



Arpenter

L'UNIVERS

Planètes et Gravitation

LIVRET PEDAGOGIQUE

Lycée

(v 3.2 – 08/08/2018)

Pour l'enseignant et l'animateur



Sommaire

Partie 1 : Introduction	3
Arpenter l'Univers	5
La thématique « Planètes et Gravitation »	13
A propos de Planète Sciences	19
Le télescope Jean-Marc Salomon	22
Partie 2 : Ateliers d'initiation	24
PG1 : La planétologie comparée et voyages interplanétaires	26
PG2 : La formation des planètes	42
PG3 : L'habitabilité	68
Partie 3 : Ateliers expérimentaux	87
PGAE1 : Préparation d'une observation	90
PGAE2 : Mesure de la masse de Jupiter	99
PGAE3 : Détection d'une exoplanète	103
PGAE4 : Mesure de la taille d'une montagne lunaire	107
Partie 4 : Documentation	111
Doc n°1 : Observer le Soleil en toute sécurité	113
Doc n°2 : Les échelles dans l'Univers	127
Doc n°3 : Le système solaire, notre système planétaire	150
Doc n°4 : La formation du système solaire	197
Doc n°5 : L'histoire de la planète Mars	206
Doc n°6 : Les exoplanètes	209
Doc n°7 : L'habitabilité des planètes et de leurs lunes	212
Doc n°8 : Les voyages interplanétaires	215
Partie 5 : Données	218



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.

II. Une aventure accompagnée

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.

I. 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

II. 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.

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.

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'École, 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 Planètes et Gravitation

En quoi cela consiste-il ?

Vous avez choisi la thématique Planètes et Gravitation. 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 Planètes et Gravitation, les jeunes découvriront la nature du Soleil qui éclaire nos journées et celle des planètes, ces mondes en orbite autour de celui-ci.

Ils apprendront à reconnaître, comparer les différents types de planètes, à caractériser leur surface (s'il y en a), leur atmosphère (s'il y en a), leur structure interne et leur habitabilité.

A partir de là, on reconstituera leur histoire, et au-delà, celle de notre système solaire. On apprendra la façon dont il s'est formé : disque protoplanétaire, accréation...

Enfin, on comparera notre système planétaire avec les autres, que l'on découvre par centaines, année après année. Contiennent-ils une étoile du même type que le Soleil ? Plusieurs étoiles ? Contiennent-ils les mêmes types de planètes ? Aux mêmes endroits ? On abordera à partir de ces questionnements les notions de zone habitable et de migration planétaire.

Les notions abordées iront de la thermodynamique à la climatologie 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 Planète et Gravitation se décline en 3 modules différents, qui peuvent être faits séparément ou en complémentarité sur plusieurs semestres ou années successifs(ves).

Ateliers d'Initiation



Module PG1

Planétologie comparée
et voyages interplanétaires

Objectifs :

- Savoir définir une planète.
- Comprendre le lien entre gravité et orbites.
- Comprendre et connaître le mouvement des planètes dans le système solaire.
- Découvrir la notion de voyage interplanétaire.



Module PG2

Formation des planètes
et exoplanètes

Objectifs :

- Comprendre les mécanismes de formation des systèmes planétaires.
- Savoir identifier les différents types de planètes.
- S'initier aux méthodes de détection des exoplanètes.



Module PG3

Soleil, Terre et
Habitabilité des planètes

Objectifs :

- Comprendre dans les grandes lignes le fonctionnement du soleil.
- Appréhender la notion de décroissance de la luminosité avec la distance.
- Comprendre le lien entre vent stellaire et habitabilité.
- Comprendre l'effet de la température et de la pression sur les états de l'eau.
- Appréhender la variété des conditions d'habitabilité.

Ateliers Expérimentaux

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

- Les points cardinaux
- **Vénus, l'étoile du berger**
- La Lune, notre satellite naturel
- Le soleil, notre étoile
- **Préparation d'une** observation

- Mesure de la masse de Jupiter
 - **Détection d'une exoplanète**
 - **Mesure de la taille d'une montagne lunaire**
- exemples d'ateliers expérimentaux détaillés page 88

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.

