

Arpenter L'UNIVERS

Etoiles et Lumière

LIVRET PEDAGOGIQUE

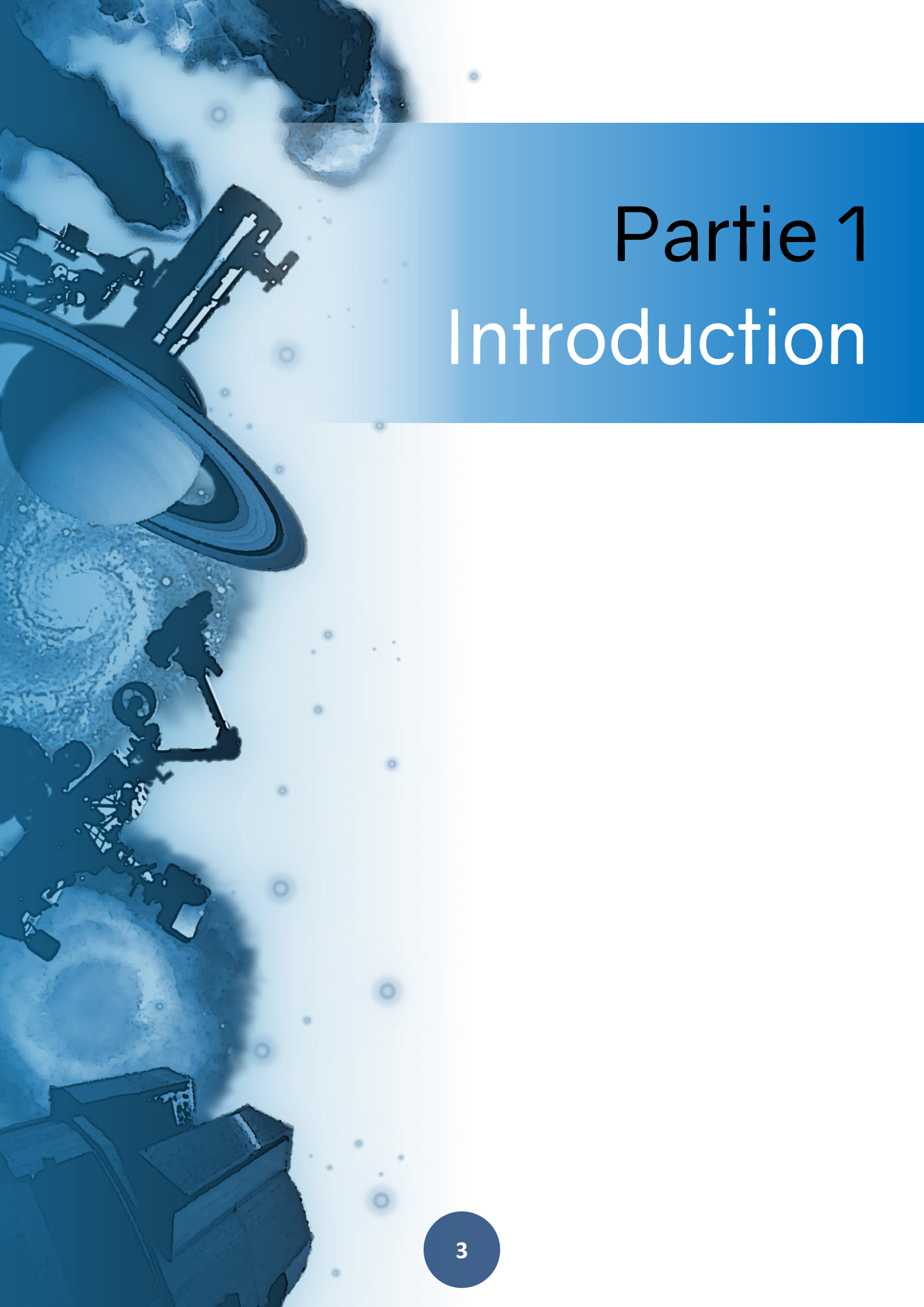
(v 3.1 – 20/01/2018)

Pour l'enseignant et l'animateur



Sommaire

Partie 1 : Introduction	3
Arpenter l'Univers	5
La thématique « Etoiles et Lumière »	13
A propos de Planète Sciences	18
Le télescope Jean-Marc Salomon	21
Partie 2 : Ateliers d'initiation	25
EL1 : Le Soleil, notre étoile	27
EL2 : Le fonctionnement des étoiles	45
EL3 : L'évolution des étoiles	65
Partie 3 : Ateliers expérimentaux	91
ELAE1 : Préparation d'une observation	93
ELAE2 : Mesure de l'âge d'un amas ouvert	103
ELAE3 : Composition de l'atmosphère du Soleil	107
ELAE4 : Les types spectraux des étoiles	111
Partie 4 : Documentation	115
Doc n°1 : Observer le Soleil en toute sécurité	117
Doc n°2 : Les échelles dans l'Univers	131
Doc n°3 : La classification des étoiles	157
Doc n°4 : La naissance des étoiles	183
Doc n°5 : L'intérieur des étoiles	197
Doc n°6 : L'évolution des étoiles	205
Doc n°7 : Le Soleil, notre étoile	219
Partie 5 : Glossaire	233



Partie 1

Introduction



Arpenter l'Univers

Qu'est-ce que c'est ?

Conformément au projet éducatif de l'association, l'opération *Arpenter l'Univers* vise à apporter aux lycéens une curiosité à l'égard de l'astronomie par la réalisation d'un projet expérimental dans le cadre scolaire et, par cette ouverture, à encourager la poursuite d'études scientifiques. Le suivi régulier du projet est réalisé par des animateurs scientifiques avec l'appui de chercheurs ou doctorants en astrophysique.

I. Les objectifs

L'objectif est de permettre aux jeunes – collégiens, lycéens et étudiants de premier cycle universitaire – de découvrir et pratiquer l'astronomie et l'astrophysique expérimentales, en lien étroit avec les programmes de Physique, Maths, SVT, Histoire, Sciences de l'ingénieur, etc. Plus précisément :

- Donner aux jeunes une représentation de l'Univers fidèle à ce que la science nous permet de connaître aujourd'hui afin de contribuer à leur ouverture d'esprit et la construction de soi.
- Initier à la démarche expérimentale pour aiguïser leur objectivité et leur sens critique.
- Faire découvrir les métiers scientifiques et le travail de recherche pour leur montrer comment les découvertes sont faites.
- Placer les notions des cours de sciences dans un contexte plus vaste pour susciter la curiosité.

Dès le choix d'un parcours Arpenter l'Univers et d'une thématique, l'enseignant est guidé par Planète Sciences tout au long de son projet :

- Le coordinateur l'aide à choisir la thématique et le parcours qui lui conviennent le mieux.
- La réunion pédagogique en début de parcours lui permet de rencontrer l'équipe d'animation, notamment l'intervenant référent qui accompagnera le projet sur toute sa durée.
- La réalisation du parcours en 4 phases (initiation, approfondissement, expérimentation, valorisation) favorise la progression de la démarche expérimentale.
- 4 ateliers + 1 observation d'initiation au sein de l'établissement, encadrées par deux animateurs scientifiques, aiguillent le projet.
- La phase de projet de classe en autonomie est suivie et guidée conjointement par un scientifique parrain et l'animateur référent.
- Une 2^{ème} observation scientifique clôture le projet, à l'établissement ou dans un observatoire astronomique.
- Les Astrophées, une rencontre de tous les élèves participants, valorise leurs projets en fin d'année scolaire.

II. Les parcours Arpenter l'Univers

L'opération vous est proposée sous la forme de trois parcours, parmi lesquels vous pouvez choisir. Si vous êtes enseignant, le parcours **Découverte** est idéal pour une première expérience d'Arpenter l'Univers. Il est accessible pour les classes entières et les classes en demi-groupes. Le parcours **Exploration**, dédié à l'expérimentation en astrophysique, correspond plutôt à un projet mené dans le cadre d'un enseignement d'exploration, en demi classe ou avec des élèves volontaires, ou encore dans le cadre d'un club science. Si vous êtes lycéen ou étudiant, vous pouvez réaliser votre TPE ou TIPE dans le cadre du parcours **Aventure** ou simplement participer librement avec votre club astro étudiant. Le suivi et le contenu abordé sont personnalisés.



Objectifs :

Initier les élèves à l'astronomie, afin qu'ils acquièrent une représentation de l'Univers fidèle aux découvertes de la science et qu'ils ressentent l'envie d'apprendre par eux-mêmes.

Durée type : 1 trimestre

Public type : classes, entières ou en demi-groupes, de Collège ou de Lycée.

Encadrement : 2 animateurs dont un référent

Effectif : 30 jeunes max.

Seuil tarifaire indicatif : 800 € au total

Prestations : 4 ateliers en classe + 1 observation à



Objectifs :

Initier les élèves à l'astronomie et à l'agencement des échelles dans l'Univers, et leur apprendre à établir et réaliser un protocole expérimental à l'aide d'un télescope semi-professionnel en observatoire.

Durée type : 1 trimestre

Public type : Elèves volontaires en Collège / Lycée, clubs de sciences, enseignements d'exploration.

Encadrement : 2 animateurs dont un référent

Effectif : 15 jeunes max.

Seuil tarifaire indicatif : 1400 € au total

Prestations : 3 ateliers en classe + **1 atelier et 1 observation en observatoire** + 1 projet suivi à distance



Objectifs :

Apporter des connaissances en astronomie et assurer un suivi à des élèves désirant réaliser un TPE ou un TIPE en utilisant un télescope semi-professionnel.

Durée type : adaptée aux besoins des étudiants

Public type : TPE au lycée, TIPE en CPGE, TP en premier cycle universitaire. 5 jeunes max.

Encadrement : 2 animateurs dont un référent

Effectif : 5 jeunes max.

Seuil tarifaire indicatif : 30 € par étudiant

Prestations : 3 ateliers au Fablab de Planète Sciences + 1 observation en observatoire + suivi à distance

III. Les thématiques d'Arpenter l'Univers

Les thématiques proposées sont :

- **Etoiles et Lumière** : comment fonctionne une étoile ?
Liens aisés avec les matières : Physique-Chimie, Mathématiques, Sciences de l'Ingénieur
- **Galaxie et Univers** : Qu'est-ce qu'une galaxie ?
Liens aisés avec les matières : Physique- Chimie, Mathématiques
- **Planètes et Gravitation** : comment se forment les planètes ?
Liens aisés avec les matières : Physique-Chimie, Mathématiques, SVT
- **Histoire et instrumentation** : comment a-t-on appris tout cela ?
Liens aisés avec les matières : Histoire, Philosophie, Physique-Chimie, Sciences de l'Ingénieur, Mathématiques

Au sein d'une thématique, les élèves bénéficieront de 3 ateliers d'initiation encadrés par deux animateurs scientifiques avec le matériel pédagogique associé. L'enseignant bénéficiera d'un suivi adapté par l'animateur référent et un chercheur parrain travaillant dans le domaine lié à la thématique, ainsi que d'un livret de documentation pédagogique et scientifique. L'opération se déroule sur environ un trimestre, en plusieurs phases qui sont explicitées ci-après.

Une opération pour les enseignants

Arpenter l'Univers s'appuie sur une approche transdisciplinaire et va dans le sens d'un travail avec plusieurs enseignants pour une classe. Les contenus sont liés de manière étroite aux programmes des cours de science. L'astronomie et l'astrophysique sont présentées comme moyens d'illustration, d'approfondissement et d'ouverture du cours.

Cela permet également de faciliter les demandes des enseignants auprès de leur hiérarchie pour financer l'opération dans leurs classes.

IV. Mise en place et déroulement

Le parcours Arpenter l'Univers

Chaque projet avec une classe s'articule en plusieurs phases successives, constituant un parcours Arpenter l'Univers. L'agencement des phases peut demeurer souple selon les besoins propres à chaque projet. Pour le parcours **Aventure**, les durées et l'organisation de ces phases seront personnalisées suivant les besoins du groupe de jeunes.

Réunion de préparation

Une réunion pédagogique de lancement est prévue en début de projet. Elle rassemble les enseignants, les animateurs, les bénévoles référents techniques, les scientifiques parrains et la coordinatrice responsable de l'ensemble des projets. Elle se tient en septembre pour la première vague de l'année, et en janvier pour la seconde. Tous les groupes concernés sont invités à se réunir le même jour pour suivre une présentation officielle d'Arpenter l'Univers (« ALU »), puis se réunir en petits groupes pour discuter de la mise en œuvre concrète des projets respectifs.

- **Phase 1 : Initiation**

L'objectif de cette phase est de sensibiliser les élèves à l'astronomie et à la thématique choisie. On y apporte les notions de base nécessaires aux élèves comme à l'enseignant pour qu'ils soient en mesure d'identifier un projet à réaliser sur la phase d'approfondissement. L'enseignant et les animateurs disposent d'un livret pédagogique et scientifique commun pour les guider. Les animateurs viennent en classe avec du matériel pédagogique associé à chaque atelier. Un carnet de bord individuel est mis à disposition de chaque élève pour lui permettre de formaliser sa progression au sein de la thématique suivie.

Le binôme d'animateurs vient encadrer en classe 3 ateliers pédagogiques sur la thématique choisie. Chaque séance dure en moyenne 1h à 1h30 pour 15 élèves (le double en demi-groupes pour une classe entière). Ces durées types sont à adapter selon les configurations de classes et d'emplois du temps. Elles se définissent, avec les dates des interventions, en début de parcours.

Une première observation, menée en début ou en fin de la phase d'initiation, permet aux élèves de découvrir les instruments d'astronomie, d'apprendre à les utiliser et à se repérer dans le ciel. Elle peut également susciter des questionnements à l'origine du projet de classe et orienter les jeunes sur les manipulations expérimentales réalisables.

- **Phase 2 : Approfondissement**

L'objectif de cette phase est d'établir une problématique avec les élèves, élaborée à partir des connaissances acquises lors de la phase d'initiation, qu'il s'agira de résoudre ensemble. Lors d'une séance en classe de lancement du projet, l'animateur référent pourra offrir son aide aux élèves et à l'enseignant pour la définition de cette problématique, l'organisation du travail en coopération ainsi que la définition des étapes du projet.

L'enseignant et sa classe seront suivis à distance et guidés dans leurs recherches à la fois par leur animateur référent et un scientifique parrain.

Le scientifique parrain pourra donner une conférence en classe sur son domaine de travail, en lien avec la thématique choisie et la problématique définie. Si le budget accordé par l'établissement le permet, la classe pourrait visiter son laboratoire. La durée de cette phase est variable et décidée en autonomie par le groupe projet.

L'enseignant et les élèves disposeront d'une malle documentaire, du livret de ressources pédagogiques et scientifiques et des cahiers de bord individuels des élèves pour les aider durant cette phase.

- **Phase 3 : Observation / Expérimentation**

Une expérience scientifique vient conclure ou alimenter la phase d'approfondissement. En formule **Découverte**, il s'agit d'une soirée d'observation réalisée dans la cour du Lycée. En formule **Exploration**, il s'agit de réaliser le protocole expérimental établi par les élèves, avec l'aide de l'animateur, l'enseignant et les guides d'ateliers expérimentaux du livret pédagogique, et d'utiliser le soir l'instrumentation d'un observatoire astronomique pour mener à bien cette expérience.

- **Phase 4 : Valorisation , les Astrophées**

A la fin de l'année scolaire ont lieu les Astrophées, une rencontre de tous les jeunes ayant participé à l'opération Arpenter l'Univers. Les parents et les enseignants sont également invités. Cette rencontre se tient dans un lieu reconnu de Culture Scientifique et Technique.

Durant cette journée, chaque groupe de jeunes pourra exposer et expliquer son projet, sous forme d'expositions, de maquettes, d'expériences ou de présentations orales. Un jury décernera des Astrophées aux groupes qui se démarqueront selon certains critères. C'est aussi l'occasion pour les jeunes d'échanger entre eux sur les différentes thématiques de leurs projets, leur façon d'aborder l'astronomie, etc.

V. Moyens

Moyens humains

Chaque réalisation d'Arpenter l'Univers sera confiée à un animateur scientifique référent. Il sera l'interlocuteur privilégié entre l'équipe enseignante et la coordinatrice de Planète Sciences. Cet animateur interviendra en classe durant la phase d'initiation. Il sera pour cela secondé par un animateur adjoint. L'animateur référent aura aussi pour tâches de guider l'enseignant dans la phase d'approfondissement et d'encadrer les soirées d'observation. Dans le cadre des missions en observatoire, si aucun animateur ne possède l'agrément d'utilisation du télescope sur place, ils seront accompagnés par un bénévole habilité. Dans le cas du Télescope Jean-Marc Salomon (Île de Loisirs de Buthiers, Seine-et-Marne), il est par exemple possible pour un enseignant de passer cet agrément s'il a des connaissances en astronomie amateur (nous contacter).

De par leur métier, les animateurs scientifiques sont en mesure de s'adapter à différents publics enfants, jeunes ou adultes, et en capacité d'assurer la sécurité des personnes et du matériel durant les expériences scientifiques.

Un scientifique parrain sera associé au projet pour la phase d'approfondissement. Il pourra également, selon ses disponibilités, participer à l'encadrement des soirées d'observation, faire une présentation en classe ou à distance (skype), ou accueillir les élèves dans son laboratoire pour une visite guidée.

Moyens pédagogiques

Planète Sciences édite un livret pédagogique accompagné de documentation pour chaque thème astronomique. Ce livret contient :

- les fiches des ateliers d'initiation ;
- des encadrés indiquant les liens avec les programmes scolaires pour les différents niveaux, utiles pour réinvestir les connaissances et aller plus loin ;
- des illustrations et des exemples ;
- de la documentation sur le thème abordé, utile à l'enseignant et aux élèves pour imaginer des exercices ou pour la phase d'approfondissement.

L'animateur utilisera également ce livret pour ses interventions en complément des malles de matériel pédagogique. Le contenu de celles-ci est référencé dans le livret afin de faciliter la mise en œuvre des ateliers.

Moyens techniques

Certains ateliers, ainsi que la soirée d'observation à l'établissement, impliquent l'utilisation de matériel astronomique technique. Afin qu'il soit utilisé en toute sécurité, il sera fourni par Planète Sciences pour les séances concernées et récupéré ensuite. L'animateur référent en aura la responsabilité le temps de la présence des instruments à l'établissement. Dans le cas d'une mission en observatoire, cette responsabilité incombera au responsable agréé.

Moyens financiers et partenaires

Il est demandé aux établissements de prendre à leur charge une partie du coût total du projet. La partie complémentaire est assurée grâce au soutien financier de divers partenaires. Ainsi, nous ont soutenus depuis le lancement de l'opération :

Le Ministère de la Recherche, le Ministère de la Jeunesse et des Sports, le Fond National pour le Développement de la Vie Associative, la Fondation SNCF, Sciences à l'Ecole, la Région Ile de France, la Fondation Jean-Marc Salomon (sous l'égide de la Fondation de France), la Fondation du Campus Paris-Saclay (la Diagonale), l'Île de loisirs de Buthiers.



La thématique Etoiles et Lumière

En quoi cela consiste-il ?

Vous avez choisi la thématique Etoiles et Lumière. Chaque Thématique de Arpenter l'Univers associe une échelle de l'Univers et un phénomène physique important présent à cette échelle. A chaque étape de l'exploration de cette thématique, le présent livret vous donnera les clés pour illustrer et prolonger les programmes officiels de cours avec l'astronomie et l'astrophysique.

I. Présentation de la thématique

Dans la thématique Etoiles et Lumière, les jeunes découvriront la nature du Soleil qui éclaire nos journées, et la multitude des autres étoiles, dans toute leur diversité : étoiles naines, étoiles géantes, cadavres d'étoiles, étoiles chaudes, étoiles froides...

Ils apprendront à les reconnaître, à les classer, et appréhenderont leur fonctionnement. Après tout, beaucoup de gens savent qu'une étoile, par exemple notre Soleil, émet de la lumière, mais comment ça marche ? La réponse à cette question permettra d'illustrer et approfondir le cours de physique sur la lumière et le nucléaire.

Les notions abordées iront de la thermodynamique à la physique nucléaire en passant par la spectroscopie ou encore la gravitation. A chaque fois, les domaines seront effleurés, en prenant juste ce qu'il faut pour que les jeunes puissent comprendre les mécanismes à l'œuvre.

Enfin, comme dans toutes les actions de Planète Sciences en astronomie, la notion la plus importante qui sera approfondie est la notion d'échelle. L'esprit humain a beaucoup de mal à appréhender l'immensité de l'Univers. Les ateliers d'initiation sont là pour tenter d'élargir la représentation du monde des jeunes.

II. Les ateliers de la thématique

La thématique Etoiles et Lumière se décline en 3 modules différents, qui peuvent être faits séparément ou en complémentarité sur plusieurs semestres ou années successifs. Le module 1 correspond bien à une introduction à la thématique pour les classes de collège, tandis que les modules 2 et 3 sont intéressants à mener ensemble avec les lycées.

Ateliers d'Initiation



Module EL1

Le Soleil, notre étoile

Objectifs :

- Découvrir le Soleil et connaître ses caractéristiques.
- Comprendre la nature du Soleil.
- Comprendre la parenté du Soleil avec les étoiles du ciel nocturne.
- Introduire les notions de décroissance de la luminosité, puissance lumineuse, champs magnétiques.



Module EL2

Le fonctionnement des étoiles

Objectifs :

- Connaître et comprendre la structure interne d'une étoile comme le Soleil.
- Comprendre comment une étoile tient en équilibre.
- Comprendre comment une étoile produit son énergie.
- Comprendre comment l'énergie sort de l'étoile et sous quelle forme.



Module EL3

L'évolution des étoiles

Objectifs :

- Comprendre et connaître les types d'étoiles principaux.
- Savoir classer les étoiles.
- Comprendre les mécanismes principaux de l'évolution des étoiles.
- Comprendre le cycle de la matière au sein d'une galaxie, et ce qui fait que nous sommes-là pour y penser.

Ateliers Expérimentaux

Quelques idées d'expérimentations et observations réalisables avec les élèves.

III. Les malles Arpenter l'Univers

A chaque module d'une thématique est associée une malle de matériel contenant divers outils d'animation et activités. Elles sont apportées à l'établissement par Planète Sciences pour la phase d'initiation.





Pour la phase d'approfondissement, une malle de ressources bibliographiques sera mise à disposition. Pour les ateliers expérimentaux et les séances d'observation, Planète Sciences assurera la venue et le retour du matériel technique.

A propos de Planète Sciences

Une association d'éducation populaire

Créée en 1962, Planète Sciences est une association nationale à but non lucratif organisée en réseau. Elle comporte 10 délégations régionales, s'appuie sur 1 000 bénévoles et 80 permanents. Son objectif est de favoriser, auprès des jeunes de 8 à 25 ans, l'intérêt, la découverte et la pratique des sciences et des techniques et d'aider les enseignants, les animateurs, les éducateurs, les chercheurs et les parents dans leurs activités avec les jeunes.

I. Les activités de l'association

Chaque année, 100 000 jeunes participent à ses activités proposées sur les thématiques de l'astronomie, de l'espace, de l'environnement et de la robotique. Pour créer, améliorer et diversifier ses animations, elle a des liens étroits avec les chercheurs et les ingénieurs. L'association offre aussi différents types de formations (BAFA ou stages techniques) et réalise des documents (ouvrages, guides techniques, livrets pédagogiques) et outils d'animation. Planète Sciences intervient essentiellement dans le cadre de partenariats. Ses actions s'inscrivent dans les politiques des collectivités territoriales, de l'éducation nationale, des ministères, d'organismes de recherche, d'entreprises et de fondations, destinées aux jeunes et au grand public. Les actions de Planète Sciences sont essentiellement menées au sein de structures éducatives (écoles, collèges, lycées, centres de loisirs, maisons de quartiers) ou culturelles (services culturels des communes et institutions publiques, bibliothèques, médiathèques).

II. La pédagogie chez Planète Sciences

La pédagogie de l'association repose sur deux principes fondamentaux : la méthodologie de projet et la démarche scientifique expérimentale.

- **La méthodologie de projet** s'appuie sur la définition d'un cahier des charges englobant plusieurs éléments : circonscription des objectifs, moyens de réalisation, planification, critères d'évaluation. Elle est basée sur la gestion de projet en entreprise.
- **La démarche expérimentale** consiste à mettre le participant en situation de recherche sur un sujet spécifique défini dans un contexte particulier. Elle se réalise en plusieurs étapes : phase d'observation, définition d'hypothèses préalables à l'expérimentation elle-même, phase d'interprétation, communication et confrontation des résultats.



III. Le secteur Astronomie

Avec quarante années de pratique de l'astronomie expérimentale pour les jeunes, le secteur astronomie et ses bénévoles ont développé un savoir-faire et des outils uniques, précieux et en constante évolution.

Au premier rang de ces outils, le télescope Jean-Marc Salomon (TJMS) de 60 centimètres de diamètre est le plus grand télescope amateur d'Ile-de-France et l'un des rares en France à

accueillir des groupes de jeunes pour des activités à caractère pédagogique (cf. partie TJMS ci-dessous). Situé en Seine-et-Marne dans le sud de l'île de France, ce télescope bénéficie d'une bonne vision sur le ciel nocturne, loin de la pollution lumineuse de Paris.

Pour organiser des activités en itinérance, l'association possède des télescopes mobiles de 120 à 400 mm de diamètre et tout l'équipement nécessaire pour imager le ciel.

Par ailleurs, l'association est équipée de nombreux outils pédagogiques tels que des jeux et des supports d'activités élaborés par les bénévoles et salariés du réseau.

Le secteur Astronomie vise à développer régulièrement de nouveaux projets.

Notamment, depuis 2008, sont réalisées des activités d'astronomie pour des enfants hospitalisés, des jeunes sourds, des jeunes handicapés mentaux ou détenus, sous le label « Astronomie Vers Tous ».

L'opération Arpenter L'Univers présentée ici est issue du réaménagement d'une opération scolaire plus ancienne à destination des collèges, lycées et premiers cycles universitaires. Elle a démarrée dans sa version actuelle à la rentrée scolaire 2015.

L'ensemble des actions d'animation, de formation et de vulgarisation du secteur astronomie est piloté par un groupe de bénévoles épaulés par une équipe salariée. Les bénévoles et animateurs agissent sur tous les terrains (scolaire, loisirs, évènementiel) souvent en partenariat avec d'autres établissements scientifiques et associations.

Des temps associatifs variés et réguliers sont organisés.

Le Télescope Jean-Marc Salomon

Le vaisseau spatial du secteur Astronomie

Don de la Fondation Jean-Marc Salomon à Planète Sciences, le TJMS (Télescope Jean-Marc Salomon) est un instrument semi-professionnel de grand diamètre accessible à tous. C'est cet instrument que vos élèves utiliseront si vous choisissez la formule Exploration.

Le télescope Jean-Marc Salomon (« TJMS ») est un télescope de soixante centimètres de diamètre sous coupole. C'est le plus grand télescope amateur d'Ile-de-France et l'un des rares à accueillir des groupes de jeunes pour des activités à caractère pédagogique. Au plein sud de Paris à la limite de la Région Centre, ce télescope, situé sur l'Île de loisirs de Buthiers en Seine-et-Marne, bénéficie de l'un des meilleurs ciels possibles à cette distance de Paris.

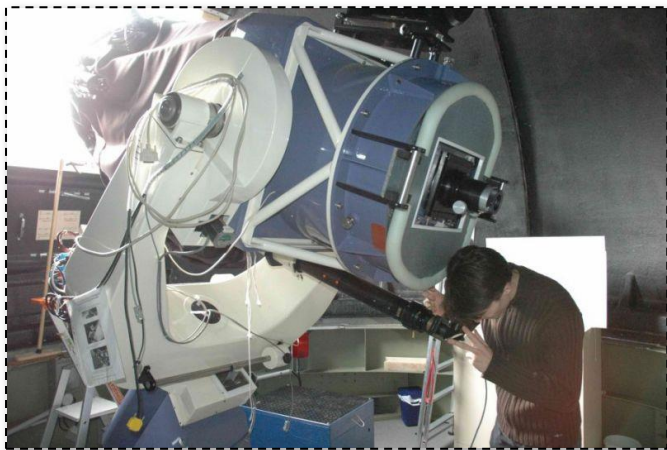
Le « TJMS » reçoit toutes sortes de publics, des classes de tous les niveaux aux groupes venus des Maisons de Jeunes et autres structures de loisirs, en passant par des étudiants. Tous y réalisent des projets d'astronomie expérimentale à leur niveau.

Les activités proposées sont nombreuses : soirées d'observations autonomes, classes, animations pour les jeunes, groupes d'adultes, clubs et associations, formations, événements grand public comme les Nuits des Etoiles Filantes.

Le TJMS intègre les dernières innovations technologiques tant en ce qui concerne le pilotage informatisé de l'instrument que l'acquisition d'images numériques. Il permet de réaliser des observations et d'acquérir des données de qualité scientifique dans les meilleures conditions. Avec ce télescope, les bénévoles de Planète Sciences ont notamment découvert deux astéroïdes et confirmé l'existence d'une exoplanète.

Le maître mot de cet instrument est son accessibilité :

- par sa proximité (à une heure et demie du centre de Paris) ;
- par sa facilité d'utilisation (pilotage par ordinateur, pointage automatisé) ;
- par son équipement de qualité professionnelle.

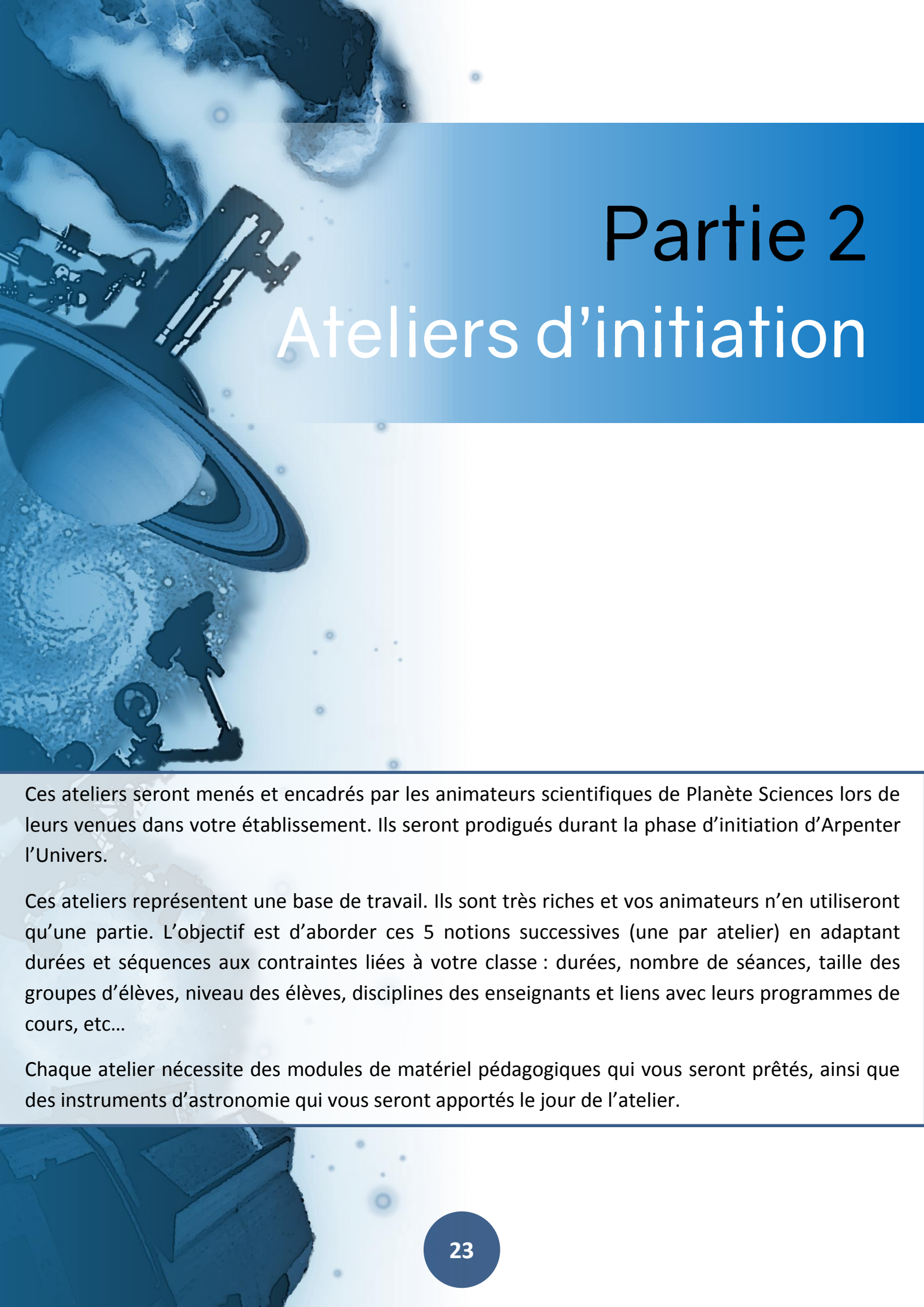


Forte de ces précieux outils, Planète Sciences souhaite faire de ce télescope un instrument reconnu pour la pratique de l'astronomie tant dans le domaine scientifique que technique, pédagogique et inter-associatif. C'est également un instrument dont la vocation est d'accueillir des expériences de science participative et de collaborations entre les jeunes et le monde de la recherche scientifique en astrophysique.

C'est notamment en ce lieu que pourront se dérouler les ateliers expérimentaux d'Arpenter l'Univers pour le parcours Exploration (cela concerne principalement les classes franciliennes).



Figure 1 : Photographie de la galaxie d'Andromède, M31, obtenue au foyer du TJMS.

The background of the page features a stylized illustration of a night sky. In the upper left, a telescope is mounted on a tripod, pointing towards the right. Below it, the planet Saturn is depicted with its prominent rings. The sky is filled with various stars and nebulae, rendered in shades of blue and white. The overall theme is astronomy and space exploration.

Partie 2

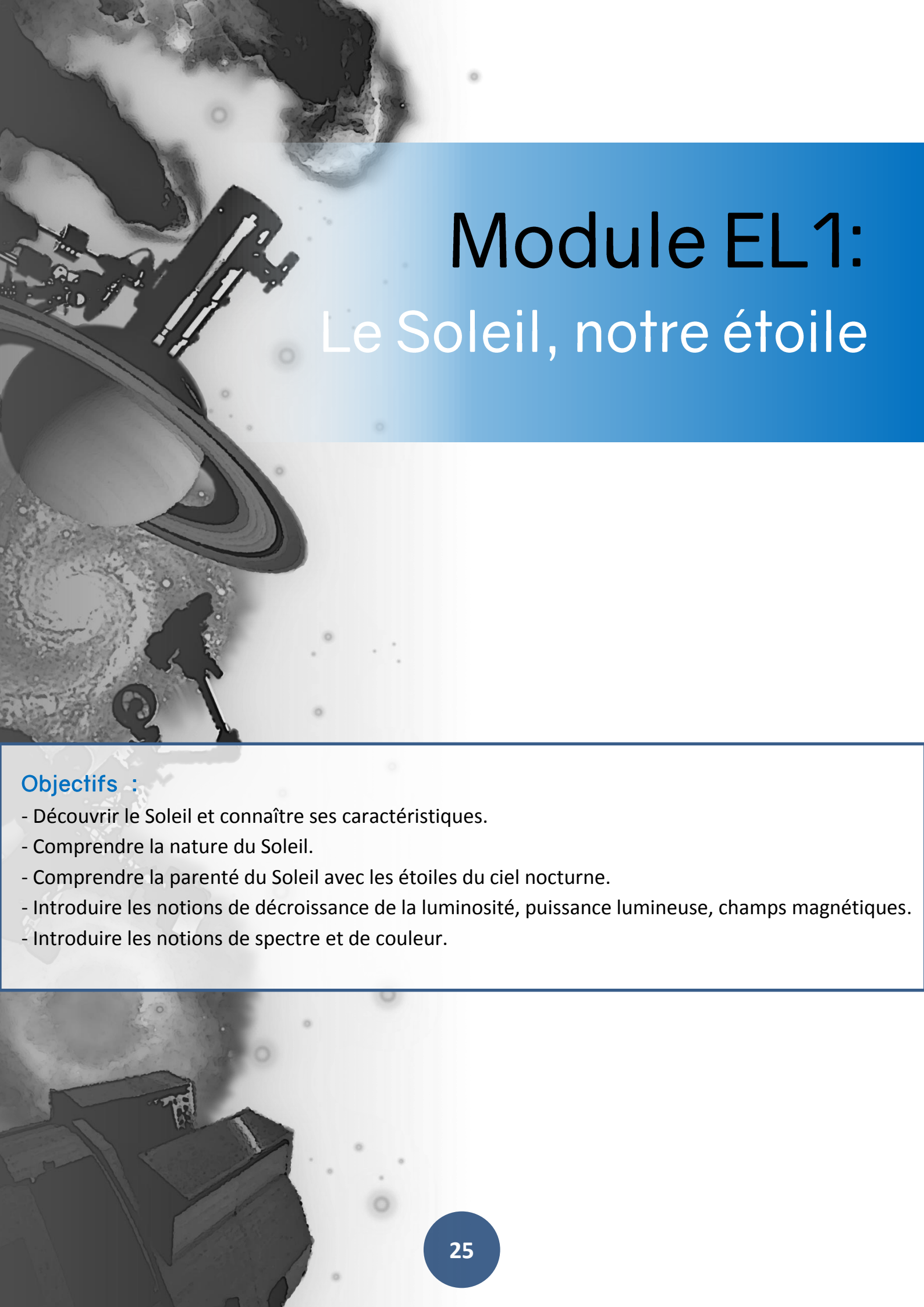
Ateliers d'initiation

Ces ateliers seront menés et encadrés par les animateurs scientifiques de Planète Sciences lors de leurs venues dans votre établissement. Ils seront prodigués durant la phase d'initiation d'Arpenter l'Univers.

Ces ateliers représentent une base de travail. Ils sont très riches et vos animateurs n'en utiliseront qu'une partie. L'objectif est d'aborder ces 5 notions successives (une par atelier) en adaptant durées et séquences aux contraintes liées à votre classe : durées, nombre de séances, taille des groupes d'élèves, niveau des élèves, disciplines des enseignants et liens avec leurs programmes de cours, etc...

Chaque atelier nécessite des modules de matériel pédagogiques qui vous seront prêtés, ainsi que des instruments d'astronomie qui vous seront apportés le jour de l'atelier.





Module EL1:

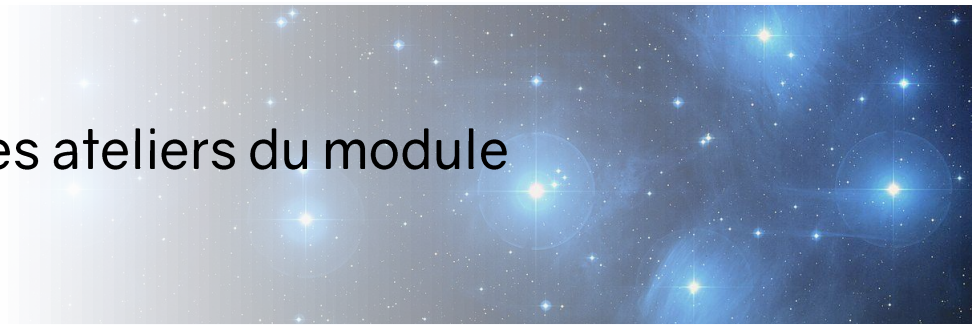
Le Soleil, notre étoile

Objectifs :

- Découvrir le Soleil et connaître ses caractéristiques.
- Comprendre la nature du Soleil.
- Comprendre la parenté du Soleil avec les étoiles du ciel nocturne.
- Introduire les notions de décroissance de la luminosité, puissance lumineuse, champs magnétiques.
- Introduire les notions de spectre et de couleur.

Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	ELA1 PM	EL1 Petite malle	1
Prêt	ELA1 GM	EL1 Grande malle	1
Etab		Vidéoprojecteur	1
Etab		Tableau	1

*Le matériel se trouve dans les malles fournies par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour des observations.

Séquence 1

Observation du Soleil

Objectif :

- Se familiariser avec la source de lumière qui régit nos vies en observant le Soleil via un instrument.

Durée : 1h à 1h30

Etape 1 : Observation du Soleil

Si le temps est **clair**, on **installe** la lunette astronomique ou un télescope Dobson sur le site d'observation, en présence des élèves. On projette l'image sur un écran⁰⁰⁰¹. En installant l'instrument, on peut nommer ce qui est utilisé et interroger les élèves sur la manière de pointer le Soleil sans l'observer directement (Voir document « *Comment observer le Soleil en toute sécurité* dans la partie documentation de ce livret p 115). On peut aussi faire observer les élèves en groupes dans des solarscopes.

Si le temps est **couvert**, on propose une connexion Internet sur le site Soho (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>), projetée sur écran. On explique alors de quelle manière est produite l'image (Voir Document « *Prise d'images en astronomie* »).

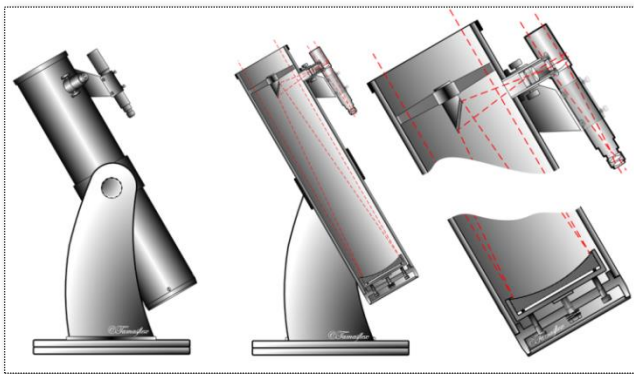


Figure 3 : Télescope de Dobson



Figure 2 : Observation du Soleil par projection

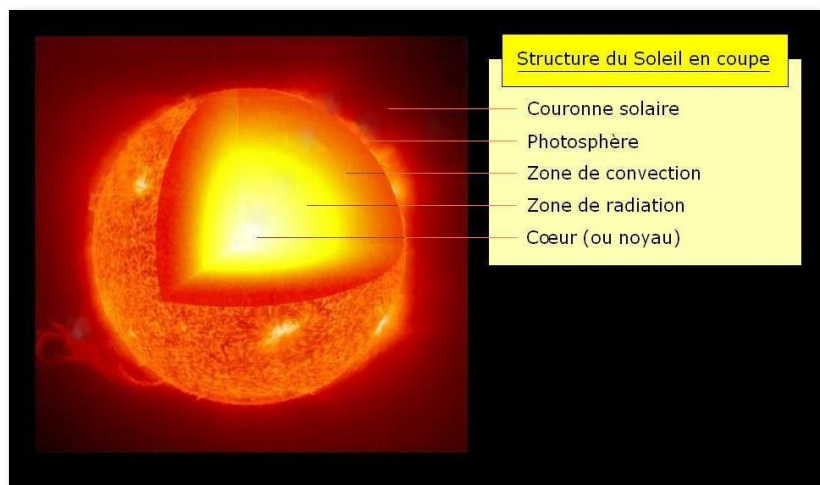
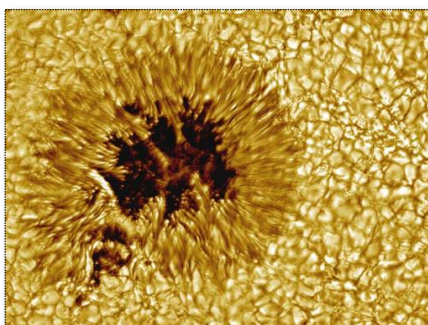
On invite les élèves à **s'exprimer librement sur ce qu'ils voient**. On note leurs remarques sur un tableau.

Etape 2 : Description du Soleil

A l'aide de la maquette en coupe, en partant du cœur jusqu'à la surface et la couronne, on décrit rapidement les différentes composantes du Soleil et sa fonction : "centrale nucléaire à grande échelle" produisant lumière et chaleur (Voir document EL7 « *Le Soleil, notre étoile* » p 214).

A l'aide de la projection du site internet Soho, on revient sur l'observation des protubérances solaires et on explicite le phénomène. On interroge les élèves sur la taille estimée de ces protubérances. (Voir document « *Le Soleil, notre étoile* »).

On revient sur l'observation des taches solaires et on explicite leur nature (Voir document « *Le Soleil, notre étoile* »).



Etape 3 : Visualisation du champ Magnétique

Les protubérances sont des lignes de champ magnétique du Soleil le long desquelles sont piégés des ions et des électrons. Les particules chargées suivent les lignes de champ magnétique en tournant autour. C'est la rupture et la recombinaison de ces lignes de champ magnétique qui libèrent le plasma et provoquent des éruptions. Un champ

magnétique est créé par l'effet dynamo : des rotations de matériaux au sein des astres (voir affiche pour le Soleil, et maquette pour la Terre).

En tournant dans son noyau métallique liquide, la graine métallique solide de la Terre crée donc un champ magnétique qui vient faire barrage au vent solaire. Les particules chargées du vent solaire suivent les lignes de champ en tournant autour et sont dirigées vers les pôles où les lignes se reconnectent, ou bien vers la queue magnétique de la Terre.

Se faisant, à part aux pôles, très peu de particules parviennent au sol, et la biosphère n'est pas touchée.

Cependant, lors de tempêtes solaires (très grosses éruptions), il arrive que le champ magnétique terrestre ne soit pas suffisant et nous faisons face à de très importantes pannes électroniques et de télécommunications sur Terre.

Avec les cadres remplis de limaille de fer et les aimants, on peut visualiser les lignes de champ magnétique entre les pôles nord et sud des aimants.



Séquence 2

La structure du Soleil

OU La place du Soleil dans le système solaire

Objectif :

- Concevoir le Soleil comme un objet physique ayant des caractéristiques et étant sujet à des phénomènes physiques, et non plus comme la seule source de lumière du jour.

Durée : 30 min à 1h

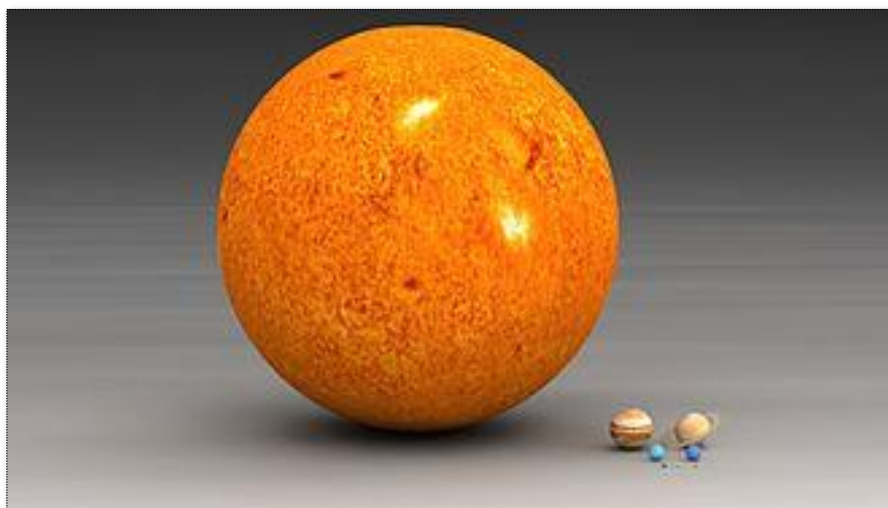
Etape 1 : Notion d'échelle

A l'aide de la maquette en coupe du Soleil et d'une série de boules de différentes tailles inférieures, on invite les élèves à **se prononcer sur les diamètres comparés de la Terre, des planètes et du Soleil**. On conclut en indiquant la bonne réponse (*Voir document « Echelles dans l'Univers »*).

Nom	Diamètre (km)	Masse (Masse de la Terre)
Soleil	1 392 684	333000
Mercure	4879	0,055
Vénus	12104	0,815
Terre	12756	1
Lune	3475	0,0123
Mars	6792	0,107
Jupiter	142984	317,8
Saturne	120536	95,152

Uranus	51118	14,536
Neptune	49528	17,147
Pluton (planète naine)	2370	0.0022
Cérès (planète naine)	946	0.00015
Astéroïdes	1 à 946 (Eros : 33×13×13)	Cérès : 0.00015, Eros : 10^{-9}
Comètes	~1 à qqes dizaines	$<10^{-9}$

Tableau 1 : Paramètres de différents corps du système solaire



Le diamètre de Jupiter est 10 fois plus petit que celui du Soleil, et le diamètre de la Terre est 11 fois plus petit que celui de Jupiter. Enfin, le diamètre de Cérès est 13 fois plus petit que celui de la Terre.

Figure 4 : Comparaison de tailles du Soleil et des planètes

Etape 2 : Système solaire vivant

Système solaire vivant à la place de la description du Soleil qui a déjà été faite en séq 1 ?

Etape 2 : Description du Soleil

A l'aide de la maquette en coupe, en partant du cœur jusqu'à la surface et la couronne, on **décrit rapidement les différentes composantes du Soleil et sa fonction** : "centrale nucléaire à grande échelle" produisant lumière et chaleur (Voir document « Le Soleil, notre étoile »).



A l'aide de la projection du site internet Soho, on revient sur **l'observation des protubérances solaires** et on explicite le phénomène. On interroge les élèves sur la taille estimée de ces protubérances. (Voir document « *Le Soleil, notre étoile* »).

On revient sur **l'observation des taches solaires** et on explicite leur nature (Voir document « *Le Soleil, notre étoile* »).

Figure 5 : Eruption solaire ou p

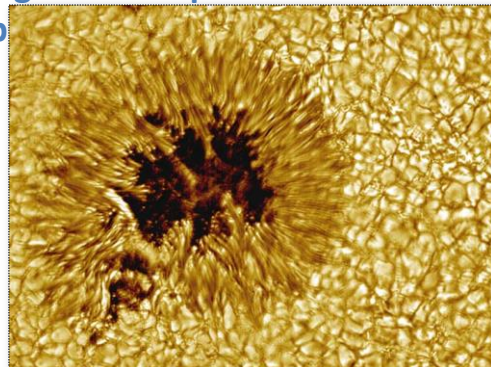


Figure 7 : Tache solaire

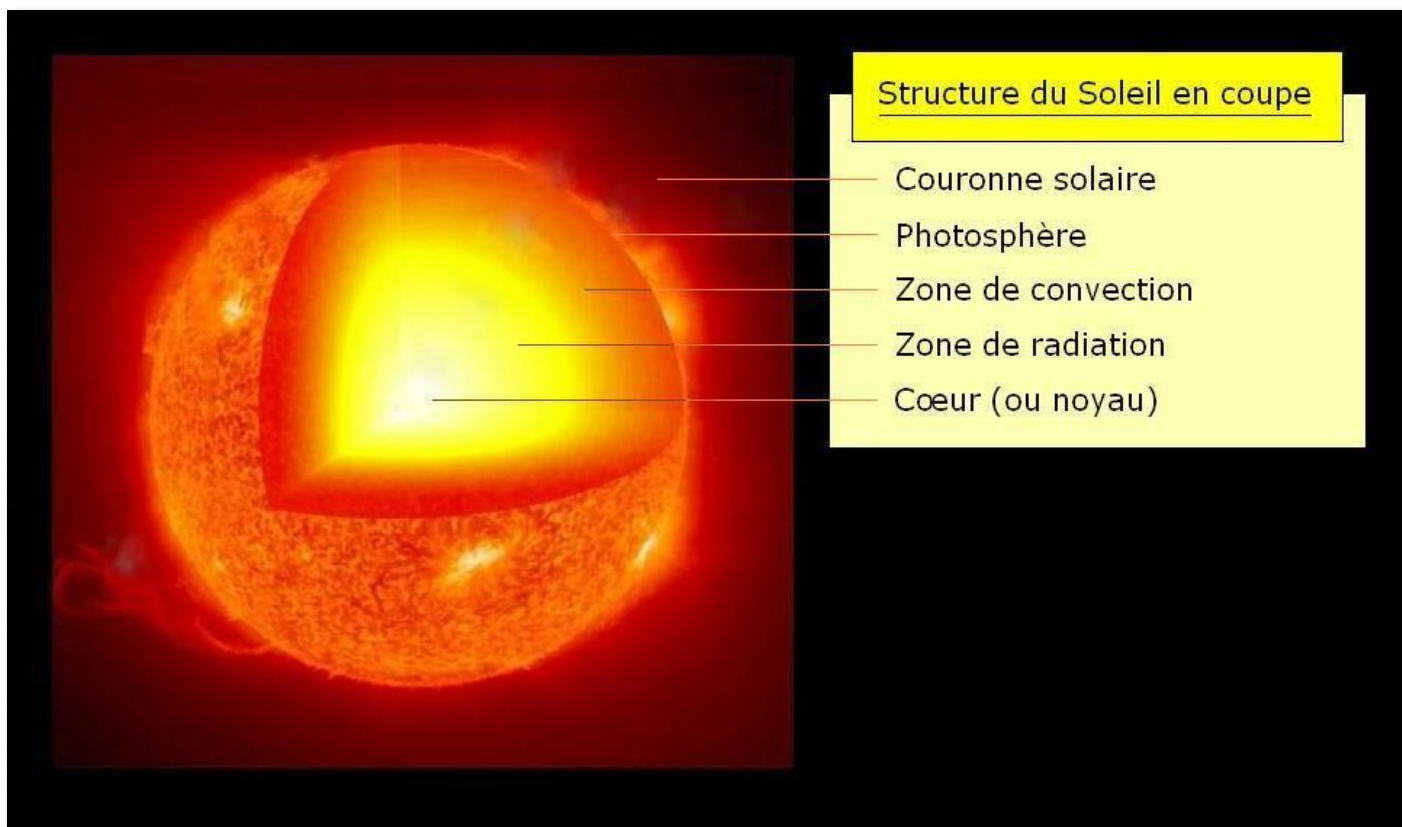


Figure 6 : Structure interne du Soleil.

Séquence 3

La puissance du Soleil



Objectif :

- Comprendre que le Soleil est une source d'énergie. Il produit cette énergie sous forme de lumière (photons), émis dans toutes les directions, et que seule une petite partie de cette énergie nous parvient.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Mesure par la température

On utilise le module Puissance du Soleil^{M002}. On place un spot à différentes distance d'un carré de chocolat, et on regarde à quelle vitesse il fond : plus la lampe est proche, plus il fond vite : l'énergie qu'on reçoit à chaque seconde du Soleil diminue à mesure qu'on s'éloigne.

Etape 2 : Mesure par la luminosité

On utilise l'expérience des lampes : deux tubes accolés, un plus long que l'autre, une ampoule au bout de chacun. On allume, et on place les tubes sur les yeux. On compare la luminosité perçue par les deux yeux : la lampe la plus proche éblouit plus que l'autre. Essayer avec des calques pour voir si tout le monde est d'accord : les calques diffusent sur toute leur surface.

Nom	Définition	Unité	Dimension
Energie	Capacité d'un corps ou d'un système à produire un travail.	Joule (J), $1\text{J}=1\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$	$\text{M.L}^2.\text{T}^2$
Puissance	Energie produite par seconde.	Watt (W), $1\text{W}=1\text{J.s}^{-1}$	$\text{M.L}^2.\text{T}^{-3}$
Luminosité	Energie émise par seconde par une étoile par toute sa surface (ou réfléchiée, pour une planète). Autrement appelée puissance lumineuse.	Watt (W), $1\text{W}=1\text{J.s}^{-1}$	$\text{M.L}^2.\text{T}^{-3}$
Flux lumineux émis	Luminosité émise par unité de surface, ou puissance traversant une surface.	W.m^{-2}	M.T^{-3}
Flux lumineux reçu	Luminosité reçue par unité de surface, ou puissance traversant une surface.	W.m^{-2}	M.T^{-3}
Température	Degré d'agitation des molécules d'un corps ou d'une substance.	Kelvin (K), $1\text{K}=-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$	Aucune, c'est une grandeur relative

Tableau 2 : Grandeurs physiques importantes en astrophysique

Etape 3 : Décroissance de la luminosité

L'animateur explique que la luminosité diminue de plus en plus vite à mesure qu'on s'éloigne.

On utilise la maquette : une demi-sphère représente le Soleil, posée au centre d'un système d'orbites de planètes. On utilise des demi-sphères transparentes adaptées aux différentes orbites, pour indiquer que l'énergie reçue par chaque planète est de plus en plus faible avec la distance, car elle est diluée sur toute la surface de sphères de plus en plus grandes.

Décroissance de la luminosité

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

F = Flux lumineux reçu en W.m^{-2}

L = puissance lumineuse de la source en W
(énergie émise ou réfléchie par seconde)

r = distance entre la source et l'observateur en m

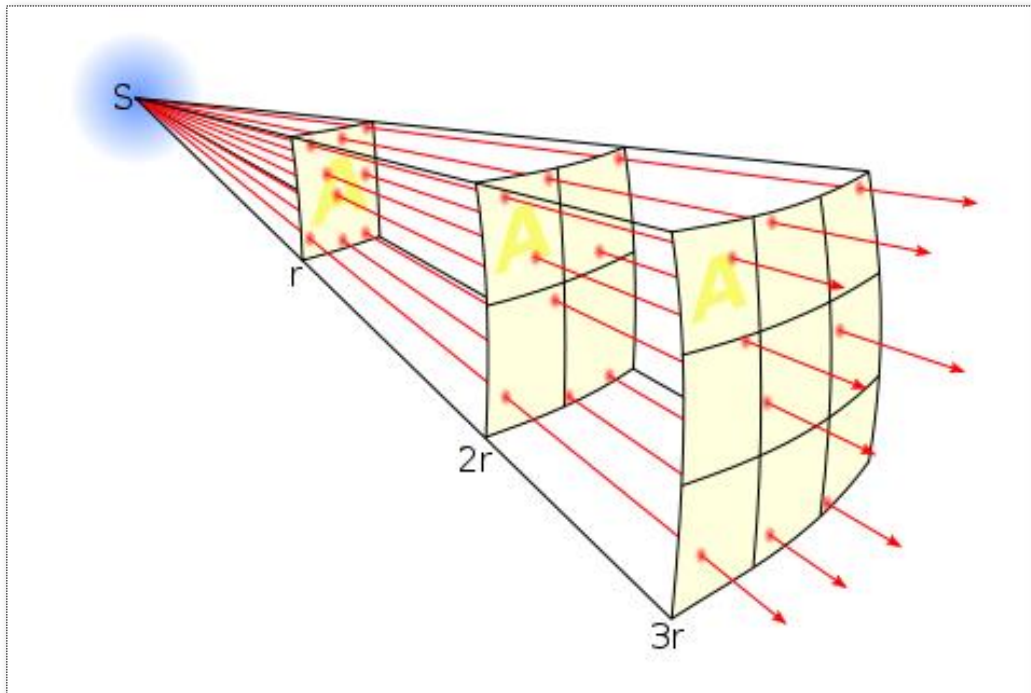


Figure 8 : Dilution de l'énergie avec la distance : la luminosité perçue, ou flux lumineux reçu décroît avec le carré de la distance.

Séquence 4

Le Soleil n'est pas jaune



Objectif :

- Connaître la véritable couleur du Soleil, celle de la lumière qu'il émet et non celle que nos yeux voient.

Durée : 20 à 45 min

Etape 1 : Comment voit-on le Soleil ?

La séquence commence par le mode interactif. Chaque élève peut donner son avis sur la couleur que peut avoir le Soleil. Il apparaît jaune quand il est haut dans le ciel, blanc quand on le regarde en face (à proscrire), orange ou rouge lorsqu'il est à l'horizon. Ensuite, on montre aux élèves **une photographie du Soleil** prise depuis un vaisseau spatial habité : c'est la vision qu'en a un astronaute depuis l'espace. Il apparaît blanc. On demande alors aux élèves : « Où est passée la couleur du Soleil ? ». S'ensuit des propositions d'hypothèses.

Si aucun élève ne trouve ou n'évoque la cause, on explique que c'est la présence de l'atmosphère qui donne au Soleil sa couleur jaune, orange ou rouge dans le ciel.

Le gaz de l'atmosphère diffuse la lumière solaire selon la couleur (rappel : la lumière blanche contient toutes les couleurs) : le bleu reçu du Soleil va dans toutes les directions donc le ciel est bleu. Le jaune n'est pas dévié lorsque le Soleil est haut, mais il l'est également lorsqu'il est sur l'horizon, car la lumière a une plus grande épaisseur à traverser. Reste alors l'orangé, puis le rouge, qui à leur tour apparaissent comme les couleurs non déviées, et qui donnent la couleur du Soleil couchant ou levant.



Figure 9 : Pour un astronaute, depuis l'espace, le Soleil apparaît blanc.

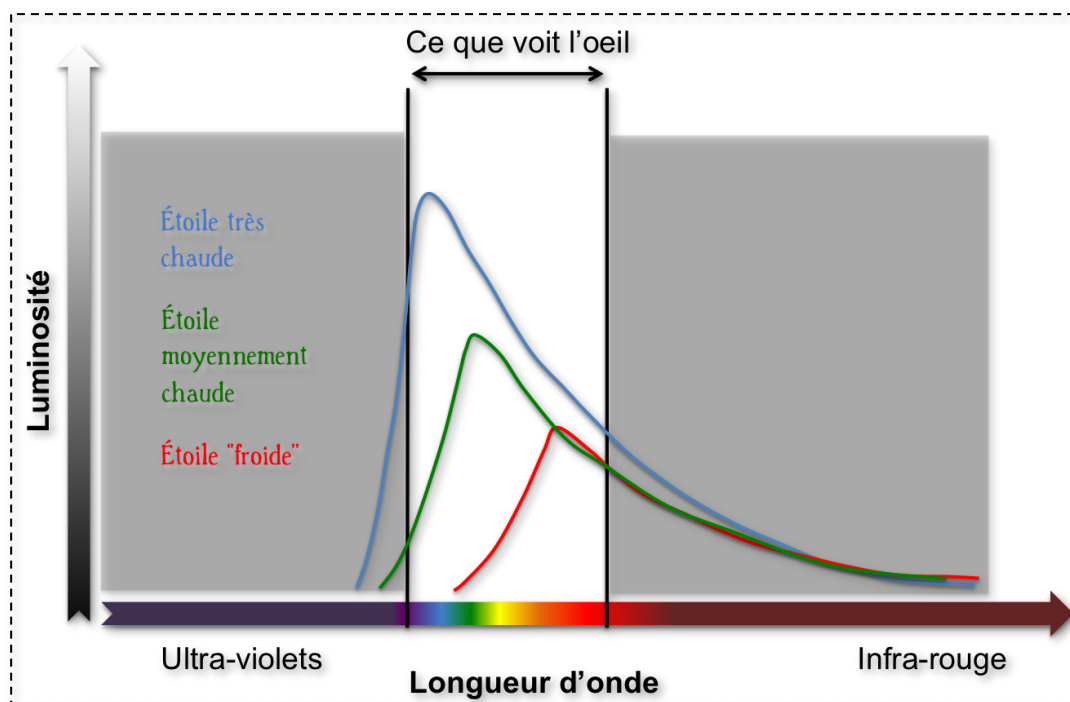


Figure 11 : Nous ne voyons pas le Soleil vert.

