussi les principes forts d'une hygiène de l'esprit. Au point de l'accrocher au ciel, peut-être pour lui donner un espoir d'éternité, aux basques des structures étonnamment stables que sont les arcs de Neptune. Manquait le Courage comme une condition nécessaire à leur maintien. On a appris depuis que l'arc Liberté avait perdu de sa superbe et que Courage avait, dans le même temps, exhibé une belle étincelle, Égalité et Fraternité restant fidèles à leur éclat passé. Qu'en sera-t-il demain ? Veillons au grain. Et ne nous laissons jamais des tours de manège que nous offre la Terre, par dizaines, dans sa folle course autour du Soleil. À l'instar d'André.

Cécile Ferrari

*André Brahic était mon ami ; certes nous ne nous rencontrions que trop rarement ; aussitôt apparu, aussitôt disparu, - tel était André, qui n'avait pas la vitesse de la lumière, mais presque. Rapide et précis dans tout ce qu'il faisait, sa présence était pour tous un stimulant efficace et souriant. L'enthousiasme d'André était communicatif. Sa connaissance des planètes de notre Système solaire était éblouissante ; dès ses premiers travaux, il avait expliqué, grâce à la dynamique newtonienne, la stabilité des anneaux de Saturne ; plus tard il a découvert l'anneau de Neptune. Aujourd'hui, André Brahic se préoccupait de l'émergence de la vie sur les planètes, y compris les exoplanètes, qui tournent autour d'autres étoiles que le Soleil. André avait aussi le génie de la communication. Tout en s'exprimant à une vitesse record, il était suivi avec la passion qu'il savait communiquer à ses auditeurs comme d'ailleurs à ses lecteurs. Aujourd'hui, nous apprenons tristement sa disparition, mais le souvenir de son visage souriant, de sa parole facile, et de son œuvre profonde, ce souvenir durera très longtemps. André Brahic était notre ami.*

Jean-Claude Pecker  
15 mai 2016

André,

Tu nous as fait rêver les yeux ouverts,  
avec tes histoires qui nous ont baladé  
des confins du système solaire  
aux fins fonds de la voie lactée.

Tu nous as fait rire et sourire  
avec tes anecdotes habilement placées  
pour faire rebondir l'intérêt  
d'un discours bien plus abstrait.

Tu nous as fait vibrer, en ouvrant au partage  
ton grand livre d'images, et les merveilles  
d'un savoir chaque jour  
un peu plus complet que la veille.

Tu nous as fait tourner la tête  
à te voir parcourir la planète  
à travers vents et marées, partout  
où il te semblait indispensable d'aller.

Tu nous as fait envie  
et rendus bleus de jalousie  
à t'entendre si facilement expliciter  
ce dont nous, nous avons tant de mal à parler.

Tu nous as fait miroiter qu'ainsi il suffisait  
de t'accompagner dans ces "conférences" sans fin  
pour se sentir moins crétin  
le lendemain matin...

Et là, voilà soudain  
que tu nous laisserais tomber...  
Sérieux ? T'as pas trouvé mieux ?  
Encore une blague que tu nous fais ?

Hélas, on me dit que t'as quitté la galaxie,  
définitivement "décalé vers le rouge",  
alors que tu savais y être depuis longtemps,  
dans le rouge, ne fais pas l'innocent.

Non, non, on va pas pleurer, non.  
On va juste essayer de reprendre  
le flambeau que tu nous as laissé,  
et on va finir le boulot.

En tout cas le continuer,  
comme tu nous l'as montré :  
meilleure manière de garder l'espoir  
et d'honorer ta mémoire.  
Te reposer, maintenant, tu peux,  
Maître Dédé.