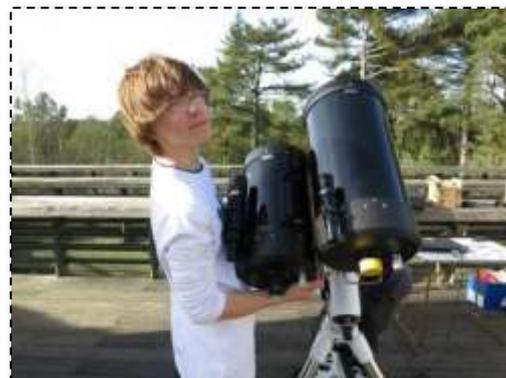
IV. Les activités de l'association

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).

V. 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.



VI. 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.

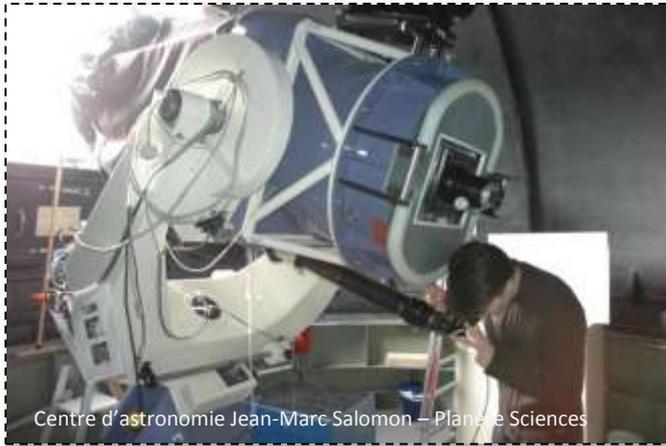
Le « TJMS » reçoit toutes sortes de publics, des classes de tous les niveaux aux groupes venus des Maisons de Jeunes et autres structures de loisirs, en passant par des étudiants. Tous y réalisent des projets d'astronomie expérimentale à leur niveau.

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).