On pose enfin la question suivante : « Bon, d'accord. Mais dans l'espace, le Soleil est-il vraiment blanc ou bien c'est l'astronaute qui le voit blanc ? ». On laisse les élèves réfléchir, proposer des réponses, prendre parti.

Etape 2 : Premières notions de spectroscopie

Puis on montre **le spectre lissé du Soleil** (i.e. : sans les raies d'absorption). Etrange, le maximum de la lumière émise par le Soleil a une longueur d'onde de 500 nm, mais pourquoi il n'est pas vert alors ???

On explique enfin avec **un schéma** :

- que le vert est le centre du spectre visible par notre œil,
- que le Soleil émet tout de même beaucoup de lumière dans le bleu et le rouge, c'est-à-dire que certes, la lumière verte est plus forte, mais de peu.
- que l'œil, recevant toute cette lumière colorée avec peu de contraste, additionne le tout, et voit donc du blanc.
- que l'œil voit bleues les étoiles bleues et rouges les étoiles rouges car leur spectre pique sur le bord de notre spectre visible (Il n'y a alors aucune couleur pour contrebalancer et donner du blanc).
- On ne voit donc aucune étoile verte dans l'Univers ! mais on voit des étoiles bleues, blanches, jaune, orange, et rouges, selon où pique leur spectre par rapport à notre spectre visible.

Suggestion : on peut faire des toupies colorées avec des proportions plus ou moins importantes de chaque couleur pour voir l'effet du mélange.

Séquence 5

Observation du spectre solaire



Objectif :

- Comprendre ce qu'est un spectre et comprendre qu'il permet de connaître la composition de l'atmosphère du Soleil.

Durée : 20 à 45 min

Etape 1 : Le Spectre du Soleil

On invite les élèves à regarder un spectre du Soleil à l'aide **des spectroscopes artisanaux¹⁰⁰¹** fournis, 5 par 5, puis on leur demande leur ressenti et leurs explications sur ce qu'ils ont vu.

On explique le spectre observé : on voit la décomposition de la lumière « blanche » du Soleil dans toutes les couleurs, et certaines couleurs sont plus brillantes que d'autres (le vert et le jaune), puis on remontre la courbe du corps noir pour comparer ces deux représentations des intensités de couleur.

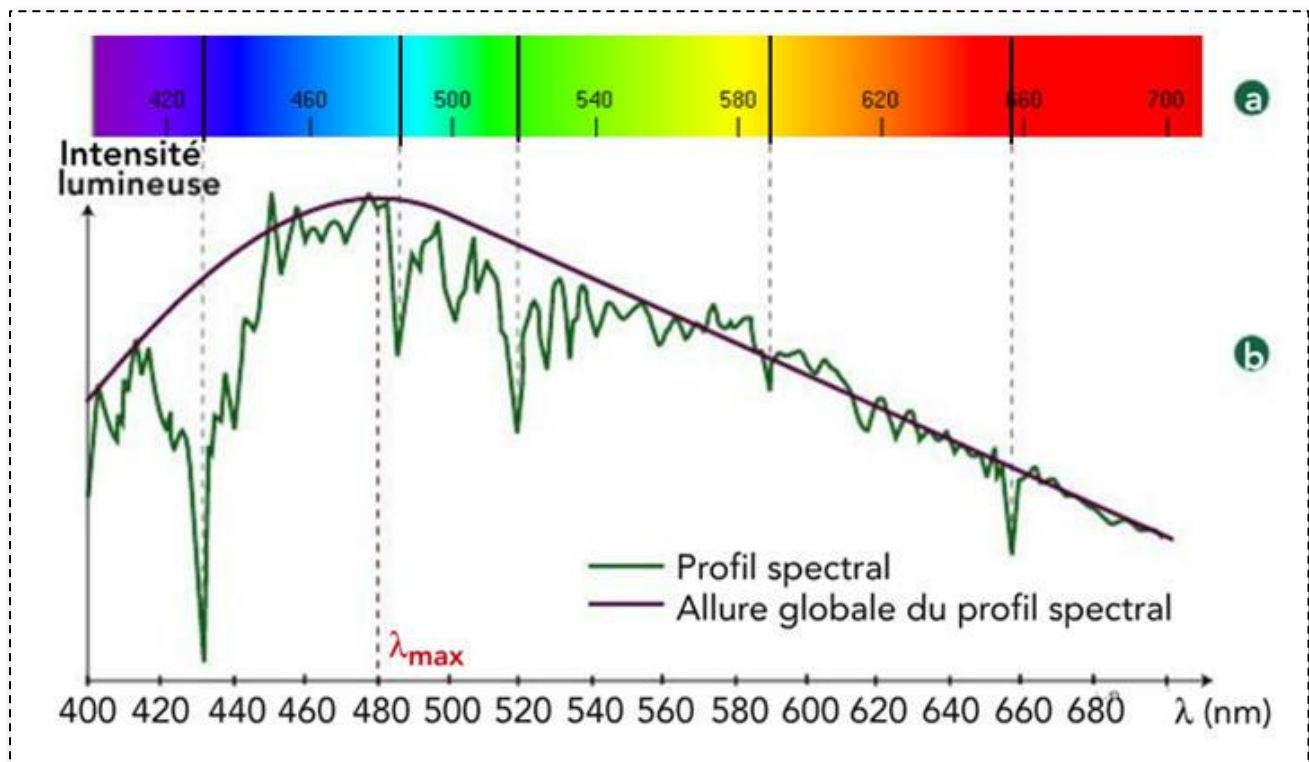


Figure 10 : Spectre du Soleil simplifié.

Etape 2 : Des raies dans le spectre du Soleil

On montre ensuite **un spectre du Soleil** effectué avec un instrument plus performant (i.e. : ayant une plus grande résolution en longueur d'onde). On demande aux élèves s'ils remarquent quelque chose, et si oui, de tenter de l'expliquer.

En effet, il manque des couleurs : de fines bandes noires apparaissent sur la bande colorée du spectre solaire. On explique que ce sont les éléments présents dans l'atmosphère du Soleil qui absorbent ces couleurs aux longueurs d'onde très précises, à chacun la ou les siennes. Ces couleurs ne nous parviennent donc pas, et apparaissent sous forme de bandes noires.

On demande aux élèves quelle information peut alors apporter le spectre du Soleil. Le spectre du Soleil permet de savoir ce qui se trouve dans son atmosphère.

On pousse le propos à l'échelle du dessus en disant que les spectres des étoiles sont similaires mais légèrement différents : Le Soleil est donc une étoile, comme celles que l'on voit dans le ciel la nuit. Il est simplement beaucoup plus proche et nous apparaît donc plus

large et plus brillant. Enfin, on explique que c'est par leur spectre qu'on va pouvoir différencier les différents types d'étoiles !

Liens avec les programmes scolaires

Séquence 6

Le Soleil depuis Pluton

Objectif :

- Concevoir la vision du Soleil depuis des confins de notre système planétaire, et comprendre que vu de loin, on voit le Soleil comme un point, c'est à dire comme une étoile.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Vivre le phénomène

On établit au sol une échelle de distance entre les planètes + Pluton et le Soleil. On place un jeune à chaque planète et à la place du Soleil. Le jeune qui joue le rôle du Soleil tient une boule bien en évidence afin que les jeunes qui jouent le rôle de planètes puissent le voir. On demande à chaque planète la taille apparente du Soleil : elle diminue avec la distance

On fait passer un appareil photo, et chaque planète prend le Soleil en photo. On compare la taille apparente du Soleil sur les photos.

NB : depuis 2006, Pluton n'est pas considérée comme une planète mais une planète naine, au même titre qu'Eris, plus massive que Pluton, et Cérès, à la fois planète naine et astéroïde.

Etape 2 : Voir le phénomène

On peut montrer le même phénomène avec Stellarium en regardant le Soleil avec le même instrument et la même taille de champ depuis des planètes de plus en plus éloignées. On

peut également parler de la sonde spatiale New Horizons qui est passée à 12500 km de Pluton le 14 juillet 2015.



Figure 11 : La sonde New Horizons, lancée le 19 janvier 2006 depuis Cap Canaveral et passée à 12500 km de Pluton le 14 juillet 2015.

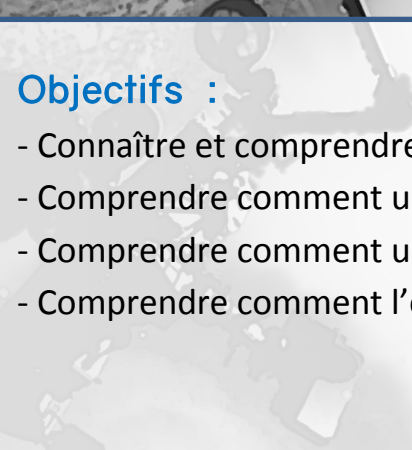
A mesure qu'on s'éloigne du Soleil, la puissance qu'on en reçoit diminue, sa luminosité apparente diminue, et sa taille apparente diminue. Vu de très loin, le Soleil est un point lumineux comme ceux que l'on voit la nuit dans le ciel : le Soleil est une étoile, les étoiles sont des Soleils.





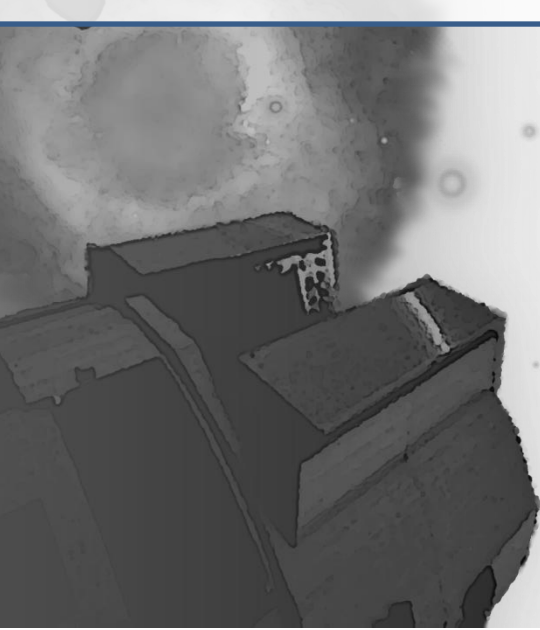
Module EL2 :

Le fonctionnement des étoiles



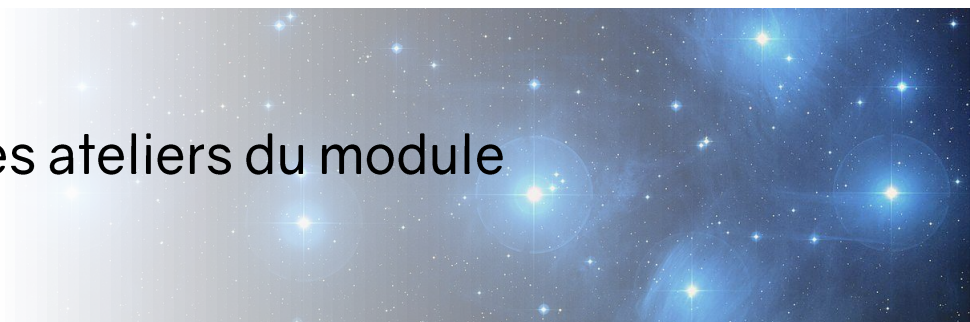
Objectifs :

- Connaître et comprendre la structure interne d'une étoile comme le Soleil.
- Comprendre comment une étoile tient en équilibre.
- Comprendre comment une étoile produit son énergie.
- Comprendre comment l'énergie sort de l'étoile et sous quelle forme.



Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	ELA2 PM	EL2 Petite malle	1
Prêt	ELA2 GM	EL2 Grande malle	1

* Le matériel se trouve dans les malles fournies par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour des observations.

Séquence 1

Le cœur du Soleil

Objectif :

- Comprendre comment l'énergie est produite au cœur du Soleil

Durée : 45 min à 1h30

Etape 1 : La fusion nucléaire « vivante »

1) Mise en place :

Dégager un espace vide dans la classe en repoussant tables et chaises (min 3m x 5m). Vous pouvez le délimiter avec des tables, des chaises, des murs, de la ficelle ou des repères.

2) Explications :

Rappeler/Expliquer avec la méthode pédagogique de votre choix ce qu'est un proton, un électron, un neutron, un atome.

Enoncer le fait que l'on va jouer avec des protons (noyaux d'hydrogène) au cœur de l'étoile pour voir comment elle produit de l'énergie (de la lumière).

3) Démarrage du jeu :

Distribuer un bandeau « **Proton** » à chaque élève, et leur demander de le montrer / de l'accrocher sur eux face « **Proton** » bien visible.

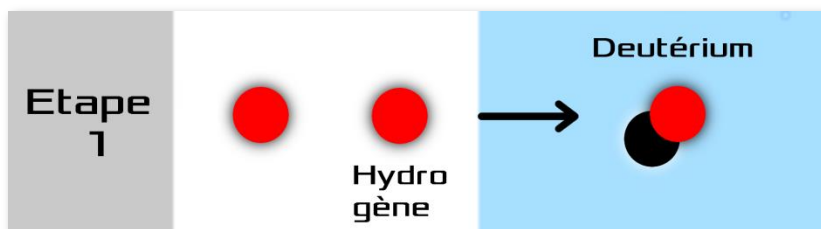


4) Expliquer les règles du jeu :

L'espace de jeu représente le cœur de l'étoile. C'est uniquement là-dedans (durant la majeure partie de la vie de l'étoile) qu'a lieu la production d'énergie par fusion nucléaire (fabrication d'atomes).

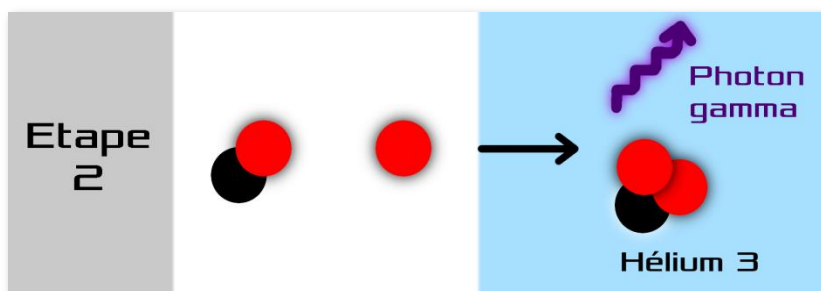
- Règle n°1 :** Les **protons** se déplacent dans l'espace de jeu en ligne droite (sans courir).
- Règle n°2 :** Lorsqu'un **proton** rencontre la frontière, il change de direction.
- Règle n°3 :** Lorsqu'un **proton** entre en collision (touche) un autre **proton** ou un élément, on applique la **règle de collision**.

Vous pouvez confier le rôle d'arbitre à un ou deux jeunes ou le faire vous-même. L'arbitre signale les collisions quand elles ont lieu, stoppe le jeu et rappelle la règle à appliquer avant de relancer le jeu. Vous pouvez expliquer la **règle de collision** au fur et à mesure ou bien au début du jeu. La règle est rappelée sur une affiche A3.

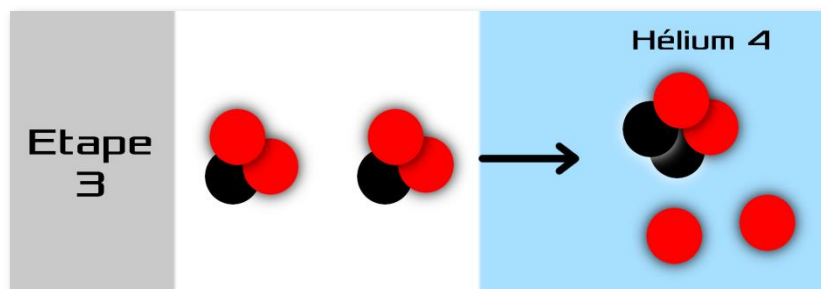


Etape 1 : Deux protons se rencontrent.

L'un des deux retourne son bandeau pour devenir un **neutron**. Les deux joueurs restent accrochés par le bras et continuent à jouer sous la forme de l'élément **Deutérium**.



Etape 2 : Un proton rencontre un élément de deutérium. Les trois joueurs produisent un **photon** en s'accrochant, et continuent à jouer sous la forme de l'élément **Hélium 3**.



Etape 3 : Deux éléments Hélium 3 se rencontrent. Deux **protons** sont libérés et retournent en jeu seuls. Les 4 autres joueurs s'accrochent et continuent à jouer sous la forme de l'élément **Hélium 4**.

Toute autre rencontre est sans effet : les joueurs changent simplement de direction.

A chaque fois que **l'étape 2** se produit, un **photon gamma** (particule de lumière) est produit. L'arbitre ajoute un **photon gamma** au saladier.



5) Fin du jeu :

C'est vous qui décidez quand le jeu s'arrête :

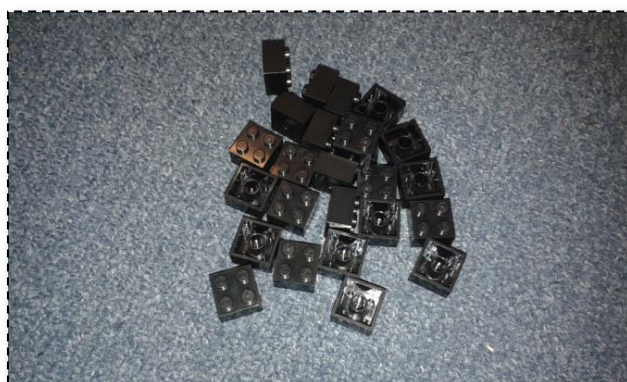
- Quand il y a suffisamment d'hélium 4 pour que les collisions deviennent majoritairement sans effet.
- Quand un certain nombre de photons a été produit.
- Quand les joueurs ont compris le principe de la fusion dans le cœur de l'étoile et qu'ils peuvent jouer sans la fiche d'aide.
- Au bout d'une certaine durée (15-20 min, typiquement).

Faire un bilan participatif à la fin de ce jeu, recueillez les interprétations des joueurs.

Etape 2 : La fusion nucléaire « en LEGO »

1) Mise en place :

Placez **25 LEGO rouges** dans un saladier, et de même dans un autre. Placez **12 LEGO noirs** à proximité de chaque saladier.



Constituez deux pioches de **photons** avec une quantité égale de cartes. Placez-en une à proximité de chaque saladier.

2) Explications :

Les saladiers représentent les cœurs de 2 étoiles, contenant des **protons** (LEGO rouges). Les LEGO noirs représenteront les **neutrons** dont on aura besoin. Rappeler la règle de collision et mettez l’affiche bien en évidence afin que les joueurs puissent s’y référer tout en jouant.

3) Démarrage du jeu :

Faites deux équipes d’effectifs égaux. Le but du jeu est de produire plus de **photons** que l’autre équipe en un temps donné (10-20 min). Installer chaque équipe autour de leur cœur d’étoile respectif.

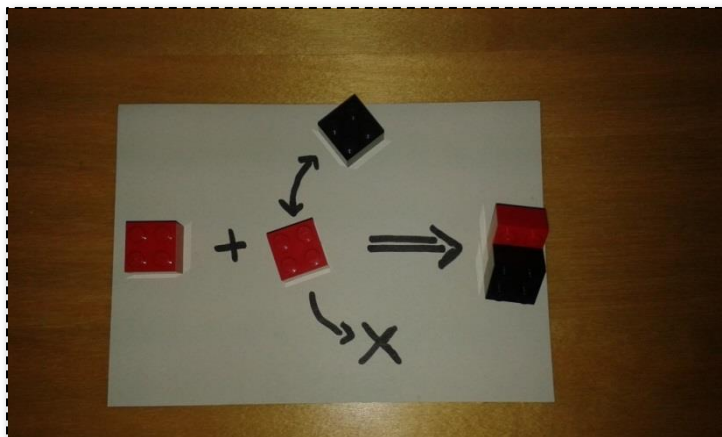
4) Expliquer les règles du jeu :

- | | |
|--------------------|--|
| Règle n°1 : | Piocher deux éléments dans le saladier sans regarder. |
| Règle n°2 : | Regarder les éléments piochés, et appliquer la règle de collision : on accroche ensemble les LEGO (ou on les défait) s’il y a un effet. |
| Règle n°3 : | On replace les produits d’une collision (avec ou sans effet) dans le saladier, afin de pouvoir les piocher à nouveau plus tard. |
| Règle n°4 : | Si on produit un photon, on pioche un photon et on le place de l’autre côté de son saladier (ou on le donne à l’animateur jouant le rôle d’arbitre). |

Attention :

- Quand on pioche 2 **protons**, on fabrique l’élément **deutérium** : **on retire du jeu (i.e on ne le remet pas dans le saladier) l’un des deux protons**, et on prend un **neutron** à la place, et on accroche ce **proton** et ce **neutron**. On replace ainsi ce **deutérium** dans le saladier.
- Quand on pioche 2 **hélium 3**, on fabrique un **hélium 4** que l’on replace dans le saladier, mais les 2 **protons** qui s’échappent reviennent dans le saladier aussi.

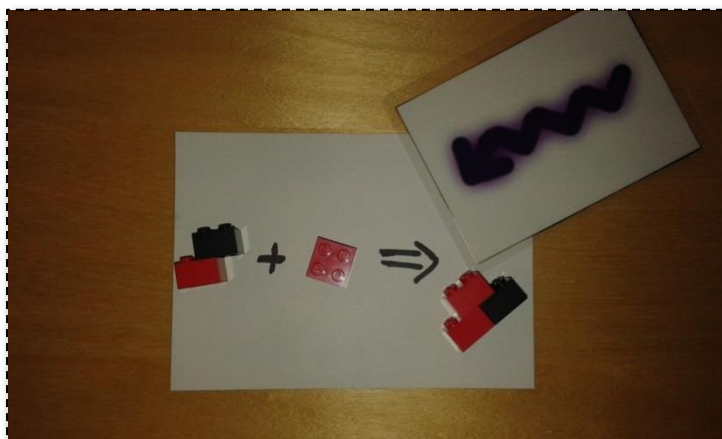
C'est aux équipes de trouver la méthode de jeu la plus efficace pour produire un maximum d'énergie en un temps donné : on joue un par un ? 2 par 2 ? Tous en même temps ?



Etape 1 :

Attention, le **proton** que l'on a transformé en **neutron** ne retourne pas dans le saladier.

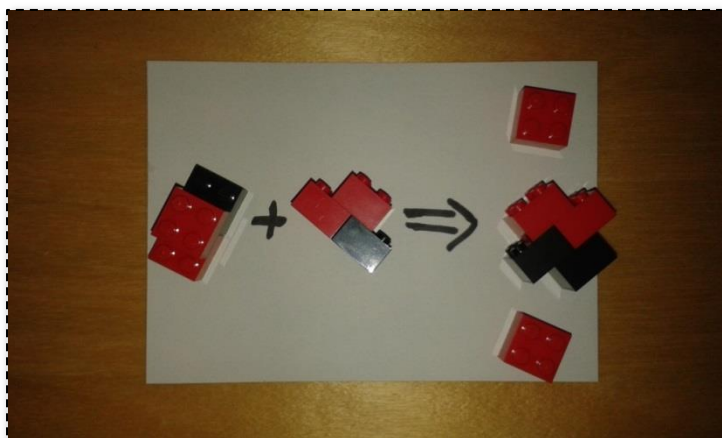
On remet le **deutérium** dans le saladier.



Etape 2 :

On pioche un **photon**.

On remet l'**hélium 3** dans le saladier.



Etape 3 :

On remet 2 **protons** et un **hélium 4** dans le saladier.

5) Fin du jeu :

C'est vous qui décidez quand le jeu s'arrête :

- quand il y a suffisamment d'hélium 4 pour que les collisions deviennent majoritairement sans effet.
- quand un certain nombre de photons a été produit.
- quand les joueurs ont compris le principe de la fusion dans le cœur de l'étoile et qu'ils peuvent jouer sans aide.
- au bout d'une certaine durée (15-20 min, typiquement).

Faire un bilan participatif à la fin de ce jeu, recueillez les interprétations des joueurs.

Idées à faire ressortir :

- La probabilité de produire un photon dans un temps donné est très faible.
- Pour que ça aille plus vite il faut augmenter le nombre de collisions en un temps donné. Pour le jeu 1, cela se fait en réduisant l'espace de jeu ou en augmentant le nombre de joueurs. Pour le jeu 2, cela se fait en faisant piocher plus de joueurs en même temps.
- Et dans une vraie étoile ? plus le cœur est dense, plus il est chaud, plus il y a de réactions simultanées, plus il y a de production d'énergie. Et aussi, plus sont carburant se consume vite, c'est-à-dire, plus son temps de vie est court.

Séquence 2

L'enveloppe du Soleil

Objectif :

- Comprendre comment l'énergie produite au cœur du Soleil sous forme de photons gamma parvient à sortir de son enveloppe et être émise à sa surface sous forme de lumière visible.

Durée : 45 min à 1h30

Etape 1 : Introduction

On reprend la maquette du Soleil pour décrire les différentes couches à l'intérieur.

- On explique qu'on vient de voir où et comment l'énergie est produite : le cœur avec la fusion nucléaire et la production de photons Gamma.
- On explique que l'étoile est opaque et que c'est la surface qui émet la lumière que l'on voit. Et on pose la question : comment sort l'énergie depuis le cœur ? En combien de temps ? (10^5 à 10^6 ans).
- On donne les noms des deux couches internes : zone radiative au-dessus du cœur et zone convective sous le cœur. On explique qu'on va d'abord parler de la zone convective.



Au centre, le cœur, où il fait une température de 14 millions de K. Il y a fusion nucléaire et production de photons gamma.

Au-dessus, la zone radiative, où les photons sont absorbés et réémis dans des directions aléatoires par les atomes.

Encore au-dessus, la zone convective, où l'énergie est transportée par la matière

Et enfin, tout en haut, la surface qui émet la lumière.

Etape 2 : La convection



Pour cette expérience, séparez le groupe en deux. Confiez à chaque petit groupe une mini-plaque chauffante et un bécher. Ce sont les jeunes qui vont manipuler.



Verser un peu de thé ou de thym au fond du bécher puis verser de l'eau froide à l'intérieur. Attendre que le courant dû à l'introduction de l'eau s'arrête et que les particules soient déposées au fond.

Placer le bécher sur la plaque chauffante et régler la plaque entre 3 et 4.

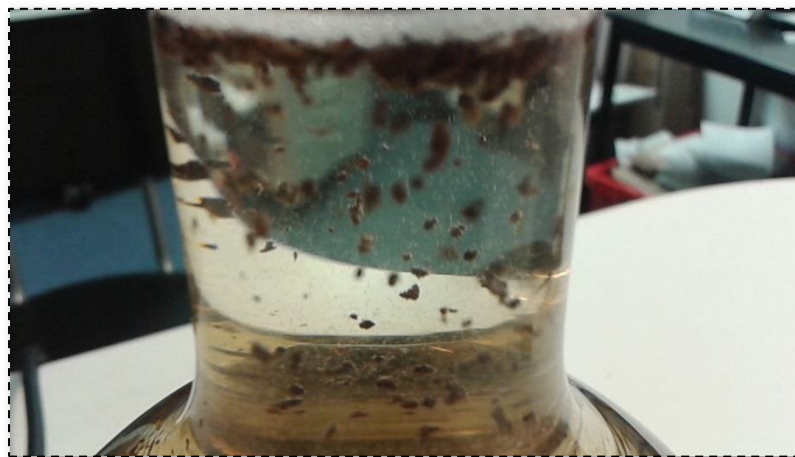


Au bout de quelques dizaines de secondes, le thé au fond va commencer à infuser et lancer des volutes d'eau colorées et chaudes vers le haut.



Au bout d'un certain temps, une cellule de convection va se mettre en place dans le bécher. Les particules de thé sont emportées par les courants chauds vers le haut lorsqu'ils atteignent le fond du bécher, puis se retrouvent dans des eaux froides qui les entraînent dans un courant descendant.

On peut suivre une particule spécifiquement pour voir son mouvement entre la plaque, chaude, et les eaux du haut du bécher, froides. Au bout d'un certain temps, la température de l'eau va s'homogénéiser dans la partie ronde du bécher.



La partie haute, cylindrique se situe après un goulot d'étranglement et reste emplie d'eau froide pendant un certain temps. Une nouvelle cellule de convection va donc se mettre en place entre la surface de l'eau et l'eau tiède du ballon.

En continuant à chauffer, la température de l'eau va s'homogénéiser dans tout le bécher, puis il va s'installer une nouvelle différence de température entre le bas qui chauffe

toujours, et la surface de l'eau, au contact de l'air frais. Une cellule de convection va se mettre en place entre ces deux interfaces.

Conclusion de l'expérience

On conclut l'expérience par un bilan collectif. On demande notamment aux jeunes de chercher les similitudes avec l'intérieur d'une étoile :

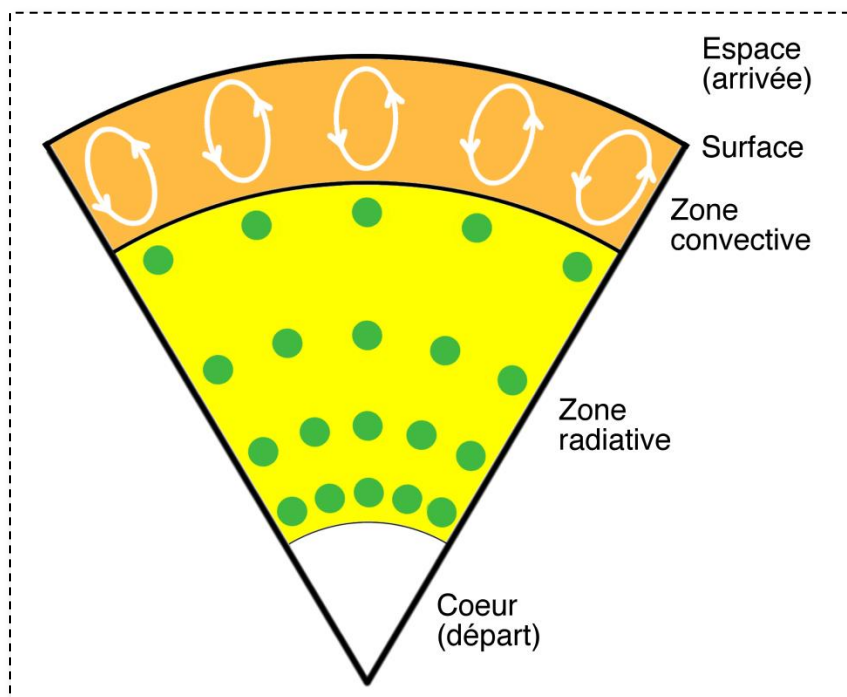
- La plaque chauffante représente l'interface entre la zone radiative, plus chaude, et la zone convective, plus froide.
- L'eau qui se déplace représente la matière de l'étoile qui se déplace dans la zone convective (les particules de thé ne sont là que pour rendre visible ce mouvement)
- L'air frais de la pièce peut être comparé à l'espace, froid, au-delà de la surface de l'étoile.

Étape 3 : Le transfert de l'énergie

Par ce jeu, on va expliquer comment l'énergie, qui est produite sous forme de lumière gamma (photons très énergétiques) dans un cœur ayant une température 14 millions de K, parvient à sortir de la surface de l'étoile ayant une température de 5700 K seulement, et sous forme de lumière visible.

1) Mise en place :

On agrandit si possible l'espace créé pour le premier jeu. La mise en place qui suit est prévue pour une quinzaine de personnes. Doubler les quantités ou faites deux espaces de jeu pour une classe entière.

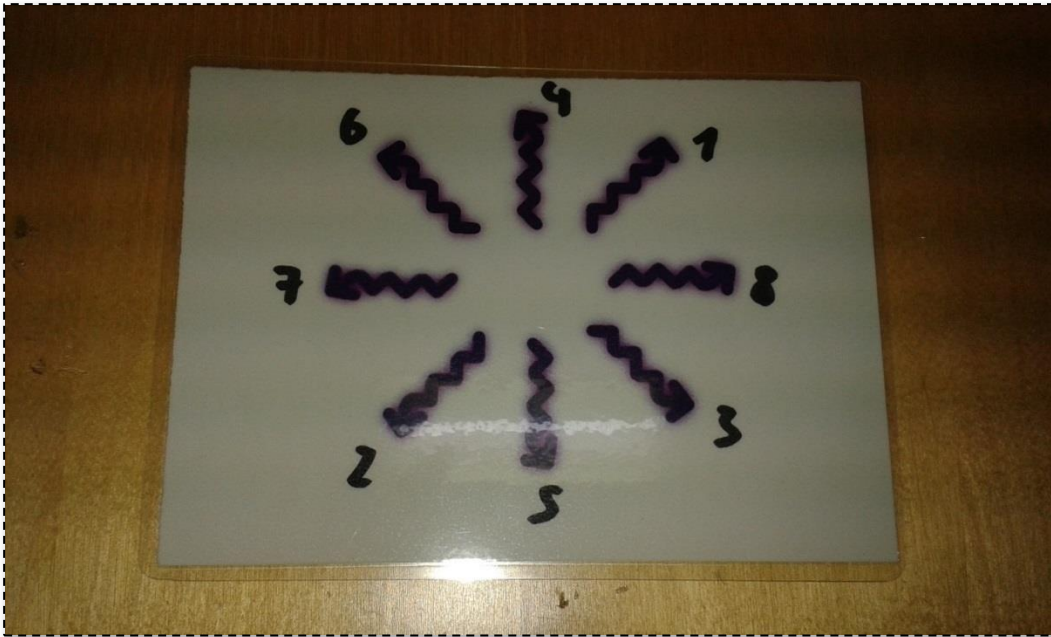


Une affiche A3 est là pour vous aider à mettre en place le plateau de jeu.

Selon la place disponible, il peut être plus judicieux de tracer un rectangle plutôt qu'un quartier.

- Placez des assiettes (4x5) en plastique au sol selon le plan de jeu (pastilles vertes).

- Délimitez le cœur, la zone radiative, la zone convective et l'espace avec de la ficelle, des rangées serrées d'assiettes, ou indiquez les limites avec des chaises.
- Confiez le rôle de « cellule de convection » à 5 jeunes. Ils se placent dans la zone de convection, dans la continuation des colonnes d'assiettes.
- Donnez une carte de déplacement à chaque autre joueur.



2) Explications :

Les joueurs ayant une carte de déplacement sont des photons, créés par le cœur de l'étoile, dont le but est de sortir de l'étoile pour se propager dans l'espace. Ils vont devoir traverser deux zones avant d'atteindre le vide de l'espace :

- la zone radiative (assiettes = atomes qui les absorbent et les réémettent dans une autre direction)
- la zone convective (cellules de convection)

3) Démarrage du jeu :

Pour débuter, et durant le jeu ensuite, faites apparaître 3 à 5 joueurs à la fois dans le cœur de l'étoile, pas plus, afin d'éviter les embouteillages sur la case départ. Ces 3 à 5 joueurs choisissent de se positionner sur une assiette de la première ligne.

4) Expliquer les règles du jeu :

- Règle n°1 :** Chaque photon doit se déplacer en suivant les indications de sa carte de déplacement qu'il positionne dans ses mains devant lui.
- Règle n°2 :** Au plus, un photon par assiette.
- Règle n°3 :** L'animateur tire le dé 8 faces toutes les 5 à 10 secondes et annonce le résultat à voix haute. Chaque photon avance d'une assiette dans la direction correspondante sur sa carte de déplacement.
- Règle n°4 :** Si un photon ne peut pas se déplacer parce qu'il rencontre la limite de l'espace de jeu ou bien parce qu'il arrive sur une assiette déjà occupée, il choisit la plus proche assiette libre.
- Règle n°5 :** Si un photon parvient à dépasser la dernière ligne d'assiettes, il est attrapé par le joueur « cellule de convection » correspondant et est transporté dans l'espace. Il peut alors continuer sa course en ligne droite.



Figure 12 : Dé à 8 faces

5) Fin du jeu :

C'est vous qui décidez quand le jeu s'arrête :

- quand il y a un certain nombre de photons libérés dans l'espace.
- au bout d'un certain temps de jeu.
- lorsqu'un ou plusieurs photons restent coincés trop longtemps dans la zone radiative.
- lorsque les jeunes ont compris le fonctionnement du système.

Faire un bilan participatif à la fin de ce jeu, recueillez les interprétations des joueurs.

Idées à faire ressortir :

- La probabilité pour un photon de traverser tout droit la zone radiative est très faible.
- Cela peut prendre très longtemps pour atteindre la zone convective.
- Dans la zone radiative, à chaque atome rencontré, un photon est absorbé, puis réémis dans une direction aléatoire.
- Dans la zone radiative, il fait très chaud, et l'énergie se transmet par déplacement de lumière. Dans la zone convective, il fait moins chaud, et l'énergie se transmet par déplacement de matière.
- Dans l'espace, la lumière se déplace en ligne droite car aucun (ou presque) atome ne l'en empêche.
- A mesure qu'un photon (produit au cœur dans le domaine gamma) progresse vers la surface, il perd de l'énergie, et finit par entrer dans le domaine visible lorsqu'il est émis par la surface, ce qui nous permet de voir l'étoile.

Séquence 3

Les autres étoiles



Objectif :

- Cette partie sert de bilan et d'ouverture vers l'atelier suivant « La classification et l'évolution des étoiles ».

Durée : 20 min à 40 min

On présente les 3 maquettes d'étoiles et on demande aux jeunes de décrire leurs différences et d'essayer de les interpréter.





Idées à faire ressortir :

- Une étoile légère et petite a un cœur et une surface froids. Sa surface est rouge.
- Une étoile lourde et grosse a un cœur et une surface chauds. Sa surface est bleue.
- Une étoile de masse et de taille intermédiaire a une surface blanc ou jaune.
- Une étoile bleue n'a pas de taches solaires et de protubérances car il n'y a pas de zone de convection sous la surface.
- Quand il fait chaud, l'énergie est transmise sous forme de lumière (radiation), quand il fait moins chaud, c'est la matière (convection).
- Une petite étoile rouge n'a pas un cœur assez chaud pour avoir une zone radiative.
- Une étoile bleue a un cœur beaucoup plus chaud qu'une étoile jaune. Quand il fait vraiment très chaud, c'est de nouveau la matière qui transmet l'énergie. C'est pourquoi les couches sont inversées.

Méthodes de transmission de l'énergie :

Chaud : convection

Très chaud : radiation

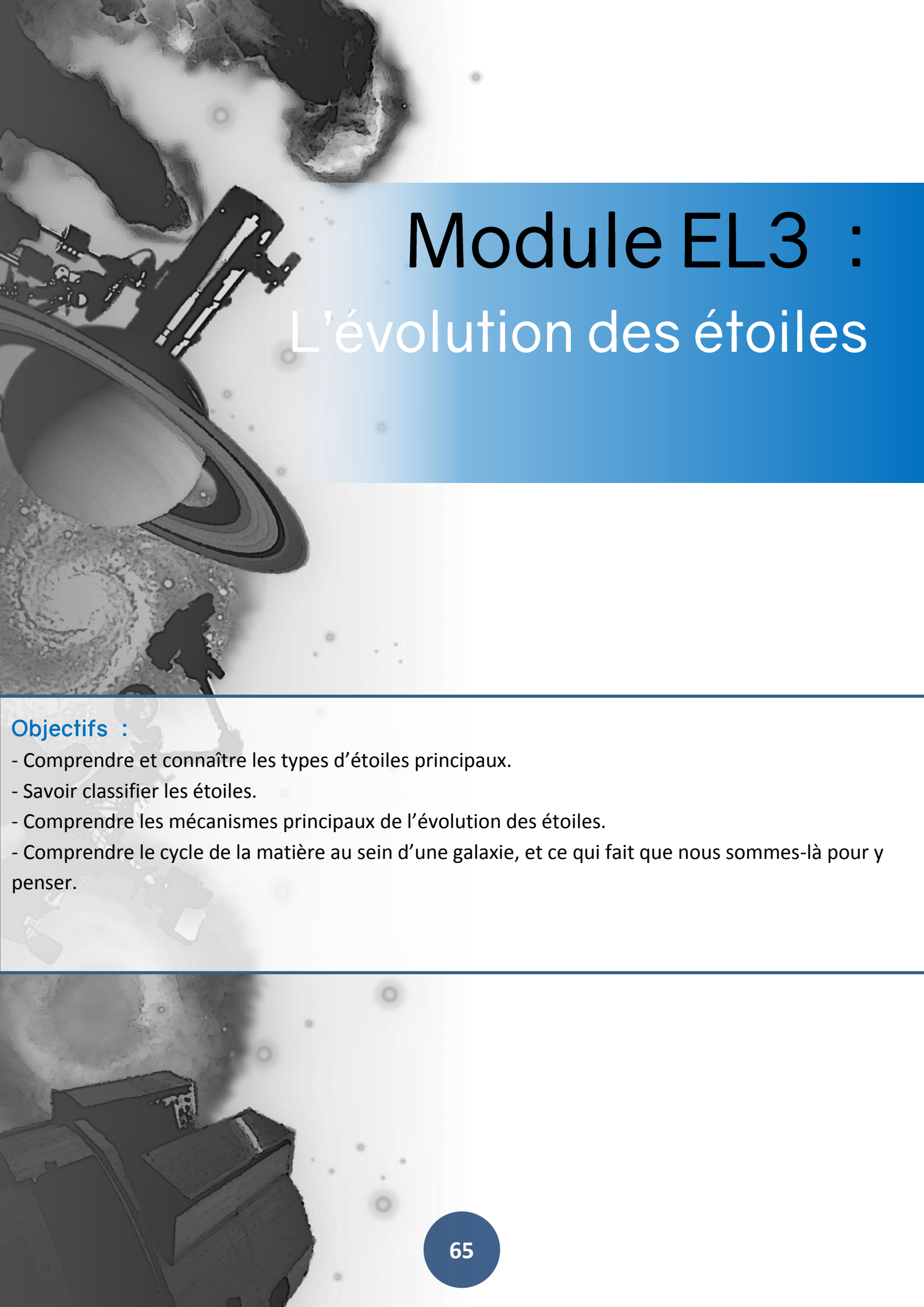
Très très chaud : de nouveau convection

On peut donner des exemples d'étoiles pour chaque type :

- Proxima du Centaure, du système triple Alpha du Centaure, à 4,2 années-lumière de nous, est une naine rouge.
- Rigel, dans la constellation d'Orion, est une étoile bleue.
- Le Soleil, ou Alpha du Centaure, sont des étoiles blanc-jaune.

Liens avec les programmes scolaires





Module EL3 :

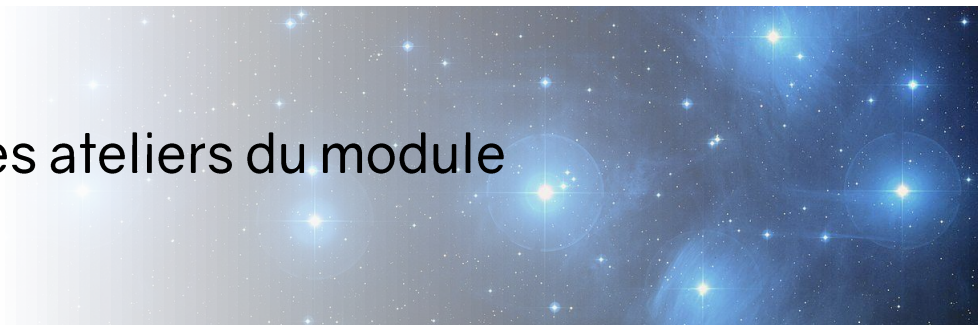
L'évolution des étoiles

Objectifs :

- Comprendre et connaître les types d'étoiles principaux.
- Savoir classer les étoiles.
- Comprendre les mécanismes principaux de l'évolution des étoiles.
- Comprendre le cycle de la matière au sein d'une galaxie, et ce qui fait que nous sommes-là pour y penser.

Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	ELA3 PM	EL3 Petite malle	1
Prêt	ELA3 GM	EL3 Grande malle	1
Etab		Tableau	1

* Le matériel se trouve dans les malles fournies par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour des observations.

Séquence 1

La classification des étoiles

Objectif :

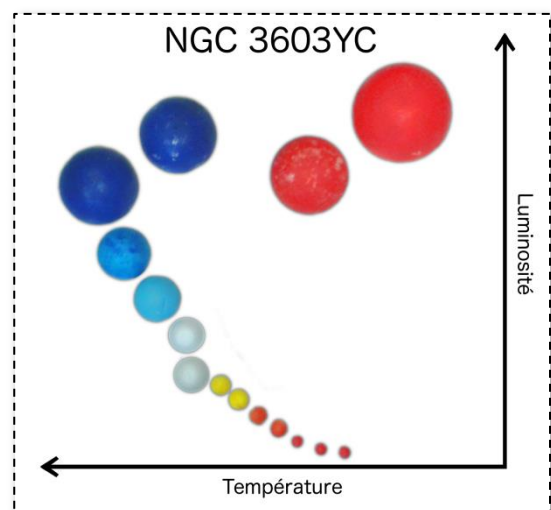
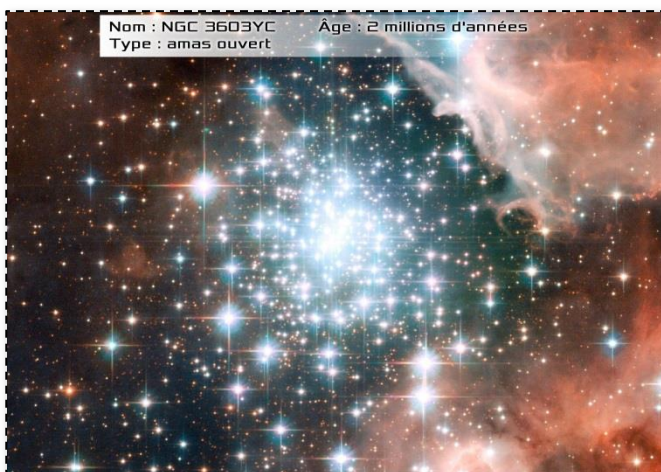
- Découvrir les différents types d'étoiles, leur classification, et la notion d'amas d'étoiles.

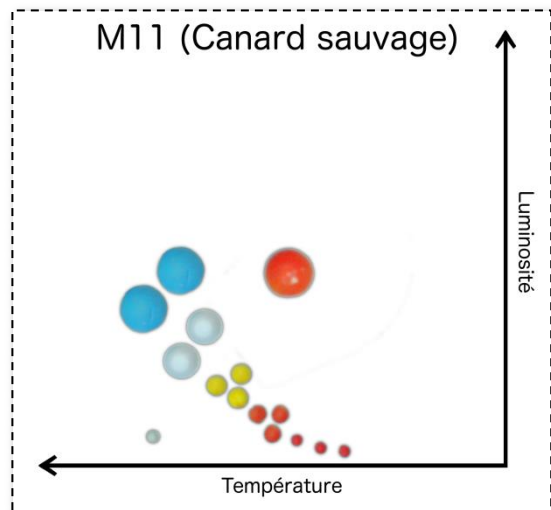
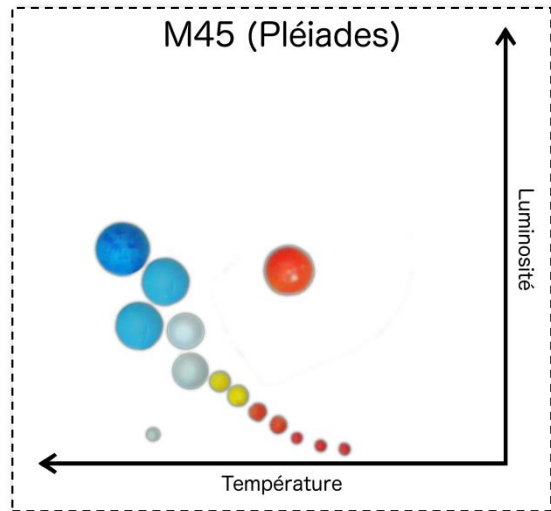
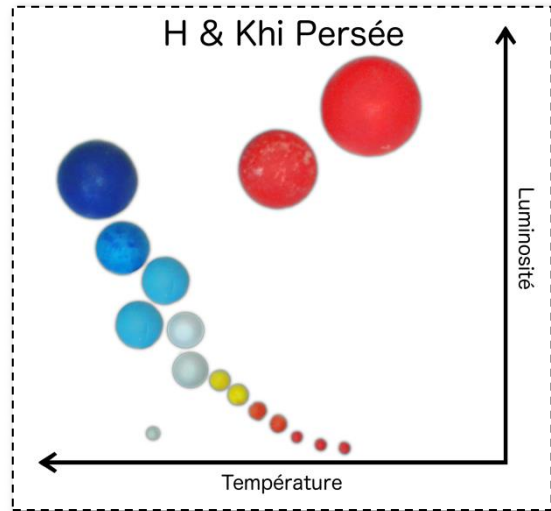
Durée : 45 min à 1h30

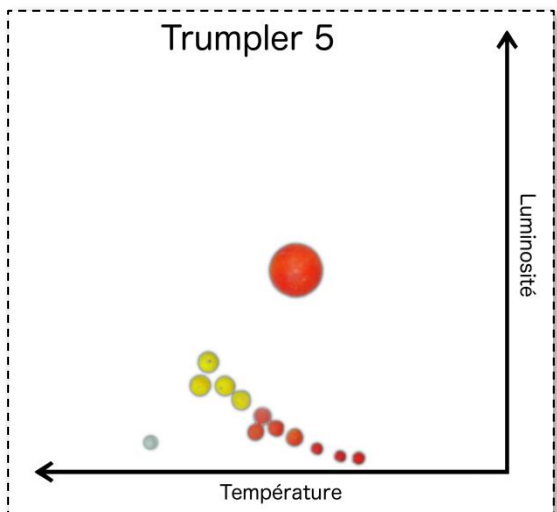
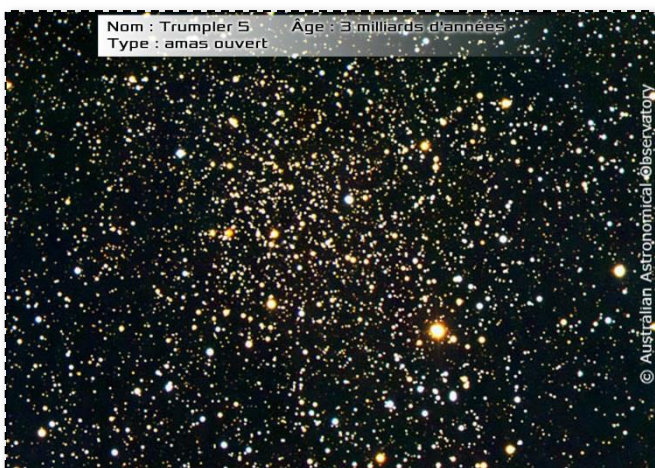
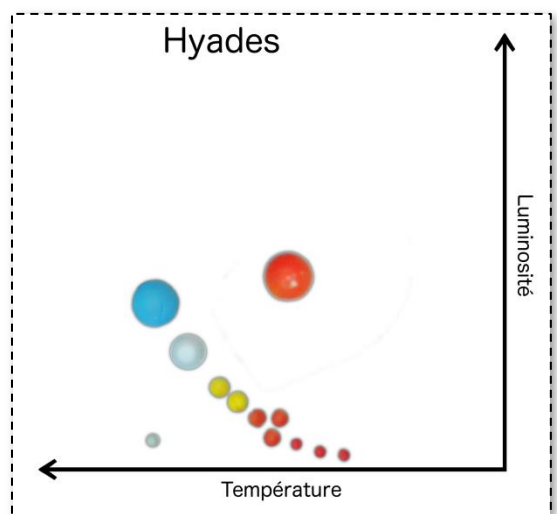
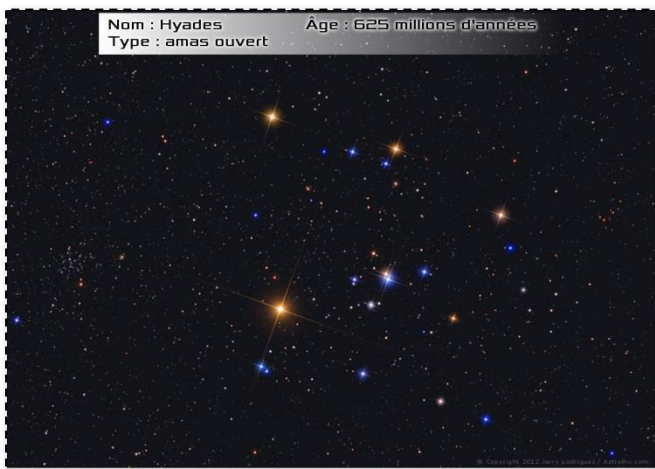
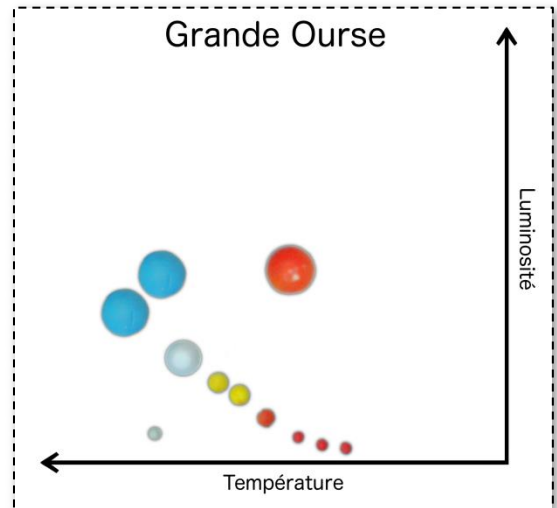
Etape 1 : Les amas d'étoiles

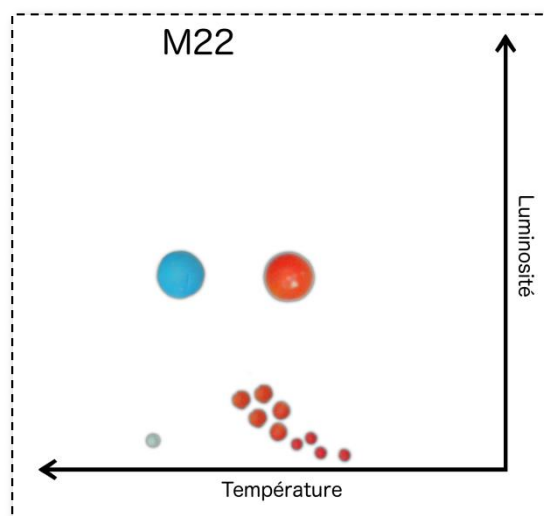
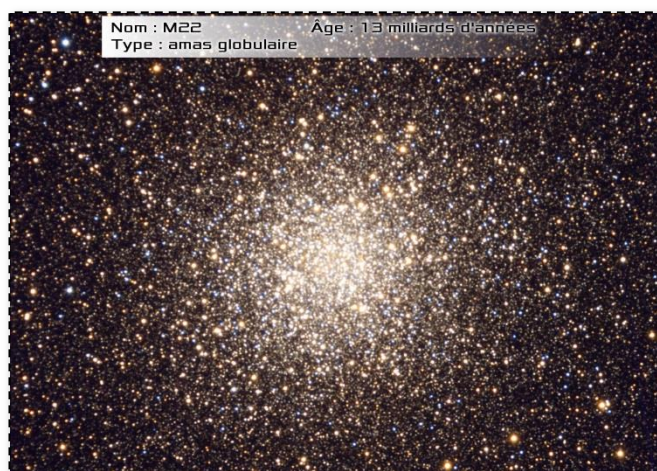
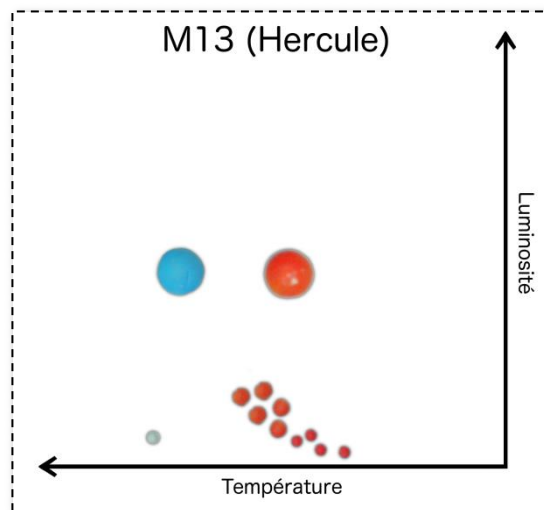
1) Mise en place :

- Séparer votre groupe en quelques petits-groupes de maximum 5 jeunes.
- Donner à chacun la photo d'un amas d'étoiles (que l'on trouve dans le **bac bleu**).
- Distribuer le lot d'étoiles à chaque groupe, correspondant à leur amas. Plus loin, les photos de ces amas et leurs lots d'étoiles avec leur classification dans un diagramme H-R (classés par âge croissant). Attention, ne pas donner les diagrammes H-R aux élèves : c'est la solution du jeu.









2) Atelier :

- Demander à chaque petit groupe de classer les étoiles de son amas en fonction de deux paramètres, en utilisant une abscisse et une ordonnée. Le choix des deux paramètres est libre : forme, taille, couleur, masse, etc ...
- Une fois cette étape faite, faire le bilan avec les élèves de toutes les classifications qu'ils ont proposées, et les noter au tableau. Discuter avec eux pour parvenir à la bonne classification : couleur vs taille ou température vs luminosité.
Remarque : plus une étoile est chaude et grande, plus elle est lumineuse.
- Demander aux élèves de classer les étoiles de leurs amas selon les paramètres du diagramme HR, puis de se déplacer pour aller voir les amas des autres groupes.
Remarque : si vous disposez d'un tableau assez grand, faites-leur construire le diagramme HR de chaque amas au tableau (les étoiles sont magnétiques).
- Demander aux jeunes de comparer leurs diagrammes HR en fonction de l'âge de leurs amas. L'âge des différents amas est donné sur les photos. Quels types d'étoiles

ont disparu ? quels types d'étoiles sont apparus ? après combien de temps ? Est-ce que l'aspect de l'amas sur la photo change avec l'âge ? Quelle sont les différences entre les différents types d'amas proposés ?

- Rassembler les étoiles de tous les amas dans un seul diagramme HR au tableau en faisant participer les jeunes

3) Remarques :

- **Les étoiles représentées par des demi-boules de polystyrène pour chaque amas donnent une idée des types d'étoiles que l'on peut trouver dans ces amas.** Mais les proportions en nombre d'étoiles des types entre eux ne sont pas respectées, ainsi que les proportions en nombre d'étoiles d'un amas à l'autre. Ce peut être d'ailleurs un sujet de discussion avec les élèves :
 - 95% des étoiles dans un amas d'étoiles venant de naître sont moins massives que le Soleil, et se trouvent donc en bas à droite du diagramme HR.
 - Les géantes rouges sont peu nombreuses et apparaissent régulièrement au cours de la vie de l'amas, à mesure que les étoiles les plus massives meurent. Au fil du temps, elles meurent dans l'ordre décroissant de leurs masses.
- Lorsqu'on mesure la vitesse de déplacement des étoiles de la Grande Ourse par rapport à nous, on s'aperçoit qu'elles viennent toutes d'une même région. Cela signifie que ces étoiles étaient auparavant regroupées dans un amas. Aujourd'hui, elles forment ce que l'on appelle un groupe mouvant : c'est un amas d'étoiles en fin de vie, les étoiles le composant sont en train de se disperser dans la Galaxie. **Attention : une constellation est rarement le vestige d'un amas d'étoiles, mais bien plus souvent un effet de la perspective. La Grande Ourse est une exception.**

Etape 2 : Le diagramme H-R*

1) Mise en place :

Pendant l'étape précédente, l'animateur construit sur une autre partie du tableau le diagramme HR légendé avec le jeu de boules présent dans le grand bac du module. Garder ce diagramme caché le temps de la séquence : on le montrera en guise de conclusion.