Daniel PAUPART - CLEA.Bordeaux



*Les chasseurs d'éclipses, association dans laquelle Lionel Muller était actif en Alsace vont faire installer une méridienne sur sa tombe.*

*Elle sera réalisée grâce aux divers dons recueillis lors de son décès.*

*Ci-contre une photo de la maquette que nous envoie Alexandra Hergott.*

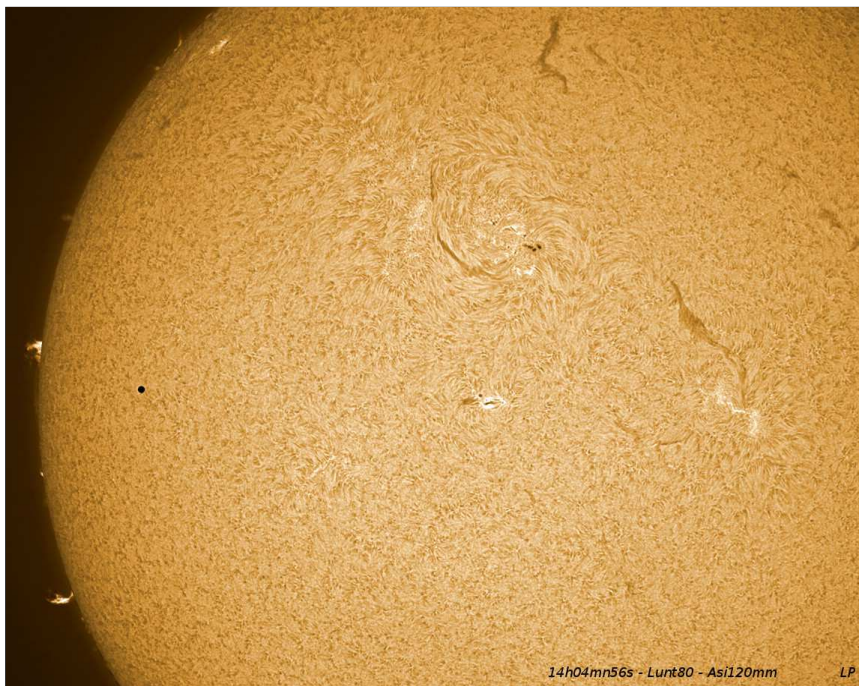


Image du passage de Mercure devant le Soleil à 14 h 04 min 56 s le 19 mai dernier...  
Image de Luc Pictorius prise avec une lunette H-alpha de 80 mm.

Vous trouverez sur le site du CLEA d'autres photographies de l'événement.

14h04mn56s - Lurt80 - Asi120mm LP

### Solutions des mots croisés de la page 34

#### Horizontalement

1. Hertzprung. 2. Yaourtière. 3. Dust. Altaïr. 4. Ara. NLU. 5. Or. As. Tau (lettre grecque ou abréviation du Taureau). 6. Géante. 7. Isis. 8. Morgan. Ré. 8. Naine. Métal (les astronomes ont la drôle d'habitude de parler de métal pour tous les atomes plus lourds que l'hélium). 9. Étés. Gasoil.

#### Verticalement

1. Hydrogène. 2. Eau. Ré. At. 3. Rose. Amie. 4. Tut. Anons. 5. Zr. Astre. 6. Star. Eg. 7. Pilat. AMA (2009, année mondiale de l'astronomie). 8. Ret (Réticule). Ainés. 9. Uranus. To (téraoctet). 10. Neil (Armstrong). Irai. 11. Russell.

## Ecole d'Eté 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 :  
[acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea](http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea)

## Les productions du CLEA

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

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

### Fiches pédagogiques

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

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

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

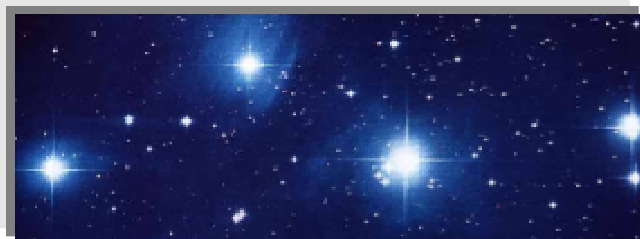
*Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>*

Le formulaire de commande est sur le site.

## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



# LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 141 - Mars 2013 7 €



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

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

# COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège social :**

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

**École d'Eté d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

[http://ventes.clea-astro.eu/](http://ventes.clea-astro.eu)

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2015 :	<b>10 €</b>
Abonnement CC pour 2015 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>35 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>40 €</b>

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

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

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368  
Prix au numéro : 9 €  
Revue trimestrielle : numéro 154 été 2016