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



Partie 2

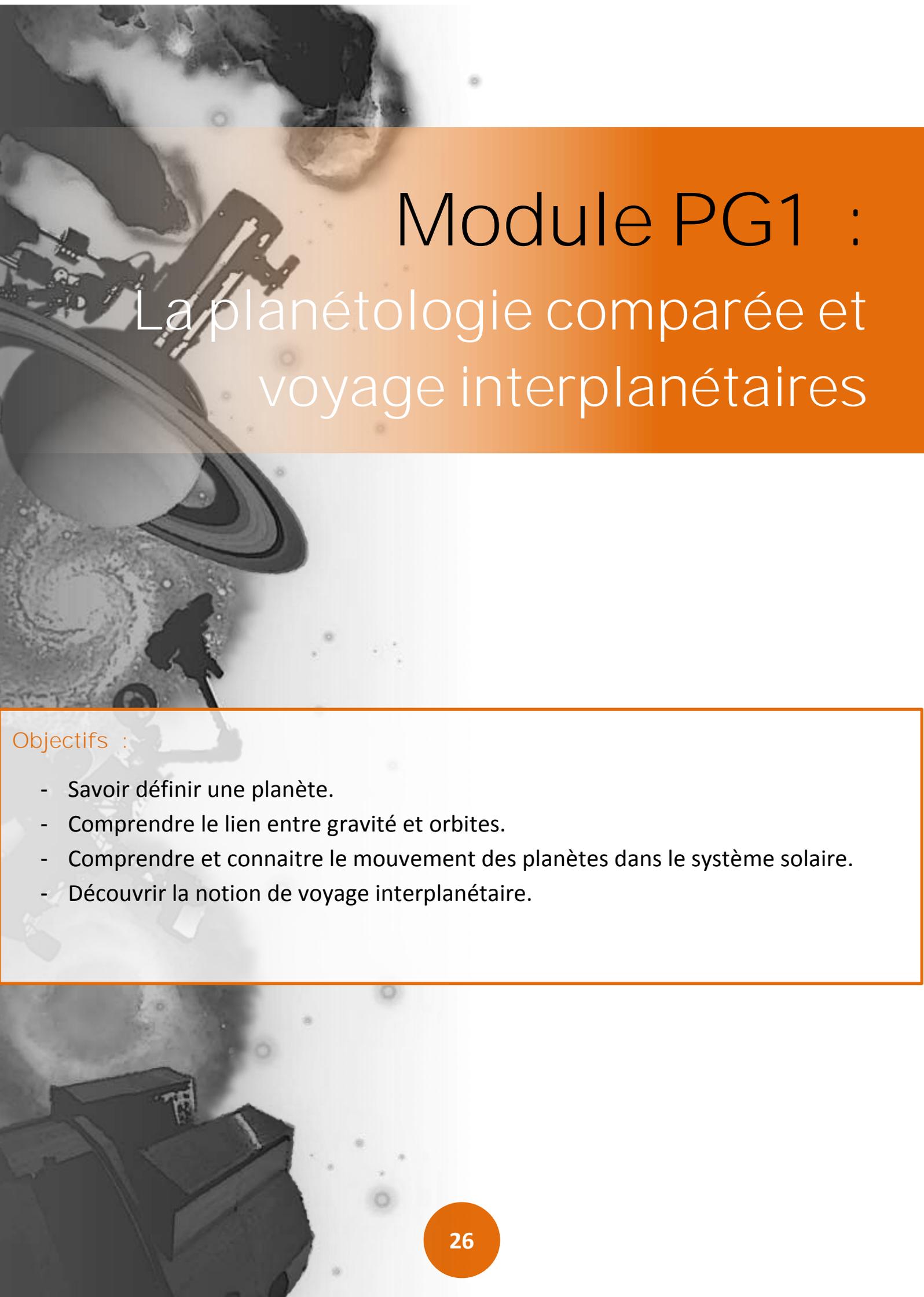
Ateliers d'initiation

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 des 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 PG1 :

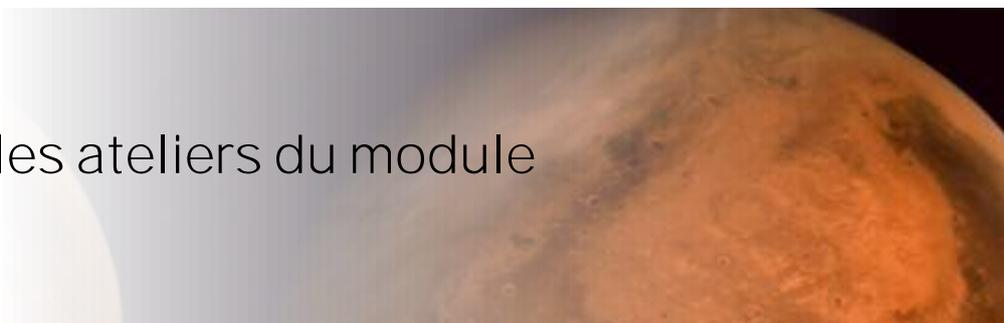
La planétologie comparée et voyage interplanétaires

Objectifs :

- Savoir définir une planète.
- Comprendre le lien entre gravité et orbites.
- Comprendre et connaître le mouvement des planètes dans le système solaire.
- Découvrir la notion de voyage interplanétaire.

Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	PGA1 PM	PG1 Petite malle	1
Prêt	PGA1 GM	PG1 Grande malle	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 définition d'une planète

Objectif :

- Comprendre ce qu'est une planète et la différencier des autres objets célestes.
- Comprendre la différence entre la nature d'un corps et sa situation spatiale.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Jeux des définitions

On distribue les cartes définitions à 4 groupes d'élèves, et on leur demande d'en sélectionner quelques-unes pour définir les objets célestes suivants, dans l'ordre que vous jugez utile :

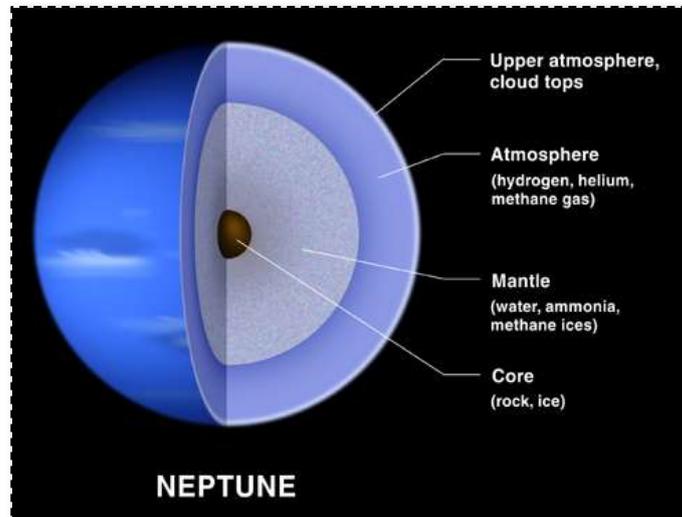
- Etoile
- Naine brune
- Planète
- Planète géante
- Planète tellurique
- Planète naine
- Lune ou satellite
- Astéroïde
- Comète

A chaque fois, un groupe propose une définition et on en discute pour voir s'il manque des éléments et/ou si certains sont incorrects ou en trop.