2) Atelier :

- A partir du diagramme HR général que les jeunes ont constitué, demander aux jeunes de délimiter des zones contenant des groupes d'étoiles et de leur inventer un nom, selon les caractéristiques des étoiles qu'ils contiennent. Demander aux jeunes qui proposent des idées de les expliquer.
- Enfin, dévoiler le diagramme HR légendé et expliquer les différents éléments qu'il contient, en utilisant des informations parmi celles données plus loin :

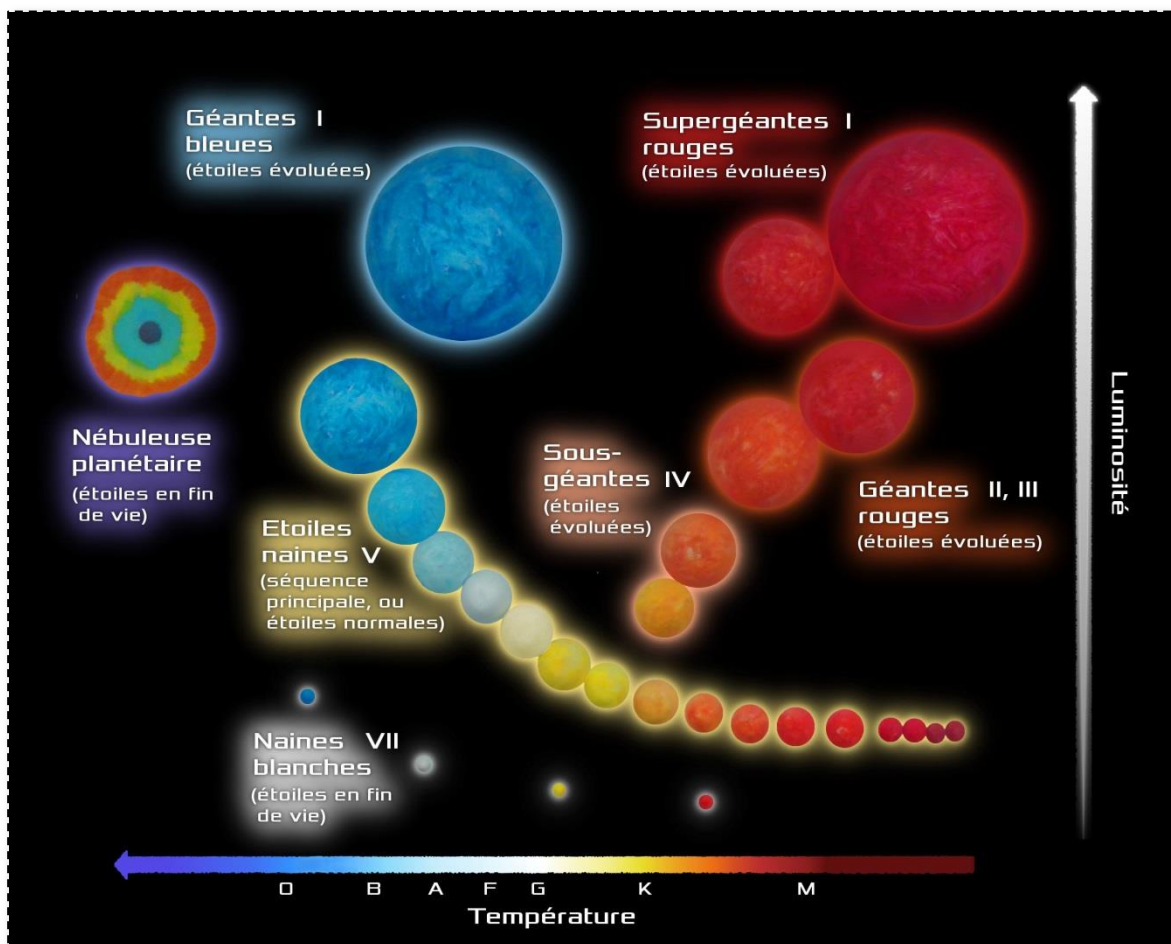


Figure 13 : Diagramme Hertzsprung-Russell

3) Explications

Étoiles naines : séquence principale ou « étoiles normales ».

C'est à cet endroit du diagramme HR que les étoiles commencent leur vie. Lorsqu'un amas d'étoiles se forme, toutes ses étoiles se répartissent sur une ligne diagonale dans le diagramme HR, la séquence principale, selon leur masse initiale.

Les étoiles naissantes les plus lourdes vont aussi être les plus grosses et les plus chaudes, et donc également les plus lumineuses et les plus bleues.

Les étoiles naissantes les plus légères vont aussi être les plus petites et les moins chaudes, et donc également les moins lumineuses et les plus rouges.

Tous ces paramètres : masse, température, luminosité et taille vont changer durant l'évolution d'une étoile. Mais c'est la masse initiale qui détermine absolument toute la suite de l'existence d'une étoile (il y a aussi la composition chimique, dans une moindre mesure). On verra cela dans la séquence suivante.

On appelle les étoiles de la séquence principale des étoiles naines ou « normales » car elles n'ont pas encore évolué, ou ont très peu évolué.

Géantes rouges et supergéantes rouges : étoiles évoluées.

Ce sont des stades évolués des étoiles. Vers la fin de son existence, une étoile va naviguer dans cette zone du diagramme HR. Les étoiles ayant la masse initiale du Soleil ou moins, une fois devenues géantes rouges, ne feront qu'une brève incursion dans la région des supergéantes rouges, mais les étoiles nées bleues iront dans la région des supergéantes rouges sans passer dans celle des géantes rouges.

Sous-géantes et géantes bleues : stades intermédiaires.

Ce sont des stades intermédiaires de l'évolution des étoiles. Le stade de sous-géante intervient juste avant celui de géante rouge pour des étoiles de la masse initiale du Soleil ou moins. Le stade de géante bleue intervient à plusieurs reprises durant la vie d'une étoile naine bleue (très massive), en alternance avec des phases de supergéante rouge.

Nébuleuses planétaires et naines blanches : étoiles en fin de vie.

Ce sont différents stades du même épisode de l'évolution d'une étoile née avec une masse de moins de 8 fois celle du Soleil. Cela ne concerne donc pas les deux étoiles bleues placées en haut de la séquence principale sur ce diagramme HR.

La nébuleuse planétaire est constituée d'une naine blanche, qui est le cœur de l'étoile, et d'un nuage de gaz en expansion, qui est le résidu de son enveloppe, qui s'échappe. Au départ, la naine blanche est très chaude et donc est très lumineuse et émet en ultra-violet. Ensuite, elle refroidit en plusieurs dizaines de milliards d'années et se dirige vers la partie en bas à droite du diagramme HR.

Attention à ne pas confondre le groupe des naines blanches et les étoiles naines blanches de la séquence principale. Cette confusion des conventions est malheureuse mais a une raison historique : on a découvert les étoiles de la séquence principale avant les naines blanches. Lorsqu'on a découvert des étoiles en bas à gauche du diagramme HR (donc peu lumineuses, et de couleur bleue ou blanche), on les a appelées naines blanches.

Remarque : on n'a encore jamais observé de naines blanches de couleur rouge car il leur faut 20 milliards d'années pour atteindre ce stade, soit plus que l'âge actuel de l'Univers !

Une autre façon de classer les étoiles :

On peut aussi utiliser le type spectral, qui est la carte d'identité d'une étoile. Il est composé de sa classe spectrale et de sa classe de luminosité.

La classe spectrale ne dépend que de la température de l'étoile. Elle est indiquée le long de l'axe des températures : O, B, A, F, G, K, et M.

La classe de luminosité dépend de l'âge de l'étoile. La taille d'une étoile change au cours de sa vie. Cela implique des changements de luminosité. On associe alors une classe de luminosité à chaque grande étape de la vie d'une étoile. Elles sont numérotées de I à VII, et sont indiquées à côté des noms des différents groupes d'étoiles sur le diagramme HR. L'ordre croissant des classes de luminosité correspond plus ou moins à un ordre croissant dans les luminosités.

Un conseil : ne pas en dire trop sur l'évolution des étoiles lors de cette séquence, car c'est la notion abordée dans la séquence suivante... que voici !

Séquence 2

Couleur, température, luminosité

Objectif :

- Comprendre le lien entre la couleur d'une étoile et sa température de surface.

Durée : 30 min à 45 min

Etape 1 : Le Spectre de corps noir

On explique que le Soleil a un spectre appelé spectre de corps noir. Plus un corps noir est chaud, plus son maximum de luminosité baisse en longueur d'onde / augmente en énergie. Le Soleil a une température de 5750 degrés (Kelvin), ce qui fait que son spectre atteint son maximum dans le vert.

On donne aux élèves **des courbes de corps noir de différentes étoiles connues** (sans les raies). Ces spectres sont imprimés sur transparents et indiquent aussi la température de l'étoile, et montre une représentation artistique et colorée de l'étoile. On ajoute aussi des naines rouges et des naines brunes pour compléter la famille, qui ont des identifiants techniques mais pas de noms (découvertes récemment par des instruments infrarouges car très faibles en lumière visible).

On leur demande de les comparer, puis de les classer en les superposant. On se rend compte alors que les étoiles ont des couleurs et donc des températures différentes... et que le bleu est chaud et le rouge est froid !

On utilise une lampe à incandescence et un potentiomètre pour montrer que le filament est rouge quand il froid, et blanc quand il est chaud.

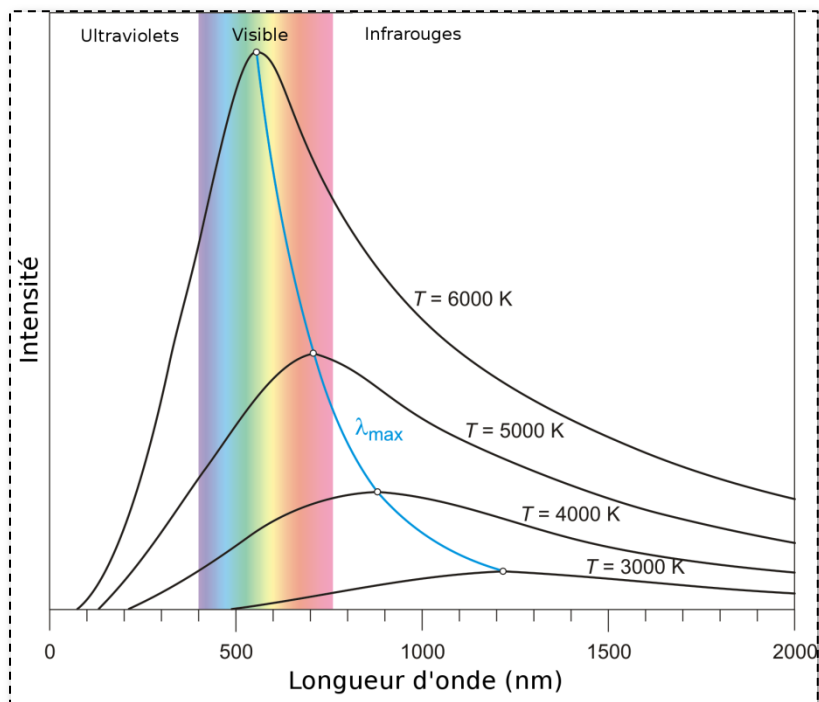


Figure 14 : Courbes de corps noir.

Etape 2 : La loi de Wien

On indique alors la loi de Wien, qui relie la longueur d'onde du maximum du spectre de corps noir à la Température de surface du corps noir.

Loi de Wien

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 * 10^{-3}}{T}$$

λ_{max} = longueur d'onde du maximum du spectre de corps noir en nm

T = Température de surface du corps noir (ici, de l'étoile) en Kelvin (K).

1K = -272.15°C. 0K = -273.15°C est le zéro absolu de la température. La température de surface du Soleil est de 5750 K.

Etape 3 : Les classes spectrales des étoiles

On montre **quelques spectres d'étoiles complets**^{S005}, avec leurs raies d'absorption, pour rappeler le spectre du Soleil et les notions de composition.

On explique qu'on peut classer les étoiles avec les caractéristiques de leurs spectres. On obtient les classes spectrales : O, B, A, F, G, K, M.

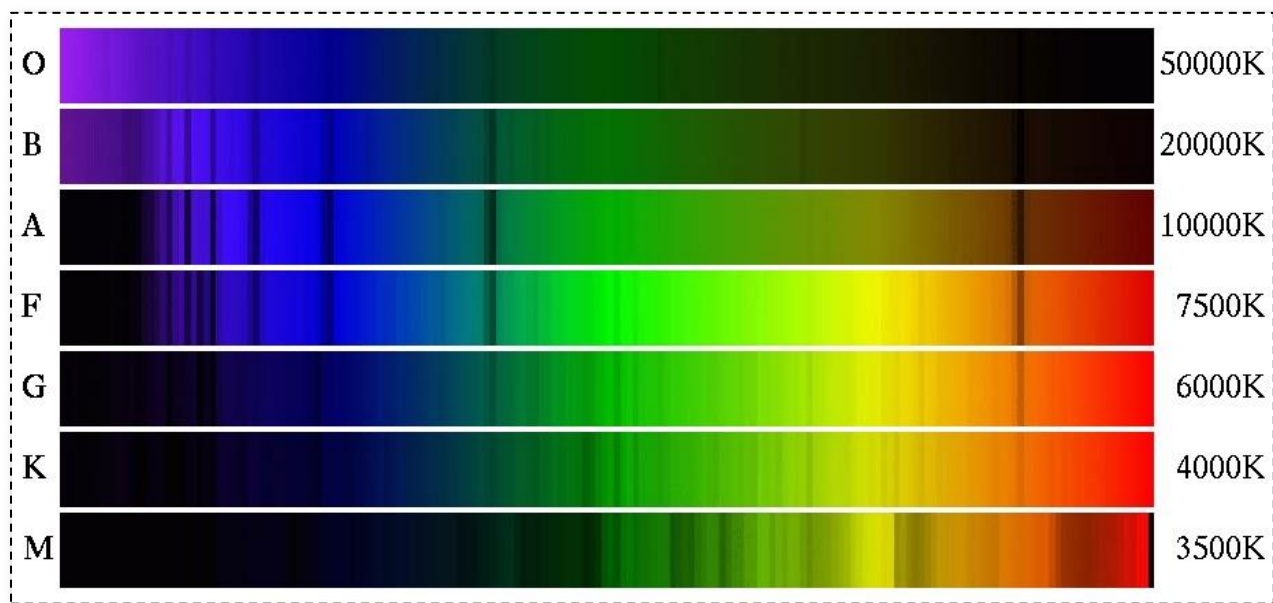


Figure 15 : Spectres d'étoiles de différentes classes spectrales.

On explique que l'on peut classer les étoiles par leur température (leur couleur) et leur luminosité totale.

Etape 4 : La loi de Stefan-Boltzmann

On indique alors la loi de Stefan-Boltzmann, qui relie la luminosité à la température et au rayon d'une étoile.

Loi de Stefan-Boltzmann

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

L= luminosité bolométrique (totale) de l'étoile en Watt (W)

r= rayon de l'étoile en km

σ = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ constante de Stefan-Boltzmann

T= température de surface de l'étoile en Kelvin (K)

Séquence 3

L'évolution des étoiles

Objectif :

- Découvrir le trajet des étoiles sur le diagramme HR au cours de leur vie, à partir de la séquence principale, et comprendre que sa durée et ses étapes dépendent de la masse initiale de l'étoile.
- Comprendre comment les éléments plus lourds que l'hélium sont fabriqués dans les étoiles.

Durée : 40 min à 1h

Etape 1 : Les chemins d'évolution

1) Mise en place :

- Distribuer quelques cartes « étape » à chaque jeune.
- Ces cartes indiquent :
 - Le numéro du chemin d'évolution.
 - La masse initiale de l'étoile (i.e. à la naissance) correspondant à ce chemin d'évolution, en masse solaire (M_{sol})
 - Le numéro d'étape sur ce chemin d'évolution.
 - La luminosité de l'étoile à cette étape en luminosité solaire (L_{sol}).
 - La température de l'étoile à cette étape en Kelvin.
 - Le rayon de l'étoile à cette étape en rayon solaire (R_{sol}).
- Les élèves doivent se rencontrer pour comparer leurs cartes et trouver ceux qui possèdent les cartes du même chemin d'évolution.

- Il y a 6 chemins correspondant à 6 masses initiales différentes, composés d'au plus 12 étapes. Idéalement, faites 4 groupes d'élèves :
 - Groupe 1 : chemins 1, 2 et 3
 - Groupe 2 : chemin 4
 - Groupe 3 : chemin 5
 - Groupe 4 : chemin 6



2) Atelier :

- Chaque groupe va construire le diagramme HR de son chemin d'évolution. Toutes les informations utiles à cette tâche figurent sur les cartes. Laisser les élèves libres de chercher pendant un certain temps.
- S'ils bloquent, proposer la solution suivante : aligner les cartes du chemin par ordre décroissant de température, de gauche à droite. Enfin, déplacer les cartes dans la direction verticale par ordre croissant de luminosité, de bas en haut.
- Distribuer des flèches jaunes aux groupes afin de les aider à matérialiser les chemins d'évolution.



- Entrer dans une phase d'observation, interprétation et discussion des différents chemins d'évolution : comment l'étoile change au cours du temps ? comment se déplace-t-elle dans le diagramme HR ? Fait-elle des allers-retours ? pourquoi ? etc ...
- On peut ensuite tracer au tableau les différents chemins d'évolution que l'on a matérialisés par les flèches jaunes, afin de les comparer : quel est l'effet de la masse initiale de l'étoile sur son chemin d'évolution ? sur son stade final ?
- Enfin, il reste la question de la durée de vie des étoiles : pour cela, on peut rappeler l'atelier E&L 2 sur le fonctionnement des étoiles. On avait vu que plus une étoile était massive, plus son cœur était dense et chaud, et plus il y avait de réactions nucléaires en un temps donné : le « carburant » était utilisé plus rapidement. Les élèves doivent arriver à la conclusion que les étoiles plus massives vivent moins longtemps.



On trouvera dans le module des cartes « durée de vie ». Chacune représente la durée totale d'un chemin, que l'on pourra associer sur le tableau aux chemins tracés.

Remarque : tous ces éléments sont aimantés et peuvent être placés au tableau.

Durées de vie des différents chemins d'évolution :

Chemin	Masse initiale (M_{sol})	Durée (années)
1	0,001	1000 milliards
2	0,15	> 20 milliards
3	0,4	15 milliards
4	1	10 milliards
Bonus	1,5	3 milliards
5	5	80 millions
6	10	32 millions
Bonus	30	11 millions
Bonus	60	3 millions
Bonus	80	1 million

Il existe tous les cas intermédiaires. Il existe même de rares étoiles de plus de 80 masses solaires qui vivent au plus 1 million d'années !

Paradoxe : plus un chemin est court en durée, plus son tracé sur le diagramme HR est complexe !

Dans le tableau sont donnés les durées de vie pour trois autres masses initiales, à ajouter au tableau à la fin de l'atelier.

Séquence 4

La géante rouge



Objectif :

- Comprendre ce qui arrive à une étoile, sur la séquence principale, quand elle a fusionné tout l'hydrogène de son cœur.

Durée : 45 min à 1h

Etape 1 : La géante rouge

1) Rappels :

Faire un petit rappel du fonctionnement d'une étoile :

- Au cœur de l'étoile, il fait assez chaud pour que l'hydrogène fusionne en hélium.
- L'étoile existe car la gravité qui tend à la faire s'effondrer sur elle-même est contrebalancée par la pression du gaz de son enveloppe.
- C'est la production d'énergie au cœur de l'étoile qui augmente la température de l'enveloppe, ce qui crée cette pression qui pousse vers l'extérieur.

2) Expérience

On va voir qu'un gaz chauffé se dilate : il prend plus de place chaud que froid.

- Fixer l'embout d'un ballon de baudruche sur le goulot ouvert de la bouteille en plastique vide.
- Faire chauffer de l'eau avec la bouilloire.
- Plonger le bas de la bouteille dans l'eau bouillante.
- Observation : le ballon gonfle. Pourquoi ?

Au départ de l'expérience, il y a de l'air dans le ballon et la bouteille, qui occupe un certain volume. En plongeant la bouteille dans l'eau bouillante, l'air à l'intérieur chauffe et se dilate. Il prend plus de place. La bouteille étant difficilement extensible, c'est le ballon qui va gonfler pour accueillir cette augmentation de volume.

La pression :

Plus précisément, le gaz en se dilatant, pousse sur les parois de la bouteille et du ballon. Sa pression augmente. **Pression = Force exercée sur une surface = force/surface = force par unité de surface.**

3) Maquette

Poser la question : que se passe-t-il quand l'étoile n'a plus d'hydrogène à fusionner en son cœur ? Qui va gagner : la gravité ou la pression ?

Montrer l'intérieur de la première moitié de la maquette de géante rouge :

- La fusion s'est arrêtée au cœur de l'étoile, qui est désormais fait d'hélium. Il s'effondre.
- En s'effondrant, l'intérieur de l'étoile apporte de l'hydrogène de l'enveloppe plus près du centre de l'étoile, là où il fait chaud : **l'hydrogène fusionne alors autour du cœur.**
- Par conséquent, pendant que le cœur continue de s'effondrer, le gaz de l'enveloppe se réchauffe. Que se passe-t-il alors ?
- Le gaz de l'enveloppe se dilate à cause de la pression des couches internes qui augmente : l'étoile s'agrandit !
- La surface, désormais beaucoup plus loin du cœur, est faite d'une matière beaucoup plus diluée qu'avant. Elle refroidit. Elle devient donc rouge.
- **L'étoile est devenue une géante rouge.**



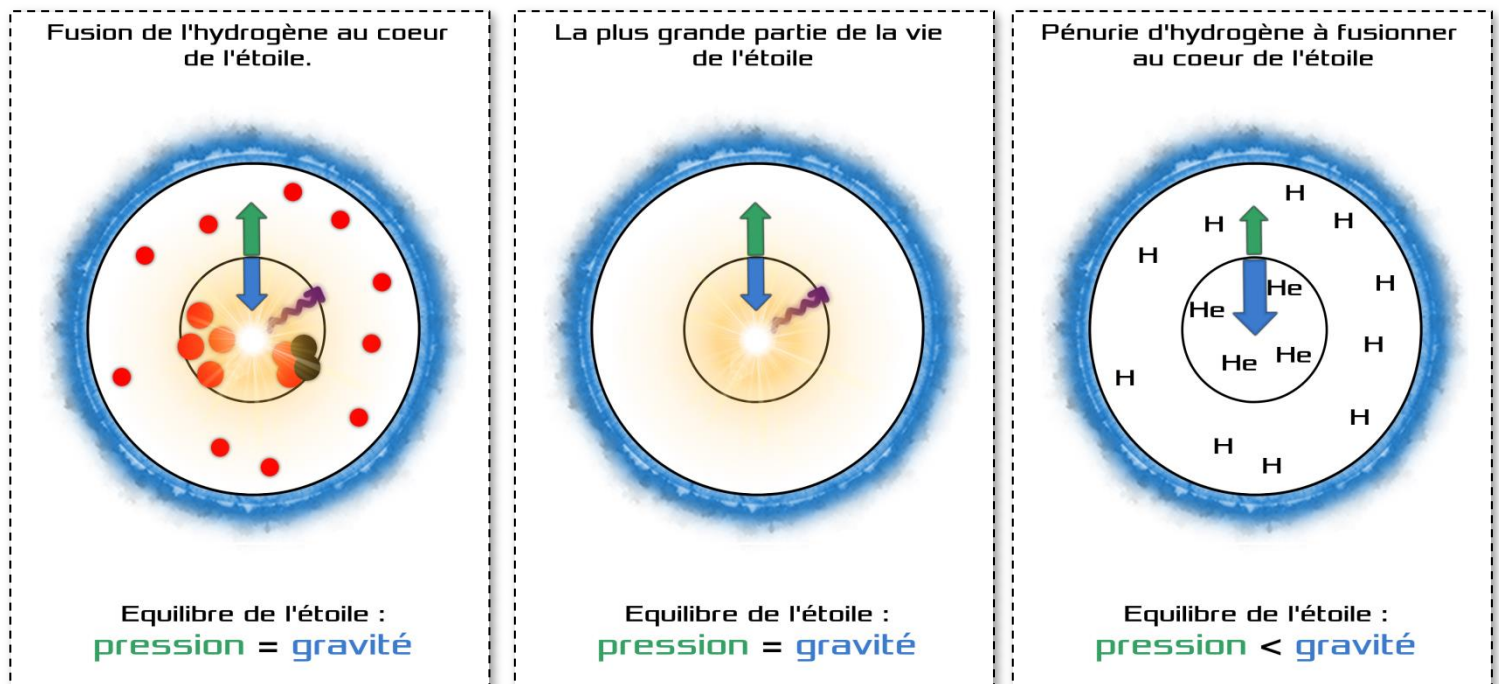
Note : la deuxième moitié de la maquette viendra conclure l'atelier.

Etape 2 : La nucléosynthèse

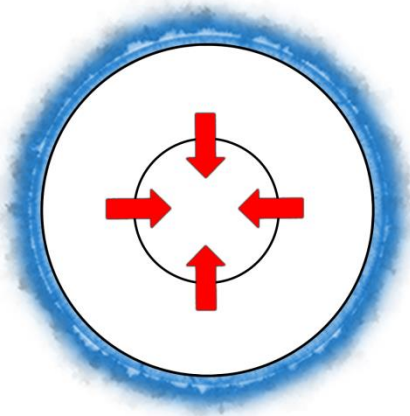
Que se passe-t-il donc quand une étoile n'a plus d'hydrogène à fusionner en son cœur ? Elle devient géante rouge ! oui, mais ensuite ? On a vu que sur le diagramme H-R, les étoiles font des zigzag entre le bleu et le rouge à la fin de leur chemin d'évolution, et qu'elles en font plus si elles sont plus lourdes (et donc plus chaudes) à la naissance. Le jeu qui suit permet de comprendre cela.

- Distribuer une carte étape à chaque élève.
- Laisser les élèves regarder leur carte.
- Ces cartes sont les étapes de la fin du chemin d'évolution d'une étoile née très massive, donc très chaude, et donc avec une surface rayonnant dans le bleu.
- Le but est ensuite de comprendre ce que ces cartes racontent et de les replacer dans l'ordre chronologique.

Voici l'ordre chronologique de ces cartes, de gauche à droite, puis de haut en bas :

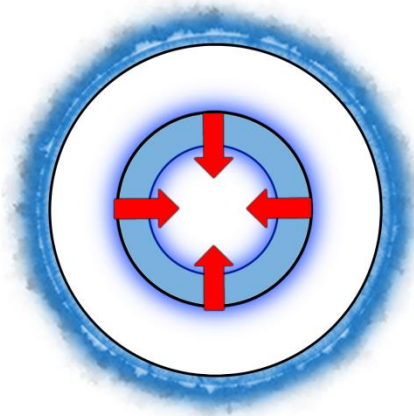


Effondrement des couches internes de l'étoile



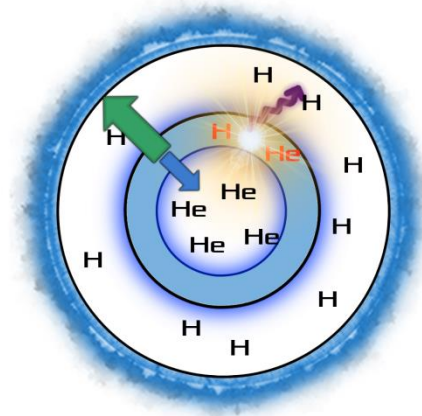
Equilibre de l'étoile :
pression < gravité

Augmentation de la température dans une couche autour du cœur



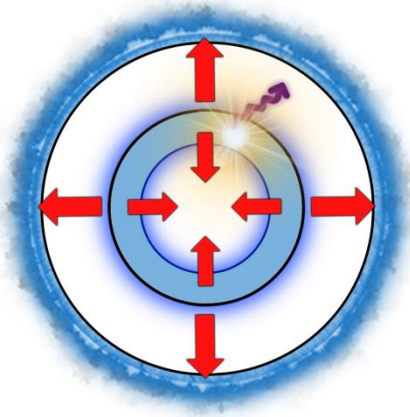
Equilibre de l'étoile :
pression < gravité

Fusion de l'hydrogène dans une couche autour du cœur



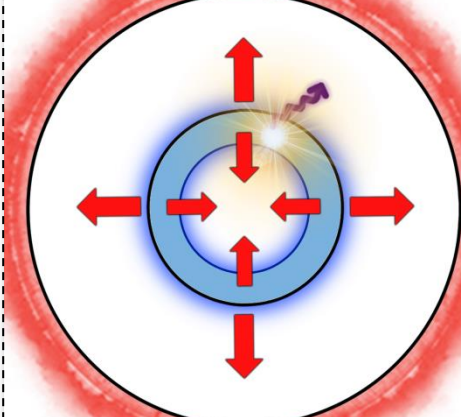
Equilibre de l'étoile :
pression > gravité

L'enveloppe se dilate, pendant que le cœur s'effondre



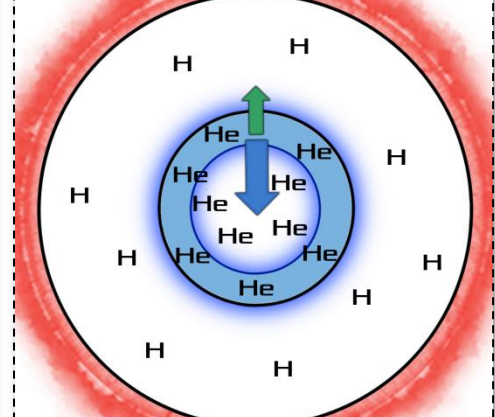
Equilibre de l'étoile :
pression > gravité

La surface, plus éloignée du cœur, refroidit et devient rouge



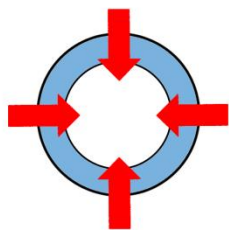
Equilibre de l'étoile :
pression > gravité

Arrêt de la fusion dans la couche autour du cœur (pénurie d'H)



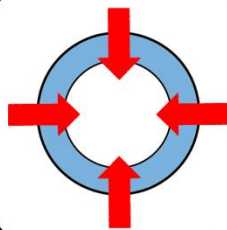
Equilibre de l'étoile :
pression < gravité

Effondrement de l'étoile sur son cœur



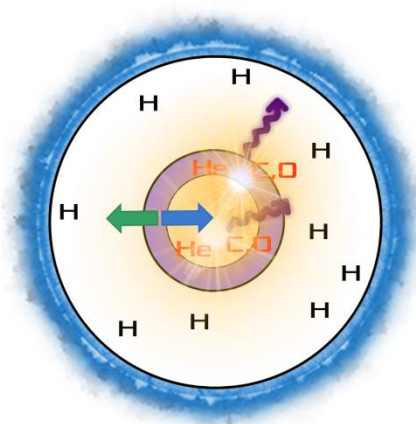
Equilibre de l'étoile :
pression < **gravité**

La surface, plus proche du cœur, devient chaude et bleue



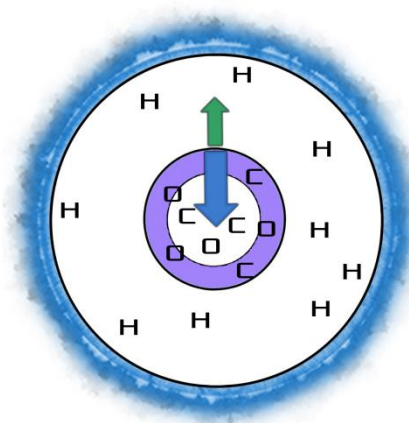
Equilibre de l'étoile :
pression < **gravité**

Augmentation de la température du cœur, fusion de l'hélium



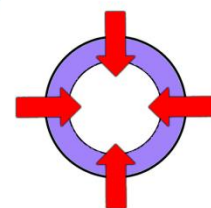
Equilibre de l'étoile :
pression = **gravité**

Arrêt de la fusion au cœur et près du cœur (pénurie d'He)



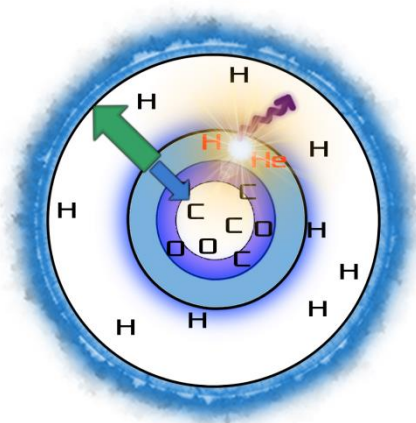
Equilibre de l'étoile :
pression < **gravité**

Effondrement des couches internes de l'étoile

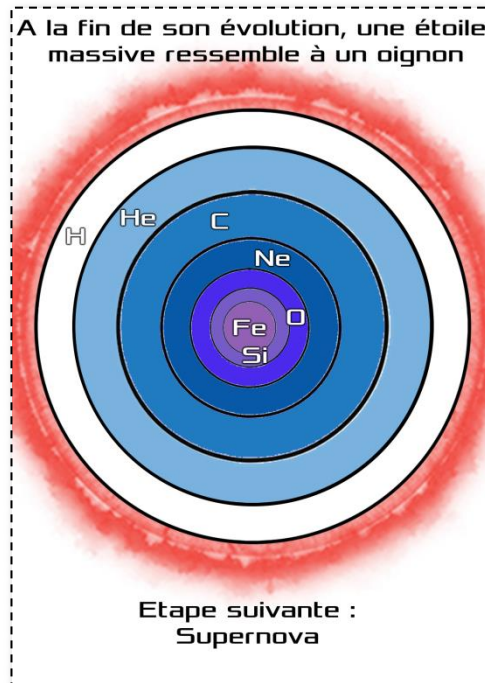
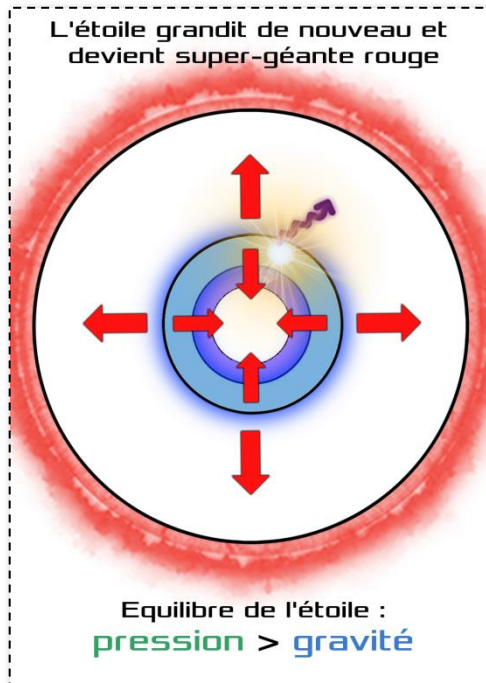


Equilibre de l'étoile :
pression < **gravité**

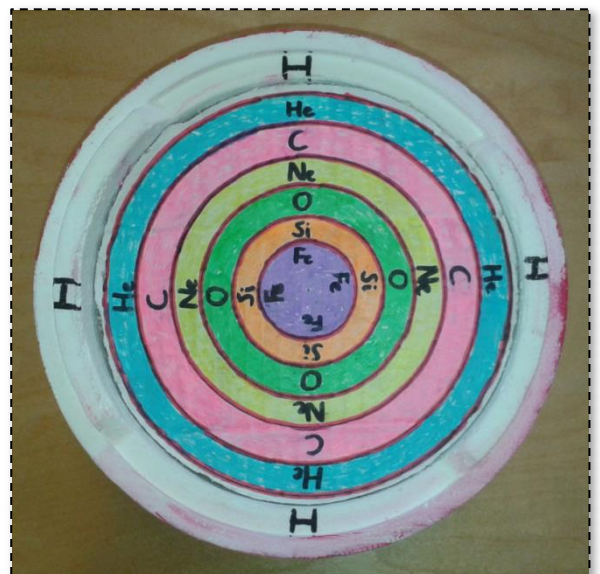
Fusion de H dans une **couche** autour de la **couche** C,O

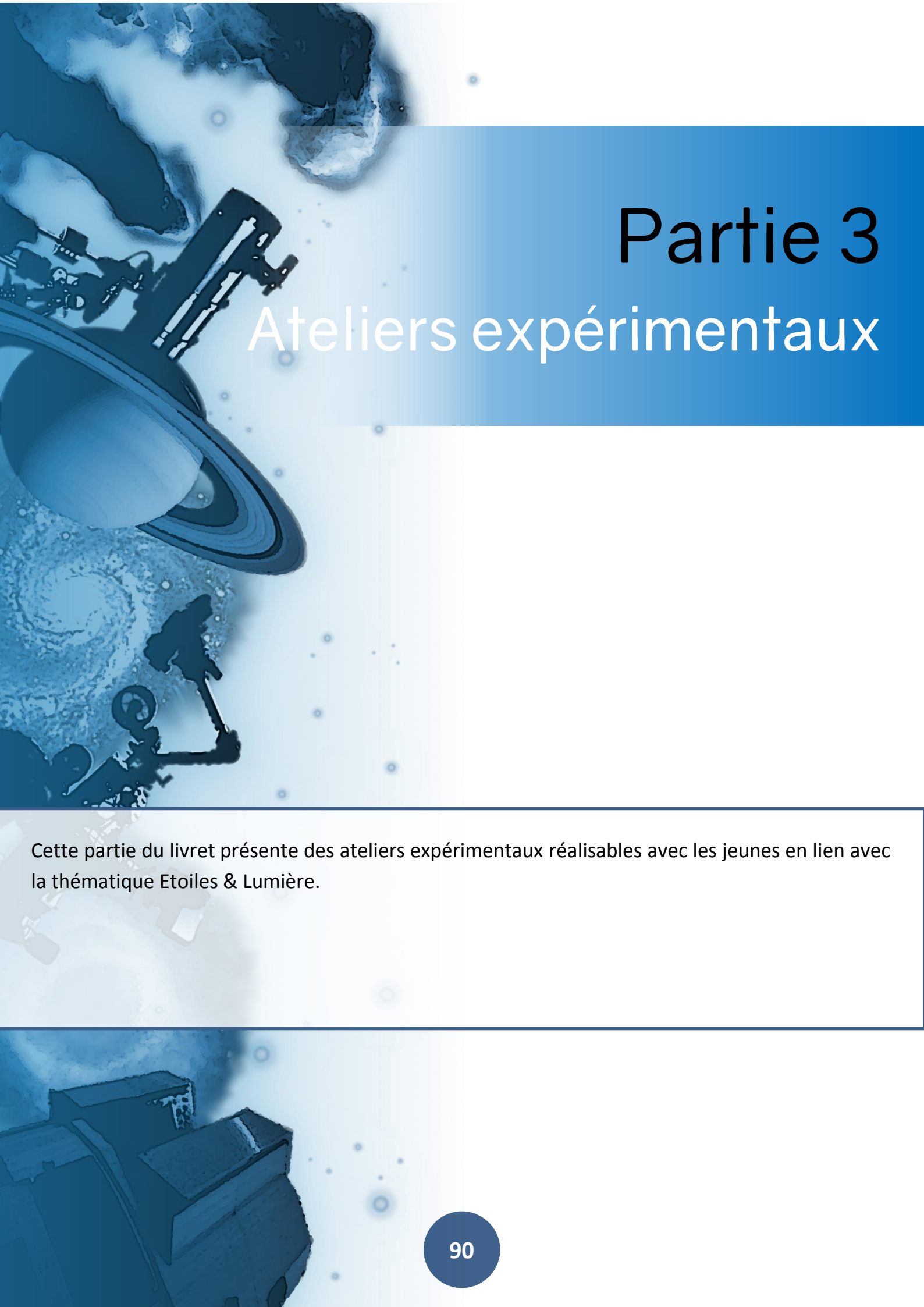


Equilibre de l'étoile :
pression > **gravité**



- Le Soleil meurt à la 16^{ème} carte, après une brève phase de super-géante rouge, car il n'est pas assez lourd pour retenir son enveloppe en expansion. Il reste alors une nébuleuse planétaire avec au centre, le cœur de l'étoile qui s'est effondré en une naine blanche. Les étoiles plus massives parviennent à passer à la fusion de l'élément suivant. A chaque phase suivante d'expansion de l'enveloppe, les étoiles pas suffisamment massives terminent là, les autres continuent.
- Lorsqu'un noyau de fer s'est formé, il ne peut plus fusionner, car il faut apporter de l'énergie pour fusionner du fer. L'étoile s'effondre entièrement sur son cœur et le matériau rebondit lorsque la compression ne peut plus progresser (pour des raisons trop complexes pour être expliquées ici). Ce rebond propulse la matière de l'étoile dans l'espace, et s'appelle la supernova. Au centre, il restera une étoile à neutrons, ou bien un trou noir, si l'étoile était assez massive.
- Montrer la deuxième moitié de la maquette pour illustrer le stade final du chemin d'évolution d'une étoile massive. Une étoile fabrique des éléments au cours de sa vie, qu'elle diffuse en explosant en supernova dans le nuage interstellaire où elle est née. Les prochaines générations d'étoiles à naître dans cette même nébuleuse primitive contiendront ces éléments et il pourra alors se former des planètes autour d'elle



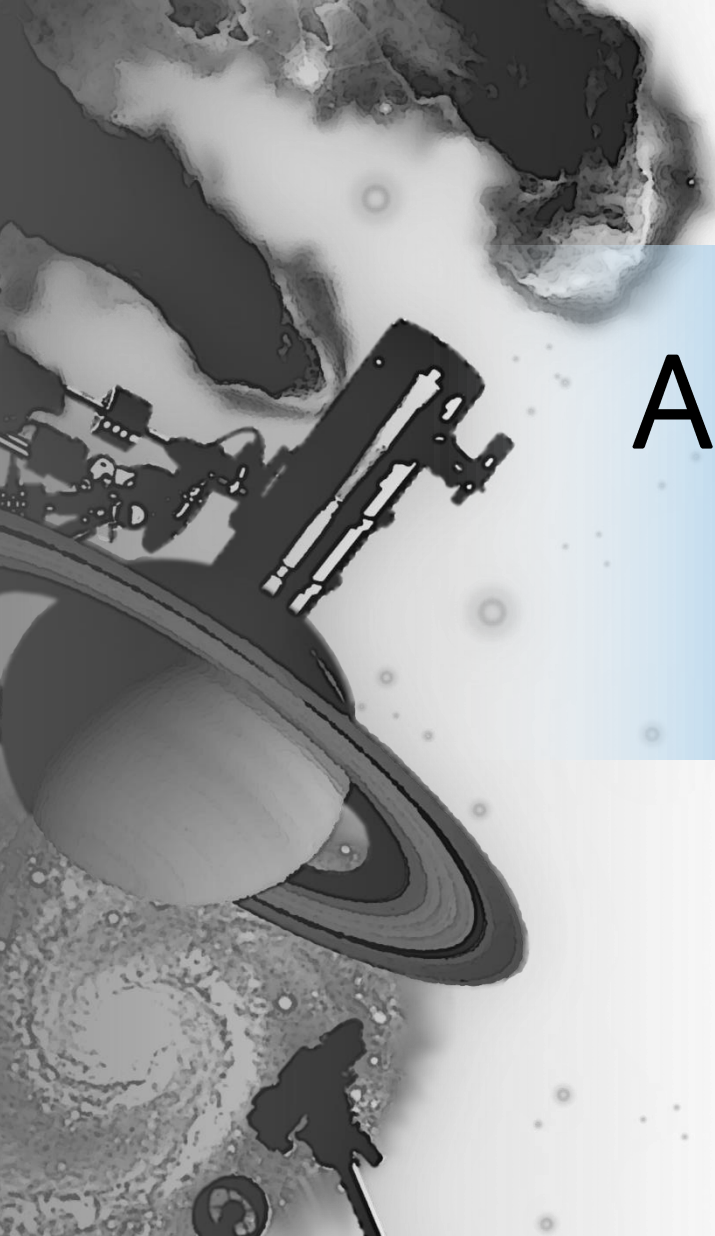
A detailed illustration of a space scene. In the upper left, a large, dark, irregularly shaped celestial body, possibly a comet or asteroid, is shown. Below it, a satellite or space probe with various instruments and antennas is depicted. To the right of the probe, a large, bright, spherical planet with a prominent ring system, resembling Saturn, is visible. The background is filled with numerous small, distant stars and a few larger, fainter celestial bodies. The overall color palette is dominated by deep blues and greys, with some lighter blue highlights on the planet's rings and the satellite's components.

Partie 3

Ateliers expérimentaux

Cette partie du livret présente des ateliers expérimentaux réalisables avec les jeunes en lien avec la thématique Etoiles & Lumière.





Atelier ELAE1 : Préparation d'une observation

Objectifs :

Atelier ELAE1

Préparation d'une observation

Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt		Télescope	1
Etab		Logiciel Stellarium	1
Etab		Connexion internet	1
Etab		Vidéoprojecteur	1
Etab		Tableau	1

*Le matériel se trouve dans la malle fournie par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour même.

Séquence 1

La luminosité et les magnitudes

Objectif :

- Comprendre la notion d'échelle de magnitude et la différence entre magnitude apparente, magnitude absolue, flux lumineux et luminosité.

Durée : 30 min

Etape 1 : La luminosité apparente

On utilise Stellarium pour reproduire l'expérience historique des grandeurs de luminosités. Pour cela, on a besoin de plusieurs ordinateurs avec Stellarium installé.

Chaque groupe de 3 à 4 élèves choisit une constellation et l'affiche en l'agrandissant pour qu'elle couvre tout le champ de vision. On met le curseur de pollution lumineuse à 9. On compte les étoiles visibles, et on dit qu'elles ont une grandeur de 1. On baisse le curseur à 8, et on compte les étoiles qui apparaissent. Elles sont moins lumineuses et sont classées pour une grandeur de 2, et ainsi de suite.

On dessine une carte de la constellation sur une feuille de papier avec les indications de grandeurs de luminosités.

On explique qu'aujourd'hui on a une échelle de mesure plus précise et que ces luminosités apparentes s'appellent des magnitudes apparentes. Véga est la référence avec une magnitude apparente de 0. Les étoiles les plus brillantes sont classées en négatif, jusqu'à -1 pour Sirius.

On demande aux élèves de comparer les grandeurs qu'ils ont attribuées aux étoiles de leur constellation aux magnitudes que leur donne le logiciel.

Etape 2 : Formalisation

On explique que la magnitude apparente est une comparaison de la quantité de lumière reçue de deux étoiles différentes. Les magnitudes apparentes sont toutes des comparaisons avec le flux lumineux reçu de Véga, de magnitude apparente 0.

Magnitude apparente d'une étoile

$$m_{\text{étoile}} - m_{\text{Véga}}$$
$$= -2,5 \log_{10} \left(\frac{F_{\text{étoile}}}{F_{\text{Véga}}} \right)$$

$m_{\text{étoile}}$ = magnitude apparente de l'étoile
 $m_{\text{Véga}}$ = magnitude apparente de Véga = 0
 $F_{\text{étoile}}$ = flux lumineux reçu de l'étoile (W.m^{-2})
 $F_{\text{Véga}}$ = flux lumineux reçu de Véga (W.m^{-2}), que l'on connaît par ailleurs

Il existe aussi une magnitude absolue, qui elle compare la luminosité émise par une étoile à celle émise par le Soleil.

Magnitude absolue d'une étoile

$$M_{\text{étoile}} - M_{\text{Soleil}}$$
$$= -2,5 \log_{10} \left(\frac{L_{\text{étoile}}}{L_{\text{Soleil}}} \right)$$

$M_{\text{étoile}}$ = magnitude absolue de l'étoile
 $M_{\text{Véga}}$ = magnitude absolue du Soleil = 0
 $L_{\text{étoile}}$ = luminosité émise par l'étoile (W)
 $L_{\text{Véga}}$ = luminosité émise par le Soleil (W) que l'on connaît par ailleurs

Tout comme la comparaison de la luminosité émise et du flux lumineux reçu, la comparaison de la magnitude absolue et de la magnitude apparente d'une étoile donne sa distance.

Module de distance

$$m_{\text{étoile}} - M_{\text{étoile}} = 5 \log_{10}(D) - 5$$

$m_{\text{étoile}}$ = magnitude apparente de l'étoile

$M_{\text{étoile}}$ = magnitude absolue de l'étoile

D = distance de l'étoile à l'observateur

Les groupes d'élèves peuvent alors calculer la distance de quelques étoiles avec les informations de magnitudes données par Stellarium.

Séquence 2

Les couleurs en astronomie



Objectif :

- Comprendre comment sont construites les photographies astronomiques.

Durée : 30 min

Etape 1 : Analyse d'images

On distribue des photographies plastifiées de nébuleuses, amas d'étoiles et galaxies aux élèves. On leur demande de décrire et d'interpréter ce qu'ils voient. Puis l'animateur les guide dans leur raisonnement pour comprendre les images : structure en 3D, couleurs, densités, nature des objets. Enfin, il introduit les notions de couleurs naturelles et couleurs artificielles.

Etape 2 : C'est quoi, la couleur, en astronomie ?

L'animateur va expliquer la succession d'étapes pour obtenir une image en couleurs d'un objet du ciel.

La couleur émise : les spectres

L'animateur distribue des spectres du Soleil imprimés sur transparents aux élèves, pour rappeler que les étoiles sont colorées. Il explique que sous l'action des étoiles, le gaz des nébuleuses peut être ionisé et émettre lui aussi de la lumière colorée et donc avoir un spectre.

Les filtres colorés

L'animateur distribue 3 filtres gélatine rouge, vert, et bleu aux élèves afin qu'ils regardent leur spectre à travers eux, en plaçant le tout en direction des lampes de la pièce. Il demande aux élèves de décrire et d'interpréter le résultat à travers chaque filtre.

Il explique qu'avec tout appareil de photographie, même l'œil (cônes R,V,B), on voit la nature au travers de jeux de filtres colorés, que l'on combine ensuite pour voir l'image en couleurs.

Les temps de pose

On utilise un appareil photo. On prend une photo d'une scène lumineuse de la pièce à travers les trois filtres successivement, en changeant les temps de pose, pour voir ce que cela change une fois l'image colorée reconstituée.

Les canaux de couleur

Une fois les trois images obtenues, on reconstitue l'image finale à l'aide d'un logiciel de graphisme (GIMP est libre). On en profite pour montrer que l'on peut assigner l'image du filtre rouge à la couleur de pixel (canal de couleur) de son choix : pourquoi pas violet ? Cela donne des images étranges, mais rien d'autre que l'objectivité scientifique n'interdit de le faire. En art, toutes les couleurs sont permises, mais en science, il faut faire attention à ne pas altérer l'information.

Les fausses couleurs

L'animateur montre des photographies de nébuleuses en lumière infrarouge ou ultraviolette pour montrer que dans le cas de lumière invisible par l'œil humain, on est obligé d'assigner les images issues des filtres dans des canaux de couleurs artificielles. Il faut juste, pour ne pas altérer l'information scientifique, bien expliquer dans la légende de l'image à quoi correspond chaque couleur.

Conclusion

Quand on regarde une photographie ou un schéma, en astronomie ou dans d'autres domaines, il faut toujours lire ou demander l'explication des couleurs utilisées afin de pouvoir la comprendre et l'interpréter sans se tromper. Les « vraies couleurs » n'existent pas : la couleur d'une photographie dépend de l'instrument utilisé et de l'information que l'on a voulu faire ressortir.

Séquence 3

Choisir un objet



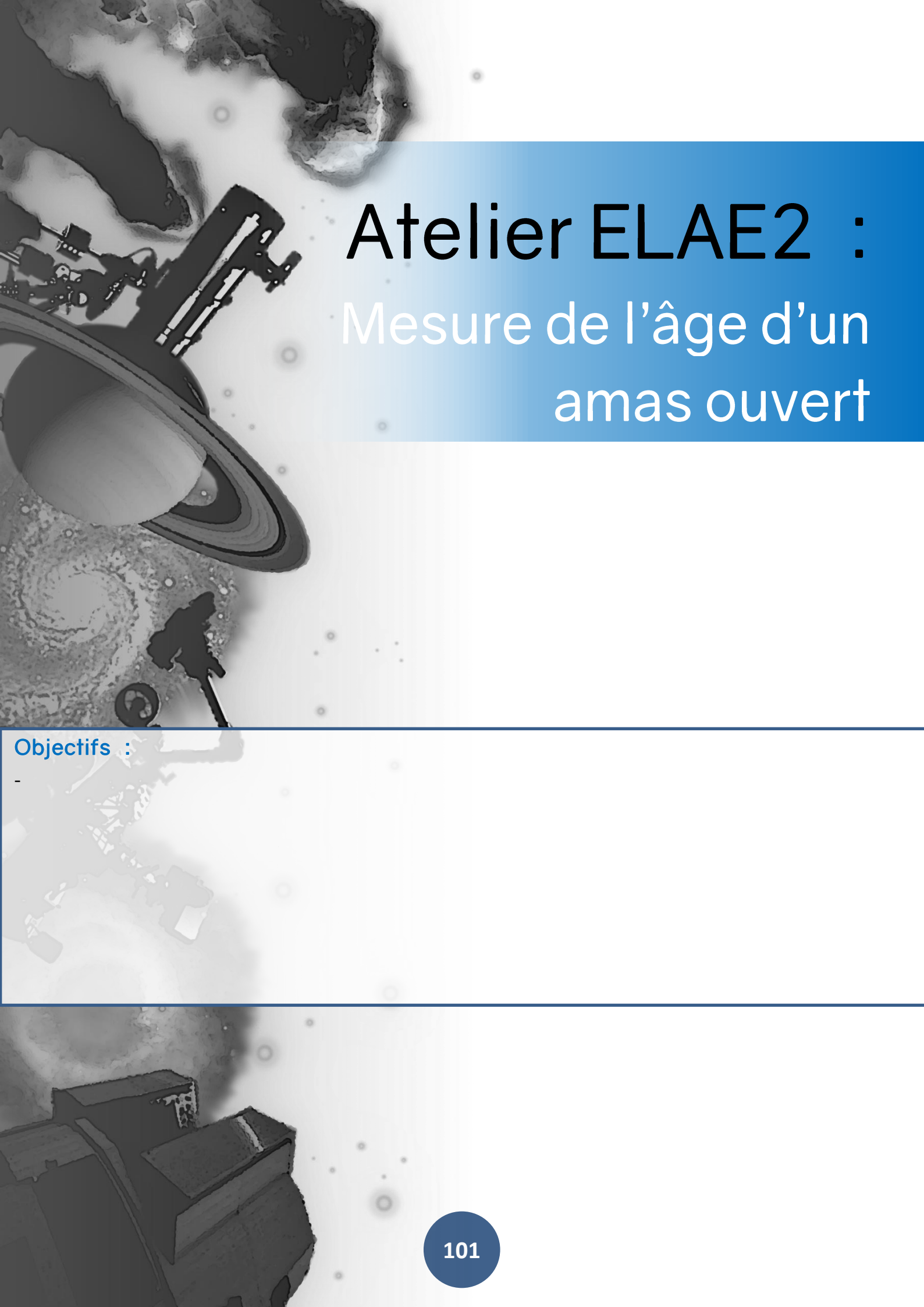
Objectif :

- Comprendre comment fonctionnent les coordonnées astronomiques et les éphémérides

Durée : 15 min

En cours de rédaction.





Atelier ELAE2 :

Mesure de l'âge d'un amas ouvert

Objectifs :

Atelier ELAE2

Mesure de l'âge d'un amas ouvert

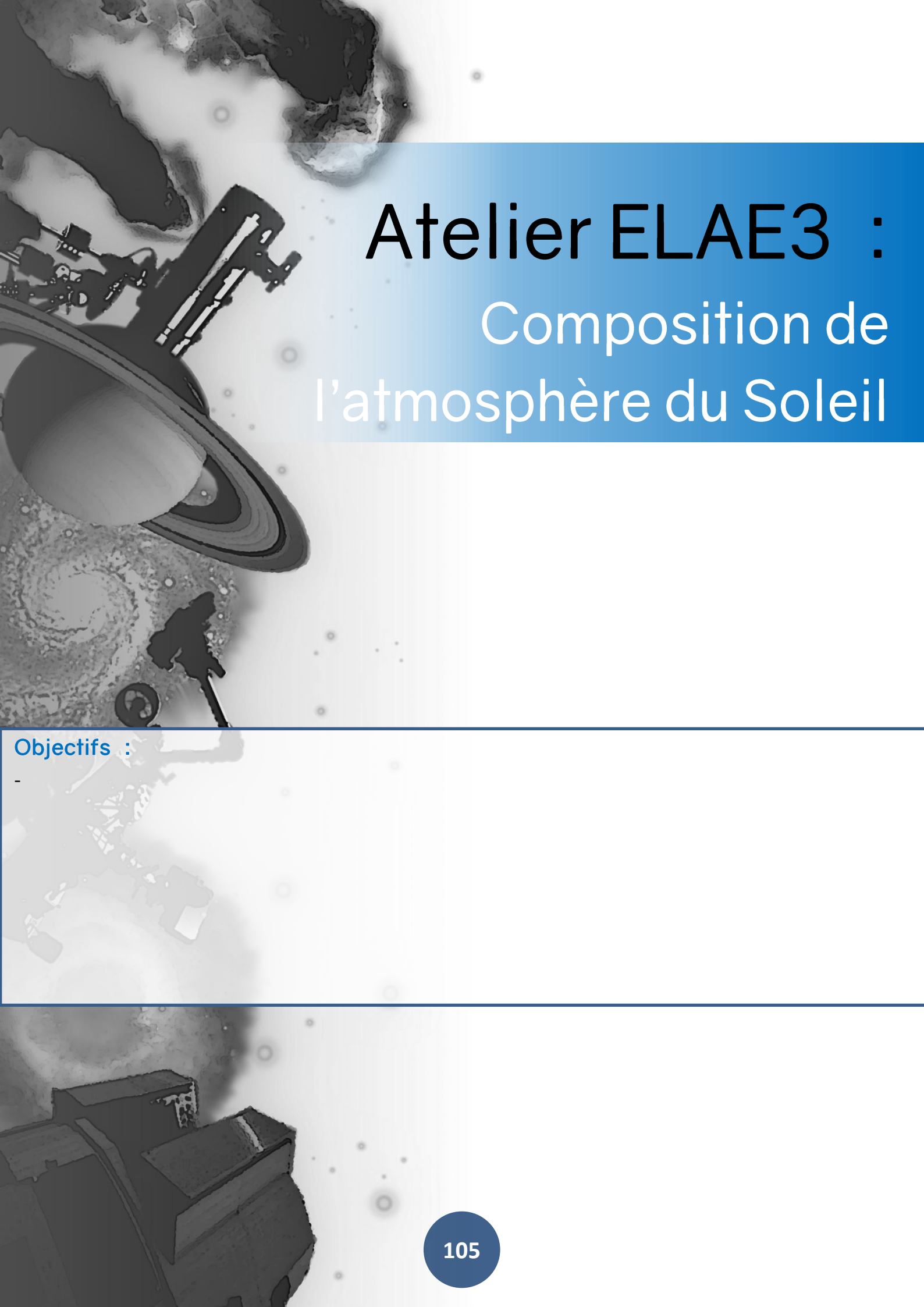
Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt		Télescope	1
Etab		Logiciel Stellarium	1
Etab		Connexion internet	1
Etab		Vidéoprojecteur	1
Etab		Tableau	1

*Le matériel se trouve dans la malle fournie par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour même.

En cours de rédaction.





Atelier ELAE3 :

Composition de l'atmosphère du Soleil

Objectifs :

Atelier ELAE3

Composition de l'atmosphère du Soleil

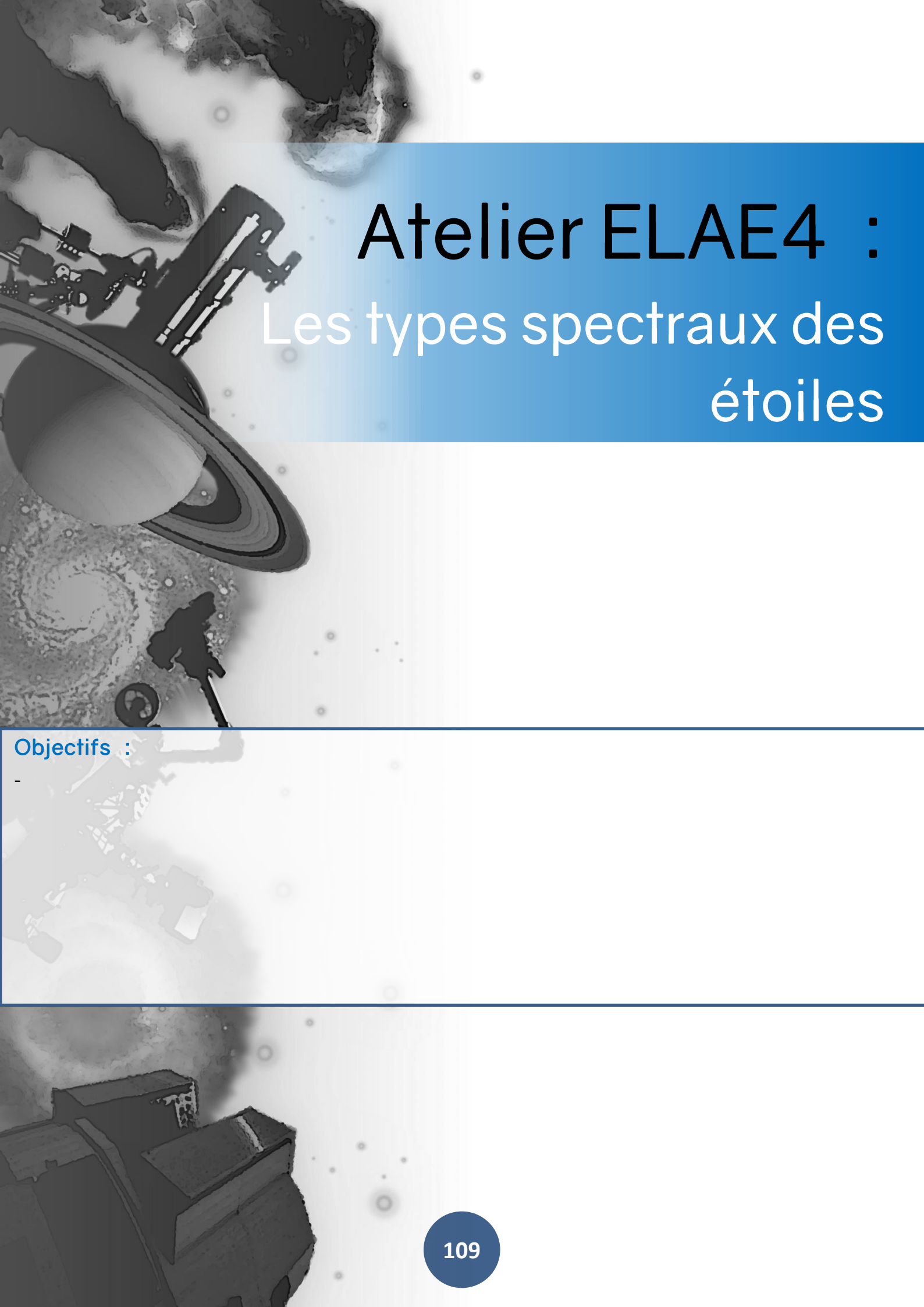
Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt		Télescope	1
Etab		Logiciel Stellarium	1
Etab		Connexion internet	1
Etab		Vidéoprojecteur	1
Etab		Tableau	1

*Le matériel se trouve dans la malle fournie par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour même.

En cours de rédaction.



A cosmic-themed background featuring a grayscale image of Saturn with its rings on the left, and a telescope pointing towards the upper left. The background is filled with a field of stars of varying brightness.

Atelier ELAE4 :

Les types spectraux des étoiles

Objectifs :

Atelier ELAE4

Les types spectraux des étoiles

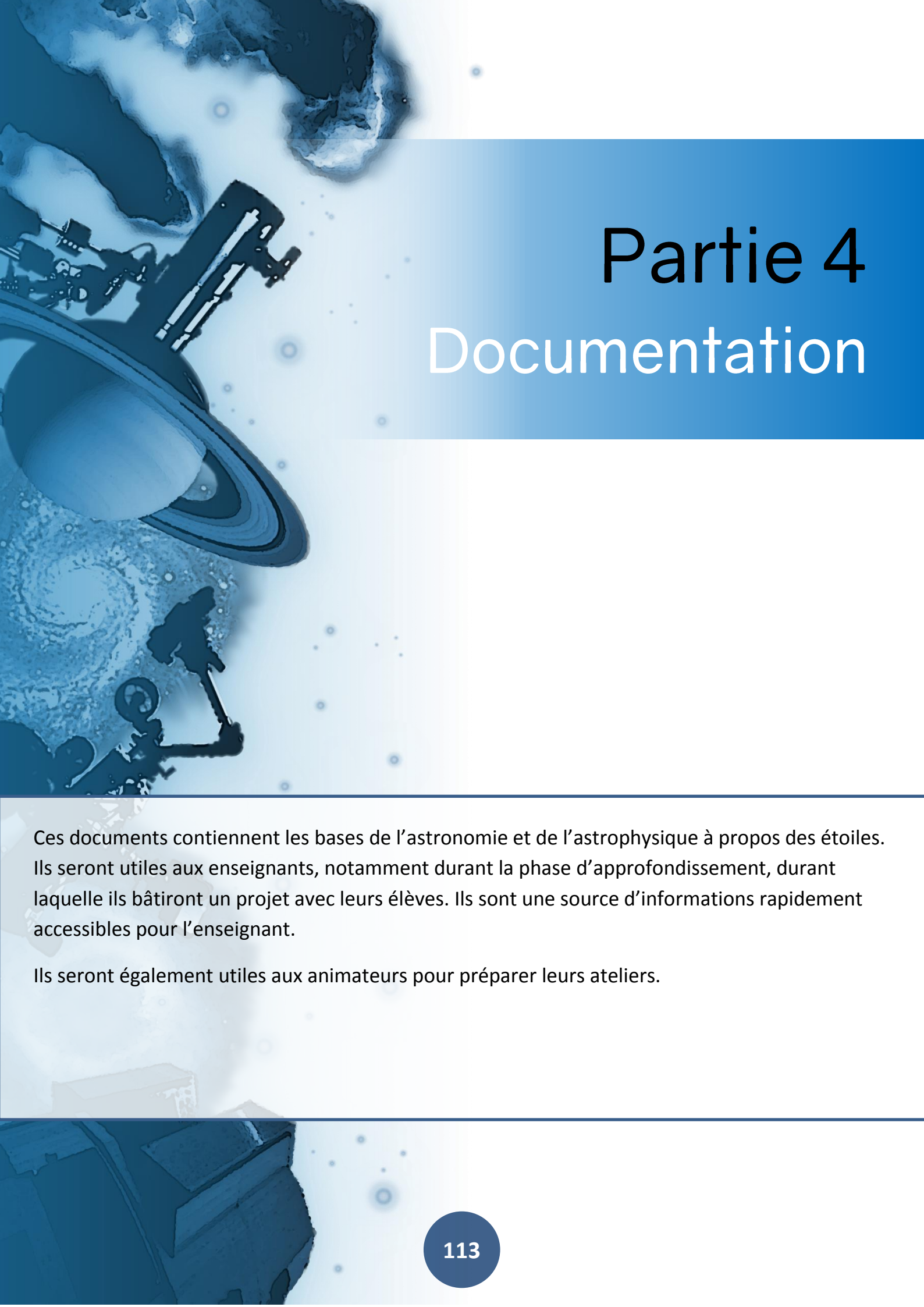
Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt		Télescope	1
Etab		Logiciel Stellarium	1
Etab		Connexion internet	1
Etab		Vidéoprojecteur	1
Etab		Tableau	1

*Le matériel se trouve dans la malle fournie par Planète Sciences, sauf les instruments techniques qui sont fournis le jour même.

En cours de rédaction.





Partie 4

Documentation

Ces documents contiennent les bases de l'astronomie et de l'astrophysique à propos des étoiles. Ils seront utiles aux enseignants, notamment durant la phase d'approfondissement, durant laquelle ils bâtiront un projet avec leurs élèves. Ils sont une source d'informations rapidement accessibles pour l'enseignant.

Ils seront également utiles aux animateurs pour préparer leurs ateliers.





Document EL1 :

Observer le Soleil en toute sécurité

L'observation du Soleil est l'activité la plus dangereuse en astronomie. Les risques étant très importants, il convient de respecter scrupuleusement les règles de sécurité, qui se complexifient en présence du public. Ce document a pour but de vous permettre de connaître les dangers encourus et les règles de sécurité à suivre afin qu'aucun accident ne survienne. Vous pourrez ainsi mener votre observation et votre animation en toute sérénité.

Document EL1

Observer le Soleil en toute sécurité



I. Les différentes méthodes d'observation

1) L'observation directe

a) Le filtre de pleine ouverture

Un filtre de pleine ouverture en Mylar ou en Astrosolar est placé à l'entrée du télescope. Ces matériaux apparaissent à l'œil comme un miroir : ils ne laissent passer qu'une infime partie du rayonnement solaire, tant en longueurs d'onde qu'en intensité.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de regarder à l'oculaire les taches solaires potentiellement présentes à la surface du Soleil.



Figure 16 : Filtre de pleine ouverture

Les dangers de cette méthode :

Un télescope est un concentrateur de lumière. Il est déjà dangereux de regarder le Soleil plus de quelques secondes à l'œil nu, même à l'horizon. Une observation de plus de quelques secondes brûle irrémédiablement la rétine et provoque une cécité partielle ou totale. A travers un télescope, les effets sont multipliés. Les dommages pour l'œil sont instantanés.

C'est pourquoi vous devez toujours vérifier :

- **La qualité de votre filtre de pleine ouverture**

Placez le filtre à bout de bras en face du Soleil ou d'une lampe puissante type halogène. Si vous voyez de petits points lumineux, ce sont des trous. Si tel est le cas, votre filtre est devenu dangereux, et vous devez en changer. Ces petits trous laissent passer une lumière suffisante pour que le télescope la concentre au-dessus du seuil de danger.

- **Le bon positionnement et la stabilité du filtre sur le télescope**

Assurez-vous que le filtre ne tombera pas au cours de l'observation. Vous pouvez pour cela le fixer à l'aide d'un ou deux tours de scotch gaffeur.

Important

Il existe des filtres qui se fixent sur l'oculaire. Ceux-ci sont à proscrire. La lumière est concentrée dessus par le télescope : ils peuvent fondre. La moindre malfaçon peut être fatale pour les yeux.

b) Le PST

Il existe un instrument d'observation directe du Soleil, le PST, dans lequel des filtres de pleine ouverture sont fixés à la fabrication et ne peuvent plus bouger. C'est donc une méthode très sûre pour observer directement le Soleil.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de regarder à l'oculaire les taches solaires potentiellement présentes à la surface du Soleil. Elle permet également de voir la granularité de la surface du Soleil, et les éruptions solaires (ou protubérances) sur son limbe.



Figure 17 : Le P.S.T. de Coronado

Les dangers de cette méthode :

Si les pièces optiques sont désaxées, le danger de la lumière solaire est le même que pour la méthode de filtre de pleine ouverture. Normalement, les PST sont bien conçus et cela ne peut arriver.

C'est pourquoi vous devez toujours :

- Vous assurer du bon fonctionnement de votre PST auprès d'un spécialiste.

c) Les lunettes éclipse

Vous pouvez également utiliser des lunettes « éclipse » non périmées et ne présentant pas de petits trous, pour une observation sans instrument.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de voir le disque solaire et de grosses taches solaires.

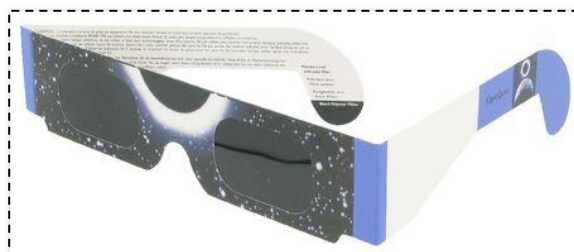


Figure 18 : Lunettes éclipse.

Les dangers de cette méthode :

Avec cette méthode, vous regardez le Soleil directement en levant les yeux, certes protégés par les lunettes.

C'est pourquoi vous devez toujours :

- vous assurer que vos lunettes ne sont pas périmées
- vous assurer qu'elles ne comportent pas de trous (comme pour le filtre de pleine ouverture)
- espacer vos phases d'observation, et de limiter celles-ci à quelques secondes
- ne pas lever la tête ou les yeux vers le Soleil avant d'avoir chaussé vos lunettes
- ne pas retirer les lunettes avant d'avoir baissé la tête ou les yeux du Soleil.

Important

Ne jamais utiliser de lunettes de soleil, même plusieurs paires superposées ! La

protection n'est absolument pas suffisante.

2) L'observation indirecte

Il existe plusieurs méthodes d'observation indirecte. Ce sont aussi les plus sûres.

a) La projection solaire

Placé à une distance suffisante de l'oculaire du télescope, un grand panneau gris peut servir d'écran de projection solaire. Trop près, il brûle. Pour cette méthode, vous ne devez pas utiliser de filtre solaire. Vous n'auriez pas assez de luminosité sur votre écran. En effet, selon l'oculaire utilisé, vous devrez placer l'écran à une distance plus ou moins grande afin d'avoir une image de taille suffisante. Plus vous reculez l'écran, plus la lumière fournie par le télescope se trouve répartie sur une grande surface. A vous de jauger cette distance. Dans le pire des cas, si votre écran est trop près de l'oculaire, il y aura un peu de fumée, mais vous aurez le temps de réagir.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de montrer le disque solaire et les taches solaires potentiellement présentes à sa surface à plusieurs personnes simultanément, et de manière beaucoup plus sûre que l'observation directe.

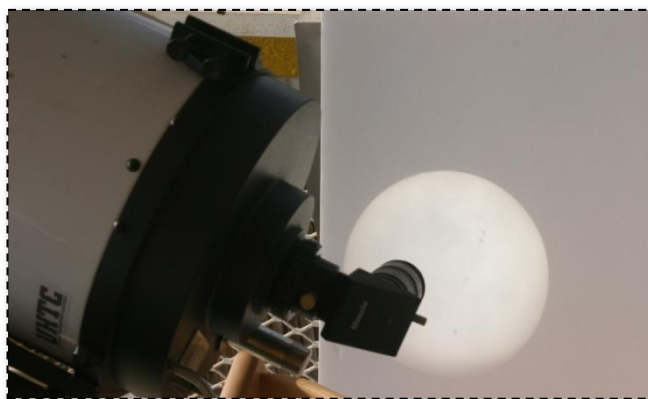


Figure 19 : Projection solaire

Les dangers de cette méthode :

Avec cette méthode, aucun filtre ne vient réduire la luminosité du Soleil. Le trajet des rayons lumineux à la sortie de l'oculaire est dangereux.

C'est pourquoi vous devez toujours :

- vous assurer que personne ne s'approche de l'oculaire.
- vous assurer que personne ne regarde dans la direction du télescope de façon trop rapprochée de la trajectoire du faisceau lumineux.

b) La webcam

Une fois un filtre de pleine ouverture positionné à l'entrée du télescope, il est possible d'adapter une webcam à la place de l'oculaire. Il existe des adaptateurs webcam/porte-oculaire, pour notamment les webcams Toucam pro de Phillips.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de montrer le disque solaire et les taches solaires potentiellement présentes à sa surface à plusieurs personnes simultanément, et de manière beaucoup plus sûre que l'observation directe.



Figure 20 : Toucam Pro et son adaptateur

Les dangers de cette méthode :

Avec cette méthode, vous devez prendre en compte les dangers du filtre de pleine ouverture.

C'est pourquoi vous devez toujours :

- vous assurer que personne ne s'approche de l'oculaire.
- vous assurer que personne ne regarde dans la direction du télescope de façon trop rapprochée de la trajectoire du faisceau lumineux.
- vous assurer que le filtre est en bon état
- vous assurer que le filtre est stable

c) Le Solarscope

Même principe que la projection solaire, mais cette fois, c'est un petit système tout prêt, en carton, qui est utilisé. Vous pourrez le trouver dans n'importe quel magasin d'astronomie.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de montrer le disque solaire et les taches solaires potentiellement présentes à sa surface à plusieurs personnes simultanément, et de manière beaucoup plus sûre que l'observation directe.



Figure 21 : Le Solarscope

Cependant, avec le Solarscope, le nombre de spectateurs est restreint, compte-tenu de la petitesse de l'écran et de l'image.

Les dangers de cette méthode :

Aucun danger connu.

d) Le Sténopé

Même principe que la projection solaire, mais cette fois, l'instrument est extrêmement simple. Percez un trou d'aiguille dans une des faces d'un grand carton dont vous avez retiré le couvercle.

Placé face au Soleil, ce petit trou jouera le rôle d'une lentille et fera converger les rayons lumineux. Après le point focal, l'endroit où les rayons se croisent, vous pourrez former une image sur un écran.

Utilisez le couvercle que vous aviez retiré en guise d'écran. Déplacez-le le long de l'axe optique de votre instrument afin d'avoir une image du Soleil de la dimension souhaitée. Cependant, sachez que la luminosité obtenue est diluée sur la surface de l'image. Par conséquent plus l'image est grande, moins elle est intense.

Plusieurs configurations sont possibles pour faire des sténopés, du moment que vous préparez les trois éléments suivants : un petit trou, une chambre sombre et un écran.

Ce que permet cette méthode :

Cette méthode permet de montrer le disque solaire et les taches solaires potentiellement présentes à sa surface à plusieurs personnes simultanément, et de manière beaucoup plus sûre que l'observation directe. Cependant, en l'absence d'un collecteur de lumière (télescope ou lunette), vous verrez une image beaucoup moins lumineuse.

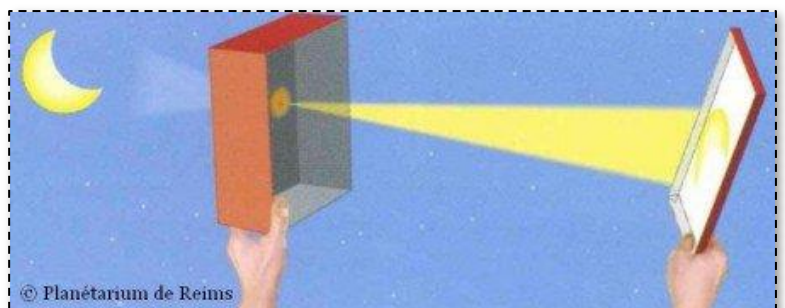


Figure 22 : La technique du sténopé

Les dangers de cette méthode :

Aucun danger connu.

3) Méthode semi-directe : la coronagraphie

La coronagraphie consiste à masquer le disque solaire pour voir sa couronne et les protubérances le long du limbe solaire. A l'intérieur de cet instrument se trouve un disque opaque positionné pour venir masquer exactement le disque solaire. Certains instruments possèdent en plus des filtres pour atténuer la lumière ou faire ressortir certains détails. Cette méthode est donc sans danger. Le résultat visuel est similaire à la totalité d'une éclipse naturelle de Soleil, lors de laquelle la Lune joue le rôle du disque occulteur.

Ce que permet cette méthode :

La baisse de luminosité par le disque occulteur provoque une baisse du contraste, qui permet de voir la couronne solaire, ces vents de particules chauffées qui nimbent le Soleil, et qui en temps normal, est beaucoup moins lumineuse que le reste du Soleil. Le coronographe permet aussi de voir des éruptions solaires le long du limbe du Soleil.

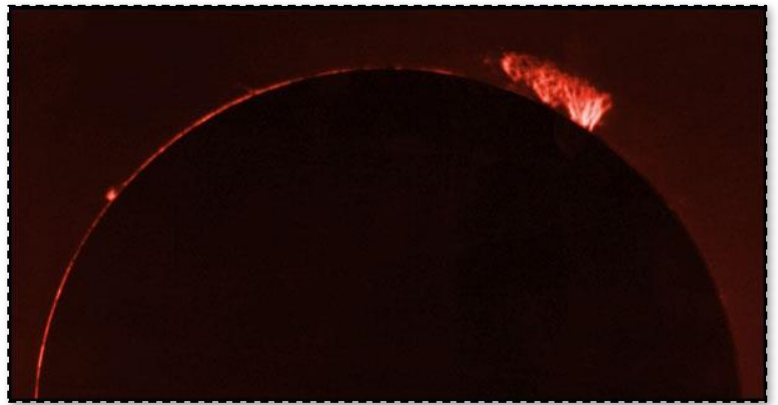


Figure 23 : Photographie obtenue par coronagraphie

Si le disque occulteur est désaxé, le danger de la lumière solaire est le même que pour les méthodes d'observation directes. Normalement, comme les PST, les coronographes sont bien conçus et cela ne peut arriver.

C'est pourquoi vous devez toujours :

- Vous assurer du bon fonctionnement de votre coronographe auprès d'un spécialiste.

Alors, comme regarder directement le Soleil est une activité à proscrire, comment fait-on pour pointer son instrument dessus, nous direz-vous ? On utilise alors une méthode de pointage indirecte. Il en existe trois.

1) La méthode des ombres

Nulle magie noire là-dedans, il suffit d'utiliser l'ombre projetée de l'instrument pour savoir s'il est dirigé vers le Soleil. Un télescope ou une lunette sont des instruments cylindriques. Outre les ombres complexes du trépied et de la monture, vous allez trouver au sol l'ombre ellipsoïde du tube de l'instrument. Or l'ombre d'un tube pointé vers le Soleil est un cercle.

Tout votre travail va donc consister à manœuvrer votre instrument en regardant non pas le ciel, mais le sol. Scrutez l'ombre du tube au sol. Lorsque vous voyez une ombre circulaire, vous êtes sur le Soleil.

Le Soleil a un grand diamètre apparent dans le ciel, et la diffusion de sa lumière par l'atmosphère terrestre provoque un halo lumineux autour de lui. Il est donc possible que le Soleil ne soit pas exactement dans l'axe du télescope après cette opération. Cependant, vous pourrez ajuster cela en regardant votre écran de projection et en utilisant les mouvements lents de votre monture. Dans le cas de l'observation directe, vous pourrez ajuster à l'oculaire, **à condition de vous être assuré que l'instrument est prêt et sans danger !**

2) La méthode des coordonnées

A l'aide d'un logiciel de cartographie du ciel incluant les éphémérides solaires, récupérez les coordonnées du Soleil (ascension droite et déclinaison pour un instrument sur monture équatoriale) pour le lieu, la date et l'heure d'observation. Toujours sans regarder le ciel, appliquez ces données à votre monture, si elle le permet. En général, les cercles de coordonnées sont apposés autour des axes de rotation des montures équatoriales. Une fois cette opération effectuée, l'instrument est dirigé vers le Soleil.

Vous pourrez ajuster l'alignement de l'instrument avec le Soleil de la même façon qu'avec la méthode des ombres, **en respectant les règles de sécurité concernant le Soleil.**

Important

Si vous utilisez un Dobson, vous ne pourrez pas appliquer cette méthode, à moins que sa monture n'indique des cercles de coordonnées d'azimut et d'altitude (un autre système de coordonnées). Vous pouvez également trouver ces coordonnées pour le Soleil dans votre logiciel.

3) La méthode Go To

Certains instruments peuvent suivre la méthode des coordonnées automatiquement. Ce sont les systèmes Go To. Suivez le manuel de votre instrument **en respectant les règles de sécurité concernant le Soleil**.

II. Comment encadrer une observation ?

1) Prévenir le danger

Il est nécessaire avant toute observation du Soleil d'expliquer et de montrer le danger à votre groupe, qu'il soit constitué d'enfants, de jeunes ou d'adultes.

Par l'évolution, les animaux ont une répulsion naturelle à l'observation du Soleil. En l'absence d'intention délibérée, nos yeux évitent automatiquement de regarder le Soleil, c'est un réflexe. Votre chien ne regardera jamais le Soleil. Il est génétiquement programmé pour agir ainsi, à moins de le forcer à le faire. Pour l'être humain, les choses sont un peu différentes : il peut, s'il y pense délibérément, se mettre à regarder le Soleil.

Comme vous proposez à votre groupe de participer à une observation du Soleil, ces personnes vont très certainement passer outre leur réflexes naturels et vouloir essayer. C'est pourquoi il faut être très strict et très convainquant concernant les dangers et les règles de sécurité, et ce, dès le début de la séance.

a) L'explication

Il s'agit d'expliquer deux choses :

- L'effet d'une trop forte luminosité sur la rétine, la cécité partielle ou totale conséquence d'une brûlure de la rétine. Dire que le Soleil est une source de

lumière bien trop puissante pour nos rétines, même à l'œil nu, et qu'il faut à tout prix éviter de le regarder directement, même à travers des nuages ou à l'horizon. Il faut également éviter de regarder des reflets du Soleil sur des surfaces métalliques, qui sont presque aussi brillantes que la lumière directe du Soleil. Enfin, la réverbération du Soleil sur des surfaces blanches est dangereuse à long termes pour les yeux (cataracte, etc ...)

- Un instrument d'observation astronomique, par construction, collecte et concentre la lumière, à la manière d'une loupe, en plus puissant. Comme on le sait, on peut faire du feu avec une loupe.

b) La démonstration

Le plus simple encore est de montrer ce danger. Pour cela, vous disposez de trois méthodes simples et sans appel :

- La feuille de papier : pointez votre télescope sur le Soleil, et placez une feuille de papier à quelques centimètres de l'oculaire. Elle brûle instantanément.
- Le thermomètre : pointez votre télescope sur le Soleil, et placez un thermomètre devant l'oculaire. Il passe en 2 ou 3 secondes de la température ambiante à son maximum.
- Le chocolat : pointez votre télescope sur le Soleil, et placez des carrés de chocolat dans une coupelle devant l'oculaire. Ils fondent instantanément.

c) Enoncer les règles de sécurité

- Toujours respecter les instructions de l'animateur : il ne cherche qu'à protéger vos yeux
- Ne pas toucher à l'instrument sans sa permission
- Ne pas porter l'œil à l'oculaire sans la permission de l'animateur
- Ne pas traverser l'axe optique du télescope à la sortie de l'oculaire (tracez-le à la main)
- Lorsque le télescope est pointé sur le Soleil, sans filtre, ne pas regarder en direction de l'oculaire
- Ne pas regarder le Soleil directement

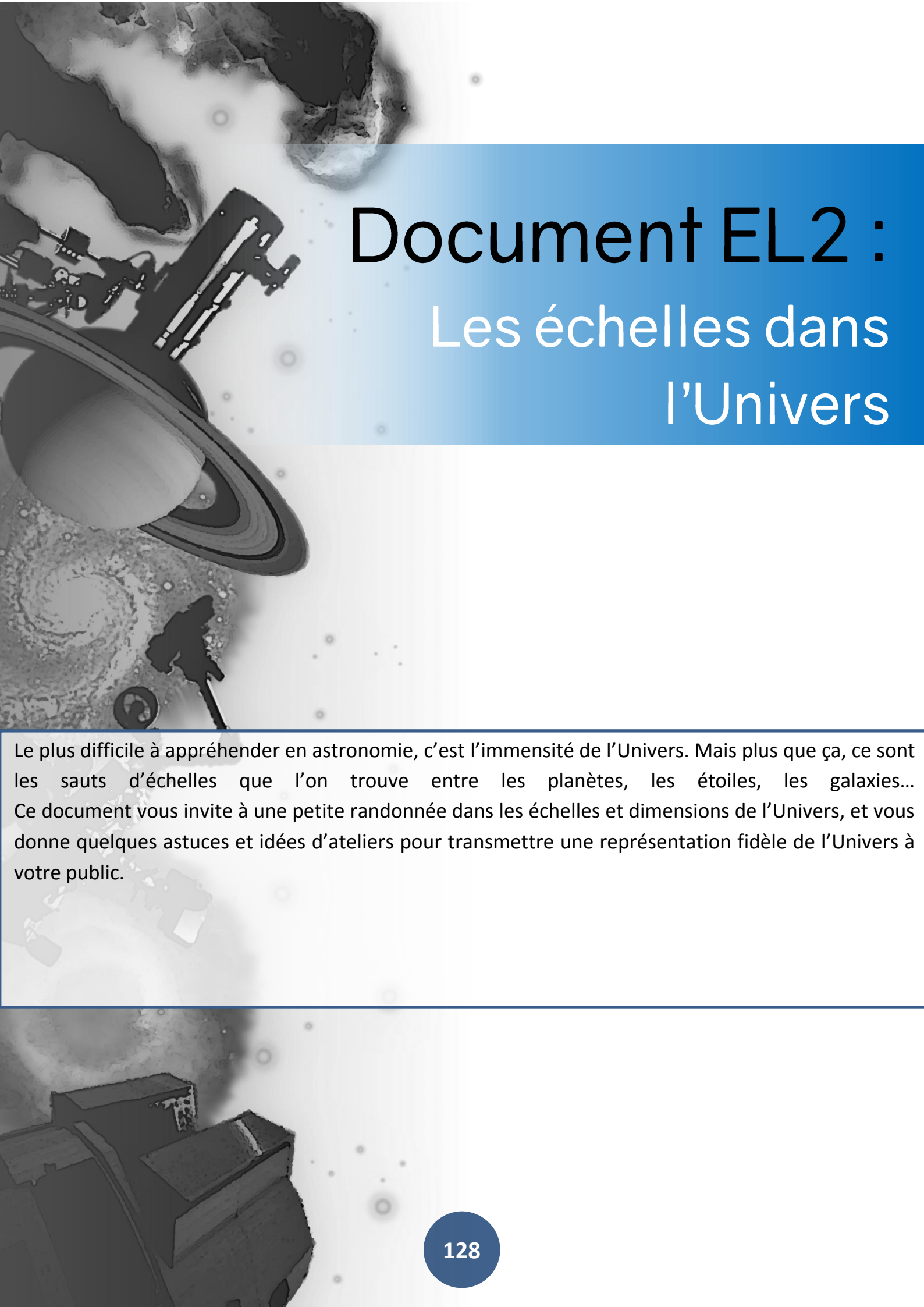
2) Assurer la sécurité des personnes

- Vous devez vous assurer en début d'atelier que ces dangers et ces règles de sécurité sont bien compris.
- A tout moment, veillez à avoir tous les participants dans votre champ de vision.
- Ne tournez pas le dos à votre télescope : une personne pourrait passer dans votre dos (si, si, ça arrive !).
- Veillez à ce que les personnes fassent la queue lors d'observations à l'oculaire.
- En cas de projection solaire, veillez à avoir une image suffisamment grande et bien visible, afin d'éviter que des personnes prennent le risque de trop s'approcher.
- A tout moment, assurez-vous que tous les chercheurs de votre télescope sont obturés notamment pendant le pointage.
- A tout moment, assurez-vous que le faisceau lumineux issu de l'oculaire rencontre soit un cache, soit un écran, et que personne ne peut s'interposer pendant que vous manipulez l'instrument. Faites attention à cela notamment pendant le pointage.
- Quand la vision de l'image du Soleil n'est plus nécessaire, dépointez votre télescope.
- Quand vous devez faire une action qui nécessite de quitter le télescope ou le public des yeux, dépointez votre télescope.
- Limitez-vous à 6 à 8 personnes autour de votre instrument.

3) Assurer la sécurité du matériel

Un télescope pointé sur le Soleil fonctionne comme un four. On utilise d'ailleurs des champs de miroirs convergents pour faire fondre des matériaux, cela s'appelle un four solaire. Par conséquent, votre télescope va chauffer très rapidement. Certaines pièces optiques contiennent du plastique et peuvent fondre. Il se peut alors que du plastique fondu s'incruste dans les lentilles, ou que des fixations en plastique fondent. Il est alors recommandé de ne pas laisser le télescope pointé trop longtemps sur le Soleil. Quand un temps dans votre atelier ne nécessite pas d'avoir l'image du Soleil, dépointez votre télescope.



A cosmic-themed background featuring a grayscale image of Saturn with its rings on the left, a telescope in the upper left, and a dark, rocky celestial body in the top left corner. The right side of the page has a blue gradient overlay where the title is located.

Document EL2 :

Les échelles dans l'Univers

Le plus difficile à appréhender en astronomie, c'est l'immensité de l'Univers. Mais plus que ça, ce sont les sauts d'échelles que l'on trouve entre les planètes, les étoiles, les galaxies... Ce document vous invite à une petite randonnée dans les échelles et dimensions de l'Univers, et vous donne quelques astuces et idées d'ateliers pour transmettre une représentation fidèle de l'Univers à votre public.

Document EL2

Les échelles dans l'Univers



I. L'Univers à échelle humaine

Si on se fie à notre perception visuelle du monde, en tant qu'être humain vivant sur Terre, on a l'impression en levant la tête de voir un papier peint en mouvement, noir et parsemé de petits points lumineux la nuit, bleu, lumineux et habité par un disque aveuglant le jour. Il est très difficile, sans une initiation, d'appréhender la 3D du



Figure 24 : Le ciel nocturne ©Théo Nguyen

Ce sont ses gigantesques dimensions qui annulent toute perspective et donne au monde extraterrestre cet aspect 2D. C'est bien d'ailleurs à cause de ce phénomène que les savants et astronomes ont mis tant de siècles à construire une représentation fidèle de l'Univers : il a fallu concevoir des expériences scientifiques pour révéler ce que nos yeux ne pouvaient voir.

Il en va de même pour ce qui se passe sous nos pieds, et dans la matière elle-même. Il a fallu attendre l'arrivée des loupes, puis des microscopes, puis des accélérateurs de particules et d'autres techniques pour comprendre que la matière, ayant une structure indiscernable pour nos yeux, est en fait constituée d'un grand nombre d'entités réparties sur d'infinies échelles, depuis les cellules vivantes jusqu'aux quarks et gluons. L'Univers, c'est tout cela : une infinité d'échelles, d'inconcevables bonds de dimensions reliant des environnements très différents, peuplés d'entités très différentes.

1) L'être humain comme référence

Prenons donc la taille de l'être humain comme point de départ. Disons que la moyenne est de 1m50. L'être humain a une taille « de l'ordre de » 1 m. On peut mesurer les humains efficacement en utilisant des règles d'un mètre de long. L'être humain a une taille plus proche de 1 m, à peu près, que de 10 m ou 1 mm. On appelle cela **un ordre de grandeur**.

2) Exploration rapide de l'infiniment petit

Un chat. Vit-il dans le même monde que nous ? Un chat, c'est à peu près 10 fois plus petit qu'un être humain. Un chat, ça mesure dans les 30 cm de haut. Disons donc que l'ordre de grandeur de taille d'un chat, c'est 10 cm, ou 10^{-1} m (il mesure quelques décimètres). On dit qu'un chat est d'un ordre de grandeur de moins que l'être humain.

Prenons une araignée. On peut dire que sa taille est de l'ordre du 1cm, ou deux ordres de grandeur de moins que l'être humain (elle mesure quelques cm). Une araignée est en moyenne 100 fois plus petite qu'un être humain. Quand on passe à la fourmi, on tombe déjà au facteur 1000. C'est le propre des échelles, et des dimensions de l'Univers, cela va très vite. Un pou est 10 fois plus petit qu'une fourmi, soit 4 ordres de grandeur de moins que l'être humain. Et à cette échelle, le monde est bien différent de celui dans lequel nous vivons, avec ces forêts de cheveux géants et ses araignées titanesques. 10^{-4} m ou 100µm, c'est aussi l'épaisseur type d'un cheveu.

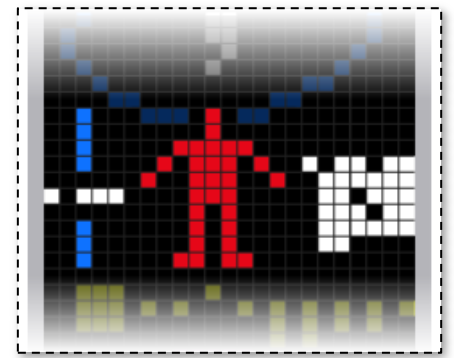


Figure 25 : Partie du message d'Arecibo transmis en 1974.



Figure 26 : Le chat, presque un ordre de grandeur de taille de moins que l'humain.

II. L'Univers à l'échelle de l'Univers

1) L'infiniment petit

- **10^{-6} m ou 1 µm**, c'est l'ordre de grandeur de taille d'une bactérie, soit 6 ordres de grandeurs de moins que l'être humain.
- **10^{-8} m**, c'est l'ordre de grandeur de taille d'un virus.
- **10^{-9} m ou 1 nm**, c'est l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'une hélice d'ADN.

- 10^{-10}m , ou **1Å (angström)**, c'est l'ordre de grandeur de la taille d'un atome.
- 10^{-14} m , c'est l'ordre de grandeur de la taille du noyau d'un atome.
- 10^{-15} m ou **fm (femtomètre)**, c'est l'ordre de grandeur de la taille du noyau d'un neutron, proton (constituants des noyaux d'atomes) ou électron.

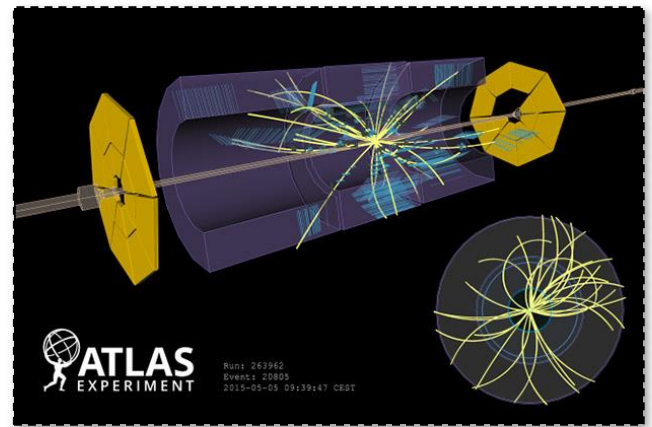


Figure 27 : Collision de particules dans le détecteur ATLAS du Large Hadron Collider du CERN

- 10^{-18} m , c'est l'ordre de grandeur de la taille des quarks, constituants des neutrons et des protons.
- $1,616\ 252 \times 10^{-35}\text{ m}$, c'est la longueur de Planck, au-dessous de laquelle toute la physique devient très très compliquée. C'est une unité de longueur théorique. Aucun instrument actuel ne peut la mesurer directement, et théoriquement aucune amélioration de ceux-ci ne pourra changer cela.

2) L'infiniment grand

Revenons à notre monde à l'échelle humaine. Une maison, un bus, un camion, ce sont des objets de l'ordre de grandeur de taille de **10 m**. Quand on passe à **100 m**, on atteint l'échelle des stades très grands arbres, rues, immeubles, collines. Jusqu'à 2 ordres de grandeur au-dessus de nous, on arrive encore à bien appréhender la taille des choses. On peut d'un seul regard se dire : « cet immeuble fait une centaine de mètre de haut », ou bien « cette colline culmine à 200 m d'altitude, à vue d'oeil ».

Lorsque l'on passe au kilomètre, on n'arrive plus à mesurer à l'œil, mais on peut se le représenter : on a toutes et tous déjà marché sur **1 km**, on connaît l'effort que cela représente. Mais on serait bien incapable de mesurer la hauteur du Mont Blanc d'un coup d'œil, ne la connaissant pas. 1 km, l'ordre de grandeur d'une montagne.... sur Terre. On trouve des montagnes de 20 km sur Mars !



Figure 28 : Le Mont Blanc

- **10^4m , ou 10 km** , l'ordre de grandeur de taille de Paris, Lyon ou Marseille. On ne voit plus ces dimensions-là d'un coup d'oeil, mais on les connaît, pour les avoir parcourues.



Figure 29 : Paris vue de la tour Montparnasse

- **10^5m , ou 100 km** , la taille d'un petit pays. On est ici à 5 ordres de grandeur au-dessus de l'être humain. Il faudrait déjà de l'ordre de 100000 êtres humains se tenant les mains pour relier deux frontières opposées d'un pays comme la Belgique.
- **10^6m , ou 1000 km** , l'ordre de grandeur de taille d'un pays, d'un océan, d'un continent.



Figure 30 : L'Europe



Figure 31 : Notre planète, la Terre

- **Et enfin, 10^7m , ou 10000 km (10 « mégamètres)**, l'ordre de grandeur de taille de notre planète, la Terre. 7 ordres de grandeur au-dessus de nous, c'est notre point de départ pour ce voyage dans l'Univers. 7 ordres de grandeur au-dessus de nous, la

taille de notre monde politique, c'est aussi l'échelle de taille maximum que la plupart d'entre nous appréhende dans notre société actuelle mondialisée. Seuls ceux qui sont un peu initiés à l'astronomie ont l'occasion d'apprendre à appréhender les échelles supérieures.

3) Quittons la Terre

Dans un premier temps, nous allons abandonner le mètre, et utiliser le kilomètre comme unité de référence... parce que notre système solaire est trop grand pour continuer à utiliser le mètre. Sauf peut-être pour les petits astéroïdes, gros rochers tournant autour du Soleil. Les plus petits observables ont une taille de quelques mètres. De même, nos vaisseaux spatiaux, habités ou non, ont des tailles de l'ordre de 1 à 100 m.

Important

Ne pas confondre les mots « Espace » et « Univers ». L'Univers constitue tout ce qui existe. L'espace est le milieu le plus commun dans l'Univers : un volume vide avec quelques particules qui passent (le mot « espace » peut aussi être le volume défini par les 3 dimensions verticale, et horizontales).

4) Les tailles des astres des systèmes planétaires

- **1 km à 10 km**, c'est donc l'ordre de grandeur de taille des gros astéroïdes comme Eros et des comètes comme Churyumov–Gerasimenko, ou des petites lunes de planètes comme Phobos autour de Mars, ou Nix autour de Pluton et Charon.

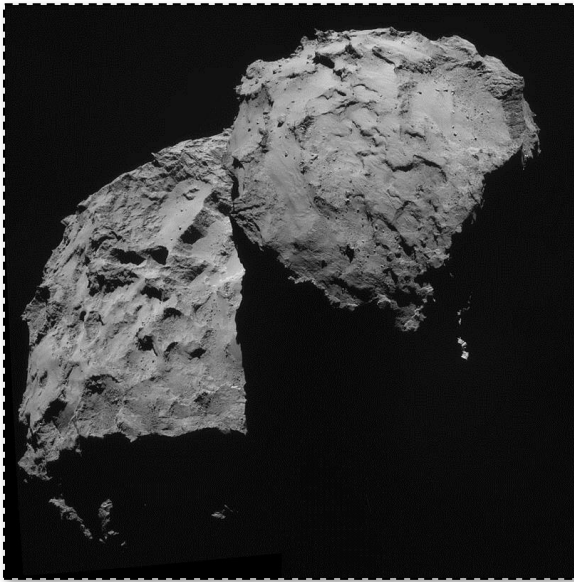


Figure 32 : Comète Churyumov–Gerasimenko par la sonde Rosetta



Figure 33 : Nix, satellite de Pluton, par la sonde New Horizons

- **100 km**, c'est l'ordre de grandeur de taille des très gros astéroïdes, ou des petites lunes de planètes, comme Amalthée, satellite de Jupiter ou Hyperion, satellite de Saturne. Il faut de l'ordre de 100000 êtres humains mains dans la main pour faire le tour d'Hyperion.

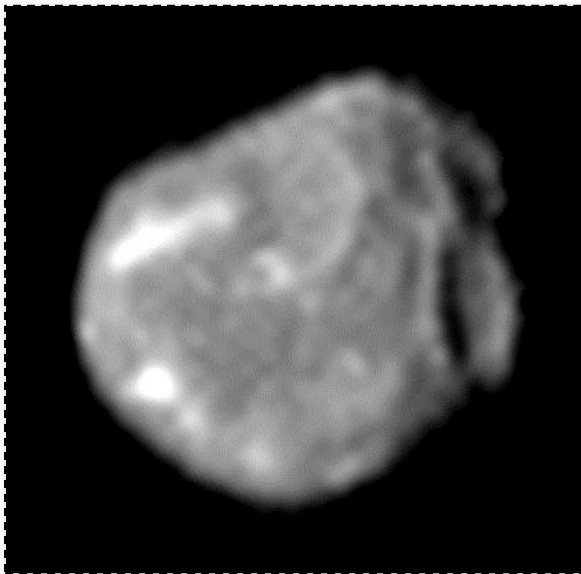


Figure 34 : Amalthée, satellite de Jupiter

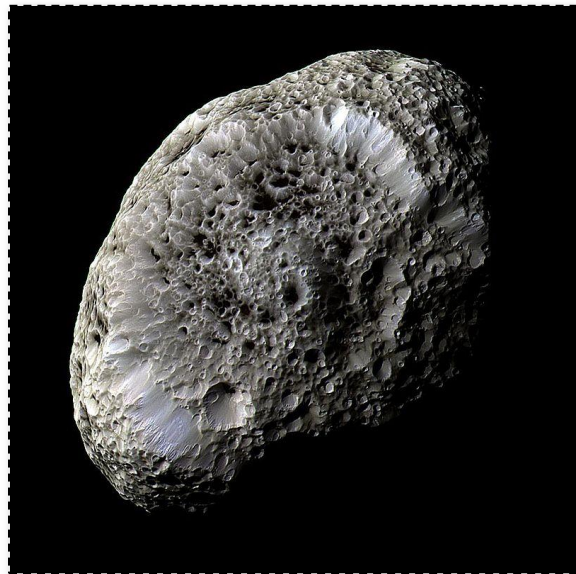


Figure 35 : Hyperion, satellite de Saturne

- **1000 km**, c'est l'ordre de grandeur de taille des planètes naines comme Cérès ou Pluton, et des lunes de planètes comme la Lune, Charon (autour de Pluton), Europa

(autour de Jupiter) ou encore Triton (autour de Neptune). C'est aussi, rappelez-vous, l'échelle de taille des Etats-Unis ou d'un océan terrestre.

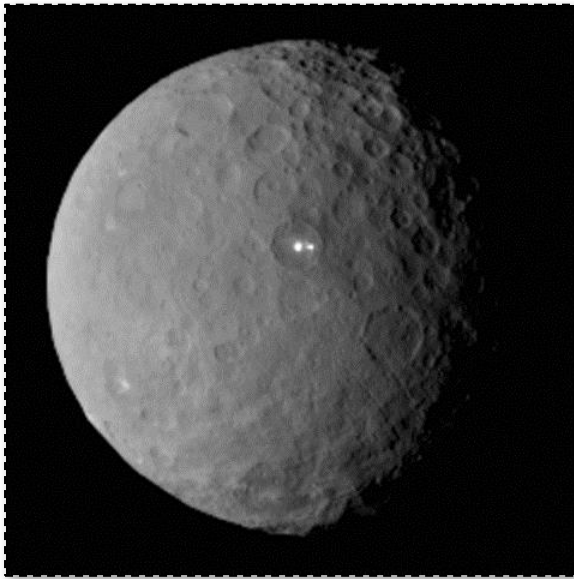


Figure 36 : Cérés, planète naine du système solaire

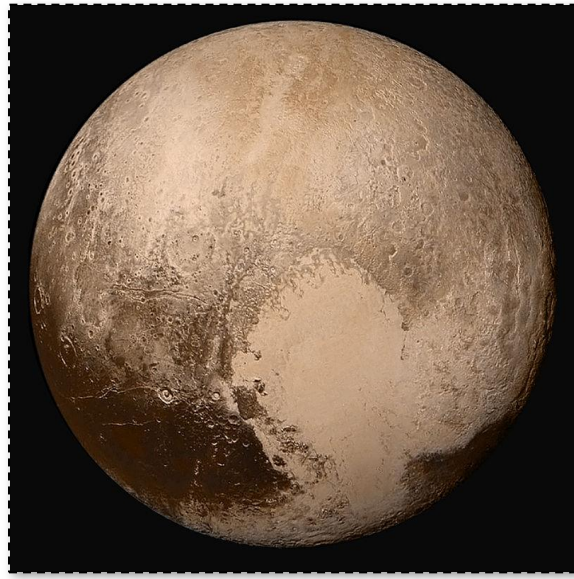


Figure 37 : Pluton, planète naine du système solaire

- **10 000 km**, c'est l'ordre de grandeur de taille des grosses planètes telluriques (faites de roches et/ou de glace), comme la Terre, Vénus, ou les super-Terres, planètes 2 à 5 fois plus grandes que la Terre, découvertes autour d'autres étoiles que le Soleil. Des mondes comme Mars ou Titan (autour de Saturne) se situent entre les échelles 1000 km et 10000 km.

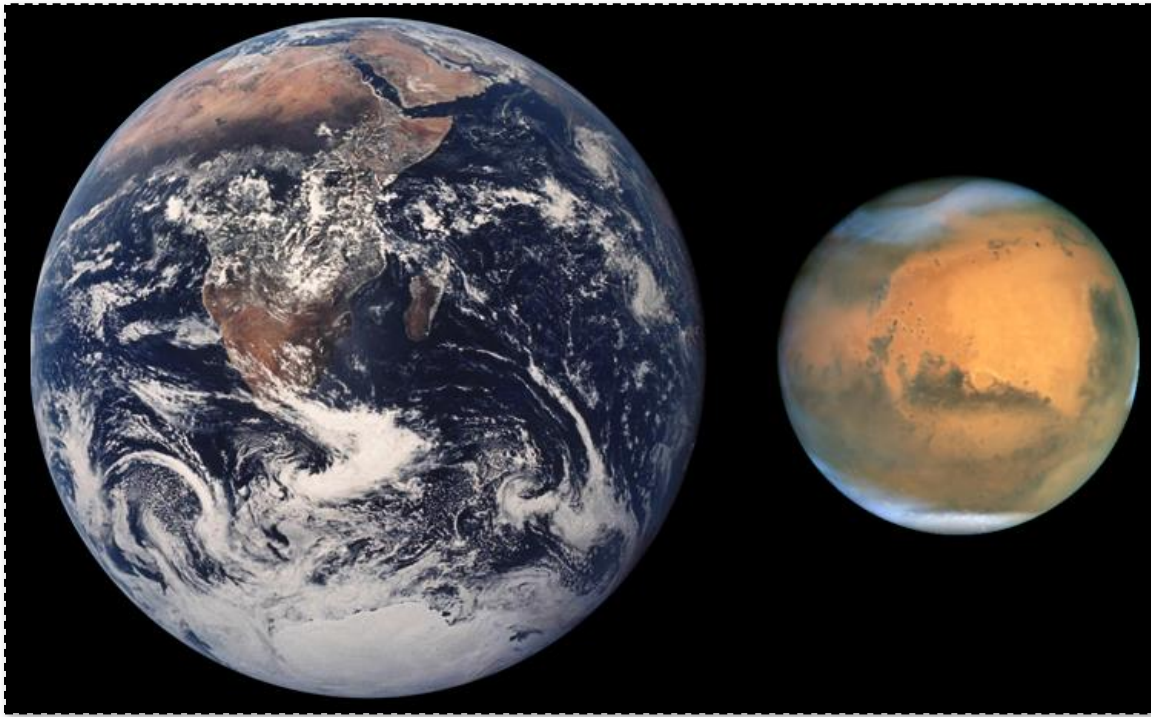


Figure 38 : comparaison des tailles de la Terre et Mars

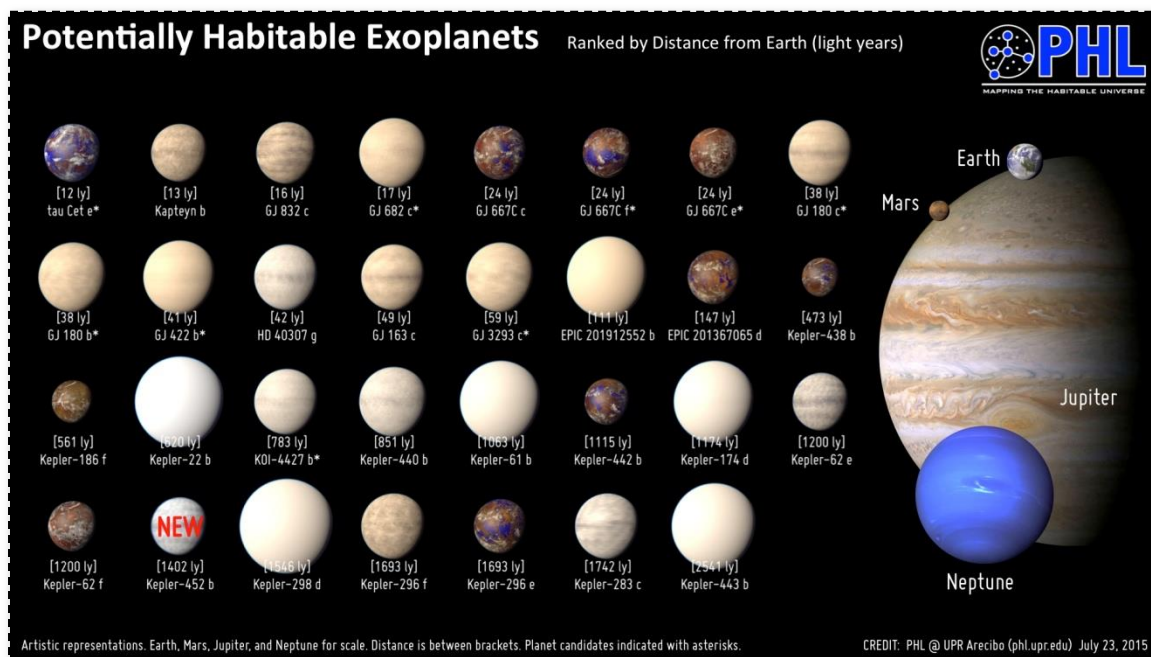


Figure 39 : Tailles comparées d'exoplanètes de type tellurique et telluriques super-Terres

- **100 000 km**, c'est l'ordre de grandeur de taille des planètes géantes gazeuses et glacées, comme Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, ou les centaines découvertes autour d'autres étoiles que le Soleil. Il faut aligner 11 fois la Terre pour obtenir le diamètre de Jupiter. Jupiter est à 1 ordre de grandeur de plus que la Terre.

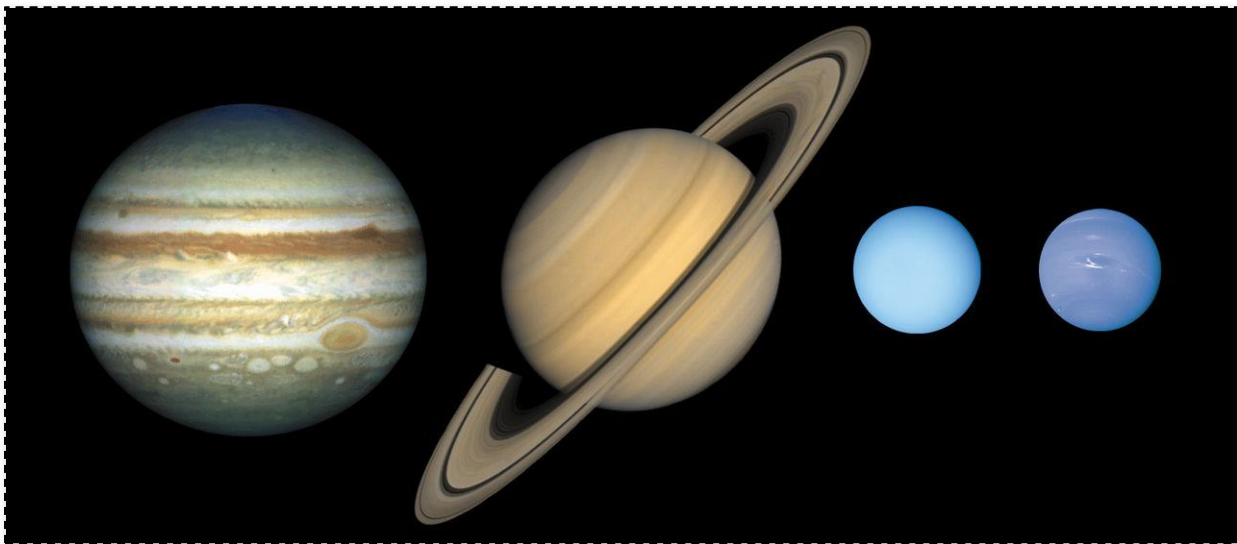


Figure 40 : Planètes géantes de notre système planétaire

- **10^6 km, 1 million de km**, c'est la taille des petites étoiles comme le Soleil. Il faut 6 millions de Terres pour remplir une sphère grande comme le Soleil. C'est 9 ordres de grandeur au-dessus de nous. Face au Soleil, nous ne sommes rien ! Il faut 1 milliard d'êtres humains (« 1 méga-humain ») main dans la main pour couvrir le diamètre d'une étoile comme le Soleil.

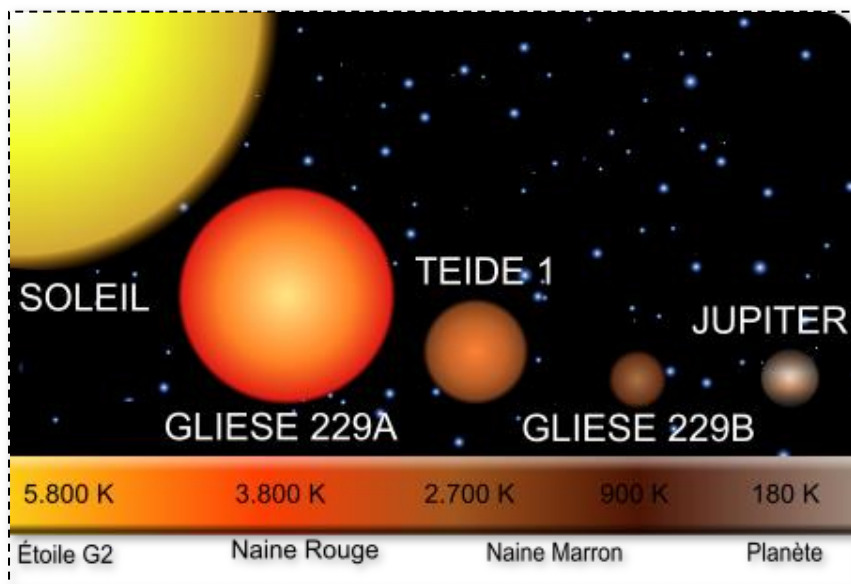


Figure 41 : Naines jaunes, naines rouges, naines brunes : les plus petites étoiles.

5) Les tailles des étoiles

A partir d'ici, on doit abandonner le kilomètre, et utiliser le rayon solaire comme référence.

Rayon solaire : $1 R_{\odot} = 6.955 \times 10^5 \text{ km}$.

$2 R_{\odot}$ c'est environ 10^6 km .

Les étoiles bleues, lourdes et très chaudes, ont une tailles de **2 à 100 $R_{\odot}$** . **100 $R_{\odot}$** , c'est quelque chose comme 11 ordres de grandeur au-dessus de nous ! Sirius a un rayon de $1.711 R_{\odot}$, Rigel a un rayon de $80 R_{\odot}$. Cela correspond également aux géantes rouges comme Aldébaran, $44 R_{\odot}$ ou Arcturus, $24.5 R_{\odot}$.

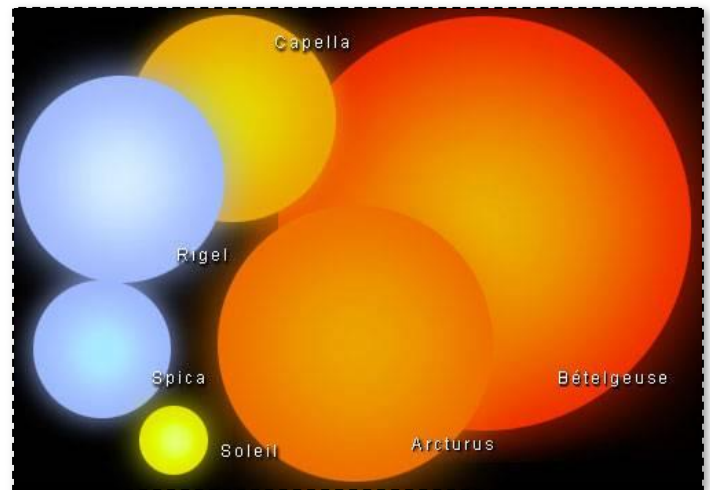


Figure 42 : Taille du Soleil comparé à des naines bleues et des géantes rouges

Les plus grandes étoiles, les super-géantes rouges, ont un rayon de l'ordre de **1000 $R_{\odot}$** , comme Antarès, $883 R_{\odot}$ ou Bételgeuse (entre 950 et $1200 R_{\odot}$), ou encore Mu Cephei, $1420 R_{\odot}$.

On se trouve ici à 12 ordres de grandeur au-dessus de nous. Transposé dans l'infiniment petit, on se situe entre la taille d'un atome et la taille d'un noyau d'atome. Il faut 1 000 000 000 000 êtres humains (« 1 Tera-humain ») main dans la main pour couvrir le diamètre d'une étoile super-géante rouge. Mu Cephei est une étoile qui mesure 2 milliards de km de diamètre, contre 1,4 millions pour le Soleil. Placée au centre de notre système planétaire, elle contiendrait l'orbite de Saturne !

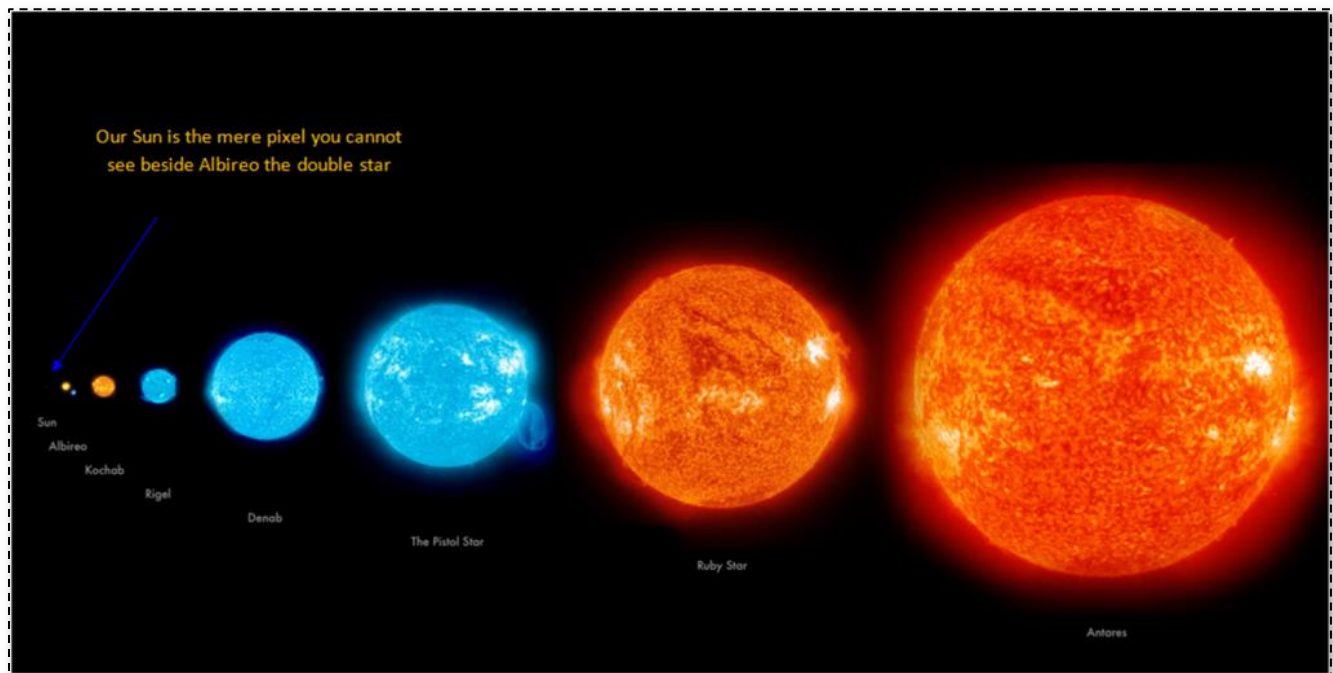


Figure 43 : Taille du Soleil comparée des naines bleues, des géantes rouges et des super-géantes rouges

6) Les distances dans l'Univers proche

Au-delà des étoiles super-géantes, il est difficile de parler d'astres. Pour ce qui est plus grand on va plutôt parler de rassemblements d'astres, des systèmes, des amas et des galaxies, à l'exception peut-être des nébuleuses, qui sont constituées de gaz diffus. On va donc parler maintenant surtout de distances pour les échelles supérieures ! Pour les distances dans l'Univers, on utilise encore les kilomètres pour mesurer les distances entre des planètes et leurs satellites, mais c'est tout. La Lune se situe par exemple à une distance de l'ordre de 100000 km de la Terre (384000 km), ou 8 ordres de grandeur au-dessus de nous, soit 100 millions d'humains, main dans la main.

Autrement, dans un système planétaire, ou dans un système d'étoiles multiples (des étoiles en orbite autour d'autres étoiles, comme dans le système de Tataouine dans Star Wars), on utilise l'unité astronomique (U.A.). C'est la distance Terre-Soleil. $1 \text{ U.A.} = 150 \times 10^6 \text{ km}$.