Variante : Il est également possible de diviser un même paquet de cartes entre plusieurs groupes d'élèves. Ainsi, chaque groupe a moins de cartes et des cartes différentes des autres groupes. Pour chaque astre énoncé, chaque groupe d'élèves se concerta pour voir s'ils ont des cartes définitions qui correspondent et les proposent (les déposent sur la table autour de laquelle tout le monde est, ou vont les accrocher sur le tableau...). On discute des cas où les définitions sont justes ou non et des subtilités éventuelles.

Etape 2 : Nature des planètes

On passe ensuite à une autre petite séquence où l'on décrit et compare des schémas de l'intérieur d'une planète géante type Jupiter, d'une planète géante type Neptune et d'une planète tellurique. Puis, on fait un quizz avec les affiches : il faut donner le bon type d'objet pour chaque photographie présentée.



Séquence 2

Comparaison de planètes

Objectif :

- Concevoir les planètes comme des mondes à part entière avec un ciel, un sol, un climat, une gravité, des montagnes, etc...

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Trouver les différences

Sur une première séquence, distribuer les images et photographie d'une planète donnée à des petits groupes. Laissez-les réfléchir et discuter pour élaborer une courte description de leur planète. On met ensuite en commun et chaque groupe énonce la description de sa planète. L'animateur peut alors rectifier des informations qui pourraient être erronées, et en proposer de nouvelles. On compare objectivement les planètes au tableau en décomposant les descriptions en quelques caractéristiques : taille, atmosphère, activité géologique, reliefs, âge de la surface (= cratérisation et érosion), type de planète (géante ou tellurique), etc...



Comparaison de la surface de Mars et de Jupiter

Etape 2 : Expérimenter les textures

Dans une seconde séquence, distribuer à 3 groupes les 3 maquettes 3D (Terre, Lune, Mars). Même principe, description au sein des groupes, puis mise en commun et établissement d'une comparaison objective. S'ensuit une séance de question/réponse entre les élèves et l'animateur pour éclaircir certains points et apporter des connaissances supplémentaires.

Séquence 3

Introduction à la gravité



Objectif :

- Observer les effets de la gravité sur différents milieux et objets.
- Comprendre comment on peut se libérer de la gravité d'un astre.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : La force de gravité et trajectoires

Grâce à différentes balles, on observe les effets de la gravité sur différents milieux et objets. On va :

- Lâcher une balle sans vitesse de différente hauteur (chute libre)
- Lancer une balle verticalement avec différente impulsion verticale.
- Plonger la balle dans l'eau. La balle normalement remonte.
- Renouveler les expériences avec une bille
- Tirs paraboliques : Imprimer une vitesse a la balle de manière à obtenir 3 types de trajectoire : Quasi verticale, cloche, tendu, et évoquer l'orbite.

A chaque démonstration en engage la discussion avec le public pour comprendre les causes et effet de la gravité sur terre.



Etape 2 : Orbites et vitesse de libération

Ensuite, nous allons :

- Accrocher la ficelle au plafond avec de la bande adhésive. A l'autre bout, accrocher la bille. Placez le tout à l'aplomb de la demi-sphère de polystyrène posée sur une table.
- Eloigner la bille de la bordure extérieure de l'hémisphère.
- Lâchez-la sans vitesse initiale (chute libre).
- Laissez-la à la surface.
- Donnez-lui une vitesse pour qu'elle retombe sur un autre point de la surface (tir parabolique).
- De nouveau éloignez la de la surface et essayez de lui imprimer une trajectoire circulaire ou elliptique (mise sur orbite).

A chaque démonstration engage la discussion avec le public pour comprendre les causes et effet de la gravité dans l'espace.