Figure 44 : Distances et tailles à l'échelle dans le système Terre-Lune

Jupiter se situe à environ 5 U.A. du Soleil, soit environ 800 millions de km. En termes d'ordre de grandeur, on se situe à **1 milliard de km**. Pluton se situe à 39 U.A., soit 6 milliards de km. Pluton fait partie de la ceinture de Kuiper, un ensemble de petits astéroïdes de glace et de planètes naines glacées, situés entre **10 et 100 milliards de km** du Soleil. **100 milliards de km**, c'est l'ordre de grandeur du rayon extérieur de la ceinture de Kuiper, soit 10^{14} m. 14 ordres de grandeur au-dessus de nous. 2 ordres de grandeur au-dessus des plus grosses étoiles. Au-delà de la ceinture de Kuiper, on se trouve dans le nuage Oort, grand réservoir de comètes englobant tout le système solaire, et qui s'étend hypothétiquement jusqu'à 1.5 année-lumière (A.L.) selon les estimations les plus aventureuses, soit de l'ordre de 10 000 milliards à 100 000 milliards de km, ou encore **10^{15} à 10^{16} m**. Inconcevable, n'est-ce pas ? et encore, c'est tout petit ... par rapport aux gouffres de vide qui séparent les systèmes planétaires, les étoiles isolées et les systèmes d'étoiles.

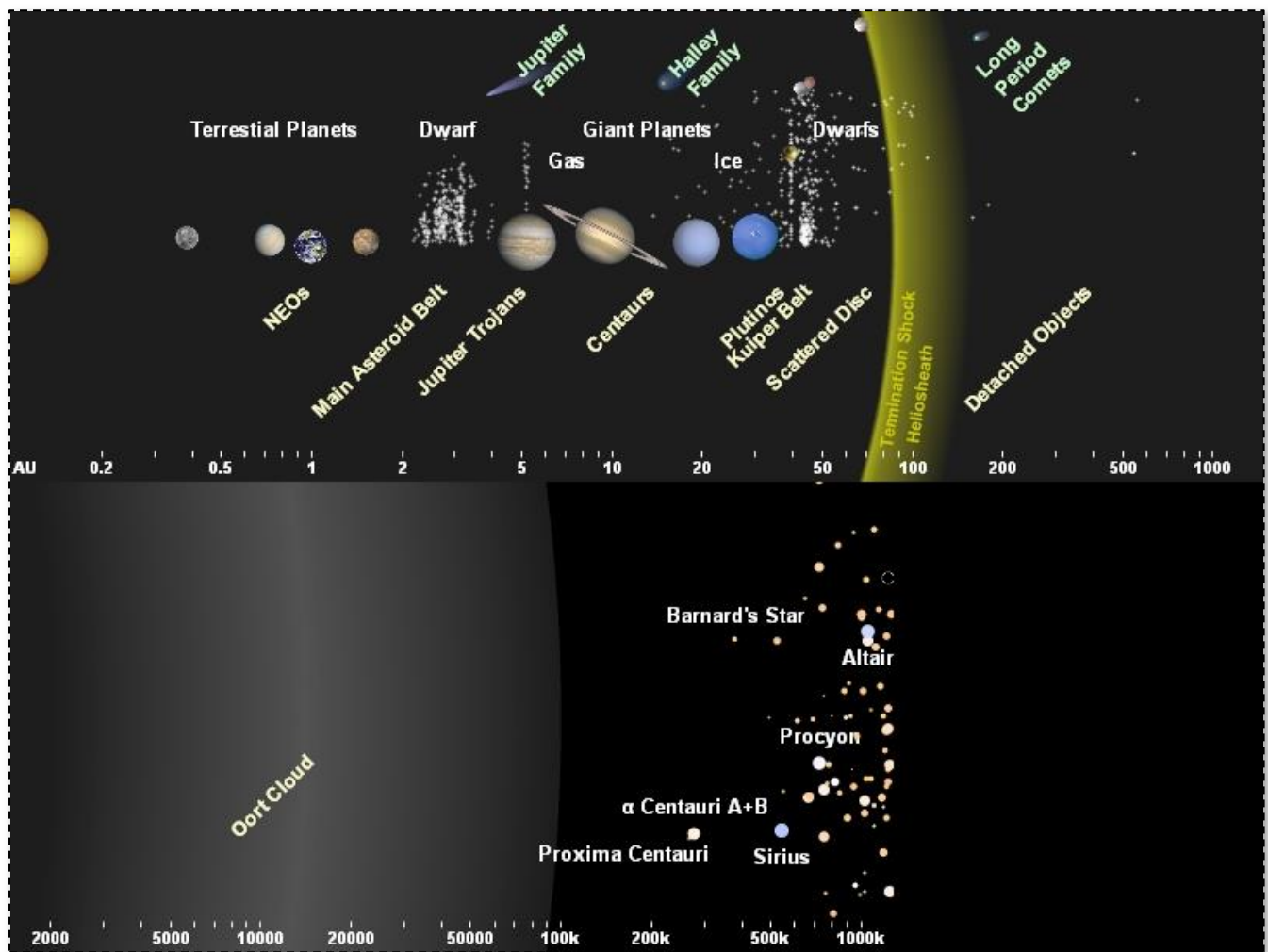


Figure 45 : Distances dans le système solaire et au-delà en U.A.

- 10^{15} à 10^{16} m, c'est donc la taille du système solaire, dans ces contrées les plus reculées.

C'est ici que l'on doit de nouveau abandonner une unité. On abandonne l'U.A. pour l'année-lumière A.L. pour mesurer les distances entre les étoiles, ou plus couramment le parsec.

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année. La lumière se déplace dans le vide à la vitesse de la lumière, ou célérité $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$1\text{ A.L.} = 9.4605284 \times 10^{15}\text{ m}$$

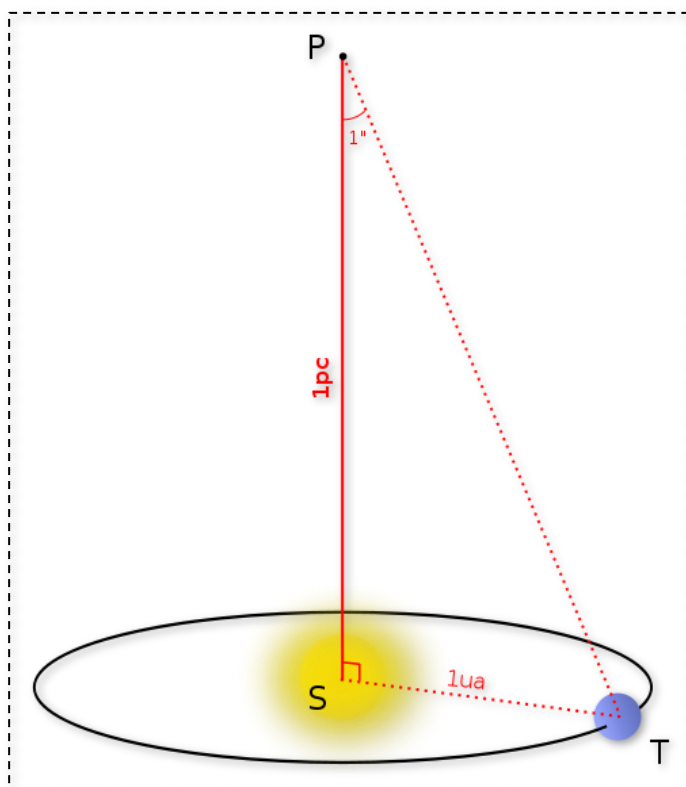


Figure 46 : définition du parsec (pc)

Un parsec correspond à la distance à laquelle une unité astronomique est vue sous un angle de 1 seconde d'arc.

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ A.L.} = 3,08567758 \times 10^{16} \text{ m}$$

Cette unité est plus couramment utilisée que l'année-lumière par les astrophysiciens aujourd'hui.

La plus proche étoile du Soleil n'est en fait pas une étoile isolée mais un système d'étoile, ou étoile multiple. Il s'agit du système d'Alpha du Centaure, situé à 4,2 A.L., soit environ 40000 milliards de km. On se trouve ici à **16 ordres de grandeur** de distance au-dessus de la taille de l'être humain. On voit le système d'Alpha du Centaure depuis l'hémisphère sud de la Terre dans la direction de la constellation du Centaure comme un point très lumineux. On ne peut en effet discerner à l'œil nu les 3 étoiles de ce système : Alpha Centauri A, Alpha Centauri B et Proxima Centauri. Ce système stellaire est vu plus en détails dans le document « La Classification des Etoiles ». Alpha Centauri B possède au moins 1 planète tellurique, peut-être 2. La suivante est l'étoile de Barnard, à 5,9 A.L., puis le couple de naines brunes WISE 1049-5319 à 6,5 A.L., découvert en 2013 par le satellite WISE.

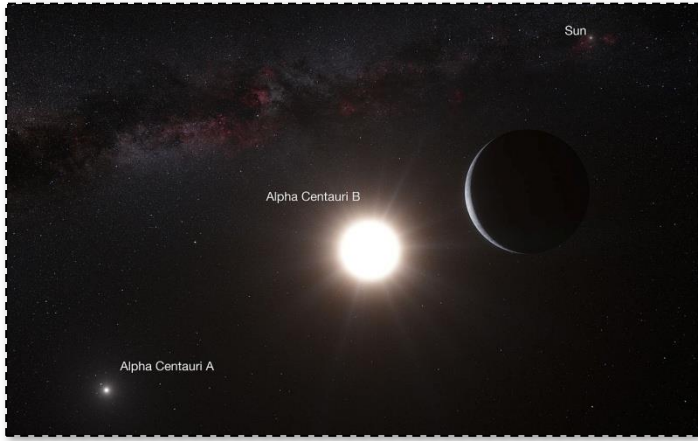


Figure 48 : Vue d'artiste d'une partie du système d'Alpha du Centaure avec la planète Alpha Centauri Bb.

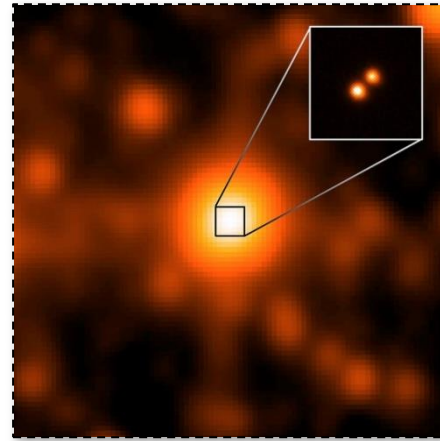


Figure 47 : Découverte du couple de naines brunes WISE 1049-5319 en 2013, troisième plus proche système stellaire du Soleil.

On connaît aujourd'hui une cinquantaine d'étoiles voisines du Soleil dans un rayon de 16 A.L.. On est à peu près confiant de ne pas en avoir raté, grâce au satellite WISE, qui a surveillé tout le ciel dans le domaine des infra-rouge pour découvrir des naines brunes, ces étoiles avortées invisibles autrement.

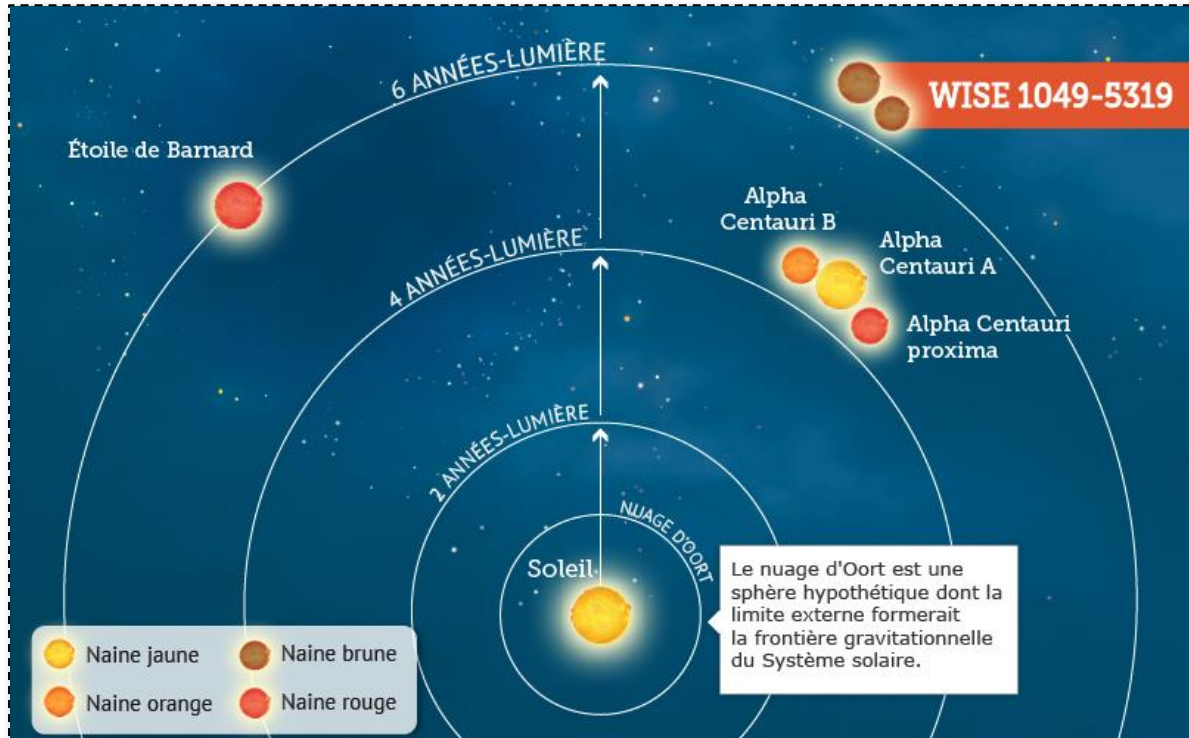


Figure 49 : Etoiles les plus proches du Soleil.

Un peu plus de détails sur ces étoiles, classées par distance croissante.

Nom		Type et couleur conventionnelle	Rayon (R $\odot$)	Luminosité (L $\odot$)	Distance (a.l.)
Système	Étoile				
Soleil		naine jaune	1	1	
Alpha Centauri	C (Proxima)	naine rouge	0.14	0.0001	4.24
	A	naine jaune	1.23	1.52	4.36
	B	naine orange	0.86	0.5	4.36
Étoile de Barnard		naine rouge	0.2	0.0035	5.96
Luhman 16	A	naine brune	0.1	négligeable	6.5
	B	naine brune	0.1	négligeable	6.5
Sirius	A	étoile blanche	1.71	26.1	8.58
	B	naine blanche	0.008	0.00024	8.58
Procyon	A	étoile blanche	2.05	7.73	11.4
	B	naine blanche	0.02	0.00055	11.4

Tableau 2 : Liste des étoiles les plus proches du Soleil, et quelques-uns de leurs paramètres intrinsèques et apparents.

Quelques explications des informations de ce tableau :

- Chaque étoile possède trois types de dénominations :
- Le nom usuel (Véga, Deneb, Bételgeuse...)
- Le nom de constellation, avec par ordre de luminosité apparente décroissante, une lettre grecque ou un numéro puis le nom de la constellation en latin (Alpha Cen ou Alpha Centauri est en apparence l'étoile la plus brillante de la constellation du Centaure)
- Le nom de catalogue, qui est le plus utilisé aujourd'hui car il permet de prendre en compte de manière efficace de grands nombres d'étoiles. Il est composé du nom du catalogue suivi du numéro d'entrée dans le catalogue (GJ 832, Gliese 667C, Kepler 452).
- Ce tableau donne également les types spectraux des étoiles. On verra cela en détail dans le document « La classification des étoiles ». La magnitude apparente et la magnitude absolue sont données. Elles seront vues dans les documents « Mesurer la lumière des étoiles ». La distance est donnée en A.L.. Le nombre entre parenthèses est le nombre de chiffres significatifs mesurés. Enfin, il est donné le nombre de planètes connues autour des étoiles. Les lettres entre parenthèses font partie de la nomenclature des exoplanètes, qui sera vue dans le document « Les Exoplanètes ».

7) A l'échelle galactique !

La plupart des planètes découvertes à ce jour autour d'autres étoiles que le Soleil l'ont été dans un rayon de 2 000 années-lumière autour du Soleil, ce qui est très réduit à l'échelle galactique. 2000 A.L.. c'est 20 millions de milliards de km, 10^{19} m, ou encore, 19 ordres de grandeurs au-dessus de la taille d'un humain ! Dans ce tout petit volume, on connaît aujourd'hui plus de 1500 planètes.

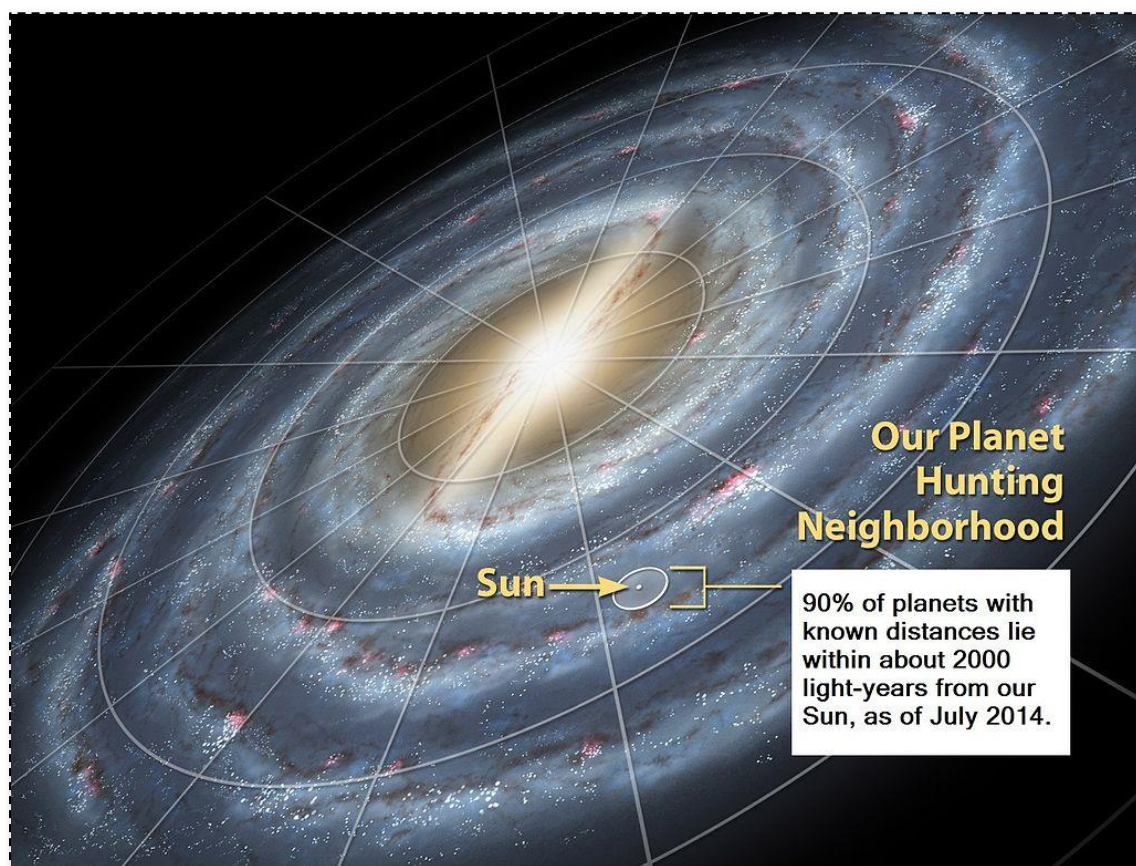


Figure 50 : La majeure partie des exoplanètes découvertes se trouvent dans un rayon de 2000 A.L.. du Soleil.

Sur cette vue d'artiste de notre Galaxie, la Voie Lactée, on voit des paquets de petits points bleus. Ce sont des amas d'étoiles jeunes. 90% des étoiles naissent en groupe et le restent jusqu'à au plus 1 milliard d'années. Ces amas d'étoiles ont un diamètre allant de quelques A.L. pour les plus petits, à quelques centaines d'A.L. pour les plus gros. Les tâches roses sont des nuages de gaz et de poussière qui émettent de la lumière sous l'action du rayonnement UV des étoiles jeunes qui en naissent. Ce sont des zones de formation d'étoiles, autrement appelées nébuleuses d'émission. La taille typique d'une zone de formation d'étoiles est de 300 A.L.



Tableau 3 : Nébuleuse de l'Aigle, région de formation d'étoiles.

Notre Galaxie, elle, a un diamètre de **30 kpc** (kiloparsec), et une épaisseur de 1kpc (3kpc au centre).

- 1kpc, c'est 3260 A.L., ou encore environ 32 millions de milliards de km ! 1kpc, c'est l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la Galaxie. 1 kpc, c'est de l'ordre de 10^{19} m. Pour rappel, côté infiniment petit, 10^{-18} m c'est la taille des quarks et des gluons. **L'être humain, en termes d'échelle, est à peu près autant éloigné de l'épaisseur typique d'une Galaxie que de la taille des plus petits constituants connus des noyaux des atomes !**
- 10kpc, c'est l'ordre de grandeur de la Galaxie et de la largeur, la longueur de ses bras spiraux. **10 kpc**, c'est 32600 A.L., ou encore environ 326 millions de milliards de km, soit 20 ordres de grandeur au-dessus de la taille humaine.

A ces échelles-là, on utilise comme unité le kiloparsec (kpc, 10^3 pc) ou le megaparsec (Mpc, 10^6 pc).

8) A l'échelle intergalactique !

La Voie Lactée mesure 30kpc, ou approximativement 100000 A.L.. de diamètre, et contient 200 milliards d'étoiles. Mais il existe des galaxies beaucoup plus grandes ! La galaxie d'Andromède mesure 140000 A.L.. de diamètre. Cela reste comparable, mais on peut aussi parler de NGC 262 qui mesure 800 kpc diamètre, soit 2,6 millions d'A.L.. 2,6 millions d'années-lumière, c'est la distance qui sépare les centres de la Voie Lactée et de la Galaxie d'Andromède ! NGC 262 pourrait donc rentrer entre ces deux Galaxies. De 100 à 1000 kpc, on se trouve dans l'ordre de grandeur des tailles des plus grosses galaxies et de distance des plus proches galaxies.



Figure 51 : IC 1101, la plus grande galaxie connue.
Les autres sources lumineuses sur l'image sont des galaxies d'avant et d'arrière-plan.

1000 kpc, c'est environ 3 millions d'années-lumière, soit 30 milliards de milliards de km, 3×10^{22} m, ou encore 22 ordres de grandeur au-dessus de l'échelle humaine. Ca décoiffe ça non ?

La plus grosse galaxie connue, IC 1101, a un diamètre de 1,8 Mpc (Megaparsec), autrement dit 1,8 millions de parsecs, ou 5,8 millions d'A.L., ou encore environ 60 milliards de milliards de km.

9) Mais ce n'est pas tout !

Les galaxies sont regroupées par attraction gravitationnelle en amas de galaxies. Un amas de Galaxies contient entre quelques centaines et quelques milliers de galaxies, chacune contenant des centaines ou des milliers de milliards d'étoiles. Le diamètre typique d'un amas de galaxies est de 2 à 10 Mpc, ou 10^{23} m. L'amas Abell 2744, est un amas géant de galaxies, situé à 13 Gigaparsec (Gpc), 13 milliards de pc, soit une distance de l'ordre de 10^{26} m.



L'amas de galaxies dans lequel se trouve la Voie Lactée s'appelle le Groupe Local. On y trouve des galaxies visibles aisément à l'œil nu ou aux jumelles : les galaxies satellites de notre Galaxie (les nuages de Magellan notamment), la galaxie d'Andromède et ses satellites, la galaxie du triangle et quelques galaxies naines. En tout, le Groupe Local contient 54 galaxies, et s'étend dans un volume de 3,1 Mpc de diamètre.

Figure 52 : L'amas géant de galaxies Abell 2744.

10) A l'échelle des super-amas de galaxies.

Les amas de galaxies sont regroupés dans des super-amas de galaxies. Notre Groupe Local fait partie du super-amas appelé Laniakea. Il contient 100000 galaxies réparties dans un volume de 160 Mpc de diamètre. En plus du groupe local, il contient les amas de la Vierge (Virgo), du Centaure (Centaurus), et du Paon (Pavo Indus). Les amas de galaxies portent parfois le nom de la constellation dans laquelle on les voit depuis la Terre.

160 Mpc, c'est de l'ordre de 10^{24} m.

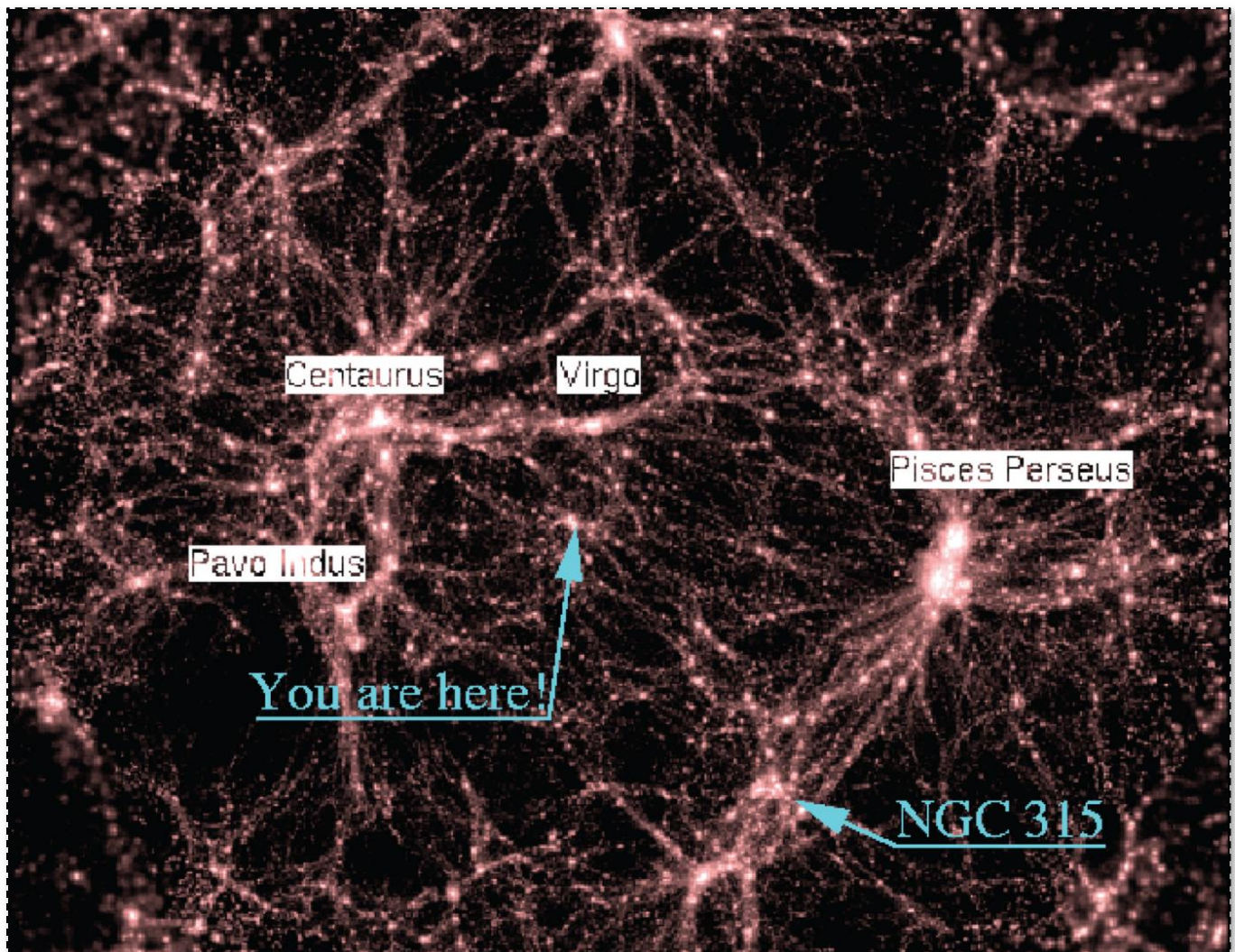


Figure 53 : Le Super-amas Laniakea, qui contient le Groupe Local, et les amas de la Vierge, du Centaure et du Paon. Sur cette simulation, on voit également d'autres amas et super-amas à "proximité", répartis le long de filaments de matière.

11) A l'échelle des filaments.

Les super-amas de galaxies sont répartis le long de filaments, séparés du vide le plus absolu. L'ordre de grandeur de la longueur de ces filaments est de 100 à 1000 Mpc (ou 1Gpc). On atteint de 10^{25} m.

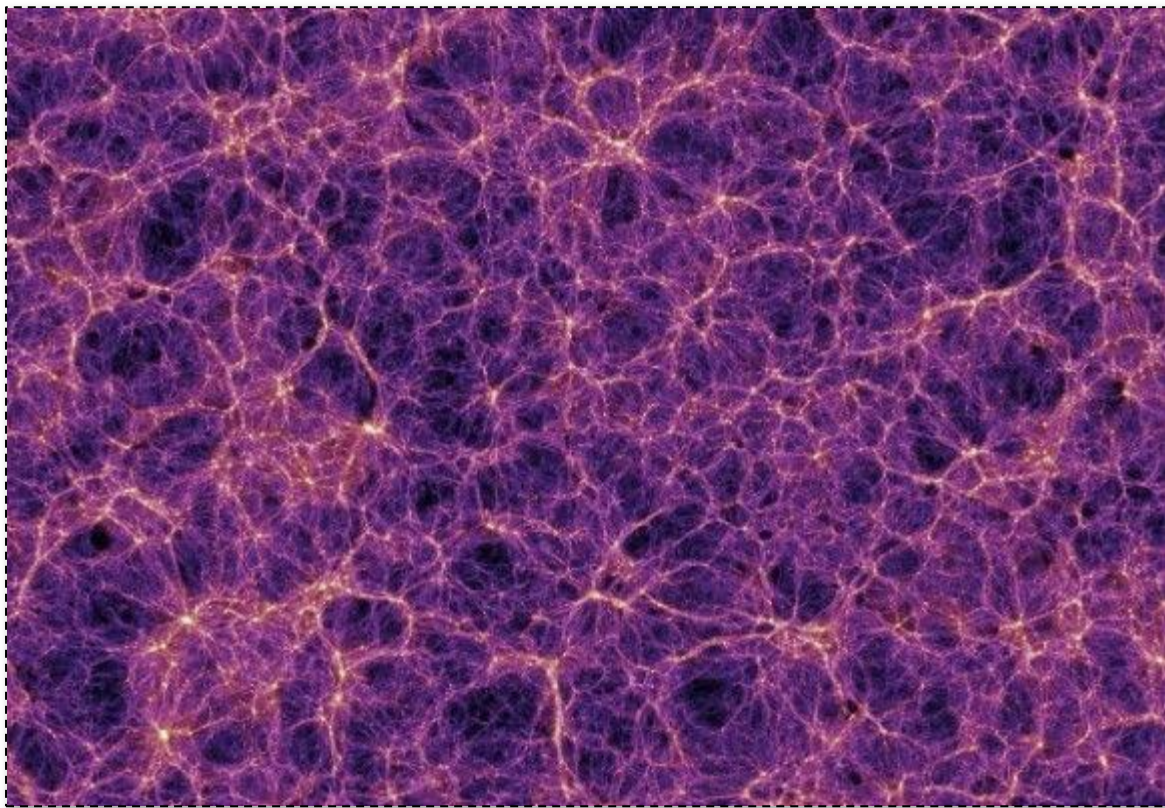


Figure 54 : Filaments d'amas et de super-amas de galaxies. Source :
<http://indicible.blog.lemonde.fr/2011/10/06/le-tissu-cosmique/>

12) A l'échelle de l'Univers.

L'Univers est né il y a 13,7 milliards d'années. Personne aujourd'hui ne peut dire quelle taille il fait. Mais on peut définir la taille de la partie de l'Univers qui est observable. Si l'Univers est né il y a 13,7 milliards d'années, cela veut aussi dire que la lumière a commencé à être émise il y a 13,7 milliards d'années (à 300000 ans près). La plus ancienne lumière émise dans l'Univers n'a pas pu voyager plus longtemps que 13,7 milliards d'années, et la lumière ayant une vitesse finie, elle n'a donc pas pu couvrir une distance plus grande que 13,7 milliards d'années-lumière.

Quelque-soit donc la taille réelle de l'Univers, on ne peut en voir que la sphère de diamètre 13,7 milliards d'A.L.. C'est une distance d'environ $1,37 \times 10^{26}$ m, soit 26 ordres de grandeur au-dessus de l'échelle humaine !

Remarque : A chaque seconde qui passe, on reçoit la lumière d'objets qui se trouvaient auparavant à 1 seconde-lumière de la frontière de l'Univers observable. On en voit de plus en plus (à une cadence ridicule) à mesure que le temps passe.

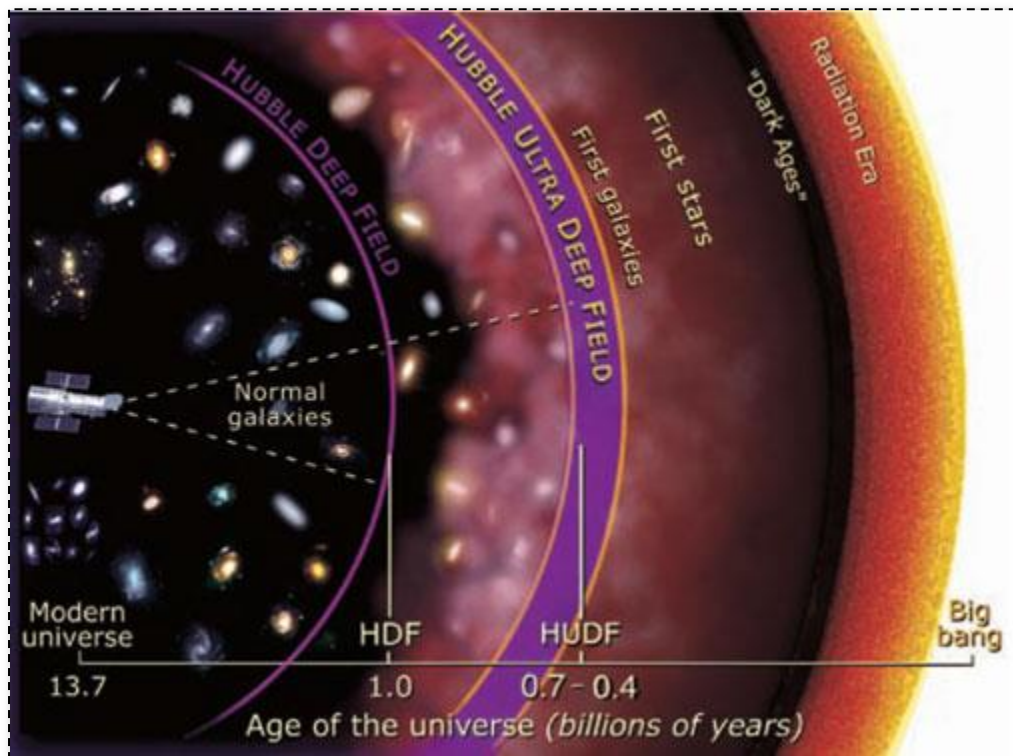


Figure 55 : 13,7 milliards d'A.L., c'est la distance au-delà de laquelle il est impossible de voir, car la lumière émise par ces objets n'a pas encore eu le temps de nous atteindre.
Source : forums.futura-sciences.com

Multiples et sous-multiples du mètre				
10^N	Nom préfixé	Symbole	Nombre en français	Nombre en mètres
10^{24}	yottamètre	Ym	Quadrillion	1 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{21}	zettamètre	Zm	Trilliard	1 000 000 000 000 000 000 000
10^{18}	examètre	Em	trillion	1 000 000 000 000 000 000
10^{15}	pétamètre	Pm	billiard	1 000 000 000 000 000
10^{12}	téramètre	Tm	billion	1 000 000 000 000
10^9	gigamètre	Gm	milliard	1 000 000 000
10^6	mégamètre	Mm	million	1 000 000
10^3	kilomètre	km	mille	1 000
10^2	hectomètre	hm	cent	100
10^1	décamètre	dam	dix	10
10^0	mètre	m	un	1
10^{-1}	décimètre	dm	dixième	0,1
10^{-2}	centimètre	cm	centième	0,01
10^{-3}	millimètre	mm	millième	0,001
10^{-6}	micromètre	μm	millionième	0,000 001
10^{-9}	nanomètre	nm	milliardième	0,000 000 001
10^{-12}	picomètre	pm	billionième	0,000 000 000 001
10^{-15}	femtomètre	fm	billiardième	0,000 000 000 000 001
10^{-18}	attomètre	am	trillionième	0,000 000 000 000 000 001
10^{-21}	zeptomètre	zm	trilliardième	0,000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	yoctomètre	ym	quadrillionième	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Tableau 4 : unités de distance avec le mètre pour référence et ordres de grandeur de distance.





Document EL3 :

La classification des étoiles

Quand on regarde le ciel nocturne, en première approche, on peut croire que tous les petits points brillants que l'on voit sont uniformément blancs. Or, selon les yeux et l'entraînement, on peut en voir certains bleus, d'autres blancs, jaunes ou rouges. Egalement, on en voit certains plus ou moins brillants. Ces étoiles sont-elles brillantes intrinsèquement, ou juste plus proches que les autres ? La couleur (liée à la température) et la luminosité sont les deux paramètres qui permettent de classer les étoiles. Leur masse, elle déterminera leur naissance, toute leur vie ainsi que leur mort. C'est ce que ce document va vous montrer dans le détail.

Document EL3

La classification des étoiles



I. La luminosité des étoiles

Commençons par la notion la plus facile à appréhender : la luminosité des étoiles. Toute source de lumière émet de la lumière, des photons, dans toute une gamme de longueurs d'onde. Le Soleil émet de la lumière ultra-violette, de la lumière visible, des infra-rouges, des ondes radio, etc... nos yeux ne voient que la partie visible de la lumière émise par le Soleil, c'est-à-dire du violet au rouge.

1) La loi de Stefan-Boltzmann.

Cependant, un astronaute, dans l'espace (on verra après pourquoi c'est important), verra le Soleil blanc (ou du moins son appareil photo, car il serait extrêmement et irrémédiablement dangereux pour lui de le regarder directement). Pourquoi blanc ? Parce que notre œil (ou une caméra de caractéristiques réglées sur l'œil) collecte toute la lumière visible reçue et en fait la somme. Si les différentes couleurs qui la composent sont à peu près aussi intenses les unes que les autres, alors le résultat est de la lumière blanche.

Si nos yeux pouvaient voir également dans tous les domaines de longueur d'onde : en rayons X, en infra-rouges, etc... et qu'on faisait la somme de toute cette lumière, on obtiendrait ainsi la luminosité totale émise par la source de lumière observée. Cette luminosité totale s'appelle la **luminosité bolométrique**. C'est la somme de la luminosité émise dans toutes les longueurs d'ondes par une source lumineuse. Autrement dit, c'est la luminosité intégrée sur tout le spectre électromagnétique.

Il se trouve que par la loi de Stefan-Boltzmann, la luminosité bolométrique L_{bol} d'une étoile est reliée à sa température de surface T_e et son rayon R :

Loi de Stefan-Boltzmann

$$L_{bol} = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

L = puissance lumineuse de l'étoile en W (énergie émise ou réfléchiée par seconde)

R = rayon de l'étoile en m. Le rayon du Soleil est de 696342 km

σ = constante de Stefan-Boltzmann. $\sigma = 5,670373 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T = température de surface de l'étoile en K

Ce que cette loi nous dit, c'est que plus les étoiles sont grandes, ou bien plus elles sont chaudes, ou bien les deux à la fois, et plus elles sont brillantes. Cela veut aussi dire que si deux étoiles ont la même température de surface, la plus grande sera la plus lumineuse. On en reparlera plus loin, mais par exemple, une étoile géante rouge, qui possède la même température de surface qu'une naine rouge, sera beaucoup plus brillante que cette dernière.

Important

On verra un peu plus loin que cette loi ne fonctionne qu'avec les étoiles dites « normales » ou de la séquence principale.

2) La luminosité des étoiles dans le ciel.

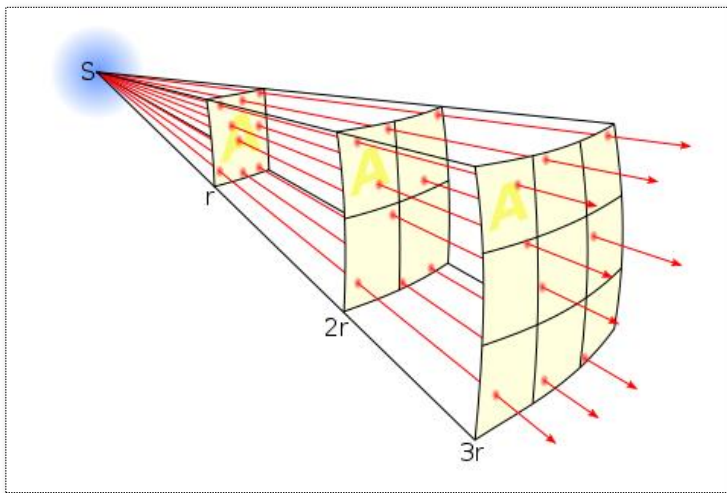
On voit aisément à l'œil nu des différences de luminosité dans les étoiles du ciel nocturne. Ces différences peuvent être dues à trois paramètres qui diffèrent pour chacune d'entre-elles :

- la taille
- la température de surface
- la distance

Les deux premiers s'expliquent par la loi de Stefan-Boltzmann. Voyons maintenant le rôle que joue la distance dans la luminosité d'une étoile.

Qu'est-ce que la luminosité, en astrophysique ? Pour les astrophysiciens, la luminosité est une puissance lumineuse et se mesure en Watt. C'est l'énergie qui est émise par toute la surface d'une étoile à chaque seconde. 1 Watt, c'est aussi 1 Joule par seconde.

Chaque seconde donc, chaque m^2 de surface de l'étoile émet la même quantité d'énergie. Prenons l'énergie E_t émise à un instant t par toute la surface. A l'instant $t+1$ seconde, la lumière qui avait été émise à l'instant t a avancé de 300000 km dans toutes les directions, la vitesse de la lumière étant de 300000 km.s^{-1} . L'énergie qui avait été émise par l'étoile à l'instant t est donc diluée sur une surface plus grande que celle de l'étoile : une sphère de rayon $R+300000 \text{ km}$.



Si l'énergie est diluée sur une plus grande surface à mesure que la lumière s'éloigne de l'étoile, cela veut dire que chaque mètre carré sur ces sphères successives est de moins en moins brillant. Autrement dit, un observateur qui s'éloignerait d'une étoile recevrait de moins en moins de lumière de celle-ci. La luminosité baisse avec le carré de la distance.

Figure 56 : Dilution de l'énergie avec la distance : la luminosité perçue, ou flux lumineux reçu décroît avec le carré de la distance.
Source : Wikipedia.

En astrophysique, on appelle flux lumineux émis la luminosité émise par 1 m^2 de source lumineuse. On appelle flux lumineux reçu la luminosité reçue par 1 m^2 de surface d'observation. Le flux lumineux se mesure en W.m^{-2} .

Décroissance de la luminosité

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

F = Flux lumineux reçu en W.m^{-2}

L = puissance lumineuse de la source en W (énergie émise ou réfléchi par seconde)

r = distance entre la source et l'observateur en m

Donc à luminosité bolométrique (ou luminosité intrinsèque) égale, une étoile plus lointaine qu'une autre étoile paraîtra moins lumineuse.

II. La couleur des étoiles

1) La perception par nos yeux

Comme nous l'avons dit en introduction, les yeux les plus exercés parviennent à percevoir la couleur de certaines étoiles dans le ciel nocturne. En fait, ce sont celles qui sont en apparence les plus brillantes qui apparaissent colorées. Pourquoi cela ? Nos yeux ont besoin d'une grande quantité de lumière pour voir la couleur. En effet, la rétine est composée de deux sortes de cellules nerveuses : les cônes et les bâtonnets.

- Les cônes existent en trois spécialités : la perception du rouge (cônes L), du vert (cônes M) et du bleu (cônes S). Les cônes R sont sensibles autour de 564 nm, les cônes V autour de 533 nm et les cônes B autour de 437 nm. Ils ont pour fonction de voir la lumière colorée, et ont besoin d'une grande quantité de lumière. On les utilise le jour. Il y en a en moyenne 5 millions sur la rétine. Ils sont principalement situés dans la partie centrale de la rétine, près de la fovéa, prolongement de l'axe optique de l'œil.
- Les bâtonnets constituent le reste de la rétine. On les trouve au nombre de 120 millions en moyenne. Il n'en existe que d'un type. Ils ne peuvent donc pas percevoir la couleur. Ce sont des cellules très sensibles qui nous permettent de voir clair au crépuscule et de discerner des contrastes la nuit. Ce sont aussi eux qui sont utilisés pour détecter les mouvements dans notre vision périphérique, capacité que nous a donné l'évolution pour échapper à nos prédateurs... ou bien pour tourner la tête vers des écrans de pubs dans le métro.

Ce sont donc principalement les bâtonnets qui sont activés lorsque l'on observe les étoiles. On voit donc les étoiles majoritairement blanches. Seulement les plus brillantes vont être en mesure d'activer nos cônes et on pourra alors percevoir leur couleur. Le seuil de luminosité et la propension à voir certaines couleurs dépendent de votre rétine. L'expression « la nuit tous les chats sont gris » illustre bien ce mécanisme.

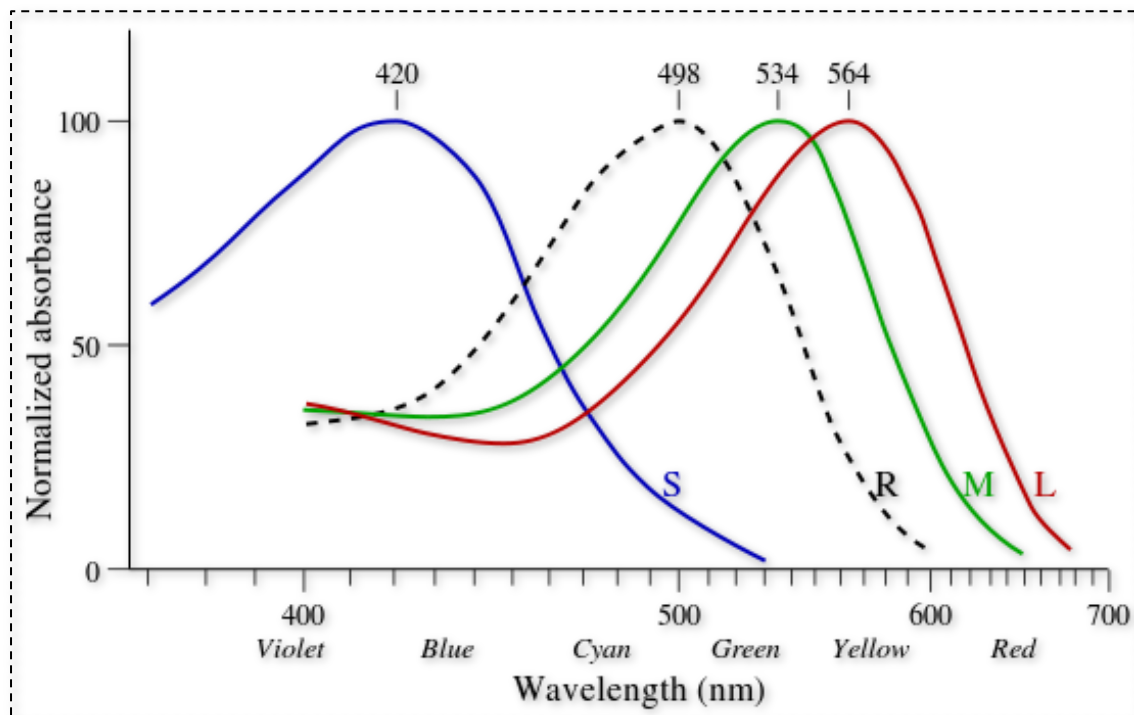


Figure 57 : Courbes d'absorbance des cônes (courbes rouge, verte et bleue) et des bâtonnets (courbe noire) en fonction de la longueur d'onde. Source : Wikipedia.

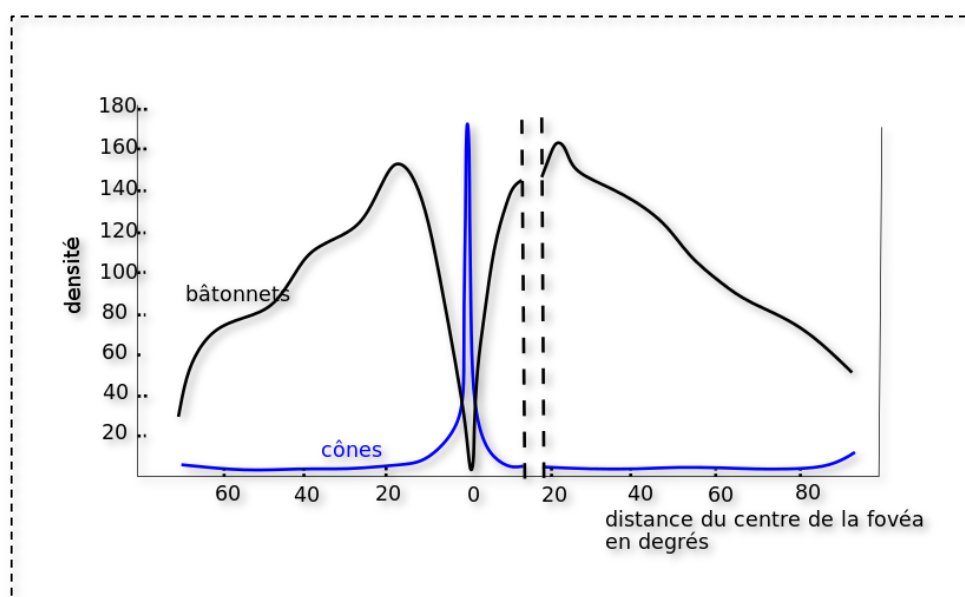


Figure 58 : Densité des cônes et des bâtonnets en fonction de la distance au centre de la fovéa, prolongement de l'axe optique de l'œil, en degrés. Source : Wikipedia.

La disposition et la sensibilité de nos bâtonnets ont pour résultat qu'il est plus facile de percevoir des astres faibles en regardant un peu à côté. On utilise cette vision périphérique pour discerner des nébuleuses, des amas d'étoiles ou des galaxies, à l'œil nu ou à l'oculaire.

La majeure partie de l'Univers est invisible à nos yeux, faute de luminosité et de sensibilité suffisante à la couleur. Voici ce qu'un œil exercé peut voir des couleurs des étoiles dans la constellation d'Orion, et ce que voit un appareil photo bien utilisé.

Nous allons voir maintenant ce qui fait que certaines étoiles sont rouges, jaunes, d'autres blanches ou encore bleues. La couleur d'une étoile est une indication de sa nature et du stade de vie dans lequel elle se trouve. Mais c'est avant tout la conséquence de sa température. Les étoiles bleues ou rouges que l'on voit à l'œil nu sont en général aussi celles qui nous apparaissent les plus brillantes. On va voir qu'il s'agit de très grosses étoiles. On va voir aussi que 95% des types d'étoiles sont invisibles pour nos yeux.

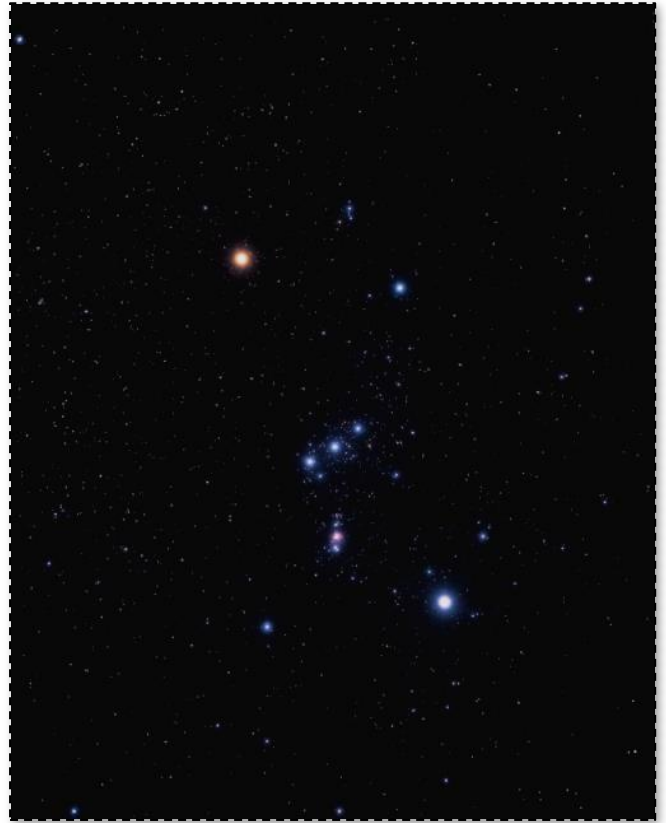


Figure 59 : constellation d'Orion telle que vue par un œil exercé.

2) La couleur comme conséquence de la température

Les étoiles sont des usines à lumière et à matière. La lumière est produite en leur cœur, où la température se compte en dizaines, centaines de millions de degrés. Et puis après des millions d'années de cheminement dans l'enveloppe de l'étoile, absorption et réémission après absorption et réémission par les noyaux d'atomes que les photons rencontrent, elle finit par sortir de l'étoile et se propager dans le vide de l'espace. Durant ce trajet intérieur, les photons perdent de l'énergie à chaque rencontre, ce qui fait augmenter leur longueur d'onde. L'enveloppe de l'étoile est également plus froide. Par conséquent, la surface de l'étoile est beaucoup plus froide que son cœur.

Le cœur du Soleil a une température de 14 millions de degrés, et sa surface de 6000 degrés seulement. Plus précisément, sa température de surface est de 5750 Kelvins (K).

Le Kelvin, unité de mesure de la température

$$1\text{ K} \\ = -272,15^{\circ}\text{C}$$

0K=-273,15°C est le zéro absolu de la température.
La température est la traduction de l'agitation thermique des atomes, molécules et particules. Le zéro absolu correspond à une agitation nulle : plus rien ne bouge.

5750 K cela correspond à un pic d'émission autour de 500 nm de longueur d'onde, soit le milieu du domaine de la lumière visible.

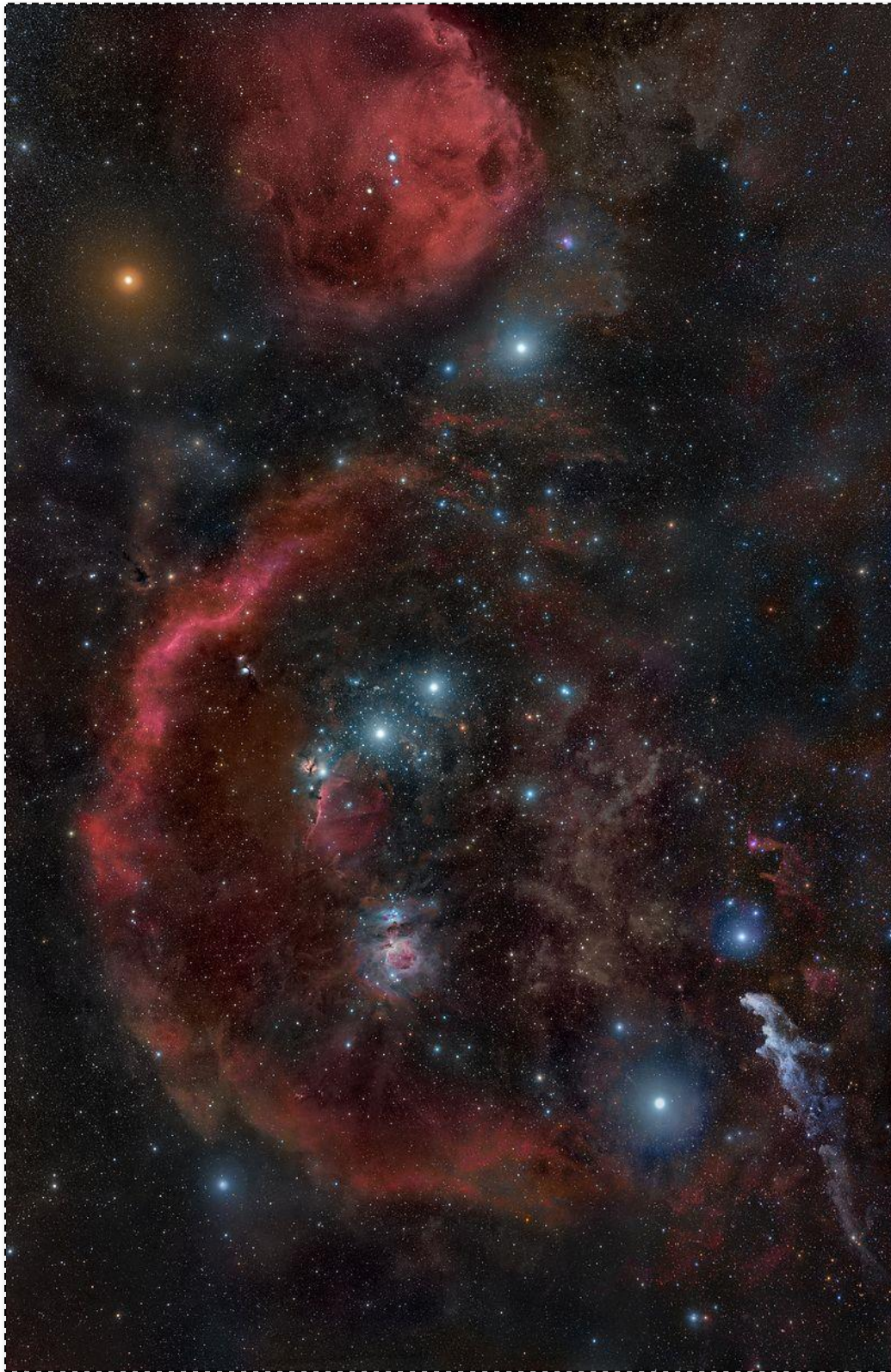


Figure 60 : Photographie de la constellation d'Orion et de ses nébulosités.
L'essentiel de l'Univers et de ses couleurs est invisible pour nos yeux.
Crédit : Rogelio Bernal Andreo, source : Wikipedia.

Des étoiles très chaudes comme Deneb, avec une température de 8400 K, ou Rigel, avec une température de 10000 K ont un maximum d'émission dans le bleu. Des étoiles encore plus chaudes, qui sont de type spectral O, avec une température de 50000 K ont un maximum d'émission dans le violet voire l'ultra-violet. A l'inverse, des étoiles froides comme Bételgeuse, avec une température de 3600 K, ou Proxima Centauri, avec une température de 3040 K ont un maximum d'émission dans le rouge.

Important

Les peintres ont beau nous dire que le bleu est une couleur froide, en physique, c'est faux ! La lumière bleue est plus énergétique que la lumière rouge, et dans le cas des étoiles, correspondent à des sources de lumière plus chaudes.

Faites chauffer un morceau de fer dans une forge*. Sous l'effet de la chaleur, il va s'illuminer en émettant un spectre de corps noir. Le maximum d'émission de ce corps noir suit la loi de Wien :

Loi de Wien

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 * 10^{-3}}{T}$$

λ_{max} = longueur d'onde du maximum du spectre de corps noir en nm
 T = Température de surface du corps noir (ici, de l'étoile) en Kelvin (K).

A mesure que vous chauffez ce morceau de fer, sa température va augmenter. Le gris du métal va tout d'abord rayonner en rouge sombre, puis rouge vif, puis orange, puis jaune, puis blanc. A tout moment, les parties plus froides du métal rayonneront en rouge.

Si vous pouviez continuer à chauffer votre métal avant qu'il ne fonde, il finirait par rayonner en bleu.



Figure 61 : Le métal chauffé passe du rouge au blanc à mesure qu'on augmente sa température.

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre. Il n'est fait aucune autre hypothèse sur la nature de l'objet. La lumière étant un rayonnement électromagnétique, elle est absorbée totalement et l'objet éclairé devrait donc apparaître noir, d'où son nom. Cependant, un corps noir peut émettre de la lumière s'il a une température suffisamment élevée (voir plus bas), il n'apparaîtra donc pas noir dans toutes les conditions.

Le morceau de métal que l'on vient de liquider n'est pas exactement un corps noir car on voit des reflets dessus quand on l'éclaire, mais il s'en rapproche. Par contre une étoile en est un, en première approximation, ou plutôt, sa surface en est un. Une étoile, et par conséquent sa surface également, est chauffée par son cœur. Le spectre d'émission d'une étoile, c'est-à-dire de sa surface se présente donc sous la forme d'un spectre de corps noir.

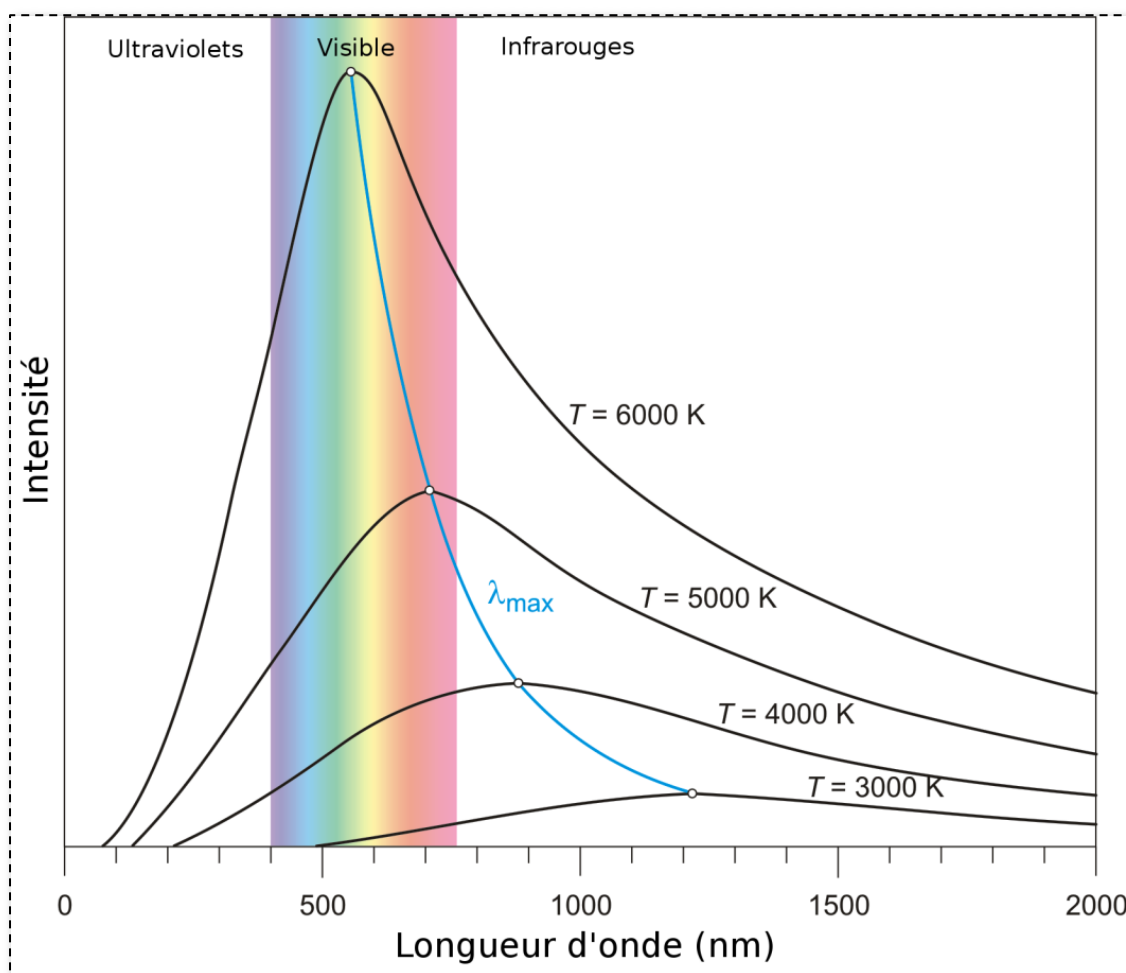


Figure 62 : Spectres de corps noirs. On peut leur appliquer la loi de Wien pour obtenir leur température ou leur longueur d'onde de maximum d'émission.

Crédit : <http://glossary.periodni.com>

Cette courbe de corps noir suit la loi de Planck :

Spectre de corps noir : la loi de Planck

$$B_{\lambda}(\lambda, T)$$

$$= \frac{2hc^2}{\lambda^5}$$

$$\times \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

B_{λ} = radiance spectrale en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$

λ = longueur d'onde en nm

T = température du corps noir (ici, de l'étoile) en Kelvin (K).

h = constante de Planck

k = constante de Boltzmann

c = vitesse de la lumière

Avec la loi de Planck, on obtient la radiance spectrale $B_{\lambda}(\lambda, T)$ du corps noir, ou pour ce qui nous intéresse, de l'étoile. Pour une étoile c'est la quantité d'énergie émise par seconde, par 1m^2 de surface, dans une longueur d'onde, et dans une direction (1 stéradian, sr). Elle s'exprime en $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$.

Si on fait la somme de cette radiance spectrale sur toute la surface de l'étoile et dans toutes les directions, on obtient la luminosité de l'étoile dans chaque longueur d'onde, L_{λ} , en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$. Et si on somme ensuite sur toutes les longueurs d'onde, on obtient la fameuse luminosité bolométrique, L_{bol} , en W, dont on a déjà parlé !

3) La couleur émise n'est pas forcément la couleur perçue

Le Soleil, avec une température de surface de 5750 K, a un maximum d'émission à 500 nm de longueur d'onde. C'est donc une étoile verte ! Mais personne ne la voit verte, pourtant ? 550nm, c'est le centre du domaine visible. L'évolution est responsable de l'adaptation de nos yeux à cela, mais pourtant, pour un astronaute, le Soleil, apparaît blanc vu de l'espace, pas vert.

Outre ce que l'on a vu sur les cônes et les bâtonnets, il y a des effets supplémentaires qui viennent altérer la couleur que l'on perçoit. Le Soleil a un maximum d'émission dans le vert, mais son émission dans les autres couleurs est loin d'être nulle ! Par conséquent, quand nos yeux font la somme de toutes les couleurs qu'ils reçoivent du Soleil, le résultat est blanc, malgré la victoire du vert d'une courte tête.



Figure 63 : Le Soleil apparaît blanc depuis la Station Spatiale Internationale. Crédit : NASA.

La somme de la lumière reçue d'une étoile dont le maximum d'émission est bleu est bleue car son émission en rouge est trop faible, et inversement pour une étoile dont le maximum d'émission est rouge.

Par contre, la somme de la lumière d'une étoile dont le maximum d'émission est verte, est blanche, car son émission dans le bleu et dans le rouge sont importantes.

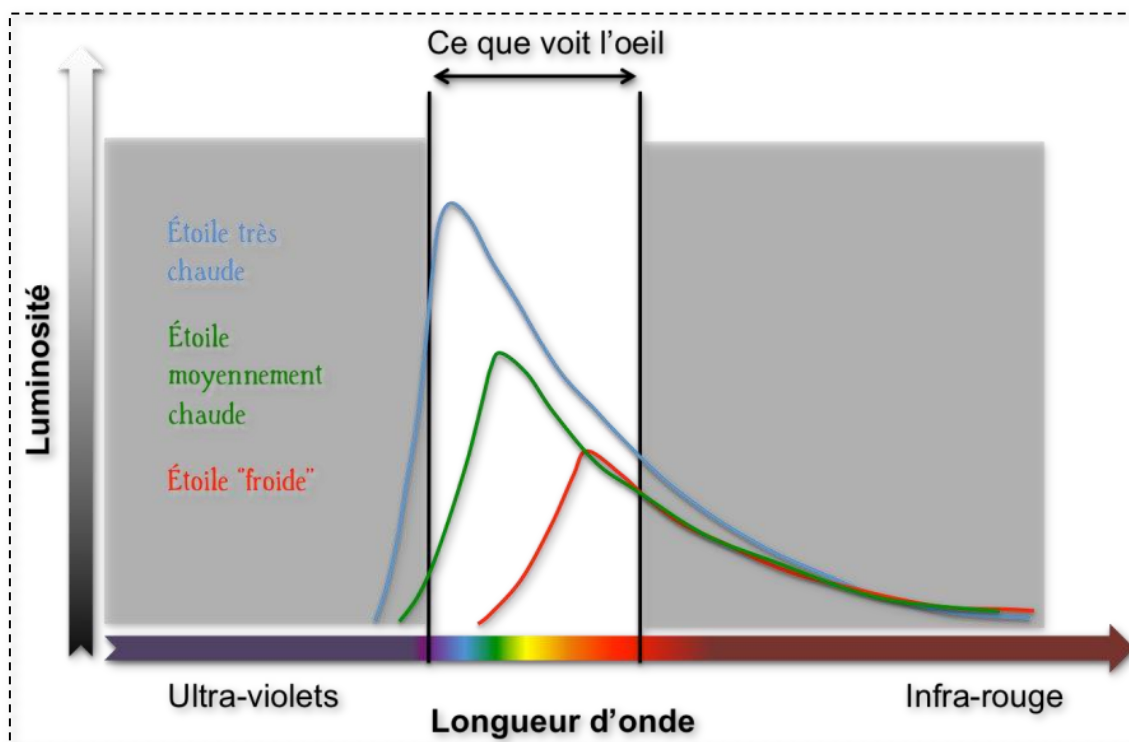


Figure 64 : Nous ne voyons pas d'étoiles vertes. Source : Planète Sciences.

« Mais non, je le vois jaune, le Soleil » : c'est sûrement ce que vous êtes en train de penser. Si nous voyons le Soleil jaune au lieu de blanc la journée, c'est à cause de l'effet diffusant de l'atmosphère terrestre. Découpons le spectre du Soleil i.e. la répartition de la luminosité qu'il émet en fonction de la longueur d'onde, en quelques bandes grossières : violet (très faible), bleu, vert, jaune, orange et rouge. On a ainsi la luminosité du Soleil, mais mieux encore, le flux lumineux reçu du Soleil dans chacune de ces couleurs. L'atmosphère est constituée d'atomes. Lorsqu'ils sont exposés à de la lumière, ces atomes la diffusent dans toutes les directions. C'est ce qui fait qu'on parvient à y voir clair même si on n'est pas directement sous le Soleil. Puisque les atomes de l'atmosphère diffusent la lumière du Soleil, celle-ci est lumineuse : on voit un ciel uniforme, le jour. Depuis la surface de la Lune qui n'a pas d'atmosphère, le ciel est noir avec des étoiles, tant qu'on ne regarde pas en direction du Soleil, qui apparaît comme un disque lumineux isolé.

Il se trouve que les photons sont diffusés par les atomes avec des angles plus forts si leur longueur d'onde est plus courte : ce phénomène s'appelle la diffusion de Rayleigh. La partie bleue du spectre du Soleil est diffusée plus fortement que les couleurs plus proches du rouge. Par conséquent le ciel est bleu.

Que reste-il de la lumière du Soleil qui arrive à traverser l'atmosphère plus ou moins en ligne droite ? le vert, le jaune, l'orange, le rouge. Quand on fait la somme de tout cela, on obtient du jaune, pour le Soleil. Voilà pourquoi nous voyons le Soleil jaune dans le ciel.

Quand il se trouve à l'horizon, les photons du Soleil ont une épaisseur d'atmosphère plus grande à traverser, et ont par conséquent plus de chance encore d'être diffusés. Ainsi, quand le Soleil s'approche de l'horizon c'est au tour du Jaune, puis du orange d'être diffusés. Voilà pourquoi le Soleil apparaît successivement orange, puis rouge lorsqu'il est à l'horizon.

Par temps clair, on peut parfois apercevoir le rayon vert, au ras du Soleil. C'est un mélange de diffusion de Rayleigh et de réfraction de la lumière par l'atmosphère.



Figure 65 : Le Soleil passe successivement au orange puis au rouge de plus en plus foncé à mesure qu'il se couche.

Important

Vous verrez de nombreux textes donnant la couleur jaune au Soleil. Sachez que c'est un raccourci : le Soleil n'est jaune que vu à travers l'atmosphère terrestre. Il n'est pas intrinsèquement jaune. Une étoile ayant un maximum réellement dans le jaune est un peu plus froide que le Soleil.

III. Le diagramme Hertzsprung-Russell

1) Les grandes catégories d'étoiles

Maintenant que l'on a deux des paramètres principaux d'une étoile, à savoir sa luminosité bolométrique et sa température de surface, on va pouvoir les classer. On utilise pour cela le diagramme Hertzsprung-Russell (H-R), avec la température de surface en abscisse et la luminosité bolométrique en ordonnées. Prenons quelques étoiles très connues et/ou bien

visibles à l'œil nu, et plaçons-les dans un espace température de surface – luminosité bolométrique.

Etoile	Constellation	T_e (K)	L_{bol} ($L_{\odot}$)
Achernar	Eridan	20 000	5250
Aldébaran	Taureau	3,910	518
Alpha Centauri A	Centaure	5790	1.519
Alpha Centauri B	Centaure	5260	0.5
Proxima Centauri	Centaure	3042	0,0017
Altaïr	Aigle	8000	10,7
Antares A	Scorpion	3400	57,500
Antares B	Scorpion	18500	170
Arcturus	Bouvier	4286	170
Etoile de Barnard	Ophiuchus	3134	0.0035
Bellatrix	Orion	21 500	4 000
Beta Centauri	Centaure	25000	41700
Betelgeuse	Orion	3140 à 3641	90000 à 150000
61 Cygni A	Cygne	4526	0.153
61 Cygni B	Cygne	4077	0.085
Deneb	Cygne	8,525	196000
Procyon A	Petit Chien	6 550	7,73
Procyon B	Petit Chien	9 700	0,00055
Sirius A	Grand Chien	9940	25.4
Sirius B	Grand Chien	25200	0.026
Véga	Lyre	9 602	37

Vous pouvez utiliser ce tableau pour faire travailler vos élèves sur la classification de ces étoiles. Tracez les axes d'un diagramme HR au tableau, et faites leur placer ces étoiles selon leur luminosité et température. Le résultat est donné à la page suivante.

Tableau 5 :
Températures de surface et luminosités bolométriques de quelques étoiles connues.

$L_{\odot}$ = luminosité bolométrique du Soleil.
Les classes spectrales et de luminosité seront vues plus loin.

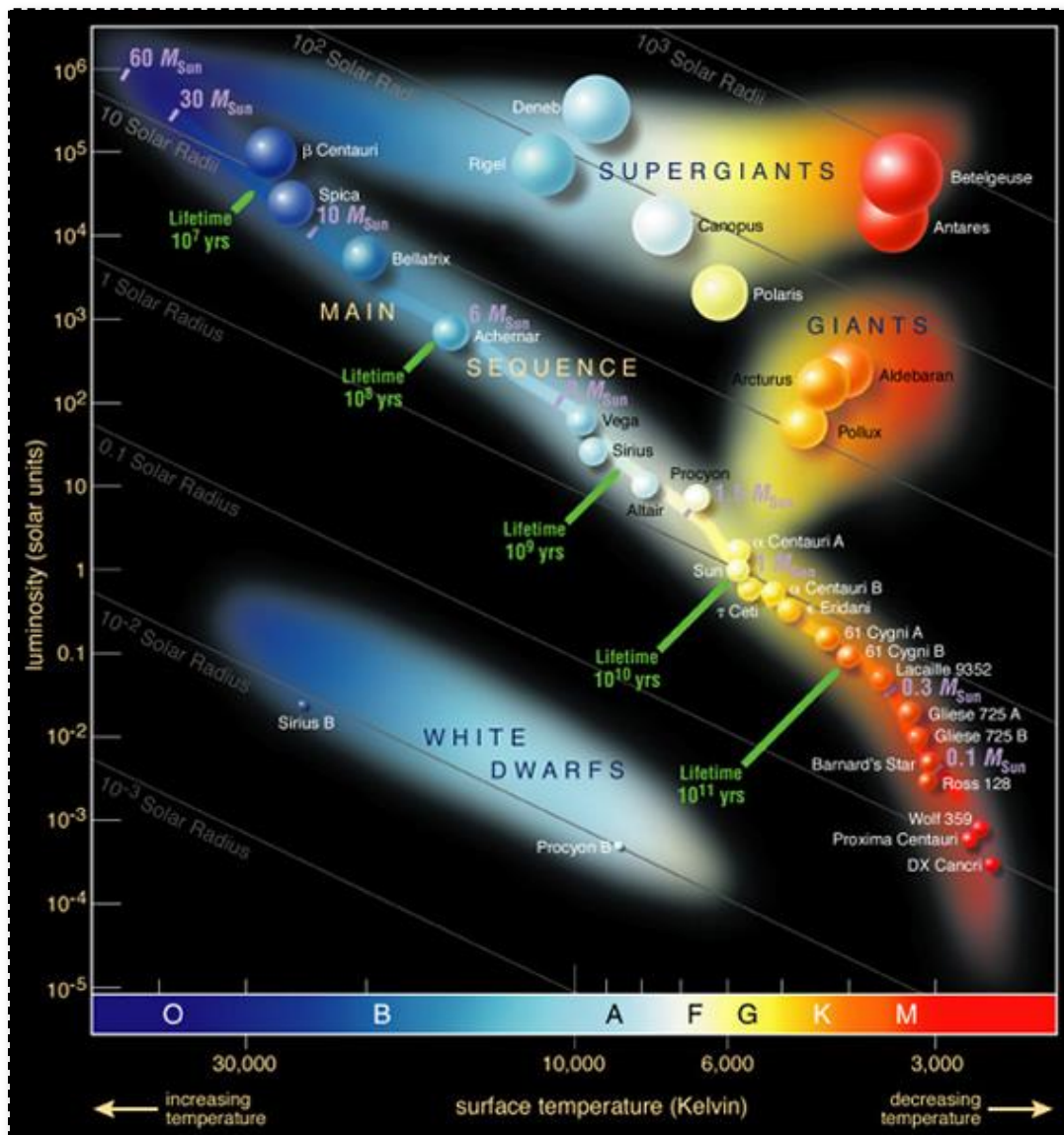


Figure 66 : Diagramme H-R avec quelques étoiles connues. Source : Wikipedia.

On remarque, en ajoutant un certain nombre d'étoiles, que 4 grands groupes se constituent dans des régions bien définies du diagramme :

- **La séquence principale** (ou branche des naines), traversant le diagramme en diagonale, et contenant toute la gamme de températures et de luminosités.
- **La branche des géantes**, constituée d'étoiles assez lumineuses et froides.
- **La branche des super-géantes**, constituée d'étoiles très lumineuses, et majoritairement froides.
- **La branche des naines blanches**, très faiblement lumineuses mais très chaudes.

Les étoiles de la séquence principale sont des étoiles venant de naître, ou en train de vivre la partie calme de leur vie. Au bout d'un certain temps, elles en partiront pour aller peupler les branches des géantes et des super-géantes. Ces deux branches sont donc constituées

d'étoiles évoluées. On les qualifie de géantes ou super-géantes car en évoluant, une étoile voit son diamètre grandir. Par cette action, la matière et l'énergie présentes dans leur enveloppe se trouvent réparties dans un volume plus grand, ce qui a pour effet de refroidir la surface de l'étoile. C'est pourquoi les géantes sont rouges. Les supergéantes bleues sont un stade intermédiaire d'évolution.

Enfin, la branche des naines blanches est constituée de cadavres d'étoiles : ce sont des cœurs d'étoiles qui ont perdu leur enveloppe. Ils sont donc très chauds, mais comme leur diamètre (de l'ordre de 10000 km) est petit, ces étoiles sont faiblement lumineuses.

Nous verrons tout cela avec plus de détails dans le document suivant « L'évolution des étoiles ».

Important

Sur internet et dans les ouvrages d'astronomie, on trouve deux façons de qualifier les étoiles, qui sont incompatibles.

La première consiste à dire que si une étoile est grande, on la nomme « géante », et si elle est petite, on la nomme « naine ».

La seconde consiste à dire que si l'étoile a évolué, on la nomme « géante », et si elle est encore sur la séquence principale, on la nomme « naine ». Elle a grossi depuis son séjour sur la séquence principale.

Seule la seconde est validée par les astrophysiciens, car elle a un sens physique. Chacun peut mettre une limite de taille différente pour séparer les grandes étoiles des petites : la première façon de nommer les étoiles est **subjective**. Par contre, une étoile évoluée est très clairement identifiable avec les mesures adéquates : la seconde façon de nommer les étoiles est **objective**.

Les étoiles bleues, si elles se trouvent en bas du diagramme H-R, sont de jeunes naines blanches. Si elles se trouvent sur la séquence principale, on les appelle des naines bleues (malgré leur taille). Enfin, si elles se trouvent au-dessus de la séquence principale, on les appelle des géantes ou des supergéantes bleues. Ces dernières sont des stades avancés de la vie d'une naine bleue.

Enfin, il faut faire attention à la confusion entre les naines blanches, cadavres d'étoiles, et les étoiles blanches de la séquence principale, aussi appelées naines blanches. Toute convention comporte ses imperfections !

2) Des biais de mesure importants

Construire un diagramme H-R à partir d'étoiles observées est très difficile. En effet, souvenez-vous, lorsqu'on mesure la luminosité d'une étoile, nous n'avons accès qu'à sa luminosité apparente, car la luminosité décroît avec le carré de la distance.

Mais il est également difficile d'obtenir avec certitude la couleur d'une étoile. Pour la mesurer, on mesure le flux lumineux reçu à travers quelques filtres colorés, et on compare les résultats pour voir quelle couleur ressort le plus. Mais le problème, c'est que sur la ligne de visée, il y a certes l'atmosphère terrestre si on observe depuis le sol, mais surtout il y a très probablement de vastes nuages de poussières interstellaires plus ou moins épais. Ces nuages de poussière sont opaques pour les courtes longueurs d'ondes, et totalement opaques au rayonnement visible s'ils sont épais. Cela veut dire qu'une étoile en arrière de ce nuage apparaîtra plus sombre et plus rouge. On mesurera donc une couleur faussée, décalée vers le rouge. Ce problème affecte aussi la luminosité totale de l'étoile.

IV. Le spectre d'une étoile

1) Les raies d'absorption

Pour pallier à ce problème de mesure de couleur, on peut enregistrer un spectre de l'étoile avec un spectroscopie, si l'étoile est assez brillante. En effet, le spectroscopie distribue la lumière collectée dans un certain nombre de longueurs d'ondes. Plus il a de résolution, c'est-à-dire plus l'écart entre deux longueurs d'ondes mesurables est petit, plus la lumière sera diluée. Le spectre sera trop sombre pour être étudié si l'étoile n'est pas assez brillante (ou si le télescope ne collecte pas assez de lumière).

Qu'apprend-t-on en mesurant le spectre d'une étoile ? On a vu que la surface d'une étoile est un corps noir. On s'attend donc à voir un spectre de corps noir. Seulement, dire qu'une surface d'étoile est un corps noir est une approximation : dans l'atmosphère de l'étoile, qui se situe donc entre l'observateur et la surface de l'étoile, se trouvent des atomes qui eux vont absorber une partie de la lumière émise par la surface.

Cela complique un peu les choses : ces atomes, selon leur nature, vont absorber des longueurs d'ondes différentes, et plus fortement s'ils sont présents en grandes quantités. Par conséquent, l'astrophysicien qui va mesurer le spectre de l'étoile verra des bandes fines de couleurs atténuées ou carrément manquantes sur son spectre de corps noir. Ces bandes

de longueur d'ondes manquantes appelées **raies d'absorption**, une fois mesurées et analysées, permettent donc de connaître la composition de l'atmosphère de l'étoile. Et cette composition liée à la nature de l'étoile et permet notamment de retrouver sa température de surface.

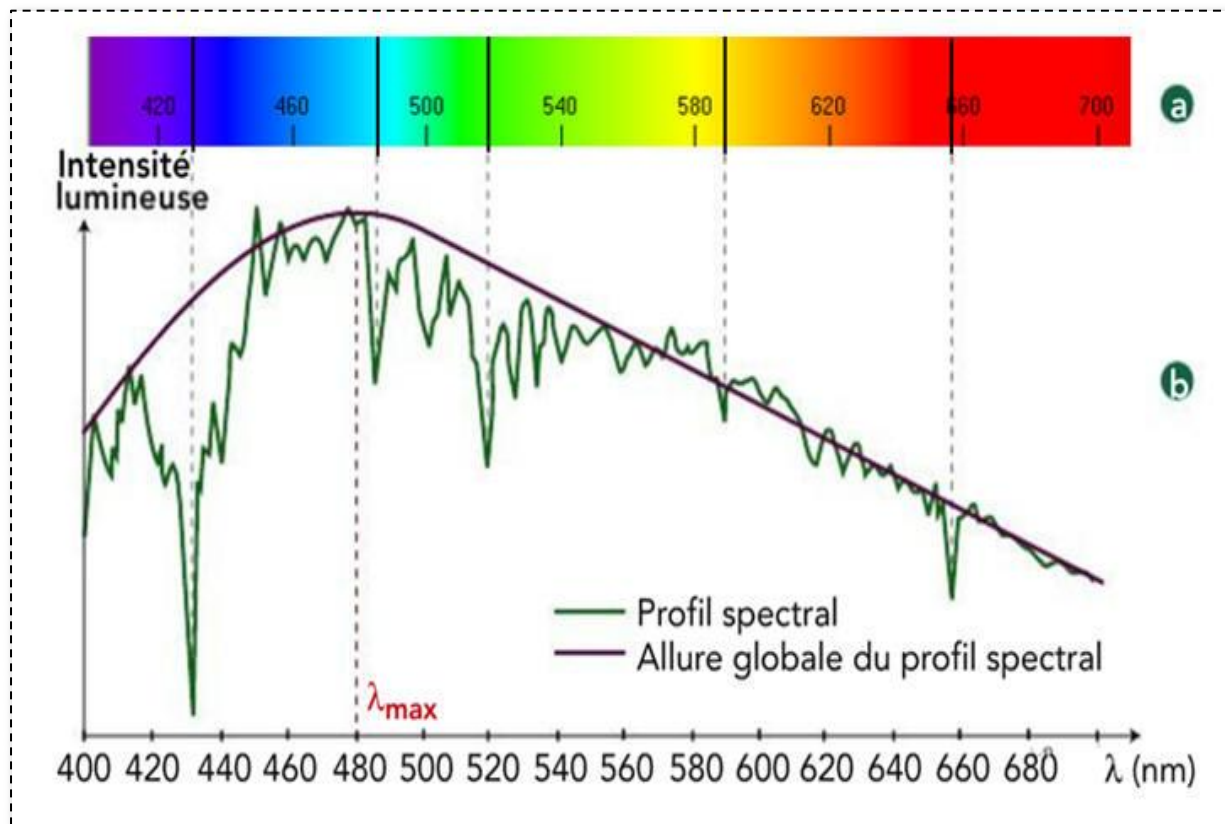


Figure 67 : Spectre simplifié du Soleil: c'est un spectre de corps noir dans lequel on trouve des raies d'absorption, des couleurs manquantes ou atténuées.

Par le volet théorique du fonctionnement des étoiles, on sait exactement quel doit être le spectre d'une étoile de telle température. On peut donc reconnaître le spectre mesuré et **déterminer la température de surface de l'étoile**, malgré les effets sur la couleur induits par la poussière interstellaire. On parle alors de **classe spectrale**.

Enfin, la largeur de certaines raies change selon que l'étoile est géante ou naine. Cela est lié à la différence de gravité « ressentie » par les atomes à leur surface (l'étoile géante ayant une plus grande surface). Ceci se reconnaît également dans le spectre mesuré et permet de dire si l'étoile observée est naine ou géante. Par conséquent, cette information associée à la température permet de **déterminer la luminosité bolométrique de l'étoile**. On parle alors de **classe de luminosité**.

Le couple formé de la classe spectrale et de la classe de luminosité s'appelle le **type spectral** (à ne pas confondre). Il représente la carte d'identité d'une étoile, qui permet de tout connaître d'elle, ou presque !

2) La classe spectrale d'une étoile

Les raies les plus déterminantes pour déterminer la classe spectrale d'une étoile, ce sont les raies de l'hydrogène. Jusqu'à une température de surface d'environ 10000 K, ces raies sont fortes, elles sont profondes, puis, au-delà, elles s'atténuent à nouveau. Ceci, avec certaines caractéristiques d'autres raies et la température de surface (liée à la position du maximum d'émission par la loi de Wien) permet d'établir les classes spectrales suivantes :

O, B, A, F, G, K, M, L et T (classification de Harvard).

Les classes L et T correspondent aux naines brunes qui sont des astres intermédiaires entre les étoiles et les planètes géantes gazeuses.

Voici des spectres typiques pour chacune de ces classes. On voit bien les différentes raies :

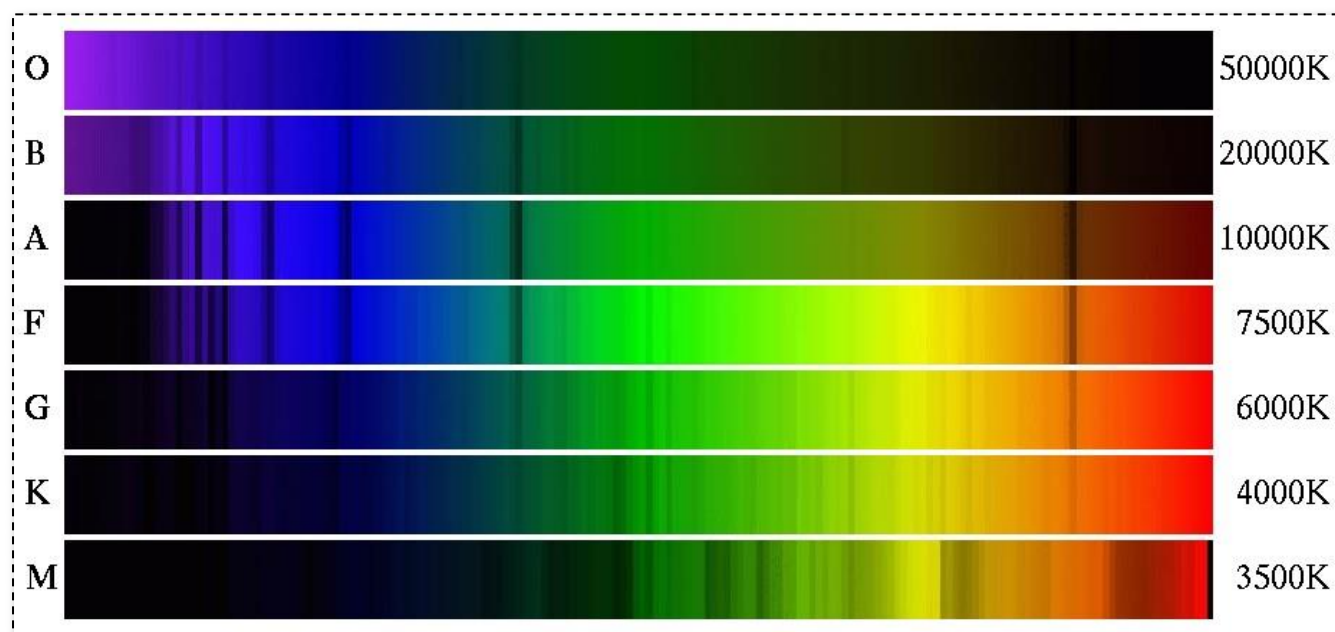


Figure 68 : Spectres d'étoiles pour chacune des classes spectrales dans la classification de Harvard. La température typique de chaque classe est donnée. Crédits : University of Maryland.

On voit très bien sur cette image la position du maximum d'émission pour chaque classe spectrale : les étoiles les plus rouges, de classe M, n'émettent quasiment pas de lumière violette ou bleu, tandis que les étoiles de classe O sont très lumineuses dans ces couleurs. On remarque également que les étoiles de classe M ont énormément de raies. Cela rend

difficile l'ajustement de la courbe de corps noir, ce qui fait que la loi de Stefan-Boltzmann que l'on a vu précédemment ne marche pas très bien pour les naines rouges et les géantes rouges : on obtient une erreur assez grande quand on l'applique.

Ces classes spectrales sont celles qui sont données en abscisses sur le diagramme H-R que l'on a vu plus haut. A l'intérieur de ces classes spectrales, on a inventé des sous-classes (10 pour chaque classe) pour rendre compte des petits écarts de température au sein d'une classe. Par exemple, la classe A contient les sous-classes A0 à A9. A0 correspond à l'étoile la plus chaude de la classe A, A9 à la moins chaude. Si on baisse encore en température, on passe de A9 à F0, puis à F1, F2, et ainsi de suite.

Important

La classe spectrale est une information équivalente à la température de surface ou à la couleur réelle (sans biais de mesure : poussière interstellaire, atmosphère terrestre, instrument...) de l'étoile.

3) La classe de luminosité d'une étoile

La classe de luminosité d'une étoile est déterminée uniquement par son stade d'évolution. Comme on l'a évoqué plus haut, la gravité à la surface de l'étoile, à masse égale, dépend de son diamètre. Et cette gravité de surface influe sur la largeur des raies d'absorption. En outre, comme l'étoile change de diamètre au cours de sa vie, la largeur de ses raies est appelée à changer. Donc le spectre d'une étoile, selon la largeur des raies, permet de dire si cette étoile est naine, géante ou super-géante, ou à tout autre stade intermédiaire.

Classe	Description
O	hypergéantes
Ia	Supergéantes très lumineuses
Ib	Supergéantes moins lumineuses
II	Géantes lumineuses
III	Géantes « normales »
IV	Sous-géantes
V	Naines (séquence principale)
VI	Sous-naines (peu utilisé)
VII	Naines blanches

Et bien sûr, à température égale, plus une étoile a une grande surface (donc un grand diamètre), plus elle est lumineuse. Les géantes sont plus lumineuses que les naines et les super-géantes plus lumineuses que les géantes. On peut comme ça classer les étoiles avec les classes de luminosité suivantes (classification de Yerkes).

Tableau 6 : Stades d'évolution correspondant aux classes de luminosité.

Important

Le premier diagramme H-R que l'on a vu était simplifié : il montrait les stades majeurs d'évolution des étoiles. Mais il existe des stades intermédiaires que ce tableau indique.

4) Le type spectral d'une étoile

Le type spectral s'obtient en joignant la classe de luminosité à la classe spectrale. Par exemple, le Soleil est une étoile de classe spectrale G2 et de luminosité V, et donc de type spectral G2V. Il y a d'autres exemples dans le tableau 5.

Parfois, des informations supplémentaires propres à l'étoile sont ajoutées à droite du type spectral. Par exemple Proxima Centauri est une étoile M6Ve. Le « e » signifie « émission ». Cette étoile comporte des raies d'émissions en plus des raies d'absorptions de son spectre. Un autre exemple : Sirius A, de type spectral A1Vm. Le « m » signifie que son spectre présente d'importantes marques de métaux (en astrophysique, un métal est constitué d'éléments plus lourds que l'hélium).

Le diagramme HR suivant montre à quoi correspondent ces classes de luminosités et où se situent ces types d'étoiles dans la classification des étoiles. La magnitude absolue est une information équivalente à la luminosité bolométrique. On en parlera dans le document « Mesurer la lumière des étoiles ».

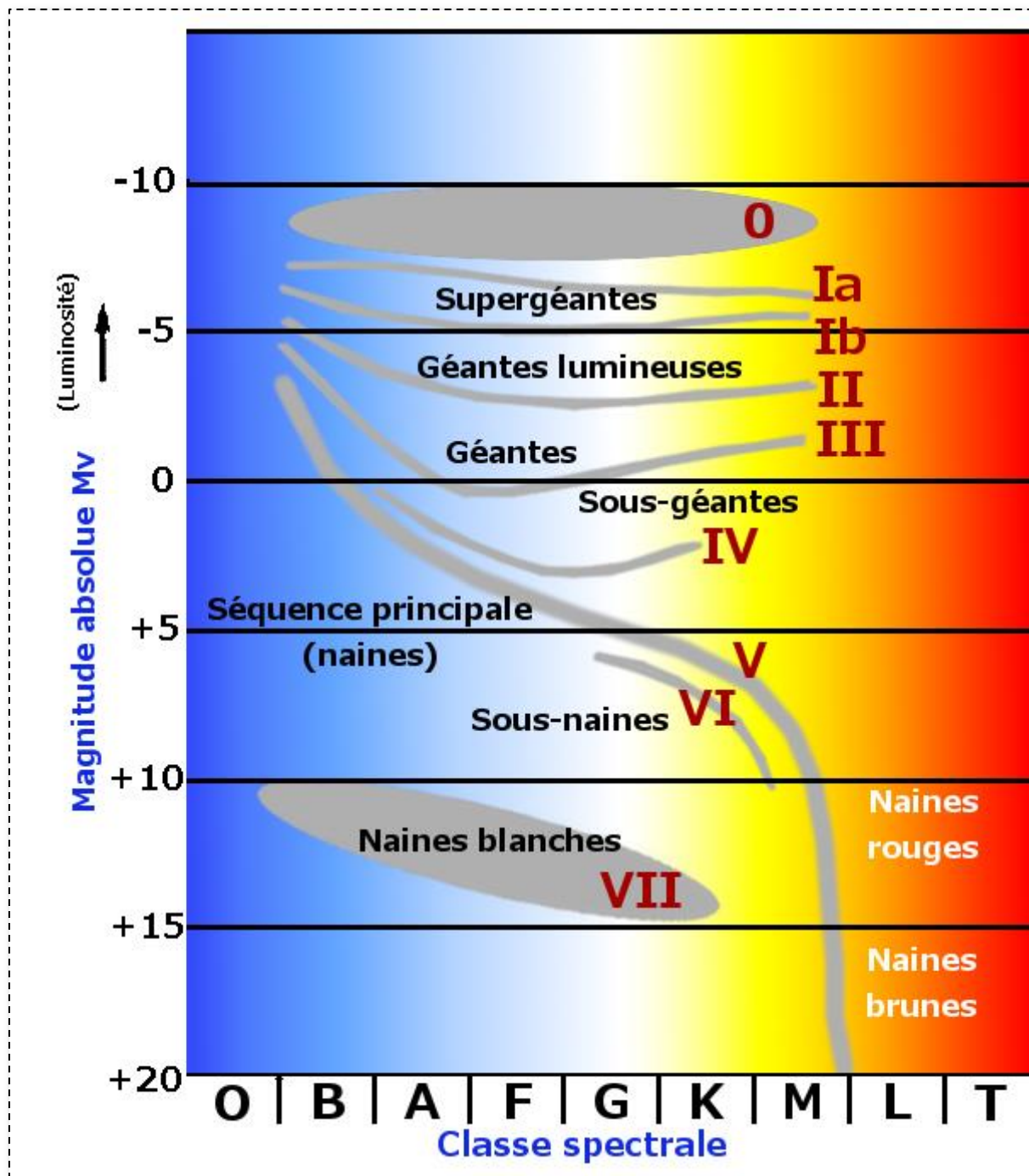
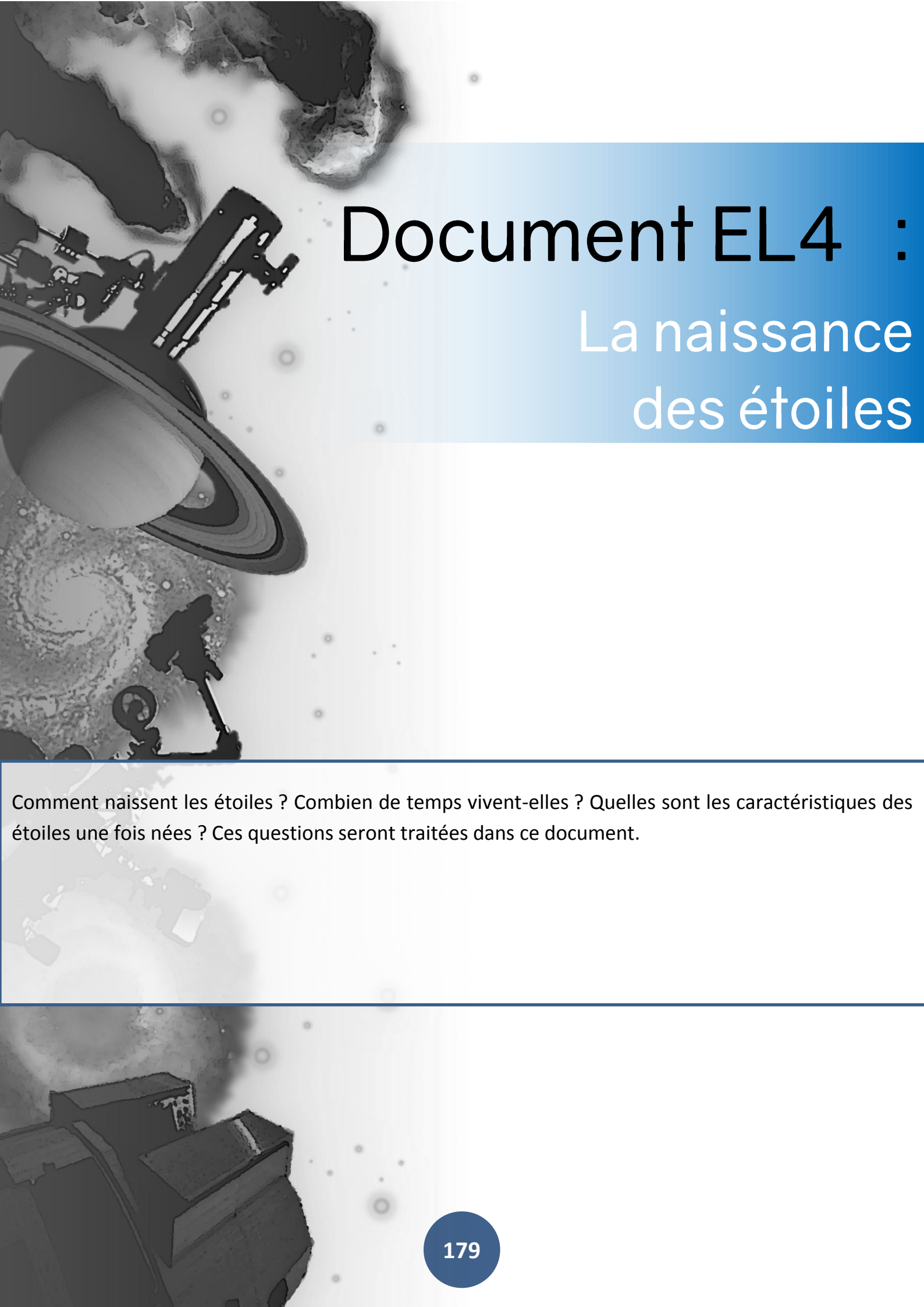


Figure 69 : Diagramme H-R avec les classes de luminosité, les stades d'évolution et les classes spectrales. Crédit : Planète Sciences.



The background of the page is a grayscale cosmic image. In the upper left, the planet Saturn is visible with its rings. Below it, a telescope is shown pointing towards the sky. The sky is filled with numerous stars of varying brightness. In the lower left, there is a dark, rocky celestial body, possibly a comet or asteroid, with a bright nucleus. The title text is overlaid on a blue gradient bar on the right side of the page.

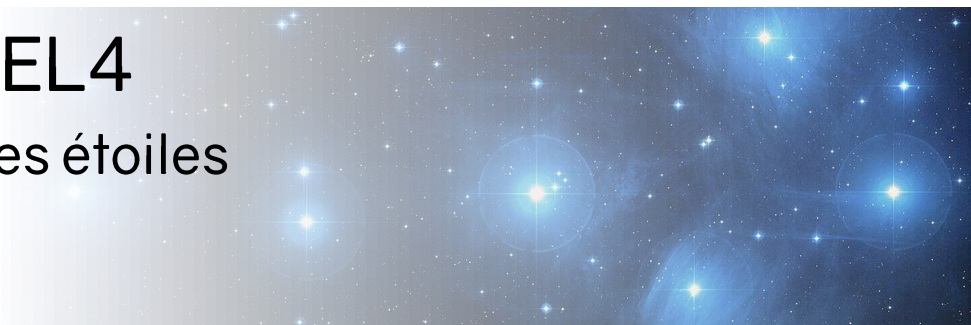
Document EL4 :

La naissance des étoiles

Comment naissent les étoiles ? Combien de temps vivent-elles ? Quelles sont les caractéristiques des étoiles une fois nées ? Ces questions seront traitées dans ce document.

Document EL4

La naissance des étoiles



I. La masse et la métallicité des étoiles

En l'absence d'un événement catastrophique, seuls deux paramètres vont déterminer toute la vie d'une étoile : sa masse à la naissance, ou masse initiale, et sa métallicité, dans une moindre mesure. La métallicité, c'est la quantité de « métaux » présents dans l'étoile, et dans son atmosphère. En astrophysique, on appelle métaux tous les éléments plus lourds que l'hélium. On ne fait pas de différences à ce stade car à eux tous, ils ne représentent que 1% des atomes de l'Univers. Avec 92% d'hydrogène et 7% d'Hélium, les métaux ne pèsent donc pas bien lourd dans la composition d'une étoile. On peut donc se permettre de les regrouper dans un même sac : les « métaux ».

1) La masse d'une étoile

Commençons par définir deux choses :

- La masse initiale M_{ini} d'une étoile est la masse d'une étoile à la naissance. Elle détermine tout d'elle : sa classe spectrale puis son chemin d'évolution de type spectral en type spectral dans l'espace du diagramme H-R.
- La masse actuelle M_{act} d'une étoile est la masse d'une étoile à un moment postérieur à sa naissance. Ce ne peut être utilisé que comme indication : « Cette étoile est plutôt lourde pour être une naine rouge », ou encore « Cette étoile est plutôt légère pour être une naine bleue ». Mais elle n'est pas aussi déterminante que la masse initiale, car plus l'âge de l'étoile avance et plus ces deux valeurs de masse divergent. Une étoile perd en moyenne 40% de sa masse au cours de sa vie, à force d'éruptions, de vent stellaire et bien sûr à cause de sa mort, moment où elle perd son enveloppe.

Plus une étoile est massive, plus son cœur est dense et plus elle est chaude. Les étoiles massives sont bleues. Elle a plus de « combustible » disponible. La conséquence de cela c'est que son combustible est plus rapidement utilisé, et l'étoile vit très peu de temps.

A l'inverse, une étoile faiblement massive possède un cœur moins dense et moins chaud. Sa surface est donc également moins chaude. Les étoiles légères sont rouges et vivent très longtemps.

Une fois sa masse initiale rassemblée, une étoile continue sa vie par ses propres moyens : elle ne gagnera plus de masse, sauf peut-être quelques miettes : un peu de gaz interstellaire ou une planète un peu trop aventureuse. C'est donc rien qu'avec cette quantité de combustible initiale que tout va se passer. La masse initiale détermine la température de l'étoile à sa naissance, et plus tard dans sa vie.

Important

60% des étoiles sont dans des systèmes stellaires. Ce sont des étoiles qui orbitent d'autres étoiles, comme le feraient des planètes. Parfois les deux composantes d'un couple d'étoiles sont tellement proches que la plus lourde attire et absorbe de la matière de la plus légère. Cela change complètement leur chemin d'évolution. On appelle les couples d'étoiles serrés des étoiles binaires.

2) La métallicité d'une étoile

Les étoiles sont des usines : elles fabriquent des éléments plus lourds à partir de noyaux d'atomes d'hydrogène puis de noyaux d'atomes d'hélium par fusion nucléaire. Ce processus dure toute leur vie. Mais c'est seulement à leur mort, lorsqu'elles expulsent leur enveloppe, que ces nouveaux éléments sont libérés dans l'espace. A terme, ils finissent par se mêler à la foule d'atomes d'hydrogène et d'hélium présents dans les nébuleuses, et les nouvelles étoiles qui naîtront de ces nébuleuses contiendront ces éléments lourds, en plus du stock habituel d'hydrogène et d'hélium. Les étoiles contiennent ainsi la marque des générations précédentes.

Cette quantité de « métaux » est mesurable dans le spectre d'une étoile. Cela vient altérer le spectre type de raies que l'on s'attend à avoir pour un type spectral donné. De plus, cela a tendance à rougir une étoile, les métaux de son atmosphère absorbant du bleu. En outre, une étoile à forte métallicité a tendance à se comporter comme une étoile un peu moins lourde qu'elle. On peut donc trouver des étoiles dont la masse initiale ne colle pas exactement avec sa température, car elles ont une forte métallicité.

Outre de permettre de préciser le chemin d'évolution d'une étoile, la mesure de la métallicité permet d'estimer le nombre de générations ayant précédé une étoile donnée. Cette technique permet de détecter des groupes d'étoiles nées à la même époque, et de reconstituer le scénario de formation d'une galaxie, groupe d'étoiles par groupe d'étoiles, pièce de puzzle par pièce de puzzle, structure après structure.

Cela permet aussi de rechercher les plus jeunes étoiles de l'Univers : les étoiles ne contenant pas du tout de métaux. En effet, le Big Bang a fabriqué les 92% d'hydrogène et les 7% d'hélium que l'on connaît, mais extrêmement peu de métaux lourds. Dans les 1% restants, on trouve surtout du Lithium et du Béryllium, les éléments plus lourds sont presque inexistantes. Des étoiles exemptes de métaux sont donc nées très tôt après le Big Bang, avant que la proportion de métaux dans l'Univers n'ait été augmentée par les étoiles.

Métallicité

La composition d'une étoile est définie par trois pourcentages en masse :

- X = pourcentage d'hydrogène
- Y = pourcentage d'hélium
- Z = pourcentage de métaux

$$X + Y + Z = 1$$

$$X = \frac{m_H}{M_{tot}} ; Y = \frac{m_{He}}{M_{tot}}$$

$$Z = \sum_{i>He} \frac{m_i}{M_{tot}}$$

m_H = masse d'un atome d'hydrogène

m_{He} = masse d'un atome d'hélium

m_i = masse d'un atome d'un élément plus lourd que l'hélium
 M_{tot} = masse totale de l'étoile.

Pour le Soleil, on a $X_{\odot}=0.73$, $Y_{\odot}=0.25$, et $Z_{\odot}=0.02$.

3) La naissance d'une étoile

Les étoiles naissent de l'effondrement de nuages de gaz, les nébuleuses. Cette formation d'étoiles se produit principalement dans les bras spiraux des galaxies. Les bras spiraux d'une galaxie sont produits par une onde de densité qui tourne autour du centre galactique. Au passage de cette onde spirale, la matière se trouve comprimée : le gaz et la poussière se rassemblent en nuages opaques, et les étoiles sont plus nombreuses, c'est pour cela qu'on voit les bras spiraux, la « crête des vagues ».



Figure 70 : La galaxie M51, avec ses bras spiraux. La poussière apparaît en marron opaque et le gaz en rose lumineux. Crédits : Télescope spatial Hubble, NASA.

Mais attention, bien que le gaz et la poussière soient bien visibles dans les bras spiraux, il y en a partout dans une galaxie, ces composantes ne sont juste pas assez denses en dehors des bras pour être visibles.

Quand les nébuleuses sont comprimées, les différentes parties plus denses vont s'attirer les unes les autres par gravité, et former des grumeaux, qui vont se densifier de plus en plus vite. Un combat va débuter entre la gravité qui cherche à faire s'effondrer les grumeaux sur eux-mêmes, et le champ magnétique produit par les ions présents dans ces grumeaux qui cherche à repousser la matière. Par dépassement de seuils critiques successifs, certains grumeaux vont finir par s'effondrer sur eux-mêmes et par conséquent se mettre à chauffer. Au-delà d'un certain seuil de température, les atomes d'hydrogène se trouvent ionisés et leurs noyaux fusionnent pour produire de l'hélium et de la lumière : l'étoile est née.

Dans la photographie ci-dessous, qui est un agrandissement de l'un des fameux piliers de la nébuleuse de l'aigle, chaque petit grumeau sur la « peau » du nuage opaque de poussière contient une étoile en formation.



Figure 71 : Nébuleuse de l'aigle, M16, par le télescope spatial Hubble.
Crédits : Télescope spatial Hubble, NASA.

Sur cette image on voit que plusieurs grumeaux se trouvent assez rapprochés. En effet, 90% des étoiles naissent en groupes. Cela s'appelle des amas d'étoiles.

4) Les amas d'étoiles

Partout dans l'Univers, les étoiles naissent en amas, pour 90% d'entre elles. Les 10% d'étoiles restantes naissent dans des parties isolées et peu massives des nuages. Il naît également des étoiles et des amas d'étoiles lors de formations secondaires d'étoiles : elles se produisent dans l'onde de choc produite par une supernova. Quand une supernova se produit, l'onde de choc vient comprimer les nuages proches, mais l'effet est moins puissant que la compression des bras spiraux.



Figure 72 : Nébuleuse NGC602 avec en son cœur un jeune amas d'étoile issu d'elle. Crédits : Télescope spatial Hubble, NASA.

Sur cette photographie on voit la nébuleuse NGC602 et deux amas d'étoiles. L'amas en bas à droite n'a pas plus de 40 millions d'années, il vient de naître de la nébuleuse et ronge peu à peu celle-ci avec son rayonnement de lumière et de particules. A gauche, on voit un deuxième amas, éloigné du gaz, et donc un peu plus âgé.

On voit également des piliers de poussière, opaques sur la coquille de la nébuleuse, dans lesquels sont en train de naître des étoiles.

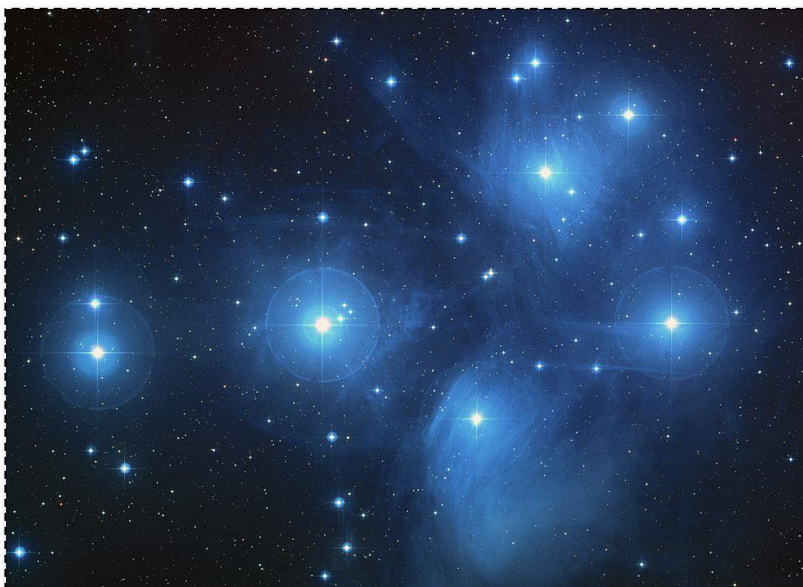


Figure 73 : Les Pléïades, un amas d'étoiles âgé d'environ 100 millions d'années. Crédit : Télescope spatial Hubble, NASA.

Au bout de 40 millions d'années, l'amas d'étoiles parvient à évacuer tout son gaz, la vague de l'onde est passée, et l'amas se retrouve seul. Le gaz étant parti, l'amas est moins lourd et perd peu à peu ses étoiles, qui sont moins attirées par la masse globale de l'amas. Au bout d'au-plus 1 milliard d'années, l'amas est disloqué par les forces de marée des autres objets massifs de la galaxie.

Les Pléïades, un amas très connu et visible à l'œil nu, est constitué d'étoiles de classe spectrale B. Il a environ 100 millions d'années. Il passe par hasard devant un nuage de gaz qu'il illumine de bleu. Mais ce nuage n'est pas celui dont les Pléïades sont issues.

5) Les étoiles multiples

Au sein des amas et hors des amas, 60% des étoiles naissent dans des systèmes d'étoiles, ou étoiles multiples. Les étoiles dans un amas sont liées par gravité à l'amas de part sa masse globale mais sont indépendantes les unes des autres. Dans un système d'étoiles, ce sont les étoiles entre elles qui sont liées par gravité : comme dans un système planétaire, des étoiles tournent autour de leurs compagnes, dans diverses configurations. Alpha Centauri est par exemple un système triple avec Alpha Centauri A et B qui tournent autour de leur centre de gravité mutuel, et Proxima Centauri qui orbite autour du couple.

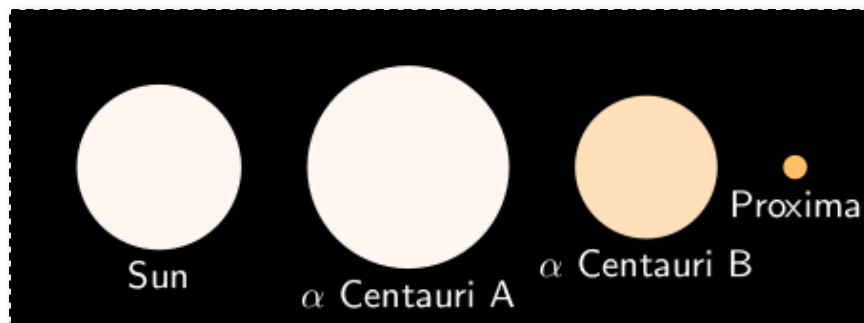


Figure 74 : Le système triple Alpha Centauri, avec le Soleil pour comparaison. Source : Wikipedia.

Alpha Centauri A est une naine comme le Soleil, de type G2V, mais légèrement plus chaude, Alpha Centauri B est une naine orange de type K1V, et Proxima Centauri une naine rouge de type M6Ve.

Dans un système multiple, on construit une hiérarchie des étoiles et des planètes afin de pouvoir les nommer. On procède comme pour la description d'un arbre : vu de loin, le système apparaît sous forme d'un point. Quand on approche on remarque deux composantes : un couple A et B, et un troisième astre, C. On ne va pas plus près pour C, qui n'a aucun compagnon connu. On zoome alors sur A-B : on voit A seul, et B, qui est en fait constitué de deux astres : une étoile, Ba, et une planète, Bb.

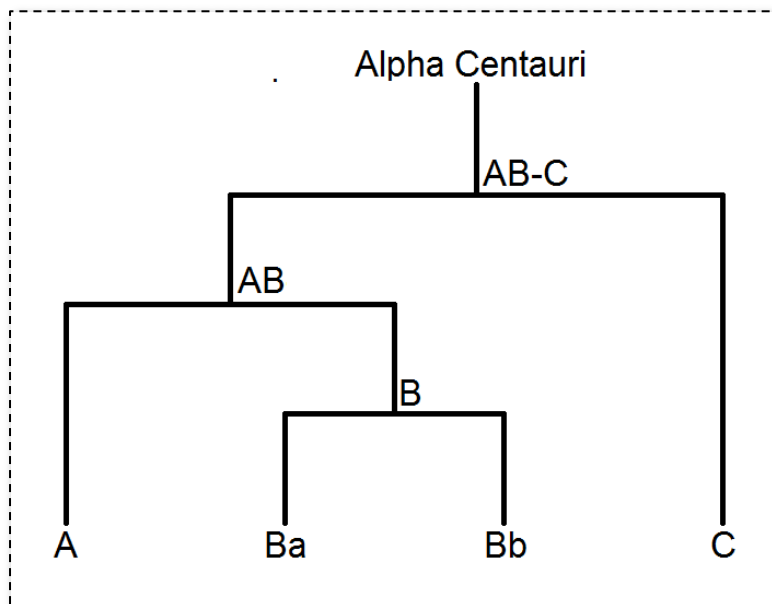


Figure 75 : Hierarchie et nomenclature du système Alpha Centauri. Source : Wikipedia.

Si Ba avait un compagnon stellaire, on le nommerait le couple Ba1 et Ba2, la planète Bb tournant autour du couple. Et si Ba2 avait une planète, on l'appellerait Ba2b, et l'étoile Ba2a, et ainsi de suite.

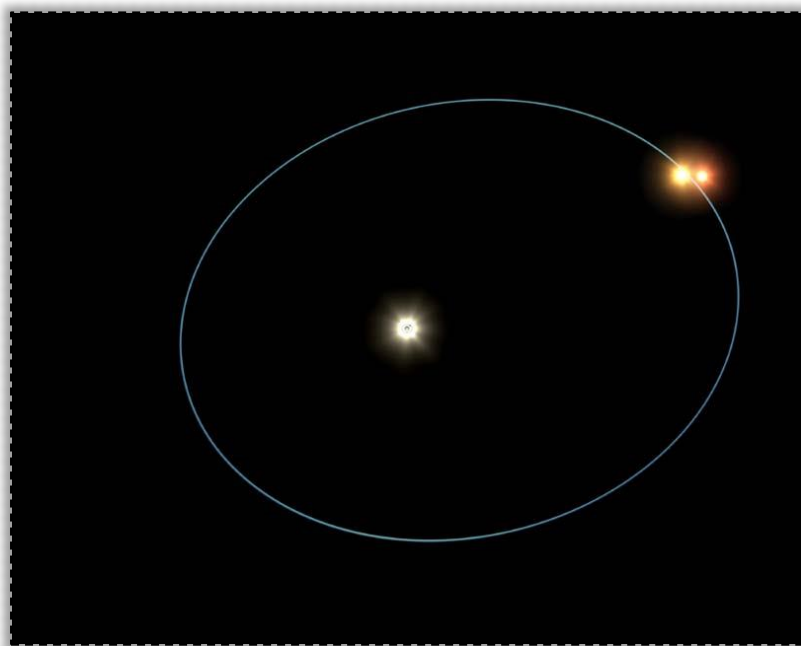


Figure 76 : Vue d'artiste du système de HD188753, de configuration similaire à Alpha Centauri, sauf qu'ici c'est le couple qui tourne autour de la troisième étoile. Source : Wikipedia.

Et il existe aussi des systèmes doubles, les plus nombreux, et plus rare, des systèmes quadruples comme Capella, quintuples, comme Delta Orionis, et même sextuple, comme Castor, voir septuple, comme AR Cassiopeiae !

En fait, la plupart des étoiles que vous connaissez sont multiples : Albireo (3), Sirius (2), Algol (3), Fomalhaut (3), Polaris (étoile polaire) (3), Mizar (2), Antarès (2), Procyon (2), Dubhe (2)...

6) La fonction de masse initiale des étoiles

Un amas d'étoiles contient entre quelques dizaines d'étoiles et quelques dizaines de milliers d'étoiles. Ce qui est étonnant, c'est que partout dans l'Univers, au sein d'un amas d'étoiles, ou bien d'une distribution d'étoiles naissantes isolées, on retrouve la même répartition d'étoiles selon les masses. Il existe plusieurs modèles de distribution pour la caractériser, par exemple la distribution de Salpeter, publiée en 1955. Une loi similaire mais ayant des exposants différents selon trois régimes de masse différents a été publiée par Kroupa en 2001.

Fonction de masse initiale (IMF) : distribution de Salpeter

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-\alpha}$$

M = masse de l'étoile
en $M_{\odot}$

$M_{\odot}$ = masse du Soleil

$\alpha = -2.35$

Voilà à quoi ressemble cette distribution une fois tracée. On se rend compte que pour 10 millions d'étoiles ayant une masse de $1 M_{\odot}$, il n'existe qu'une étoile de $100 M_{\odot}$. Ce sont les étoiles bleues les plus chaudes, de classe spectrale O. Et pour une étoile de la masse du Soleil, on trouve 10 étoiles de $0.1 M_{\odot}$. Ce sont les naines rouges, de classe spectrale M. Et les naines brunes sont encore quelque chose comme 10 à 100 fois plus nombreuses que les naines rouges (en-dehors des limites de ce graphe). En fait, 95% des étoiles qui naissent à un instant t ont une masse plus petite ou égale à celle du Soleil.