Séquence 4

Simulateur d'orbites



Objectif :

- Montrer de manière simplifiée le principe d'une orbite céleste, c'est-à-dire la trajectoire en courbe fermée d'un objet par rapport à un autre, sous l'effet de la gravitation.
- Constaté l'importance de la masse des objets et de leur vitesse.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Mise en place

1. Enrouler l'extrémité du drap sur les sections de gaine plastique, au moyen de l'ourlet.
2. A l'aide des joints, relier ensemble les trois sections de la gaine plastique de manière à former un cercle de 2 mètres de diamètre environ.
3. Placer en cercle une série de dossiers de chaises de manière à délimiter un espace central de deux mètres de diamètre, le plus plat possible.
4. Placer l'ensemble gaine et drap au centre.
5. Accrocher un poids entre chaque chaise à l'ourlet du drap.



Dans ce dispositif, le tissu élastique représente l'espace, les billes représentent les corps célestes se déplaçant « sur » l'espace de notre atelier simplifié en deux dimensions.

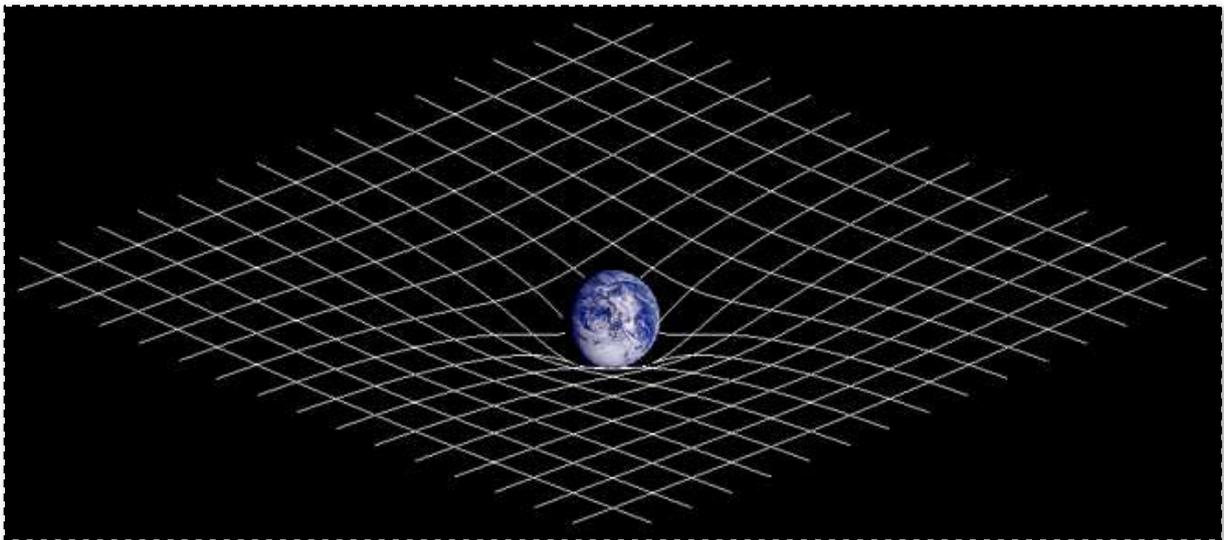
Etape 2 : le phénomène de gravitation

Énoncer que le drap représente l'espace et une bille un corps céleste de petite taille. Poser la question « Qu'est-ce qui crée le phénomène de gravitation ? »

Après discussion ouverte avec les élèves, ils sont invités à se servir du drap et d'une seule bille de petit diamètre. L'échec de cette première étape doit logiquement les conduire à solliciter les billes de plus gros diamètres, jusqu'à obtenir une courbure manifeste du tissu, en son centre.

Une fois la courbure obtenue, énoncer que l'objet représente le Soleil et proposer d'introduire sur le plan une autre bille de petite taille qui figurerait une planète.

Le glissement de la petite bille vers l'ensemble plus massif illustre le phénomène de gravitation. On peut ainsi illustrer le fait que la gravitation n'est pas une « force » et que le déplacement d'un objet dans l'espace ne s'opère jamais véritablement « en ligne droite ».



Etape 3 : Echapper à la gravitation

Poser la question « Comment échapper à la gravitation ? »

L'objet massif est laissé au centre du drap. Après discussion ouverte avec les élèves sur les différentes solutions possibles, les inviter à reproduire les solutions énoncées.

Ils devraient réussir à formuler et à reproduire deux solutions : se déplacer suffisamment loin de l'objet plus massif, aux extrémités du drap (afin de ne pas « subir » son influence gravitationnelle), ou se déplacer suffisamment vite (afin « d'échapper » à son influence gravitationnelle).

Etape 4 : Mise en orbite

Poser la question « Comment mettre un satellite ou un vaisseau spatial en orbite autour d'une planète ? »

L'objet massif, qui figure maintenant une planète comme Jupiter, est laissé au centre du drap. Après discussion ouverte, confier des billes aux élèves pour les laisser rechercher, en multipliant les essais, l'équilibre nécessaire entre distance, angle et vitesse de déplacement de la bille afin de réaliser le plus de révolutions possibles.

On peut ajouter ensuite un second objet massif, pour simuler le principe d'une orbite de transfert, « en huit ».



L'animateur pourra conclure par :

- une question posée sur la vitesse à laquelle il faut propulser un satellite pour que son orbite autour de la Terre soit suffisamment persistante (environ 28 000 km par heure)
- une indication de l'altitude minimale du satellite pour qu'il ne soit pas freiné par l'atmosphère (au moins 100 km)
- une évocation du problème lié à l'énergie (et donc au poids du carburant) qu'il convient de dépenser pour faire quitter l'atmosphère à un vaisseau spatial, puis le faire voyager dans l'espace, c'est-à-dire « transiter » d'une orbite à une autre.

Assistance gravitationnelle :

On peut aussi parler de l'effet d'assistance gravitationnelle : un vaisseau passant à proximité d'un objet avec la bonne vitesse et le bon angle peut profiter de l'accélération générée par sa masse (accélération de la pesanteur) pour... accélérer. Mais cela implique un changement de direction de trajectoire.

Pour aller plus loin :

On peut poser la question de l'illustration utilisée : en réalité, les objets s'attirent parce qu'ils sont massifs, et restent en orbite parce qu'il n'y a pas de frottements dans l'espace (c'est du vide).



Sur le drap, y a-t-il des frottements ? la gravité joue-t-elle un rôle, même indirect ? et s'il n'y avait pas de frottement, l'expérience marcherait-elle ? Sans drap, il n'y a pas de frottement et on pourrait penser que les billes resteraient en orbite. Mais sans drap, il n'y a pas « transmission » de l'effet de la gravité de la bille massive au centre à la bille qu'on place en orbite. Dans le champ gravitationnel de la Terre, l'attraction des billes entre elles est négligeable, donc sans drap, il ne se passerait rien du tout : les billes lancées iraient tout droit dans la direction du lancer.

On peut alors parler de la technique d'aérofreinage : pour ralentir un vaisseau, on peut lui donner une trajectoire rasante sur une atmosphère afin de le ralentir avec les frottements.

On peut aussi parler des vaisseaux cargos et habités qui une fois amarrés à la Station Spatiale Internationale sont utilisés pour rehausser la station en allumant leurs réacteurs. La Station n'étant qu'à 300 km d'altitude, il y a encore un peu d'air, et donc de frottements. La station tomberait sans ces actions !

Séquence 5

Système solaire vivant

Objectif :

- Comprendre et connaître le mouvement des planètes dans le système solaire.
- Introduction à la notion de voyage interplanétaire.

Durée : 45 min à 1h15

Etape 1 : Jeux du Système solaire vivant

Ce module d'animation requiert un grand espace : prévoir un hall, une cour ou une grande salle.

Chaque joueur se voit distribuer un bandeau correspondant à la planète qu'il va jouer. Dessus sont indiquées des informations nécessaires au placement de cette planète. La personne jouant le Soleil vient se placer au centre de la pièce. Sur l'orbite de la Terre, placer 12 cônes régulièrement espacés pour représenter 12 mois. Faire en sorte que 1 mois = 1 pas. On détermine ensuite avec les jeunes les diamètres des orbites (approximation circulaire) à l'échelle

Astre	Durée d'1 révolution autour du Soleil		Distance au Soleil (en U.A.)
	en mois	en années	
Soleil	0	0	0
Mercure	3	0,25	0,4
Venus	8	0,7	0,7
Terre	12	1	1
Mars	24	2	1,5
Ceres	60	5	2,8
Jupiter	144	12	5
Saturne	348	29	9,5
Uranus	1008	84	19
Neptune	1968	164	30
Pluton	2964	247	39
Eris	6696	558	67
Vaisseau	?	?	?

adaptée à l'espace disponible pour faire jouer le nombre d'objets souhaités (i.e : les orbites seront plus resserrées si l'on fait jouer jusqu'à Pluton). Pour les autres orbites, mettre simplement 4 cônes en carré afin de les matérialiser.