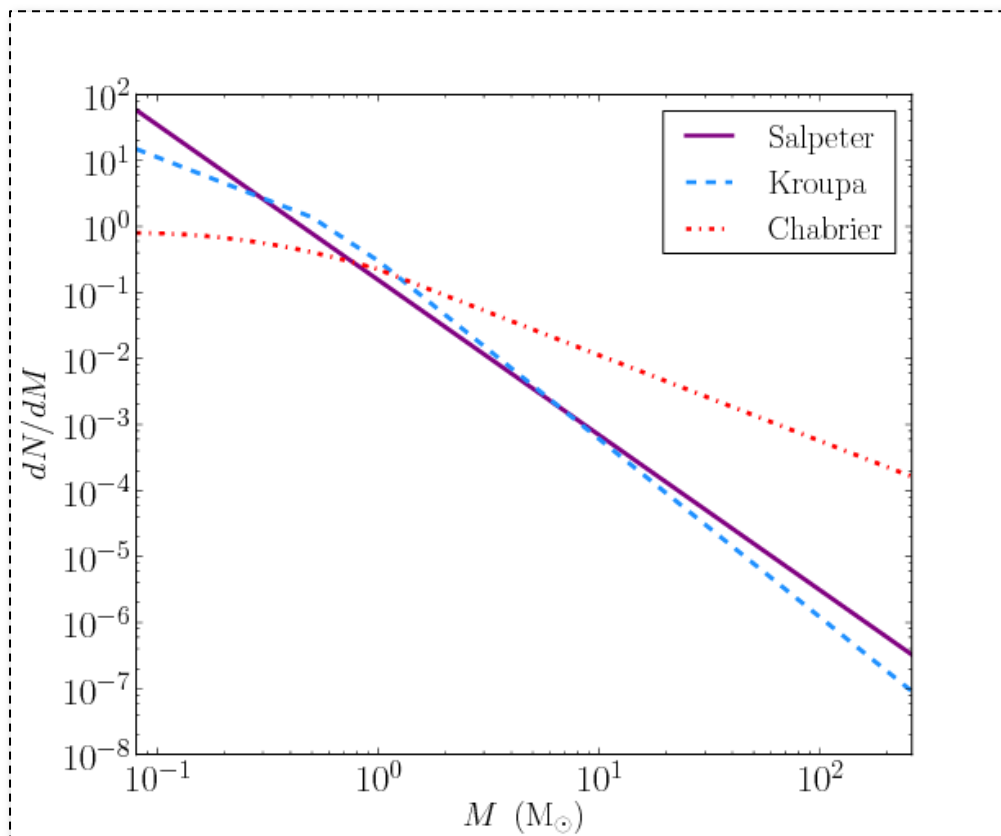


Figure 77 : Tracé de fonctions de masse initiale. Crédit : Crosby, Brian D. *et al.* *Astrophys.J.* 773 (2013) 108 arXiv:1306.4679 [astro-ph.CO].

Mais ces petites étoiles qui forment le gros des troupes sont aussi celles qui sont en majeure partie invisibles. Ce sont des étoiles de type spectral GV, KV, MV, L et T. Ces petites étoiles ont un maximum d'émission dans le orange, le rouge ou l'infrarouge, et comme leur surface est petite, leur luminosité bolométrique est très faible. Ce qui fait que ces étoiles ne représentent qu'une toute petite partie des quelques milliers d'étoiles visibles à l'œil nu. La majeure partie des étoiles visibles à l'œil nu sont des étoiles de types spectraux GV à BV, donc des étoiles brillantes et chaudes, Nous voyons aussi des étoiles super-géantes rouges ou géantes rouges (classes spectrales G à M avec classes de luminosité IV à I).

7) Les étoiles juste après leur naissance

Quand un amas d'étoiles naît, toutes les étoiles qui le composent ont une masse initiale différente, et ces masses suivent la fonction de masse initiale des étoiles, partout dans l'Univers. Si l'amas est assez massif, s'il contient assez d'étoiles, on va trouver à l'intérieur des étoiles ayant des masses allant de $0.01 M_{\odot}$ (masse solaire) à $100 M_{\odot}$. Et 95% de ces étoiles ont une masse inférieure ou égale à celle du Soleil. Ces masses initiales (avec l'aide

de la métallicité) vont déterminer le rayon, et la température et donc la luminosité de ces étoiles. Elles vont se répartir dans le diagramme H-R le long de la **séquence principale**.

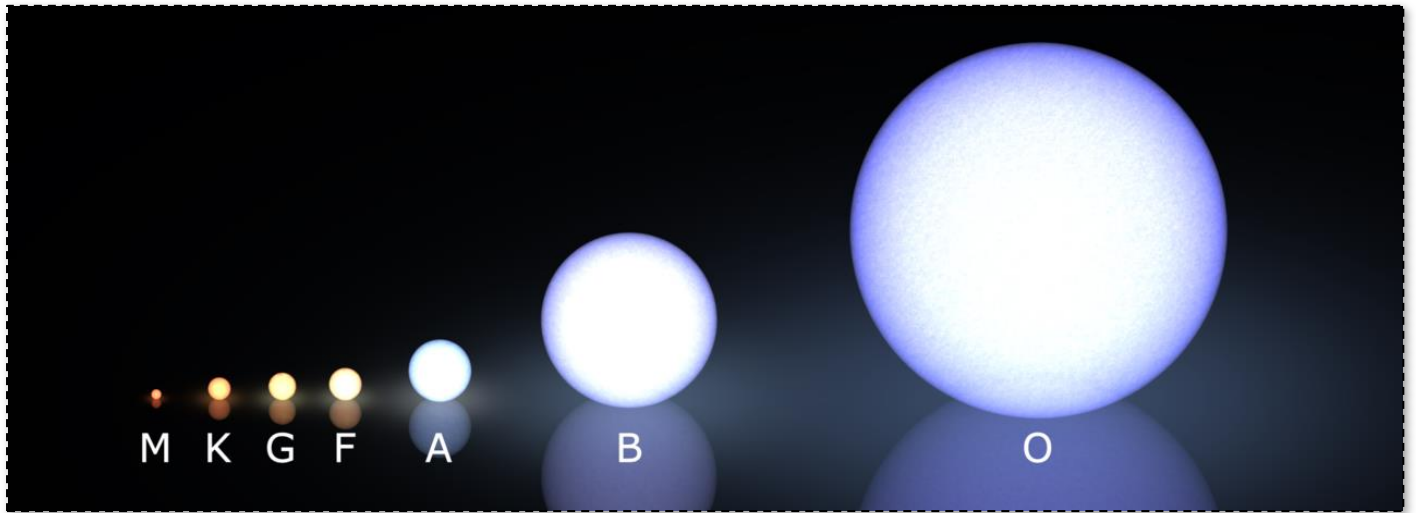
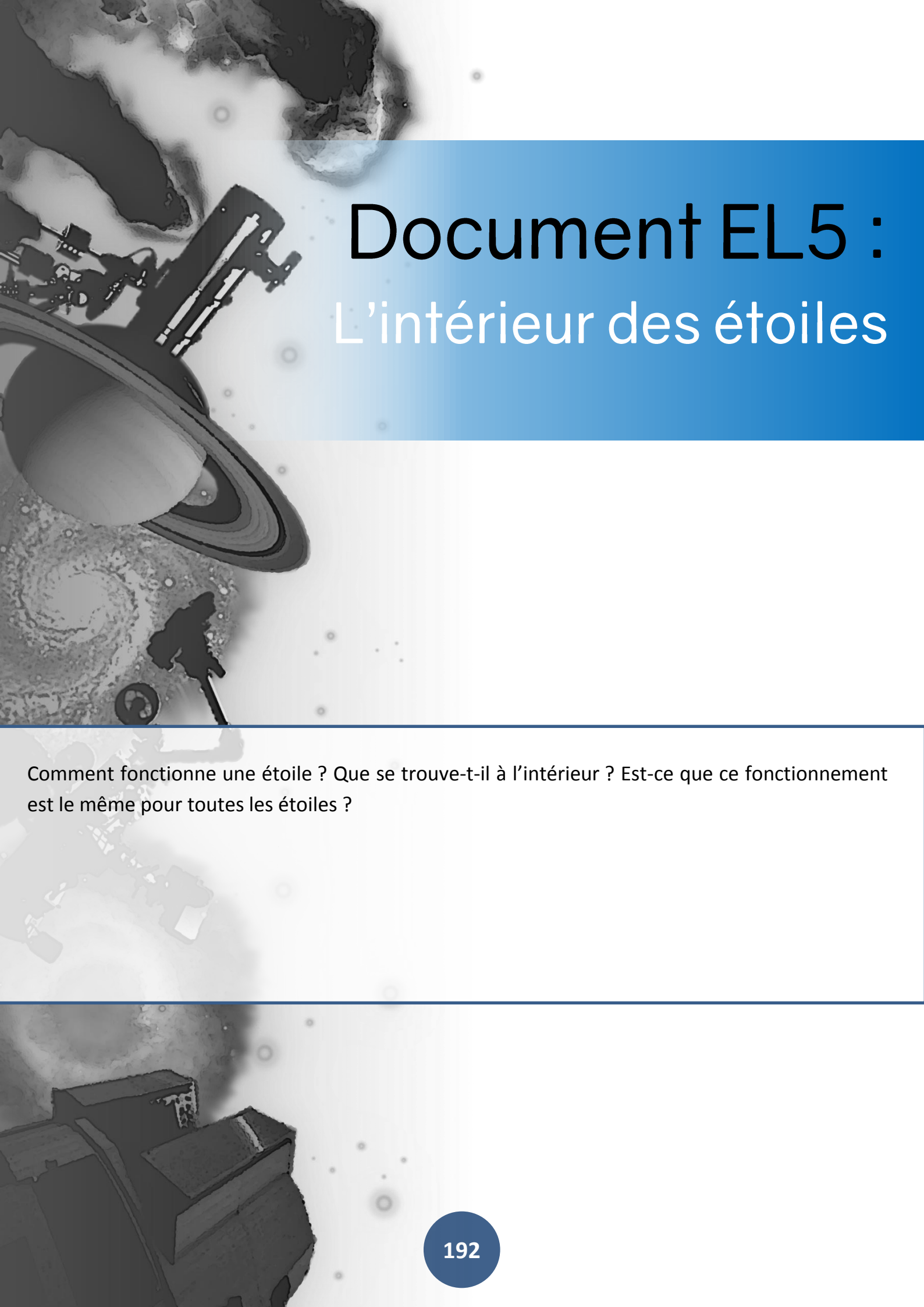


Figure 78 : Les étoiles de la séquence principale classées selon leur classe spectrale (leur température ou leur couleur). Source : Wikipdia.

Les étoiles restent sur la séquence principale tant qu'il leur reste de l'hydrogène à consommer en leur cœur. C'est l'étape la plus longue de leur vie. Elles vont s'en éloigner ensuite. Pour connaître les différents destins de ces étoiles, on peut diviser la séquence principale en différentes boîtes de masse, correspondant aux différentes classes spectrales.





Document EL5 : L'intérieur des étoiles

Comment fonctionne une étoile ? Que se trouve-t-il à l'intérieur ? Est-ce que ce fonctionnement est le même pour toutes les étoiles ?

Document EL5

L'intérieur des étoiles



I. Qu'est-ce qu'une étoile

1) La structure d'une étoile

Une étoile c'est une boule de gaz dense et chaud qui produit de la lumière et des éléments chimiques par fusion nucléaire. Elle est composée d'un cœur, d'une enveloppe, d'une surface, d'une atmosphère et d'une couronne.

Le **cœur** est la partie la plus chaude de l'étoile car elle subit la gravité de toute la matière au-dessus. C'est aussi la partie la plus dense de l'étoile. C'est là qu'est produite la lumière par fusion nucléaire.

L'enveloppe vient juste au-dessus. L'énergie se propage (difficilement) à travers elle en plusieurs millions d'années pour atteindre la surface. Chaque photon produit au cœur est sans cesse absorbé par les atomes de l'enveloppe, puis réémis dans une autre direction, ce qui rend sa trajectoire très complexe et rend son trajet très long.

La surface, autrement appelée photosphère représente l'interface entre l'intérieur de l'étoile et l'espace. C'est à partir d'ici que la lumière peut se propager en ligne droite dans toutes les directions. C'est cette partie de l'étoile que l'on voit. Tout ce qui se situe à l'intérieur est opaque, à la fois à la lumière qui viendrait de l'extérieur et à la lumière qui est produite à l'intérieur : la lumière venant du cœur n'est que réémise par la surface au bout de son parcours du combattant. La surface est la partie la plus froide de l'étoile (plusieurs milliers ou dizaines de milliers de Kelvins), car éloignée de ses parties les plus denses.

L'atmosphère et la couronne sont très diffuses, composées de plasma, des gaz tellement chauds que les électrons sont séparés des noyaux d'atomes, que l'on appelle alors des ions. La température remonte ici à plusieurs millions de Kelvins. Ces structures sont

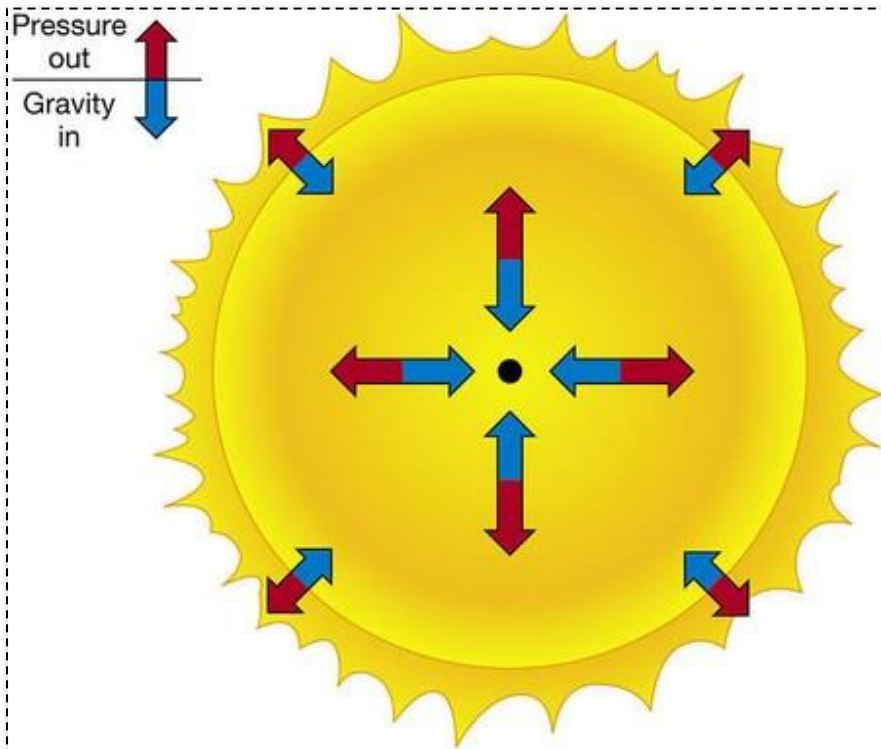
beaucoup moins lumineuses que la surface, c'est pourquoi on doit utiliser un coronographe qui masque l'étoile pour les observer.

2) Une étoile est un équilibre

Une boule de gaz, comment ça reste en forme de boule ? L'étoile est le siège d'un conflit entre deux forces : la gravité, qui a tendance à faire s'effondrer l'étoile sur elle-même, et les forces issues des pressions internes, qui ont tendance à la faire s'étendre.

Ces pressions internes sont dues à la différence de température entre la surface (« froide ») et le cœur (« chaud »), qui est, elle, due à l'action de la gravité. Tant qu'il y a production d'énergie au cœur de l'étoile, la différence de température est suffisante pour que la pression interne soit forte. Si la pression interne est forte, la force de gravité est contrebalancée. On peut s'imaginer l'énergie qui cherche à sortir comme ce qui résiste à l'effondrement de l'étoile sur son cœur, et à son cœur sur lui-même.

Si à un moment donné de la vie de l'étoile cet équilibre est rompu, c'est-à-dire si la production d'énergie en son cœur venait à baisser voire à s'arrêter, son cœur va s'effondrer sur lui-même.



La gravité rend le cœur de l'étoile plus dense que son enveloppe. C'est alors dans le cœur qu'il fait le plus chaud. La température, de plusieurs millions de degrés, y est suffisante pour que des réactions de fusion nucléaire se produisent. C'est la source d'énergie qui permet à l'étoile d'exister, et de ne pas s'effondrer.

Figure 79 : Equilibre des forces dans l'étoile. Crédits : Université de Nice.

3) La fusion nucléaire au cœur de l'étoile

Une étoile est composée à sa naissance, comme l'Univers dans son ensemble, de 92% d'hydrogène, 7% d'hélium et 1% d'éléments chimiques plus lourds. Le cœur de l'étoile est assez chaud pour que les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium. C'est cette fusion qui produit de l'énergie. Cette réaction nucléaire est en fait une chaîne de réactions appelée chaîne proton-proton.

Etape 1 :

Fusion de deux protons, ou noyaux d'hydrogène. L'un des deux se change en neutron.

Production : un noyau de deutérium, un positron, un neutrino

Etape 2 :

Fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau d'hydrogène.

Production : un noyau d'hélium 3

Etape 3 :

Fusion de deux noyaux d'hélium 3.

Production : un noyau d'hélium 4 et deux noyaux d'hydrogène

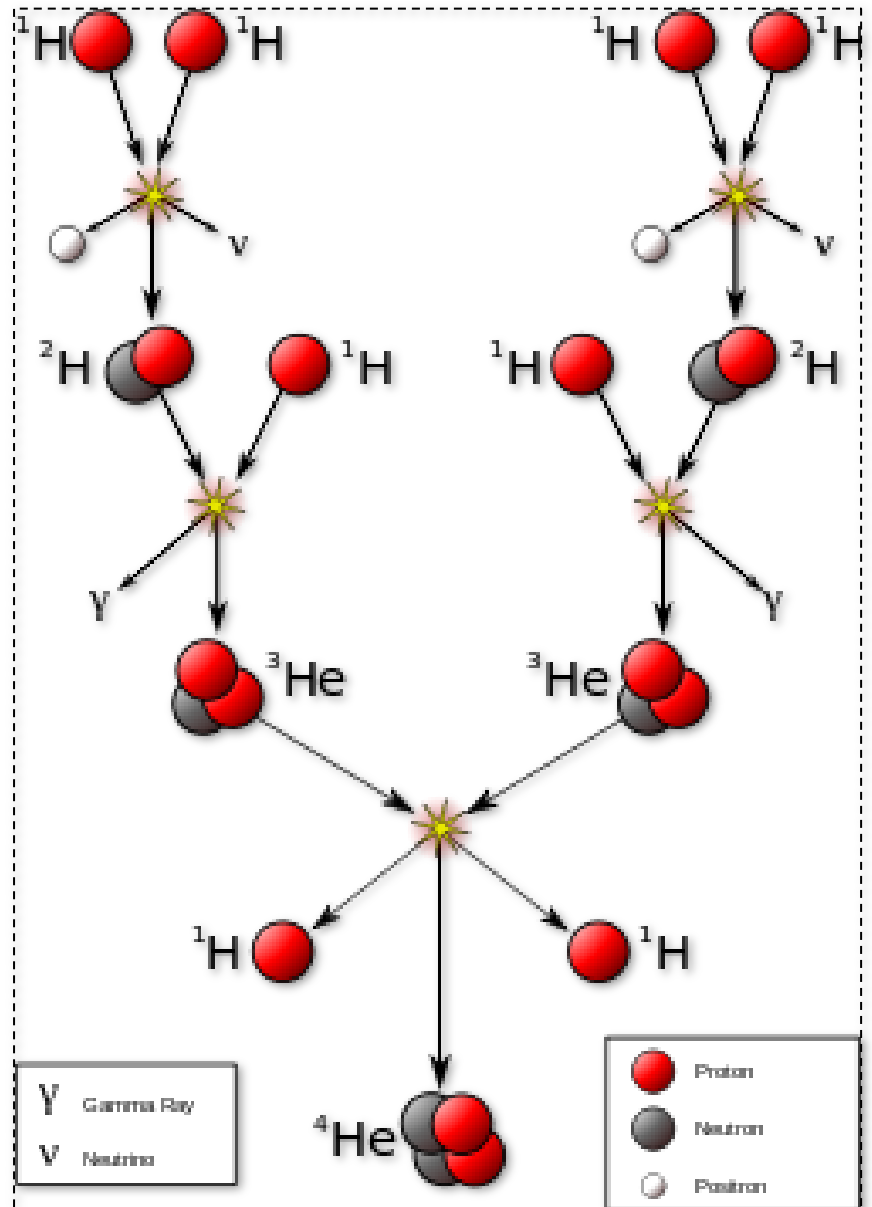


Figure 80 : Chaîne proton-proton. Source : Wikipedia.

C'est à l'étape 2 que la lumière est produite. Mais il y a beaucoup d'énergie en jeu dans la fusion nucléaire, et les photons qui sont produits ont une grande énergie, c'est-à-dire une très courte longueur d'onde. Ce sont des photons gamma. C'est la succession d'absorption et de réémissions durant leur trajet dans l'enveloppe de l'étoile vers la surface de l'étoile, et un autre phénomène que l'on verra plus loin qui vont leur faire perdre cette énergie et les rendre visibles à nos yeux.

Durant la majeure partie de leur vie, lorsqu'elles sont sur la séquence principale du diagramme H-R, les étoiles suivent ce mécanisme. Ce sont des usines à hélium et à lumière. Lorsque leur cœur s'emplit totalement d'hélium, la fusion de l'hydrogène s'arrête, la lumière arrête d'être produite, et l'équilibre de l'étoile est rompu : l'étoile va évoluer. On verra cela dans le document « L'évolution des étoiles ».

4) La structure interne d'une étoile

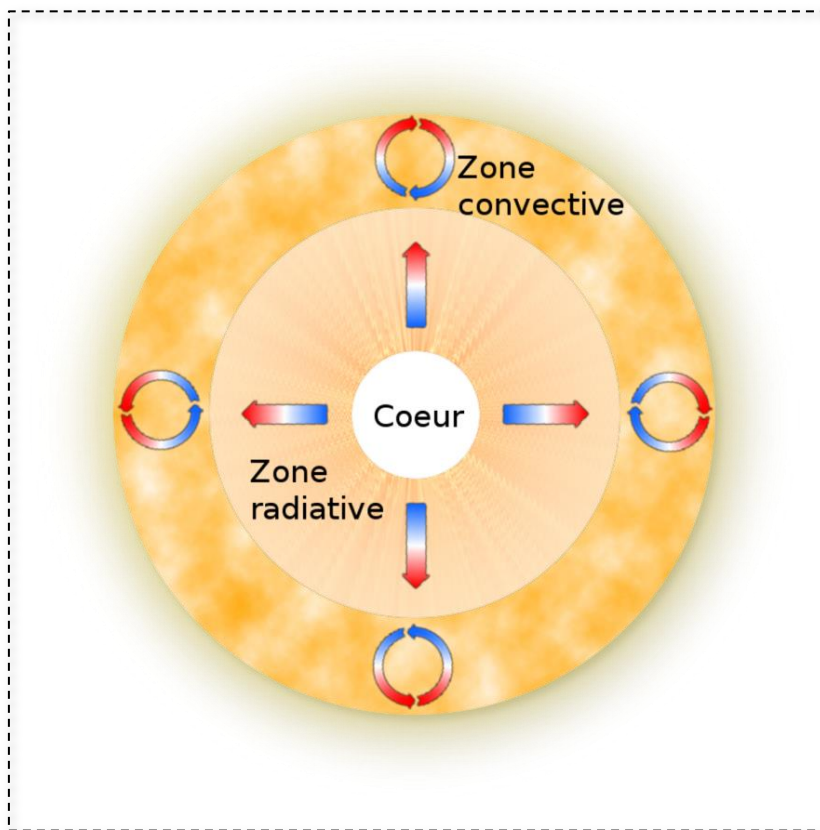
Il existe deux moyens pour l'étoile d'évacuer son énergie, produite en son cœur, vers l'extérieur : la transmission de photons, mais aussi le déplacement de matière de différentes températures. Ces deux phénomènes ont lieu dans l'enveloppe de l'étoile au sein de deux zones distinctes : la zone radiative et la zone convective.

Prenons le cas d'une étoile ayant une masse similaire au Soleil. Les photons gamma produits au cœur de l'étoile se propagent dans la partie basse de l'enveloppe, vers l'extérieur. Ils sont sans cesse absorbés et réémis par les ions environnants qu'ils rencontrent. C'est la zone radiative. Les photons mettent 1 million d'années à traverser cette zone et perdent de l'énergie : leur longueur d'onde augmente. Cette énergie est perdue un peu plus à chaque rencontre et transférée à ces ions, qui vont se mettre en mouvement.

Dans le haut de la zone radiative, les photons n'ont plus assez d'énergie pour continuer leur chemin et finissent par être complètement absorbés et à transmettre toute leur énergie à la matière environnante, qui se met à bouger. On entre dans la zone convective : c'est maintenant la matière qui va évacuer l'énergie de l'étoile et non plus les photons.

Pour comprendre la zone convective, située entre la zone radiative et la surface de l'étoile, il faut imaginer une casserole d'eau chauffée. L'eau, chauffée par la plaque de cuisson, au fond de la casserole, monte. Arrivée à la surface, au contact de l'air froid, elle se refroidit, et redescend. Elle chauffe en s'approchant de la plaque, et remonte une fois en bas, et ainsi de suite. C'est ainsi que la chaleur issue de la plaque se répartit peu à peu dans l'eau : par

des boucles de convection. Dans une étoile, le rôle de la plaque est joué par la frontière avec la zone radiative, et c'est l'interface avec l'espace extérieur qui joue le rôle de l'air froid.



Dans le bas de la zone convective, l'énergie est transmise par la zone radiative à la matière, qui se met à se déplacer vers la surface. En montant, la matière perd de l'énergie : elle refroidit. Arrivée à la surface, l'énergie est émise vers l'extérieur sous forme de lumière. Comme cette énergie a été grandement amoindrie par les mécanismes de l'étoile, la lumière qui émerge de la surface a une plus grande longueur d'onde que celle qui est produite par son cœur. Elle est dans le domaine de la lumière visible, ce qui nous permet de voir les étoiles.

Figure 81 : Structure d'une étoile de masse similaire à celle du Soleil. Crédit : Planète Sciences.

Une fois la matière ainsi vidée d'une partie de son énergie, elle redescend dans l'étoile et chauffe en descendant. Arrivée à l'interface avec la zone radiative, elle atteint un maximum de température et remonte. Et ainsi de suite.

Les **naines rouges**, moins massives que le Soleil n'ont pas un cœur assez chaud pour avoir une zone radiative : elles sont entièrement convectives.

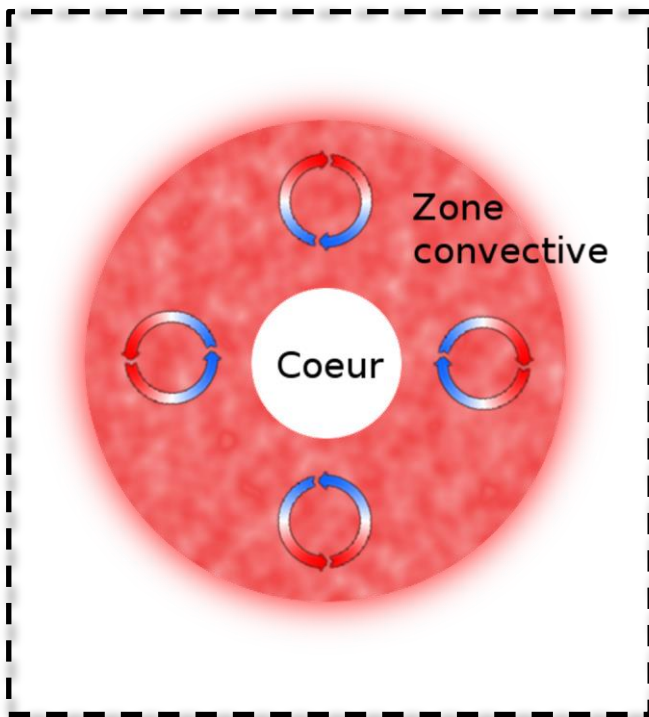


Figure 82 : Structure interne d'une naine rouge. Crédit : Planète Sciences.

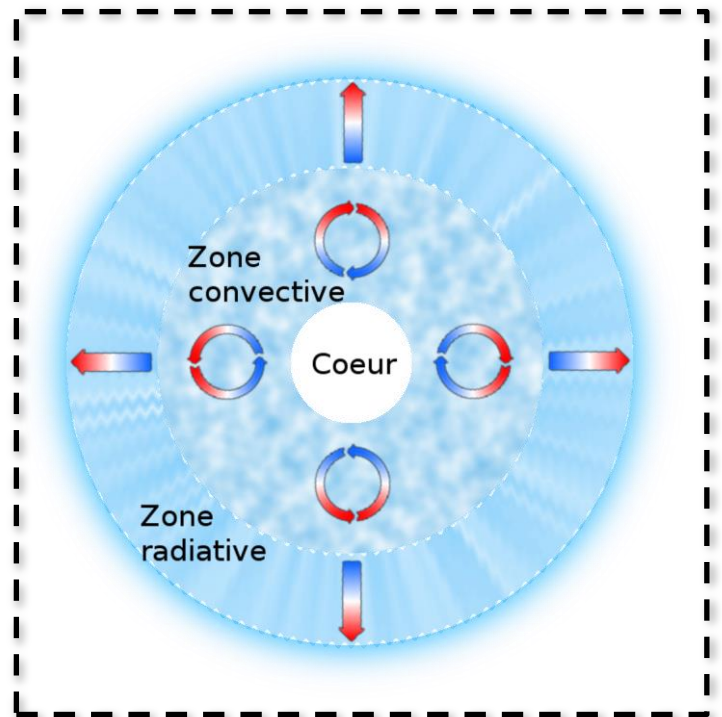


Figure 83 : Structure interne d'une étoile bleue de la séquence principale. Crédit : Planète Sciences.

Les étoiles bleues de la séquence principale, ou **naines bleues**, plus massives que le Soleil, ont un cœur très chaud. On a vu plus haut que le mécanisme radiatif fonctionne aux températures élevées, et le mécanisme de convection fonctionne aux températures plus basses. Mais il existe un seuil de température, très élevé, au-dessus duquel c'est de nouveau la convection qui se met en place. C'est le cas dans ces étoiles massives : il y a d'abord une zone de convection qui évacue l'énergie du cœur vers une zone radiative au-dessus. Dans ces étoiles massives, la température baisse très peu entre le bas et le haut de la zone radiative : cette zone atteint directement la surface. La lumière qui en sort est plus énergétique : ces étoiles émettent dans le bleu, le violet ou l'ultraviolet. Dans les étoiles massives, les deux zones radiatives et convectives sont inversées par rapport aux étoiles de faible masse comme le Soleil.



A cosmic background image featuring a detailed view of Saturn with its rings in the lower-left corner. A telescope is positioned as if observing the planet. The background is filled with various celestial bodies, including stars and nebulae, creating a deep space atmosphere.

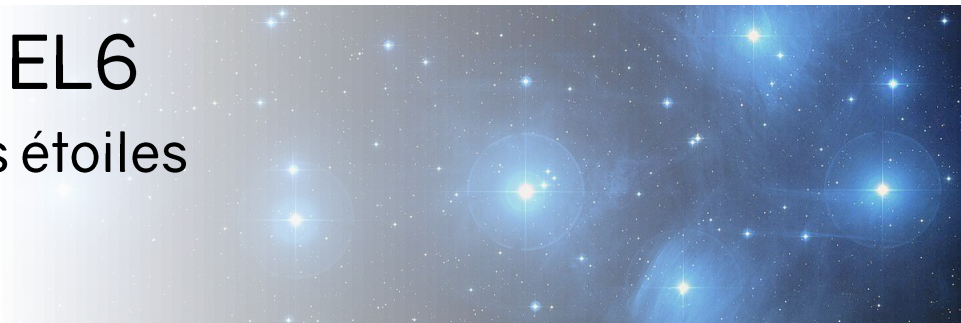
Document EL6 : L'évolution des étoiles

Comment fonctionne une étoile ? Que se trouve-t-il à l'intérieur ? Est-ce que ce fonctionnement est le même pour toutes les étoiles ?

En changeant de luminosité et de température au cours de leur vie, les étoiles vont se déplacer dans le diagramme H-R. C'est maintenant que l'on va pouvoir expliquer l'existence des différents groupes d'étoiles sur le diagramme H-R et leurs dénominations.

Document EL6

L'évolution des étoiles



I. Des naines aux géantes

1) Comment une étoile grossit-elle ?

Une étoile passe la majeure partie de sa vie dans la séquence principale, à consommer l'hydrogène de son cœur pour produire de l'énergie et de l'hélium. Il arrive un moment où le cœur de l'étoile est constitué en majorité d'hélium. L'hydrogène autour du cœur est à une température assez chaude pour continuer à fusionner quelques temps mais la fusion au cœur de l'étoile s'arrête. La fusion autour du cœur a pour effet de réchauffer l'enveloppe, qui s'étend. L'étoile grandit, et par conséquent sa surface, éloignée du cœur, refroidit : elle devient rouge. L'étoile est devenue une géante rouge.

Pendant ce temps, le cœur de l'étoile, sous l'action de la gravité, s'effondre. Et à ce moment, il y a deux destins possibles.

- Si l'étoile fait moins de 2 fois la masse du Soleil, son cœur s'effondre jusqu'à devenir une naine blanche et son enveloppe continue de s'étendre jusqu'à s'en aller complètement pour former une nébuleuse planétaire.
- Si l'étoile est plus lourde, son cœur s'effondre et est assez chaud pour fusionner l'hélium et fabriquer du béryllium, du carbone et de l'oxygène.

2) Les étoiles sont des usines

Quand il n'y a plus d'hélium et que le cœur est constitué de carbone et d'oxygène, l'étoile s'effondre à nouveau. L'hélium fusionne autour du cœur. Ensuite, c'est le même scénario : si l'étoile est légère, elle s'arrête là et expulse son enveloppe et finit en naine blanche ; si l'étoile est plus lourde, son cœur s'effondre et se met à fusionner de nouveau, pour former du sodium, du néon et du magnésium. Ce scénario à deux issues continue ainsi, et les

étoiles les plus massives finissent avec un cœur de fer et une explosion de supernova. L'intérieur d'une étoile très massive en fin de vie se présente comme un oignon : chaque couche contient un élément donné, issu d'une étape donnée de la fusion.

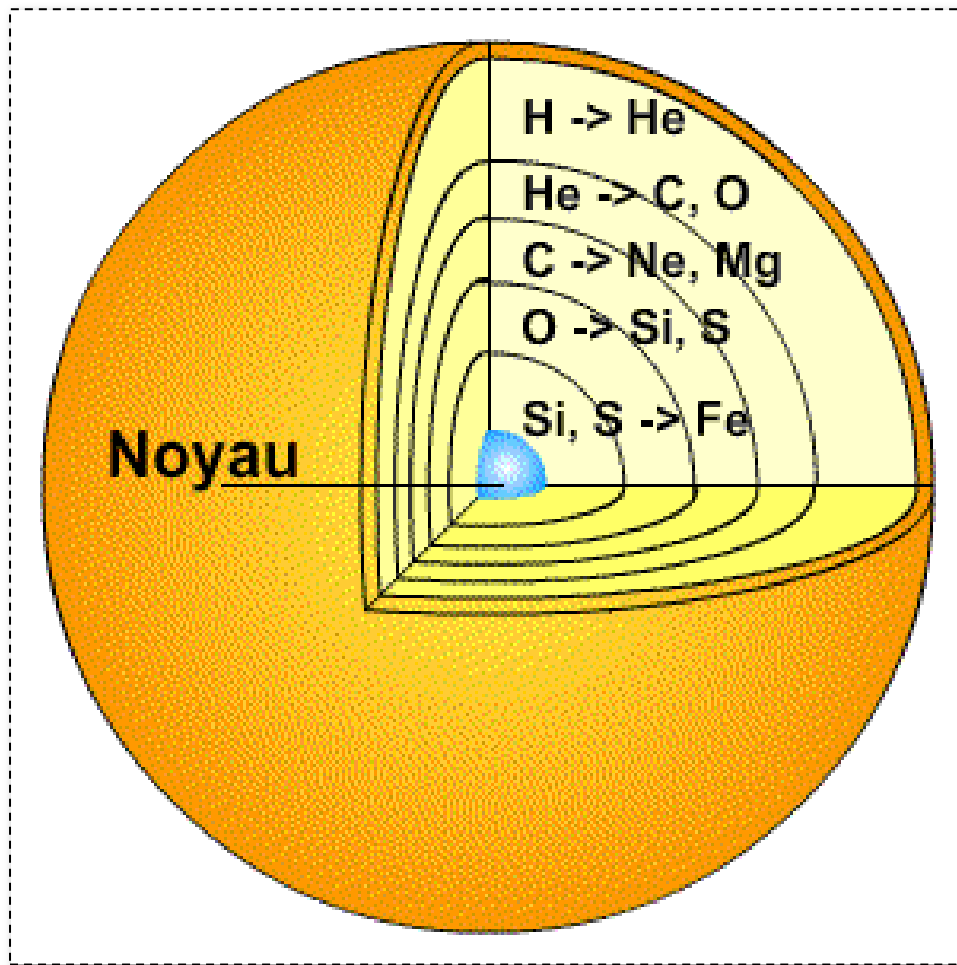


Figure 84 : Composition d'une étoile à la fin de son chemin d'évolution.
Crédit : Observatoire de Paris – UFE.

3) Qu'est-ce qui détermine la vie d'une étoile ?

C'est là qu'intervient la fameuse masse initiale dont on a parlé plus haut. Plus une étoile va naître massive, plus elle aura de combustible, c'est-à-dire d'hydrogène, pour fonctionner. Mais également, plus elle naît massive, plus son cœur est dense et chaud. L'hydrogène va donc être utilisé beaucoup plus rapidement que dans une étoile plus légère. Cela veut dire que les étapes de la vie d'une étoile massive vont passer beaucoup plus vite que celles de la vie d'une étoile légère.

En outre, une étoile massive aura un cœur assez chaud après avoir dépensé son hélium pour fabriquer des éléments encore plus lourds. Elle passera par des étapes supplémentaires que les étoiles légères ne connaissent pas.

Pour résumer, plus une étoile naît massive, plus son cœur est chaud, plus sa vie sera courte, complexe et plus elle contiendra d'étapes d'évolution. En outre, les étoiles massives ont des fins plus violentes que les étoiles légères.

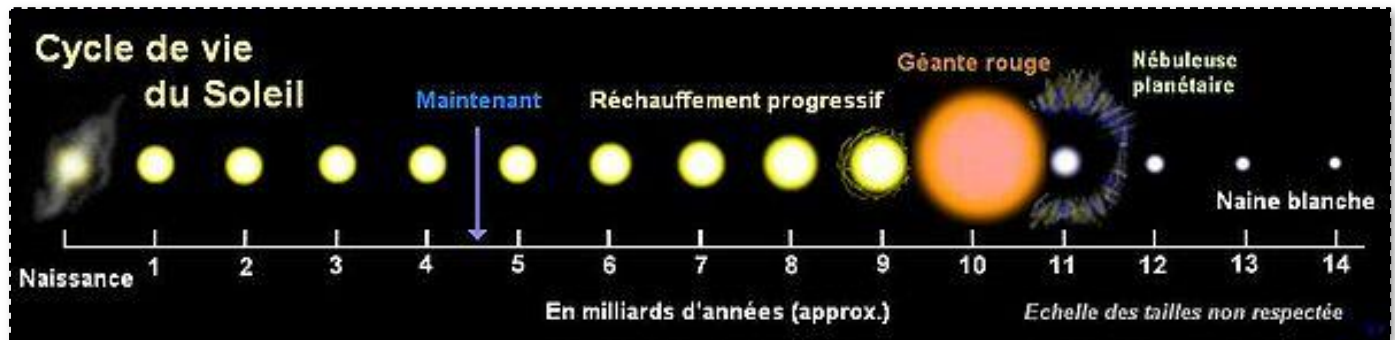


Figure 85 : Une étoile comme le Soleil deviendra géante rouge puis perdra son enveloppe et deviendra une nébuleuse planétaire avec une naine blanche au milieu : le cœur de l'étoile. Source : Wikipedia.

II. Les chemins d'évolution des étoiles

Décrivons les caractéristiques initiales et les chemins d'évolution de ces étoiles, c'est à dire l'histoire de leur vie.

1) Les naines brunes : entre 0.012 et $0.07 M_{\odot}$, classes spectrales Y, L et T

Températures	<1000 K à 2000 K	Luminosités	< $0.00015 L_{\odot}$
Couleur	rouge sombre, infrarouge	Rayons	1 à 4 rayons de Jupiter
Durée de vie	1000 milliards d'années	Fin de vie	assombrissement
Chemin d'évolution	Naine brune > naine brune éteinte		

Ce sont des étoiles avortées. Ces astres ont une masse les situant entre les plus lourdes planètes géantes gazeuses et les plus légères des étoiles, les naines rouges. Au-dessous de $0.07 M_{\odot}$, un astre n'a pas un cœur assez chaud pour entamer la fusion des atomes

d'hydrogène. C'est la définition officielle d'une étoile : un astre assez massif pour fabriquer de l'hélium et de la lumière par la fusion de l'hydrogène. Les naines brunes ne pouvant pas se le permettre, ce ne sont pas des étoiles... mais ce ne sont pas des planètes non plus ! Elles naissent comme des étoiles, ce sont des naines brunes, tout simplement ! Elles ont une masse entre 13 et 75 fois la masse de Jupiter.

Elles ont pu avoir en leur cœur de la fusion du deutérium ou du lithium, qui nécessitent moins de température, au tout début de leur vie, mais très vite, cela s'arrête. Leur cœur reste uniquement chauffé par la gravité de l'astre, et la naine brune rayonne en lumière infrarouge, très faiblement, ce qui la rend difficile à détecter ! Elle restera dans cet état pendant 1000 milliards d'années, sans quitter la séquence principale, à s'éteindre à mesure qu'elle refroidit.

2) Les naines rouges : entre 0.07 et $0.45 M_{\odot}$, classe spectrale M

Températures	2300 K à 3800 K	Luminosités	0.00015 à $0.072 L_{\odot}$
Couleur	rouge	Rayons	0.075 à $0.6 R_{\odot}$
Durée de vie	30 à 1000 milliards d'années	Fin de vie	Naine blanche
Chemin d'évolution	Naine rouge > géante rouge > naine blanche		

Ce sont les plus légères et les plus petites « vraies » étoiles de la séquence principale : elles ont de la fusion de l'hydrogène en leur cœur. Ce sont aussi celles que l'on découvre en plus grand nombre dans les amas d'étoiles (les naines brunes sont encore plus nombreuses mais difficiles à détecter). Cette fusion est très lente dans ces étoiles froides, et par conséquent, l'hélium ne s'accumule pas dans son cœur trop rapidement, ce qui permet à l'étoile de continuer à fusionner son hydrogène pendant des milliards d'années.

Les naines rouges ayant une masse inférieure à $0.25 M_{\odot}$ terminent leur vie quand leur cœur ne contient plus que de l'hélium. La fusion s'arrête, la production de lumière aussi, et l'étoile s'effondre en un résidu très chaud, une naine blanche.

Les naines rouges ayant une masse supérieure à $0.25 M_{\odot}$ terminent leur vie quand leur cœur ne contient plus que de l'hélium.

3) Les naines orange : entre 0.45 et 0.8 M_☉, classe spectrale K

Températures	3900 à 5200 K	Luminosités	0.1 à 0.4 L _☉
Couleur	Orange à jaune	Rayons	0.6 à 0.85 R _☉
Durée de vie	15 à 30 milliards d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Naine orange > géante rouge > naine blanche		

Ce sont des étoiles de couleur orange à jaune, plus petites que le Soleil et qui ont une durée de vie un peu plus longue. Elles deviennent des géantes rouges puis meurent en nébuleuse planétaire quand elles perdent leur enveloppe. Au centre, il reste une naine blanche : c'est ce qui reste du cœur de l'étoile qui s'est effondré sur lui-même par gravité.

4) Les naines jaune : entre 0.9 et 1.10 M_☉, classe spectrale G

Températures	5200 à 5900 K	Luminosités	0.7 à 1.26 L _☉
Couleur	Jaune à blanc	Rayons	0.93 à 1.05 R _☉
Durée de vie	10 milliards d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Naine jaune > géante rouge > naine blanche		

Ce sont des étoiles semblables au Soleil, et qui meurent en nébuleuse planétaire avec une naine blanche au centre. Elles ont une durée de vie d'environ 10 milliards d'années. Notre étoile a déjà vécu 5 milliards d'années.

5) Les étoiles blanches : entre 1.20 et 1.70 M_☉, classes spectrale F

Températures	6000 à 7200 K	Luminosités	1.3 à 6 L _☉
Couleur	Blanc	Rayons	1.1 à 1.3. R _☉
Durée de vie	1 milliard d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Etoile blanche > géante rouge > naine blanche		

Ce sont des étoiles un peu plus rares et un peu plus massives que le Soleil, et qui meurent en nébuleuse planétaire avec une naine blanche au centre. Elles ont une durée de vie d'environ 1 milliard d'années.

6) Les étoiles blanches : entre 1.8 et 3.2 $M_{\odot}$, classes spectrale A

Températures	7300 à 10800 K	Luminosités	7 à 80 $L_{\odot}$
Couleur	Blanc	Rayons	1.4 à 2.5 $R_{\odot}$
Durée de vie	100 à 500 millions d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Etoile blanche > géante rouge > naine blanche		

Ce sont des étoiles un peu plus rares et plus massives que le Soleil, et qui meurent en nébuleuse planétaire avec une naine blanche au centre. Elles ont une durée de vie d'environ 100 à 500 millions d'années. Les étoiles visibles à l'œil nu des Pléiades sont des étoiles de classe A. Les étoiles plus massives sont déjà mortes : l'amas des Pléiades est donc âgé d'au moins 100 millions d'années et d'au plus 500 millions d'années.

7) Les naines bleues : entre 3.3 et 18 $M_{\odot}$, classe spectrale B

Températures	10800 à 30000 K	Luminosités	80 à 20000 $L_{\odot}$
Couleur	Bleu-blanc	Rayons	2.6 à 7.4 $R_{\odot}$
Durée de vie	10 à 100 millions d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire (<8 $M_{\odot}$) ou supernova (> 8 $M_{\odot}$)
Chemin d'évolution	Naine bleue > géante rouge > naine blanche Naine bleue > supergéante bleue > supergéante rouge > supernova > pulsar, trou noir		

Ce sont des étoiles encore plus rares et un beaucoup plus massives que le Soleil. Leur durée de vie très courte fait qu'on les voit surtout sur leur lieu de formation ou à proximité : les nébuleuses d'émission comme celle d'Orion, ou les amas d'étoiles très jeunes. Les plus massives ont une durée de vie d'environ 10 millions d'années : c'est moins que le temps qu'il faut pour qu'un amas d'étoile disperse la nébuleuse de gaz et de poussière qui l'a vu naître. Les plus légères vivent 100 millions d'années, c'est la durée de vie de la plupart des amas d'étoiles, avant que ses membres se dispersent dans la Galaxie. Les étoiles B visibles à l'œil nu sont très rares, et se sont donc les plus légères d'entre elles, comme Rigel, dans la constellation d'Orion.

8) Les naines bleues massives : entre 19 et 100 $M_{\odot}$, classe spectrale O

Températures	30000 à 50000 K	Luminosités	De 20000 à $>500000 L_{\odot}$
Couleur	Bleu à bleu-violet	Rayons	$>18 R_{\odot}$
Durée de vie	1 à 10 millions d'années	Fin de vie	Supernova
Chemin d'évolution	Naine bleue > supergéante bleue > hypergéante rouge > pulsar, trou noir		

Ce sont des étoiles extrêmement rares et un beaucoup plus massives que le Soleil. Leur durée de vie très courte fait qu'on les voit uniquement sur leur lieu de formation, et même pour les plus massives, à peine sorties de leur cocon de gaz. Vous n'en verrez pas à l'œil nu.

9) Les chemins d'évolution des étoiles sur le diagramme HR

A partir de ces caractéristiques de naissance, les étoiles vont évoluer. Sur chaque chemin indiqué, on montre à chaque changement brusque les atomes que le cœur de l'étoile se met à fusionner. A chaque fois que le cœur s'arrête de produire de l'énergie et qu'il s'effondre, l'étoile diminue en taille et sa surface se réchauffe, brièvement. L'étoile devient alors bleue pendant un court laps de temps, puis quand la fusion des nouveaux éléments se met en route, l'enveloppe s'étend à nouveau et l'étoile redevient rouge. A la fin de chaque chemin est indiqué l'événement final :

- NB = Naine Blanche
- NP = Nébuleuse planétaire
- SN = SuperNova

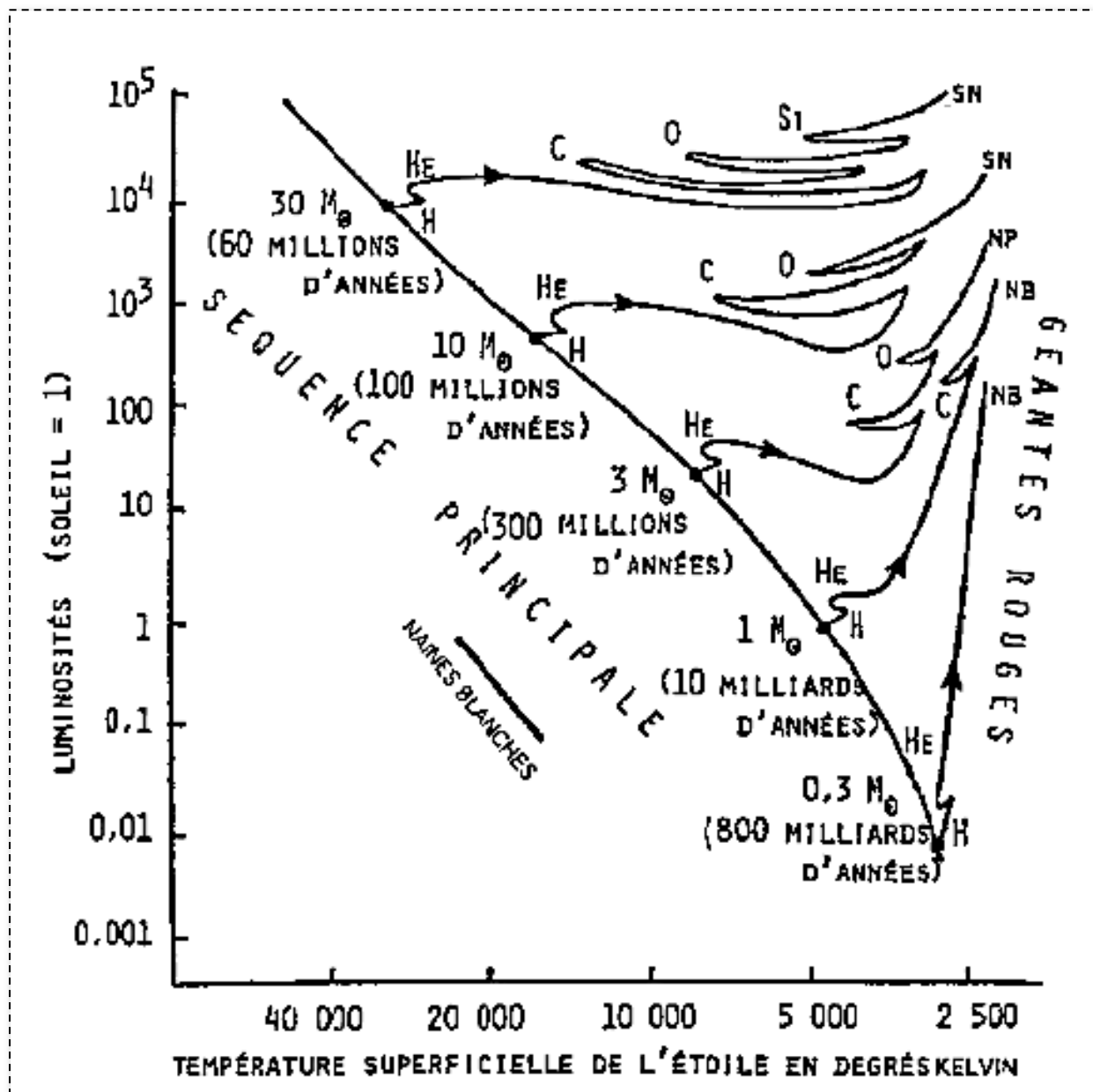


Figure 86 : Chemins d'évolution typiques des étoiles de certaines masses initiales. Les masses intermédiaires ont des chemins intermédiaires. Crédit : Armand Lévesque.

Vous pouvez lire les axes du diagramme pour vous rendre compte de l'ampleur des changements de température et de luminosité des étoiles au cours de leur vie.

10) La fin des étoiles

A la fin de chaque chemin d'évolution, l'étoile connaît un stade final qui dépend du chemin parcouru, et donc de sa masse initiale.

On distingue 5 fins différentes selon les étoiles :

- **Naine brune éteinte**

Les naines brunes et les naines rouges les plus légères finissent simplement par s'éteindre au bout de centaines, voire de milliers de milliards d'années. Leur masse n'est pas assez importante pour qu'elles s'effondrent sur elles-mêmes. Elles ont (elles auront, car l'Univers n'a que 13.7 milliards d'années) l'aspect d'une grosse planète géante gazeuse.

- **Naine blanche + nébuleuse planétaire**

Les étoiles de moins de $8 M_{\odot}$, deviennent des géantes rouges, puis leur cœur s'effondre sur eux-mêmes quand la fusion s'arrête. Il en reste une étoile très compacte, très chaude et très brillante, une naine blanche. Elle va s'éteindre et se refroidir peu à peu au bout de 10 à 20 milliards d'années. En parallèle, le cœur de l'étoile effondré émet un puissant vent stellaire qui repousse toute l'enveloppe de l'étoile à travers l'espace, ce qui forme une large coquille de nébuleuse visible de très loin car ionisée par la lumière ultraviolette de la naine blanche. La naine blanche a une taille comparable à celle de la Terre.

- **Supernova + Pulsar**

Les étoiles de plus de $8 M_{\odot}$, de classe spectrale B, deviennent des supergéantes rouges, puis leur cœur s'effondre sur eux-mêmes quand la fusion s'arrête. Il est suffisamment massif pour attirer à lui toute l'enveloppe de l'étoile. On observe alors un effondrement de l'enveloppe de l'étoile jusqu'à ce qu'elle butte sur le cœur dense et soit violemment expulsée dans l'espace. Cela s'accompagne d'une brusque et violente augmentation de luminosité. Cet événement s'appelle une supernova. Ce qui reste ensuite de l'étoile est un cœur très dense, de 10 km de diamètre, constitué uniquement de neutrons (plus aucun atome), appelé étoile à neutrons. Souvent celle-ci est en rotation rapide et nous envoie de la lumière dans un faisceau à intervalle régulier et on appelle cela un Pulsar.

- **Supernova + Trou noir**

Cela concerne les étoiles les plus massives, de classe spectrale O. C'est le mécanisme de la supernova, mais le cœur est tellement lourd et dense que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière : c'est un trou noir. En fait, c'est une étoile à neutrons qui, ne tournant pas assez vite sur elle-même, s'effondre en trou noir.

- **Trou noir sans supernova**

Il y a une deuxième façon de faire un trou noir, pour les étoiles extrêmement massives : l'étoile s'effondre entièrement sur elle-même, formant un trou noir sans supernova.

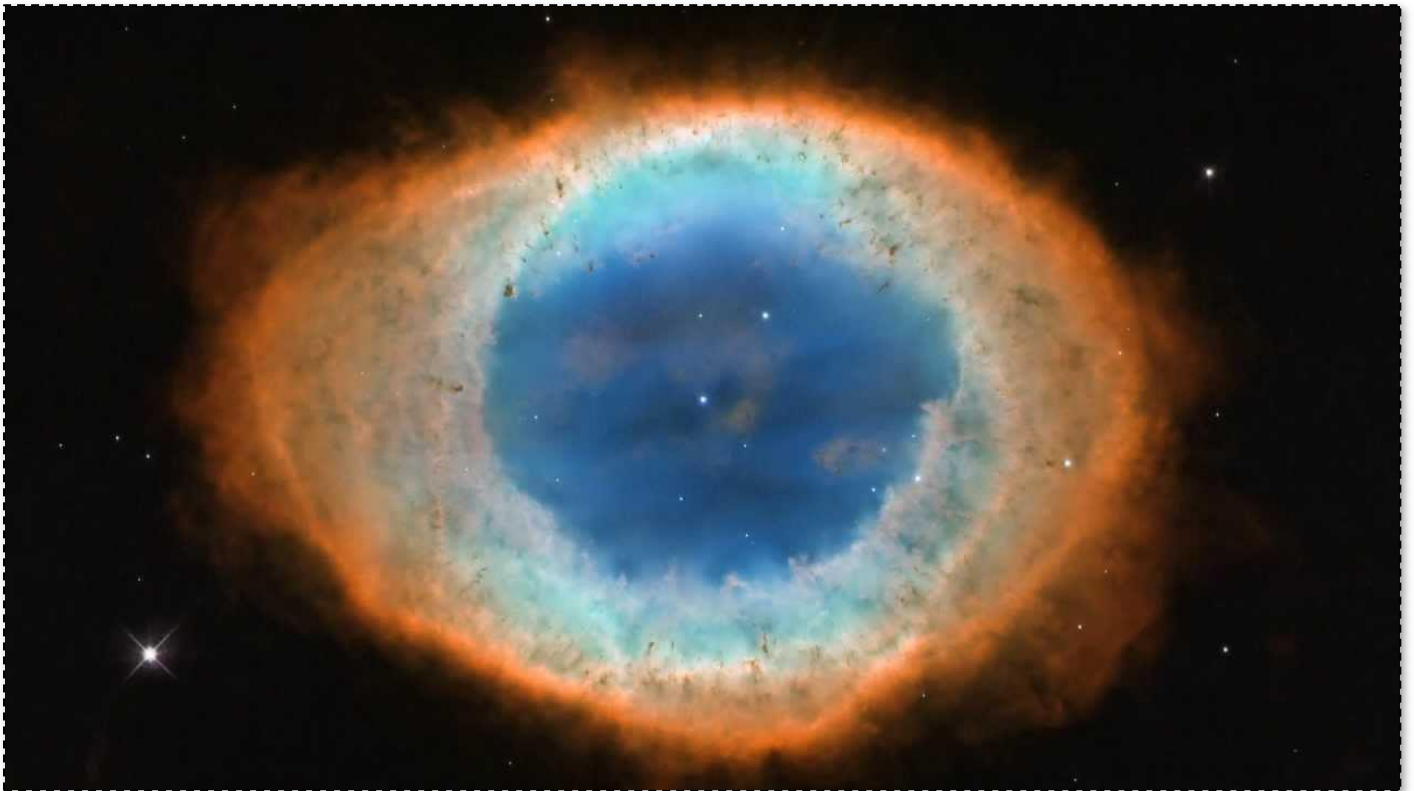


Figure 87 : Nébuluse planétaire de la Lyre, M57, avec la naine blanche au centre. Crédit : Télescope spatial Hubble, NASA.

11) Nous sommes des poussières d'étoiles

Quand elles meurent, les étoiles dispersent les éléments qu'elles ont fabriqués au cours de leur vie. Les étoiles massives meurent avant la dispersion des nébuleuses qui les ont vu naître, et en mourant les fertilisent de carbone, d'azote, d'oxygène, de silicium, de fer... Ce sont les éléments dont les planètes et les êtres vivants sont composés. En se mélangeant

aux nébuleuses alentour, ses éléments se retrouvent dans les prochaines générations d'étoiles, puis dans les nuages de poussière qui subsistent autour d'elles après leur naissance et dans lesquels se forment les planètes... et puis toi, lectrice ou lecteur.

Quand les étoiles massives deviennent supernovae, l'énergie libérée permet de fusionner les éléments à partir du fer comme l'uranium, responsables entre autres de la radioactivité du manteau de la Terre, qui est responsable en partie de sa température interne, qui est responsable de son champ magnétique, de sa tectonique des plaques, etc ... Les étoiles géantes du passé sont en chacun de nous en en chacune de nos planètes (ça c'est pour l'extraterrestre qui lirait ces lignes) !

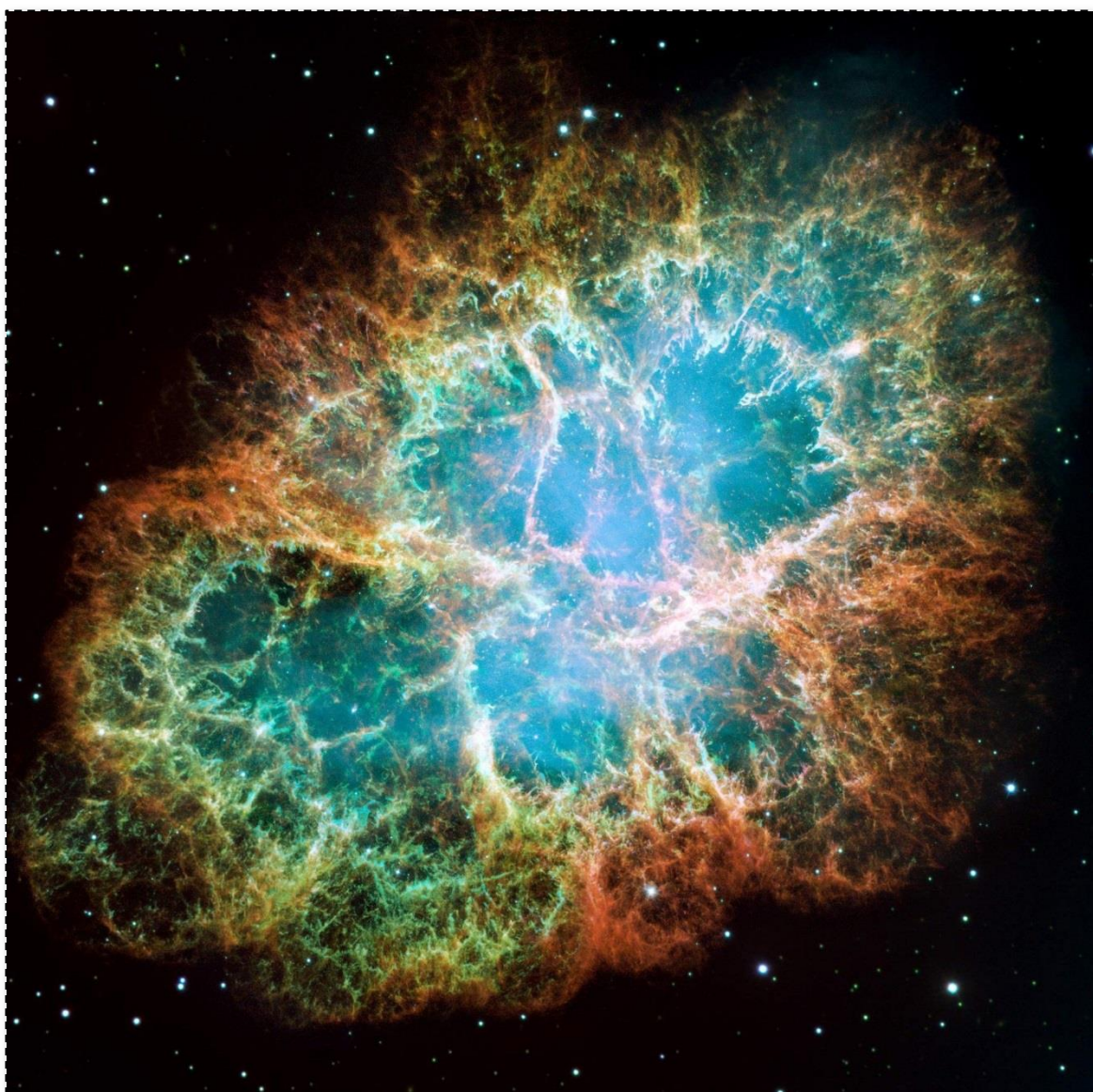
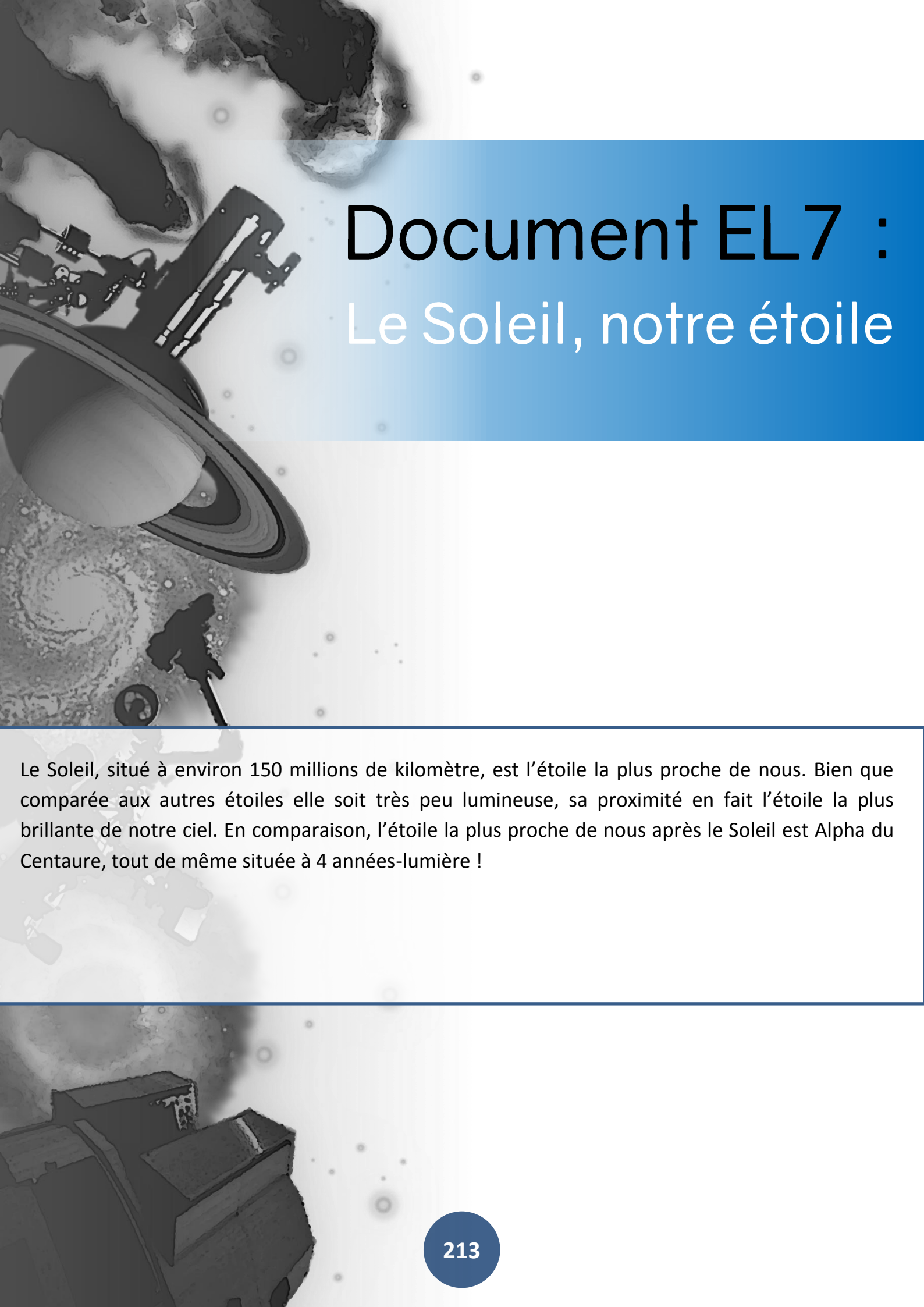


Figure 88 : Nébuleuse du Crabe, M1, résidu de supernova. Le pulsar au centre n'est ici pas visible avec l'instrument utilisé. Crédit : Télescope spatial Hubble, NASA.





Document EL7 :

Le Soleil, notre étoile

Le Soleil, situé à environ 150 millions de kilomètres, est l'étoile la plus proche de nous. Bien que comparée aux autres étoiles elle soit très peu lumineuse, sa proximité en fait l'étoile la plus brillante de notre ciel. En comparaison, l'étoile la plus proche de nous après le Soleil est Alpha du Centaure, tout de même située à 4 années-lumière !

Document EL7

Le Soleil, notre étoile



I. Introduction

Le Soleil n'a absolument rien de particulier si ce n'est qu'il est l'objet central de notre Système planétaire. Malgré sa taille impressionnante, puisque son diamètre est de 1.4 millions de kilomètres, soit 110 fois le diamètre terrestre, et sa masse de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit 333.000 fois la masse de la Terre, il reste une étoile plutôt petite.

Sa proximité nous permet d'en étudier les caractéristiques et ainsi de comprendre comment il fonctionne, d'où il tire son énergie et quelle influence il peut avoir sur notre planète. Mais comprendre comment le Soleil fonctionne, c'est aussi comprendre comment les autres étoiles fonctionnent, c'est donc une porte ouverte à la physique stellaire.

Comme nous allons le voir plus bas, la lumière visible qui nous parvient du Soleil ne provient que d'une toute petite partie de celui-ci. Le développement d'instruments capables d'observer la lumière dans d'autres domaines de longueurs d'onde ainsi qu'une meilleure compréhension de la physique de l'atome ont permis une meilleure connaissance de l'intérieur du Soleil.

Le Soleil n'est pas une boule de gaz homogène, mais présente une structure en couche que nous allons détailler ci-dessous. Il faut garder en mémoire qu'il n'y a pas de limites nettes entre les différentes couches du Soleil mais plutôt un changement continu quand on se déplace du centre vers la surface.

II. L'intérieur du Soleil

1) Le cœur du Soleil

Il n'existe pas d'observations directes du cœur du Soleil. Cependant, notre connaissance actuelle de la physique thermonucléaire permet de construire des modèles de l'intérieur de Soleil dont les conséquences visibles peuvent être directement comparées à des observations directes du Soleil.

La partie la plus centrale du Soleil, qui s'étend sur 25% du rayon solaire, est aussi la plus chaude avec une température d'environ 15 millions de degrés. C'est dans cette zone que se produisent les réactions thermonucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium, comme décrit dans le document 5. Ce processus est une incroyable source d'énergie puisque la quantité d'énergie produite par le Soleil en une seconde équivaut à 4000 milliards de bombes atomiques !

Lors des réactions thermonucléaires, des photons sont produits et interagissent avec la matière environnante. Ces interactions les piègent à l'intérieur du cœur du Soleil et ils ne parviennent à s'échapper complètement du Soleil que bien plus loin du cœur.

2) La zone radiative

Dans cette partie située au-dessus du cœur entre 0.25 et 0.7 rayon solaire. Cette zone est appelée zone radiative car c'est une couche dans laquelle l'énergie émise au cœur du Soleil est transportée vers la surface du Soleil par radiation : les photons émis lors des réactions thermonucléaires sont absorbés et réémis par les ions présents dans cette couche.

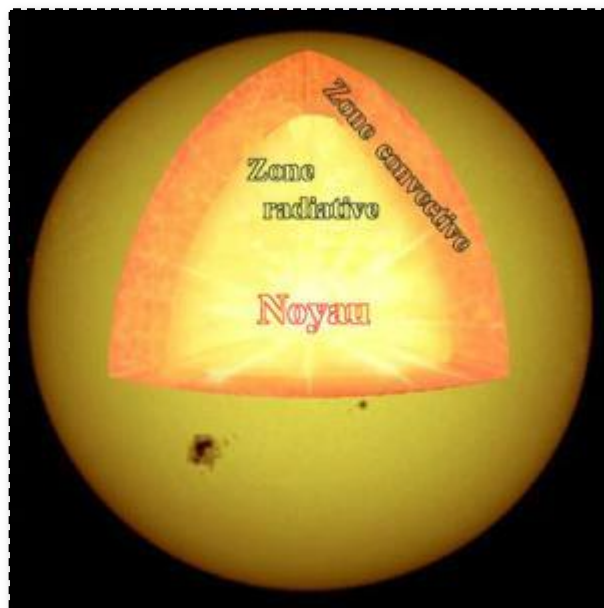


Figure 89 : Schéma simplifié de la structure interne du Soleil. Crédit : IMCCE-Observatoire de Paris.

Cela a pour effet de leur faire perdre de l'énergie lors de leurs interactions et de les ralentir. Il faut typiquement entre 10.000 et 170.000 ans à un photon pour sortir de cette zone et atteindre la surface du Soleil. Cela a pour effet de refroidir le milieu, la température atteint ainsi 2 millions de degrés, ce qui est bien plus faible que dans le cœur.

3) La zone convective

Cette partie, située entre 0.7 et 0.8 rayon solaire, est appelée « convective » car elle se refroidit par convection : la matière très chaude au bas de la couche est moins dense que la matière plus froide située juste au-dessus. Comme elle est moins dense, elle remonte et se refroidit à son tour jusqu'à ce que, se refroidissant et devenant donc plus dense, elle retombe à nouveau vers le centre et se réchauffe, remonte alors et le cycle se répète. Ce mécanisme permet de passer d'une température de 2 millions de degrés au bas de la zone de convection à 5800 degrés en haut de la couche. Ce sont ces mouvements de convections qui sont à l'origine de la granulation visibles à la surface du Soleil dont une photographie est donnée ci-contre.

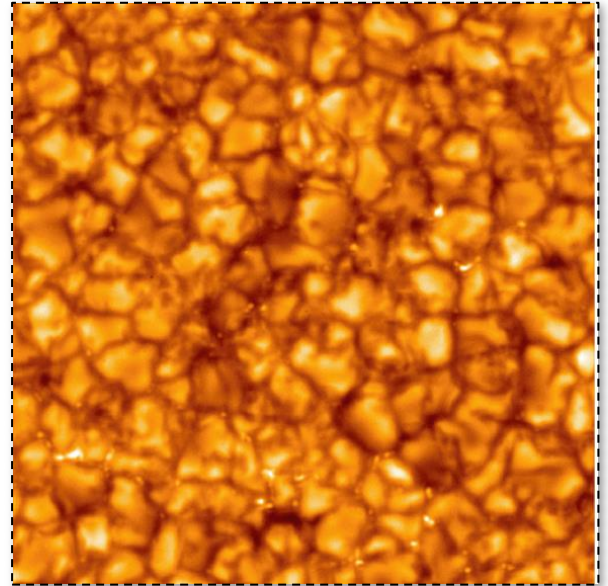


Figure 90 : Image de la granulation à la surface du Soleil observée par le satellite Hinode, cette image représente une zone de 16000 km de côté (JAXA/ESA/NASA).

Les granules, ont une taille typique de 1000 km, mais des super-granules de tailles allant jusqu'à 35000 km peuvent exister.

Cette zone de convection tourne par rapport au centre du Soleil, de même que la zone radiative. Cependant, alors que la zone radiative tourne telle un solide, autrement dit, en un seul bloc, la zone convective, elle, tourne plus vite à l'équateur qu'aux pôles, on appelle cela la rotation différentielle. La différence de type de rotation entre la zone radiative et la zone convective entraîne des frottements qui sont suspectés d'être à l'origine du champ magnétique solaire.

III. L'atmosphère du Soleil

L'atmosphère solaire se présente aussi sous forme de différentes couches que l'on peut distinguer en l'observant dans différents domaines de longueurs d'onde.

1) La photosphère : la « surface » du Soleil

Cette couche, de seulement 400 km d'épaisseur, est la partie de laquelle s'échappent les photons, c'est donc cette partie qui est « visible » à l'œil et on peut donc l'observer en lumière visible.

La température moyenne y est d'environ 5800 degrés. Des tâches sombres sont parfois visibles à la surface sur la photosphère du Soleil, dont un exemple est montré sur la photographie plus bas et semblent se déplacer. Galilée les avait déjà observées avec son télescope (sans aucune protection, ce qui le rendit aveugle !). De ces observations, il comprit que les taches ne se déplaçaient pas à la surface du Soleil mais « bougeaient » avec lui car le Soleil tourne. Il en déduit la période de rotation du Soleil, environ un peu plus d'un mois. Aujourd'hui, le suivi des tâches solaires a permis de mesurer précisément cette vitesse de rotation qui est de 25 jours à l'équateur et 35 jours près des pôles. La photosphère a donc également une rotation différentielle.

Les taches ont une température plus basse de 1500 degrés que leur environnement, étant moins chaudes, elles sont moins lumineuses et paraissent donc plus sombres. Ce n'est qu'une question de contraste.

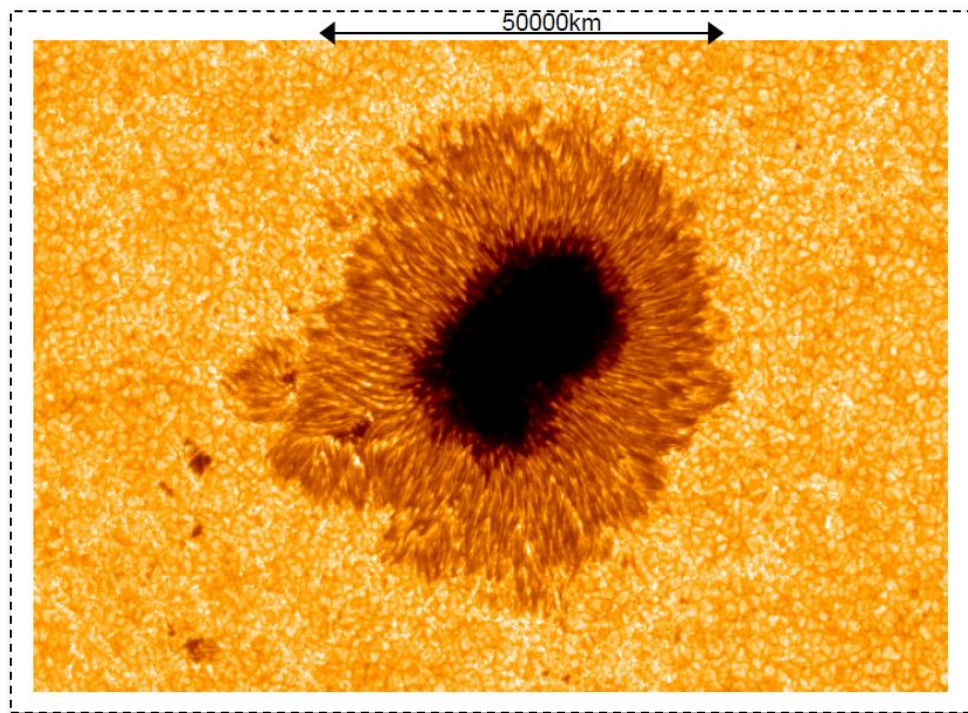


Figure 91 : Tâche noire à la surface du Soleil observé par le satellite Hinode (JAXA/ESA/NASA).

Lorsque l'on regarde des images du Soleil comme celle de la figure suivante, on s'aperçoit que le bord du Soleil apparaît plus sombre que le centre. Ce phénomène est couramment appelé assombrissement centre-bord. Lorsque l'on regarde près les bords de l'étoile, la lumière nous parvient avec un angle d'incidence plus fort et a donc traversé une plus grande épaisseur de gaz que celle provenant du centre de l'image. Cela permet d'étudier les différentes épaisseurs de la photosphère. On a alors pu mesurer comment la température varie : de 6500 degrés à la base de la photosphère, elle atteint 4400 degrés en surface. Cette différence de température contribue, avec l'absorption de lumière plus importante au bord qu'au centre lorsqu'une plus grande quantité de gaz est traversée, à l'assombrissement centre-bord.

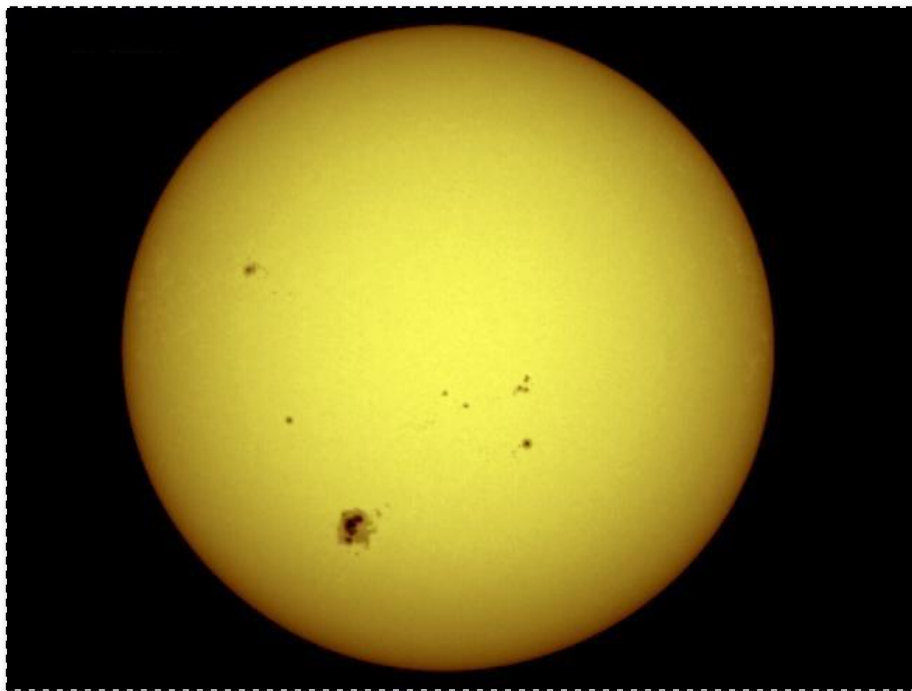
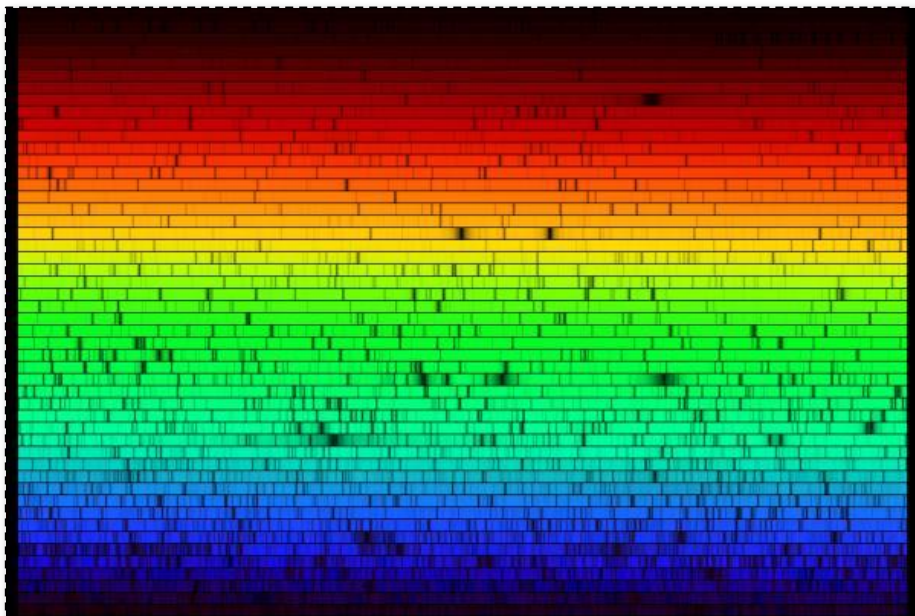


Figure 92 : Image en lumière visible du Soleil. Crédit : NASA

La composition chimique de la photosphère peut être mesurée grâce à la spectroscopie. Un spectre typique du Soleil est montré ci-dessous. Cette technique permet non seulement d'identifier les composés présents dans l'atmosphère du Soleil, mais permet aussi de les quantifier. La photosphère solaire est principalement composée d'hydrogène (78% en masse), puis d'Hélium (20% en masse). Les 2% restants sont le fruit de 60 autres éléments.



**Figure 93 : Spectre visible haute résolution du Soleil. La large bande noire située dans la partie rouge du spectre est une des raies caractéristique de l'hydrogène, appelée $H\alpha$.
Crédit : NOAO.**

2) La chromosphère

Elle fait partie de l'atmosphère solaire. A la base de la chromosphère, la température est d'environ 4000 degrés. A la surface de la chromosphère, située à 2000 km de la base, la température atteint 100.000K. La chromosphère peut être visible à l'œil lors d'éclipse solaire : elle apparaît alors comme un flash rouge très intense que dont on peut voir un exemple sur la photographie de la figure 6.

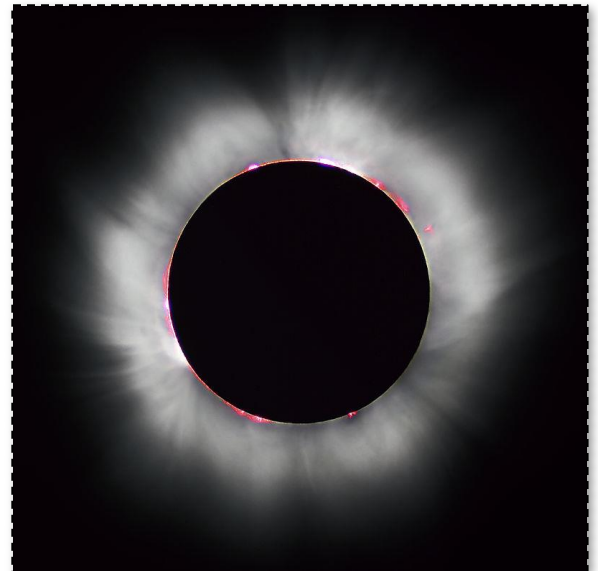


Figure 94 : Éclipse totale de Soleil de 1999. Credit : Luc Viatour.

3) La couronne

La couronne, visible à l'œil lors d'une éclipse totale (halo de lumière blanche autour du Soleil sur la photo), la température y atteint 1 million de degrés. Le chauffage de la chromosphère et de la couronne est toujours un peu mystérieux et est un domaine très actif de la recherche aujourd'hui.

Le scénario actuel pour expliquer ce chauffage met en jeu le champ magnétique du Soleil. Les lignes de champ magnétique s'élèvent au-dessus de la surface. Lorsque des micro-éruptions ont lieu aux racines de ces lignes de champ, conséquences de la dynamique de la zone convective, de forts courants électriques parcourent ces lignes, formant une onde magnétique qui transporte une très forte quantité d'énergie de la surface vers la couronne permettant ainsi d'atteindre des températures de l'ordre du million de degré.

IV. L'activité du Soleil

1) Les protubérances solaires

Les protubérances (aussi appelées éruptions) sont des jets de matière qui s'élèvent au-dessus de la surface du Soleil, dont une photographie est montrée plus bas. Leur taille est particulièrement impressionnante : elles peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers

de km au-dessus de la photosphère. Ces protubérances apparaissent pendant une durée limitée. Certaines sont lentes et relativement stables pendant quelques jours, d'autres sont très rapides, typiquement 1500 km/s, et peuvent atteindre un million de km au-dessus de la photosphère.

Il arrive que ces éruptions solaires soient très violentes, durant quelques minutes à quelques heures, avec une énergie équivalente à quelques millions de bombes nucléaires. Durant ces éruptions, le matériel solaire est chauffé à quelques dizaines de millions de degrés et est accéléré à de très hautes vitesses. Ces particules peuvent atteindre la Terre en seulement quelques minutes, entraînant parfois des perturbations de nos télécommunications. Au Québec en 1989, un tel orage solaire a entraîné une perte de courant pendant 9h.

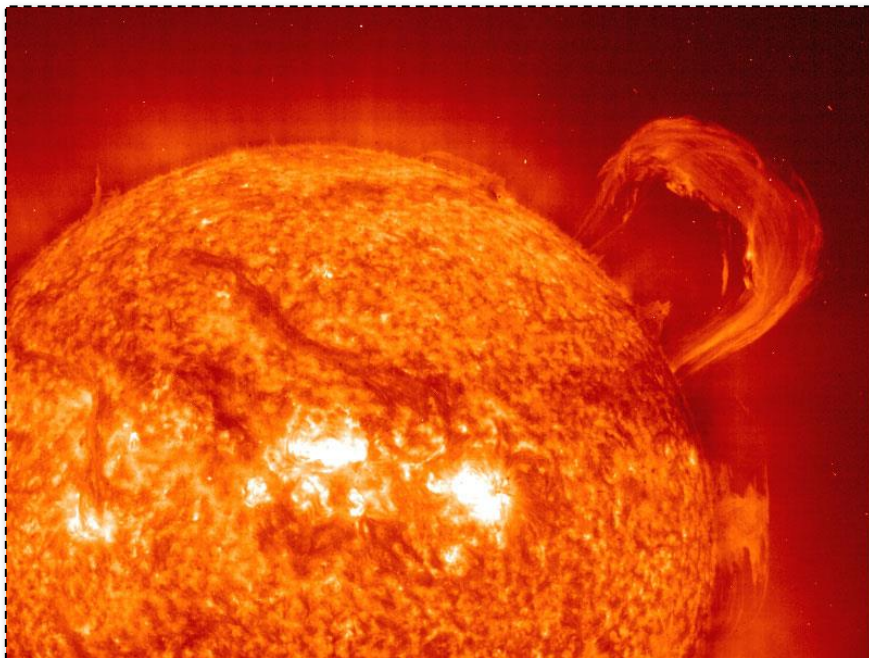


Figure 95 : Cette large protubérance, visible sur la gauche, a été photographiée par le satellite spatial SOHO (ESA/NASA) en Septembre 1999 et s'étend quelques centaines de milliers de kilomètres.

2) Le vent solaire

Le champ magnétique agit normalement comme un bouclier qui empêche les particules chargées de s'échapper. Dans certaines zones de la surface du Soleil, le champ magnétique est ouvert, ce sont ce que l'on appelle des trous coronaux, permettant aux particules chargées, principalement des protons, des électrons et des noyaux d'hélium, de s'échapper. On y trouve aussi des noyaux d'atomes d'autres éléments en très faibles quantités (les

mêmes que les responsables des raies d'absorption dans le spectre du Soleil). Le flux continu de particules émis par le Soleil est appelé vent solaire. Chaque année, quelques 2×10^{16} kg de matière sont perdus via le vent solaire.

Ce vent solaire, à la distance de la Terre, a une vitesse de 400 km/s et une densité de 2 à 10 particules/cm³. C'est ce vent solaire qui est à l'origine des aurores boréales et australes sur Terre lorsque les ions du vent solaire interagissent avec les molécules de l'atmosphère terrestre. Normalement, le champ magnétique terrestre nous protège de ces particules chargées, comme un bouclier,, mais au niveau des pôles terrestres, les lignes de champ magnétique convergent (voir le schéma représentant la magnétosphère terrestre page suivante), et les particules du vent solaire peuvent alors pénétrer dans l'atmosphère terrestre dans ces zones.

On peut mesurer la composition du Soleil en récoltant les particules du vent solaire. Le satellite GENESIS de la NASA, lancé en 2001, a récolté des particules du vent solaire pendant 2 ans avant de les ramener sur Terre. L'analyse des échantillons de GENESIS est toujours en cours d'analyse mais de nombreux progrès ont déjà été accomplis dans la mesure de la composition isotopique de l'oxygène, de l'azote ou encore du néon.

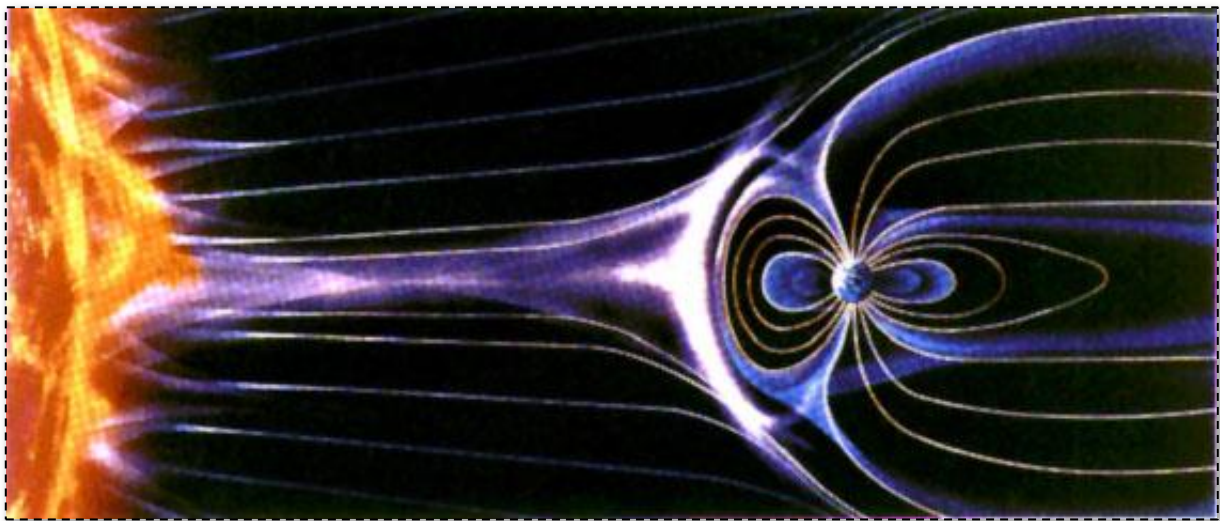


Figure 96 : Schéma de la magnétosphère terrestre (les lignes de champ magnétique sont représentées par les traits blancs) et son interaction avec le vent solaire. Crédit : Y. Kamide, Nikkei Science, Tokyo.

3) Le cycle d'activité solaire

La quantité de taches noires à la surface du Soleil varie. La figure ci-contre montre le nombre moyens de taches solaire observées entre 1750 et 2015. C'est en 1844 qu'Heinrich Schwabe, un astronome allemand, découvre que la variation de quantité de taches est très régulière et suit un cycle de 11 ans. Ce cycle est lié à la polarité au champ magnétique du Soleil qui s'inverse tous les 11 ans.

L'activité solaire a une influence directe sur le climat terrestre. Entre 1645 et 1715, très peu de taches ont été observées, on appelle cette période le minimum de Maunder.

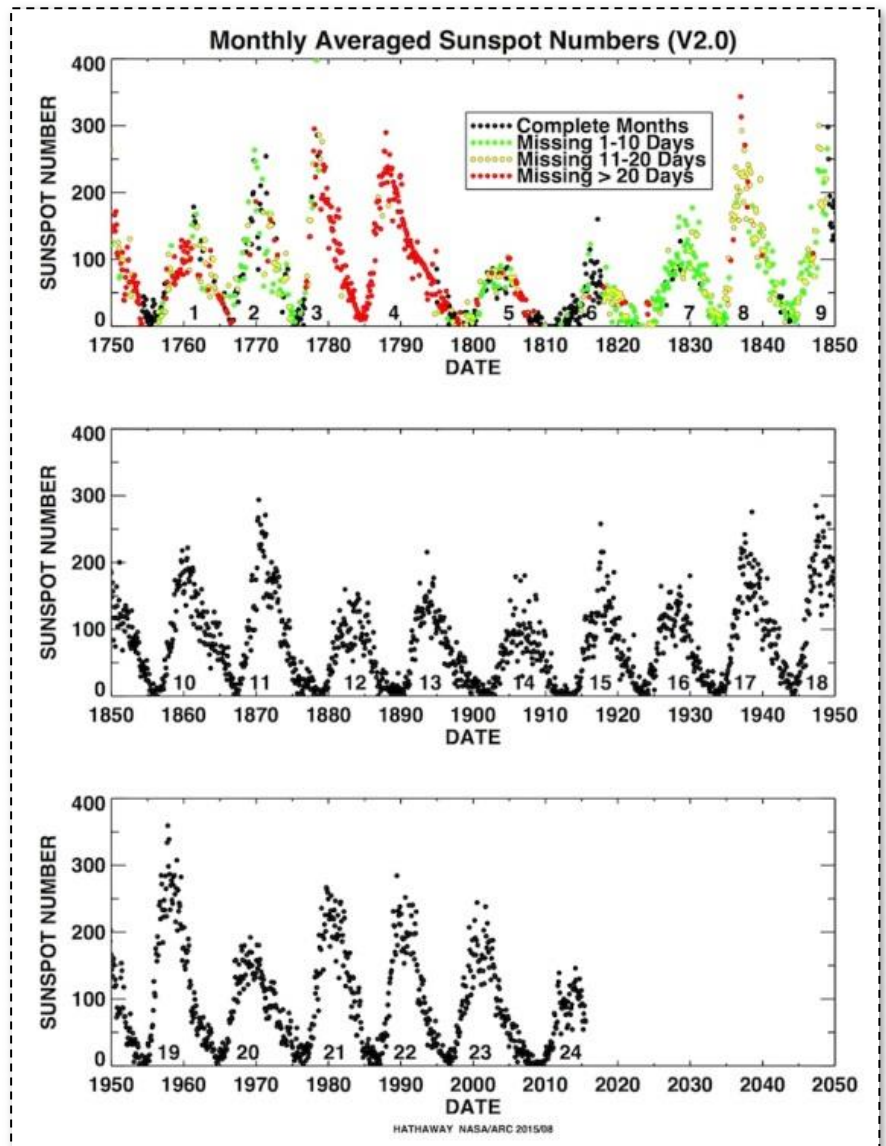


Figure 97 : Nombre moyens de taches solaire entre 1750 et 2015. Crédit : NASA.

Il est intéressant de constater que cette période correspond aussi à une période climatique particulièrement froide sur Terre que l'on nomme le « petit âge glaciaire ». On estime qu'un changement de 1% de luminosité du Soleil entraîne un changement de 1 ou 2°C sur Terre. Sachant que le dernier âge glaciaire sur Terre est dû à un changement de seulement 5°C, la luminosité du Soleil joue un rôle majeur.

4) Observer l'intérieur du Soleil : l'héliosismologie

Les puissants mouvements de convection dans le Soleil entraînent des fluctuations de pression qui causent la propagation d'ondes sonores dans le Soleil. Lorsque ces ondes atteignent la photosphère solaire, elles se réfléchissent et reviennent vers l'intérieur et éventuellement se réfléchiront à nouveau pour ré-atteindre la surface, à l'image des ondes sismiques se propageant dans la Terre. De la même manière que les géologues utilisent les ondes sismiques pour connaître la structure de la Terre interne, les astronomes utilisent ces vibrations pour connaître l'intérieur du Soleil. Ce domaine de la science consistant à étudier les vibrations du Soleil est appelé héliosismologie. Cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres étoiles, on appelle alors cette technique l'astérosismologie. Des satellites sont d'ailleurs consacrés à l'étude, entre autre, de la structure interne des étoiles dont le satellite européen CoRoT et le satellite américain Kepler. Ces vibrations se traduisent à la surface par des variations locales et/ou globales et plus moins rapides de luminosité, qui peuvent être observées. On en déduit alors les caractéristiques des ondes qui en sont les causes, et on remonte ainsi à la structure et aux mécanismes internes du Soleil ou de l'étoile étudiée.

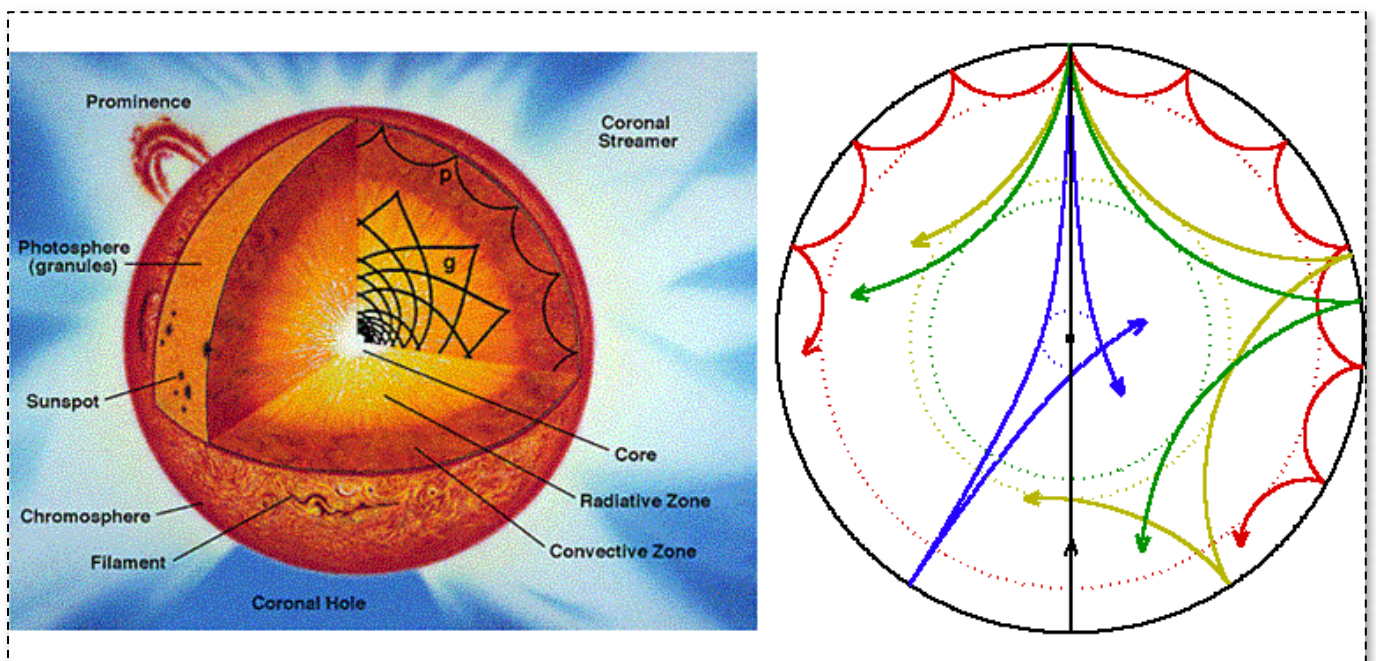
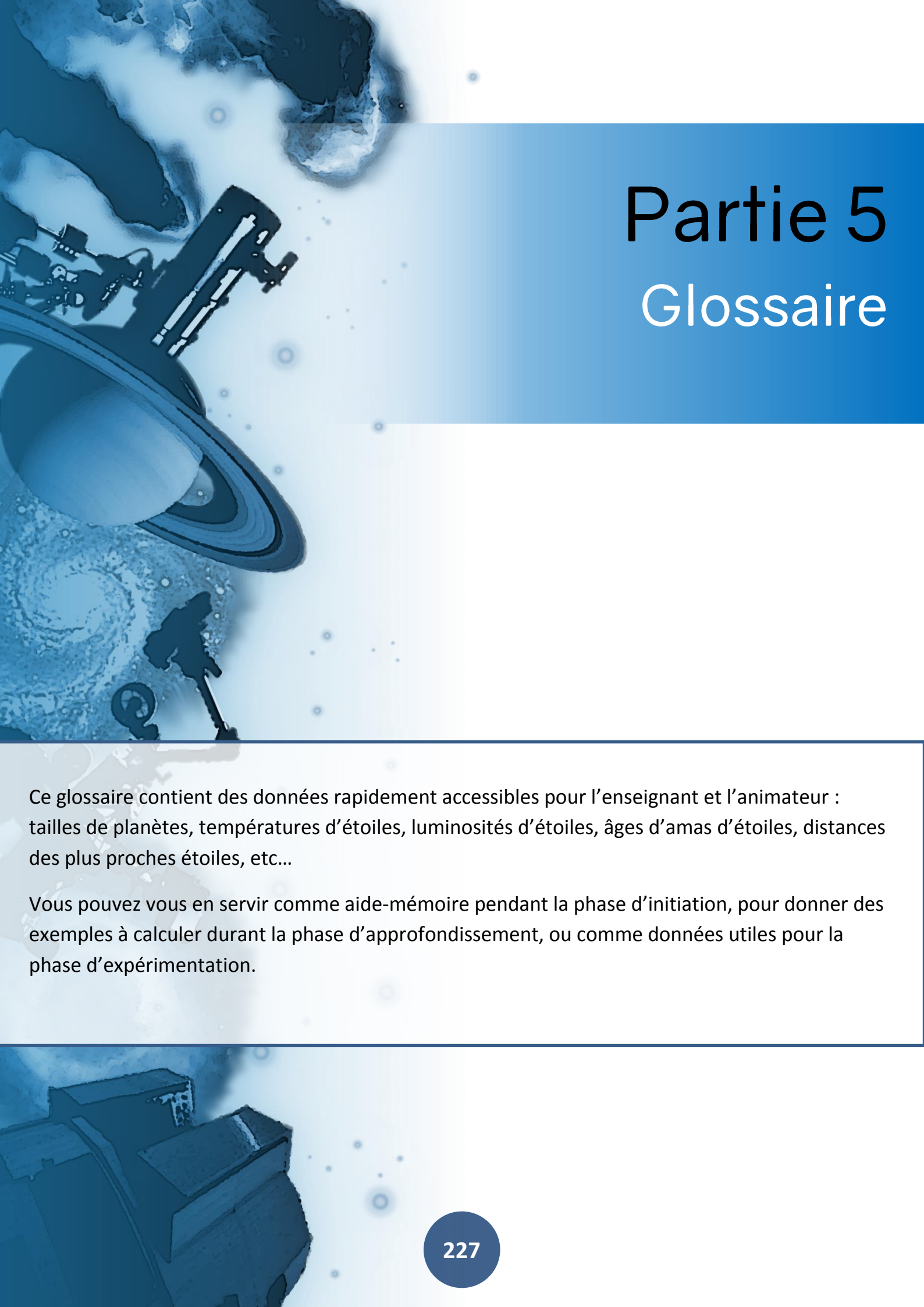


Figure 98 : Propagation des ondes sismiques dans les différentes couches internes du Soleil. Crédit : CEA, SPP.

D'autres documents seront ajoutés à ce livret dans une version ultérieure. Il est prévu d'ajouter les documents suivants :

- **Les catalogues d'étoiles**
- **Utiliser le logiciel Stellarium**
- **Les couleurs en Astronomie**
- **Mesurer la lumière des étoiles**





Partie 5

Glossaire

Ce glossaire contient des données rapidement accessibles pour l'enseignant et l'animateur : tailles de planètes, températures d'étoiles, luminosités d'étoiles, âges d'amas d'étoiles, distances des plus proches étoiles, etc...

Vous pouvez vous en servir comme aide-mémoire pendant la phase d'initiation, pour donner des exemples à calculer durant la phase d'approfondissement, ou comme données utiles pour la phase d'expérimentation.

1) Directement en orbite autour du Soleil

Corps	Nature	Rayon (km)	Masse (kg)	Masse (M_T)	Demi-grand axe (U.A.)
Soleil	Etoile naine	696342±65	$(1.98855 \pm 0.00025) \times 10^{30}$	333000	0
Mercure	Planète tellurique	2439.7±1.0	$330,2 \times 10^{21}$	0.055	0,39
Vénus	Planète tellurique	6051.8±1.0	$4,8685 \times 10^{24}$	0.815	0,72
Terre	Planète tellurique	6 378,137	$5,9736 \times 10^{24}$	1	1,00
Mars	Planète tellurique	3 396,2± 0,1	$641,85 \times 10^{21}$	0.107	1,52
Cérès	Planète naine	487,3± 1,8	$(9,46 \pm 0,04) \times 10^{20}$	0.00015	2,76
Jupiter	Planète géante	71 492	$1,8986 \times 10^{27}$	317,8	5,20
Saturne	Planète géante	60 268	$568,46 \times 10^{24}$	95,152	9.54
Uranus	Planète géante	25 559 ± 4	$8,6810 \times 10^{25}$	14,536	19,19
Neptune	Planète géante	24 764 ± 15	$102,43 \times 10^{24}$	17,147	30.10
Pluton	Planète naine	1 185 ± 10	$(1,314 \pm 0,018) \times 10^{22}$	0.00218	39.44
Eris	Planète naine	2 326 ± 12	$(1,66 \pm 0,02) \times 10^{22}$	0.0028	67,78
		Dimensions (km)			
Hauméa	Planète naine	1 960×1 518×996	$(4,2 \pm 0,1) \times 10^{21}$	0.00066	43,28
Makémaké	Planète naine	$(1\,434 \times 1422) \pm 14$	2 à 5 × 10 ²¹ kg		45,71
Eros	Astéroïde	34.4×11.2×1 1.2	$(6.687 \pm 0.003) \times 10^{15}$		1,46

Vesta	Astéroïde	$(560 \times 544 \times 454) \pm 24$	$2,7 \times 10^{20}$		2,36
Halley	Comète	15×8	2.2×10^{14}		17,8
Churyumov–Gerasimenko	Comète	4.1×3.3×1.8	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^{13}$		3,46

2) Satellites principaux de planètes

Terre (1)			
Corps	Rayon (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Lune	1738.14	7.3477×10^{22}	384 399

Mars (2)			
Corps	Dimensions (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Phobos	27 × 22 × 18	1.0659×10^{16}	9 376
Deimos	15 × 12.2 × 11	1.4762×10^{15}	23 463.2

Jupiter (67)			
Corps	Rayon (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Io	$1\,821.6 \pm 0.5$	$(8.931938 \pm 0.000018) \times 10^{22}$	421 700
Europe	$1\,560.8 \pm 0.5$	$(4.799844 \pm 0.000013) \times 10^{22}$	670 900
Ganymède	$2\,634.1 \pm 0.3$	1.4819×10^{23}	1 070 400
Callisto	2410.3 ± 1.5	$(1.075938 \pm 0.000137) \times 10^{23}$	1 882 700

Saturne (62)			
Corps	Rayon (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Mimas	198.2 ± 0.4	$3,84 \times 10^{19}$	185 520
Encelade	252.1 ± 0.2	$8,6 \times 10^{19}$	238 020
Téthys	531.1 ± 0.6	$(6.17449 \pm 0.00132) \times 10^{20}$	294 619
Dioné	561.4 ± 0.4	$(1.095452 \pm 0.000168) \times 10^{21}$	377 396
Rhéea	763.8 ± 1.0	$(2.306518 \pm 0.000353) \times 10^{21}$	527 108
Titan	2575.5 ± 2.0	$(1.3452 \pm 0.0002) \times 10^{23}$	1 221 870

Uranus (27)			
Corps	Rayon (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)

Miranda	235.8±0.7	$(6.59\pm0.75)\times10^{19}$	129 390
Ariel	578.9±0.6	$(1.353\pm0.120)\times10^{21}$	191 020
Umbriel	584.7±2.8	$(1.172\pm0.135)\times10^{21}$	266 000
Titania	788.4±0.6	$(3.527\pm0.09)\times10^{21}$	435 910
Obéron	761.4±2.6	$(3.014\pm0.075)\times10^{21}$	583 520

Neptune (17)			
Corps	Dimensions (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Triton	1353.4±0.9	2.14×10^{22}	354 759
Néréide	170±25	$3,1\times10^{19}$	5 513 787

Pluton (5)			
Corps	Rayon ou dimensions (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Charon	606±3	$(1.586\pm0.015)\times10^{21}$	19 571±4
Styx	3.5 × 2.5		42 656±78
Nix	54 × 41 × 36	$(4.5\pm4.0)\times10^{16}$	48 694±3
Kerberos	6 × 2		57 783±19
Hydra	43 × 33	$(4.8\pm4.2)\times10^{16}$	64 738±3

I. Paramètres du Soleil

Paramètre	Notation	Valeur
Rayon	$R_{\odot}$	6.955×10^5 km
Masse	$M_{\odot}$	$(1.98855\pm0.00025)\times10^{30}$ kg
Luminosité bolométrique	$L_{\text{bol}\odot}$	3.846×10^{26} W
Magnitude absolue bolométrique	$M_{\text{bol}\odot}$	4.74
Magnitude absolue en bande visible	$M_{V\odot}$	4,83
Magnitude apparente en bande visible	$m_{V\odot}$	-26,74
Métallicité	$Z_{\odot}$	0.0122
Température	$T_{\odot}$	5750

II. Étoiles de la séquence principale

1) Les naines brunes : entre 0.012 et 0.07 M_☉, classes spectrales Y, L et T

Températures	<1000 K à 2000 K	Luminosités	< 0.00015 L _☉
Couleur	rouge sombre, infrarouge	Rayons	1 à 4 rayons de Jupiter
Durée de vie	1000 milliards d'années	Fin de vie	assombrissement
Chemin d'évolution	Naine brune > naine brune éteinte		

2) Les naines rouges : entre 0.07 et 0.45 M_☉, classe spectrale M

Températures	2300 K à 3800 K	Luminosités	0.00015 à 0.072 L _☉
Couleur	rouge	Rayons	0.075 à 0.6 R _☉
Durée de vie	30 à 1000 milliards d'années	Fin de vie	Naine blanche
Chemin d'évolution	Naine rouge > géante rouge > naine blanche		

3) Les naines orange : entre 0.45 et 0.8 M_☉, classe spectrale K

Températures	3900 à 5200 K	Luminosités	0.1 à 0.4 L _☉
Couleur	Orange à jaune	Rayons	0.6 à 0.85 R _☉
Durée de vie	15 à 30 milliards d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Naine orange > géante rouge > naine blanche		

4) Les naines jaune : entre 0.9 et 1.10 M_☉, classe spectrale G

Températures	5200 à 5900 K	Luminosités	0.7 à 1.26 L _☉
Couleur	Jaune à blanc	Rayons	0.93 à 1.05 R _☉
Durée de vie	10 milliards d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Naine jaune > géante rouge > naine blanche		

5) Les étoiles blanches : entre 1.20 et 1.70 M_☉, classes spectrales F

Températures	6000 à 7200 K	Luminosités	1.3 à 6 L _☉
Couleur	Blanc	Rayons	1.1 à 1.3. R _☉
Durée de vie	1 milliard d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Etoile blanche > géante rouge > naine blanche		

6) Les étoiles blanches : entre 1.8 et 3.2 $M_{\odot}$, classes spectrale A

Températures	7300 à 10800 K	Luminosités	7 à 80 $L_{\odot}$
Couleur	Blanc	Rayons	1.4 à 2.5 $R_{\odot}$
Durée de vie	100 à 500 millions d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire
Chemin d'évolution	Etoile blanche > géante rouge > naine blanche		

7) Les naines bleues : entre 3.3 et 18 $M_{\odot}$, classe spectrale B

Températures	10800 à 30000 K	Luminosités	80 à 20000 $L_{\odot}$
Couleur	Bleu-blanc	Rayons	2.6 à 7.4 $R_{\odot}$
Durée de vie	10 à 100 millions d'années	Fin de vie	Nébuleuse planétaire (<8 $M_{\odot}$) ou supernova (> 8 $M_{\odot}$)
Chemin d'évolution	Naine bleue > géante rouge > naine blanche Naine bleue > supergéante bleue > supergéante rouge > supernova > pulsar, trou noir		

8) Les naines bleues massives : entre 19 et 100 $M_{\odot}$, classe spectrale O

Températures	30000 à 50000 K	Luminosités	De 20000 à >500000 $L_{\odot}$
Couleur	Bleu à bleu-violet	Rayons	>18 $R_{\odot}$
Durée de vie	1 à 10 millions d'années	Fin de vie	Supernova
Chemin d'évolution	Naine bleue > supergéante bleue > hypergéante rouge > pulsar, trou noir		

III. Etoiles visibles à l'œil nu

1) Paramètres physiques

Nom usuel	Constellation	Nom Scientifique	Distance (a.l.)	Masse ($M_{\odot}$)	Rayon ($R_{\odot}$)	Lbol ($L_{bol\odot}$)	Température (K)	Âge (millions d'années)
Aldébaran	Taureau	Alpha Tauri	65.3 ± 1.0	1.5 ± 0.3	44.2 ± 0.9	518 ± 32	3 910	
Algol	Persée	Beta Persei	90 ± 3	3.17 ± 0.21	2.73 ± 0.20	182	13,000	570
Altaïr	Aigle	Alpha Aquilae	16.7 ± 0.05	1.79 ± 0.018	1.63 to 2.03	10.6	8 000	630
Antarès	Scorpion	Alpha Scorpii	550	12.4	883	57 500	3 400 ± 200	12
Arcturus	Bouvier	Alpha Bootes	36.7 ± 0.2	1.08 ± 0.06	25.4 ± 0.2	170	4 286 ± 30	7 100 ± 135
Bételgeuse	Orion	Alpha Orionis	643 ± 146	7.7 à 20	950 à 1 200	90 000 à 150 000	3 140 à 3 641	7,3
Capella	Cocher	Alpha Aurigae	42.8 ± 0.3	2.69 ± 0.06	12.2 ± 0.2	78.5 ± 1.2	4 940 ± 50	540 à 590
Castor	Gémeaux	Alpha Geminorum	51 ± 3	2,76	2,4	30	10 286	370
Deneb	Cygne	Alpha Cygni	802 ± 66	19 ± 4	203 ± 17	196 000 ± 32 000	8 525 ± 75	
Denebola	Lion	Beta Leonis	35.9 ± 0.2	1.78	1,728	15	8 500	100 à 380
Dubhe	Grande Ourse	Alpha Ursa Majoris	123 ± 2	4,25	16	316	4 660	
Fomalhaut	Poisson Austral	Alpha Piscis Austrini	25.1 ± 0.09	1.92 ± 0.02	1.842 ± 0.019	16.63 ± 0.48	8 590	440

Nom usuel	Constellation	Nom Scientifique	Distance (a.l.)	Masse ($M_{\odot}$)	Rayon ($R_{\odot}$)	Lbol ($L_{bol\odot}$)	Température (K)	Âge (millions d'années)
Gemma	Couronne Boréale	Alpha Coronae Borealis	75.0 ± 0.5	2.58	2.89 à 3.04	74	9 700	314
Mérak	Grande Ourse	Beta Ursa Majoris	79.7 ± 0.3	2,7	3.021 ± 0.038	63.015 ± 1.307	9 377 ± 75	500 ± 100
Mérak	Grande Ourse	Beta Ursa Majoris	79.7 ± 0.3	2,7	3.021 ± 0.038	63.015 ± 1.307	9 377 ± 75	500 ± 100
Mirphak	Persée	Alpha Persei	510 ± 10	8.5 ± 0.3	68 ± 3	7 000	6 350 ± 100	41
Polaris (étoile polaire)	Petite Ourse	Alpha Ursa Minoris	325 à 425	4,5	46±3	2 500	6 015	70
Pollux	Gémeaux	Beta Geminorum	33.78 ± 0.09	2.04±0.3	8.8±0.1	43	4 666±95	724
Procyon	Petit Chien	Alpha Canis Minoris	11.46 ± 0.05	1.499 ± 0.031	2.048 ± 0.025	6.93	6 530±50	1870±0.130
Régulus	Lion	Alpha Leonis	79.3 ± 0.7	3.8	3.092 ± 0.147	288	12 460 ± 200	1000
Rigel	Orion	Beta Orionis	860 ± 80	21±3	78.9±7.4	120 000 ± 23 000	12100±150	8±1
Schedar	Cassiopeée	Alpha Cassiopeiae	228 ± 2	4 à 5	42.1 ± 1.7	676	4 530	100 à 200
Sirius A	Grand Chien	Alpha Canis Majoris	8.60 ± 0.04	2,02	1,711	25,4	9 940	225 à 250
Spica	Vierge	Alpha Virginis	250 ± 10	10.25 ± 0.68	7.40 ± 0.57	12 100	22 400	
Véga	Lyre	Alpha Lyrae	25.04 ± 0.07	2.135 ± 0.074	2.362 × 2.818	40.12 ± 0.45	9 602 ± 180	455 ± 13

2) Autres paramètres

Nom usuel	Constellation	Nom scientifique	mV	mB-mV	MV	Classe spectrale	Classe de luminosité	Type	Multiple ? (nombre d'étoiles)
Aldébaran	Taureau	Alpha Tauri	0,87	1,54	-0,641±0.034	K5	III	Géante	
Algol	Persée	Beta Persei	2,12	-0,05	-0,07	B8	V	Naine	3
Altaïr	Aigle	Alpha Aquilae	0,76	0,22	2,22	A7	V	Naine	
Antarès	Scorpion	Alpha Scorpii	0,96	1,83	-5,28	M1,5	I	Super géante	2
Arcturus	Bouvier	Alpha Bootis	-0,05	1,23	-0,30±0.02	K0	III	Géante	
Bételgeuse	Orion	Alpha Orionis	0,42	1,85	-5,85	M2	I	Super géante	
Capella	Cocher	Alpha Aurigae	0,08	0,80	0,35	K0	III	Géante	2
Castor	Gémeaux	Alpha Geminorum	1,93	0,03	0,986	A1	V	Naine	6
Deneb	Cygne	Alpha Cygni	1,25	0,09	-8,38	A2	I	Super géante	
Denebola	Lion	Beta Leonis	2,113	0,107		A3	V	Naine	
Dubhe	Grande Ourse	Alpha Ursa Majoris	1,79	1,07	-1.10±0.04	K0	III	Géante	2

Nom usuel	Constellation	Nom scientifique	mV	mB-mV	MV	Classe spectrale	Classe de luminosité	Type	Multiple ? (nombre d'étoiles)
Fomalhaut	Poisson Austral	Alpha Piscis Austrini	1,16	0,09	1,72	A3	V	Naine	3
Gemma	Couronne Boréale	Alpha Coronae Borealis	2,23	-0,02	0,16	A0	V	Naine	2
Markab	Pégase	Alpha Pegasi	2,48	-0,04	-0,70	B9	III	Géante	
Mérak	Grande Ourse	Beta Ursa Majoris	2,34	-0,02	0,41	A1	V	Naine	
Mirphak	Persée	Alpha Persei	1,806	0,483	-5,1	F5	I	Supergéante	
Polaris (étoile polaire)	Petite Ourse	Alpha Ursa Minoris	1,98	0,60	-3,6	F7	I	Supergéante	3
Pollux	Gémeaux	Beta Geminorum	1,14	1,00	1.08 ±0.02	K0	III	Géante	
Procyon	Petit Chien	Alpha Canis Minoris	0,34	0,40	2,66	F5	IV-V	Sous-géante	2
Régulus	Lion	Alpha Leonis	1,40	-0,11	-0,52	B8	IV	Sous-géante	3

Nom usuel	Constellation	Nom scientifique	mV	mB - mV	MV	Classe spectrale	Classe de luminosité	Type	Multiple ? (nombre d'étoiles)
Rigel	Orion	Beta Orionis	0,13	- 0,03	- 7.92±0.28	B8	I	Super géante	
Schedar	Cassiopeée	Alpha Cassiopeiae	2,240	1,16	- 1,985	K0	III	Géante	
Sirius A	Grand Chien	Alpha Canis Majoris	- 1,47	0,00	1,42	A1	V	Naine	2
Spica	Vierge	Alpha Virginis	0,97	- 0.23	- 3.55	B1	III-IV	Sous-géante	2
Véga	Lyre	Alpha Lyrae	0,03	0,00	0,58	A0	V	Naine	

- mV est la magnitude apparente dans le filtre photométrique visible ou vert (bande de longueurs d'ondes V). Plus elle est négative, plus l'étoile apparaît comme étant brillante.
- mB est la magnitude apparente dans le filtre photométrique bleu (bande de longueurs d'ondes B). Le résultat de la soustraction mB-mV, conventionnellement écrit B-V, donne la comparaison de la magnitude apparente de l'étoile entre le vert (bande visible V) et le bleu. Ce résultat permet de connaître la couleur de l'étoile, c'est-à-dire de savoir si elle est plutôt bleue (B-V négatif) ou plutôt rouge (B-V positif).
- MV est la magnitude absolue. C'est la magnitude apparente qu'aurait l'étoile observée depuis une distance de 10 parsecs.
- Le nom scientifique donné dans ces tableaux correspond la nomenclature de Bayer : une lettre grecque donnant le rang de l'étoile en termes de luminosité dans sa constellation, puis le nom latin de la constellation. Il existe d'autres noms scientifiques, liés aux catalogues de données dans lesquels l'étoile est référencée.