A partir des informations données, calculer avec les élèves le nombre de pas à effectuer par chaque objet pendant que la Terre en fait 1. Placer les joueurs sur les orbites correspondant à leurs objets dans une position initiale aléatoire. On peut énoncer / rappeler la 3ème loi de

Kepler : $T^2/a^3 = \text{cste}$ pour calculer les distances ou périodes de révolution des planètes, ou bien donner les valeurs directement et laisser les jeunes faire la règle de proportionnalité.

Déroulement :

Lancer le jeu en énonçant : « 1 mois ! » régulièrement. Les joueurs doivent alors se déplacer du nombre de pas correspondant pour leur objet. Au bout d'un moment, laissez les jeunes avancer d'eux-mêmes en s'observant.

Stopper le jeu au bout d'un moment, et questionner les jeunes sur leur interprétation :

- Les planètes sont-elles alignées ?
- Si Mars étend les bras, la main gauche représentant l'est, la main droite ouest, et si dans la position actuelle des planètes, elle tourne sur elle-même d'ouest en est, quels objets se lèvent et se couchent ? (les yeux de Mars représentent l'observateur sur Mars. Peut-on voir tout le temps les mêmes objets depuis Mars ? Semblent-ils se déplacer ? se déplacent-ils ?
- Si on veut aller de la Terre à Mars, le vaisseau peut-il aller tout droit ?

Variante ou suite : on peut regarder les éphémérides des planètes vues depuis la Terre sur stellarium, et demander au joueur-Terre de placer les planètes comme il le faut pour reproduire la configuration actuelle du système solaire.

Etape 2 : Voyage interplanétaire

Donner à un joueur le rôle d'un vaisseau spatial. Ce vaisseau se place à côté de la Terre. On lui donne la vitesse initiale de 1/2 pas = 1 mois. En faisant tourner le système, quelle trajectoire doit-il prendre pour que son vaisseau atteigne Mars ? Est-ce une ligne droite ? Une courbe ?

Introduire la notion d'orbites de transfert, qui sont des ellipses. Une fois Mars atteint, que faut-il faire pour la rattraper ? (parce qu'elle continue de tourner).

Réponse : pour amorcer un voyage vers une orbite externe à un objet, il faut accélérer, puis accélérer à nouveau pour suivre l'objet de l'orbite atteinte. Pour amorcer un voyage vers une orbite interne à un objet, il faut ralentir, puis ralentir de nouveau pour suivre l'objet de l'orbite atteinte.

Tester différentes hypothèses et différents voyages avec les jeunes.

Préciser que tout ceci est un modèle approximatif : en réalité le vaisseau n'avance pas à vitesse constante (cf « réponse » ci-dessus).

Séquence 6

Histoire de l'exploration du système solaire

Objectif :

- Connaître et comprendre l'évolution des connaissances et des recherches autour des planètes
- Connaître et comprendre l'histoire passée, présente et future de leur exploration.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Jeux Histoire de l'exploration du système solaire

Cet outil est inspiré du jeu Timeline.

- On distribue à chaque joueur 3 cartes qu'il pose devant lui.
- Chacun son tour, le joueur pose une carte face visible (date cachée) au centre de la table, d'une façon qui lui semble chronologique compte tenu des dates connues des cartes déjà posées (il est autorisé de regarder les dates des cartes déjà posées, et même conseillé de les laisser la face avec la date visible).
- A la fin du tour de jeu, on retourne la carte pour vérifier la date. Si la carte est correctement placée, on passe au joueur suivant. Sinon, le joueur pioche une nouvelle carte qu'il place devant lui.
- Si à son tour de jeu, un joueur ne sait positionner aucune de ses cartes, il peut passer son tour en piochant une nouvelle carte qu'il pose devant lui.
- La partie se termine lorsqu'un joueur place avec succès sa dernière carte. On peut alors finir le tour de table.

Mesure de la circonférence de la Terre



Eratosthène mesure la circonférence de la Terre. Nous ignorons quelle est la valeur exacte de l'unité de mesure qu'il utilisait, mais les approximations dont nous disposons invitent à penser qu'il accordait à la Terre une circonférence d'environ 39 375 km, ce qui est proche des mesures actuelles (40 000 km environ).

Description du phénomène des marées



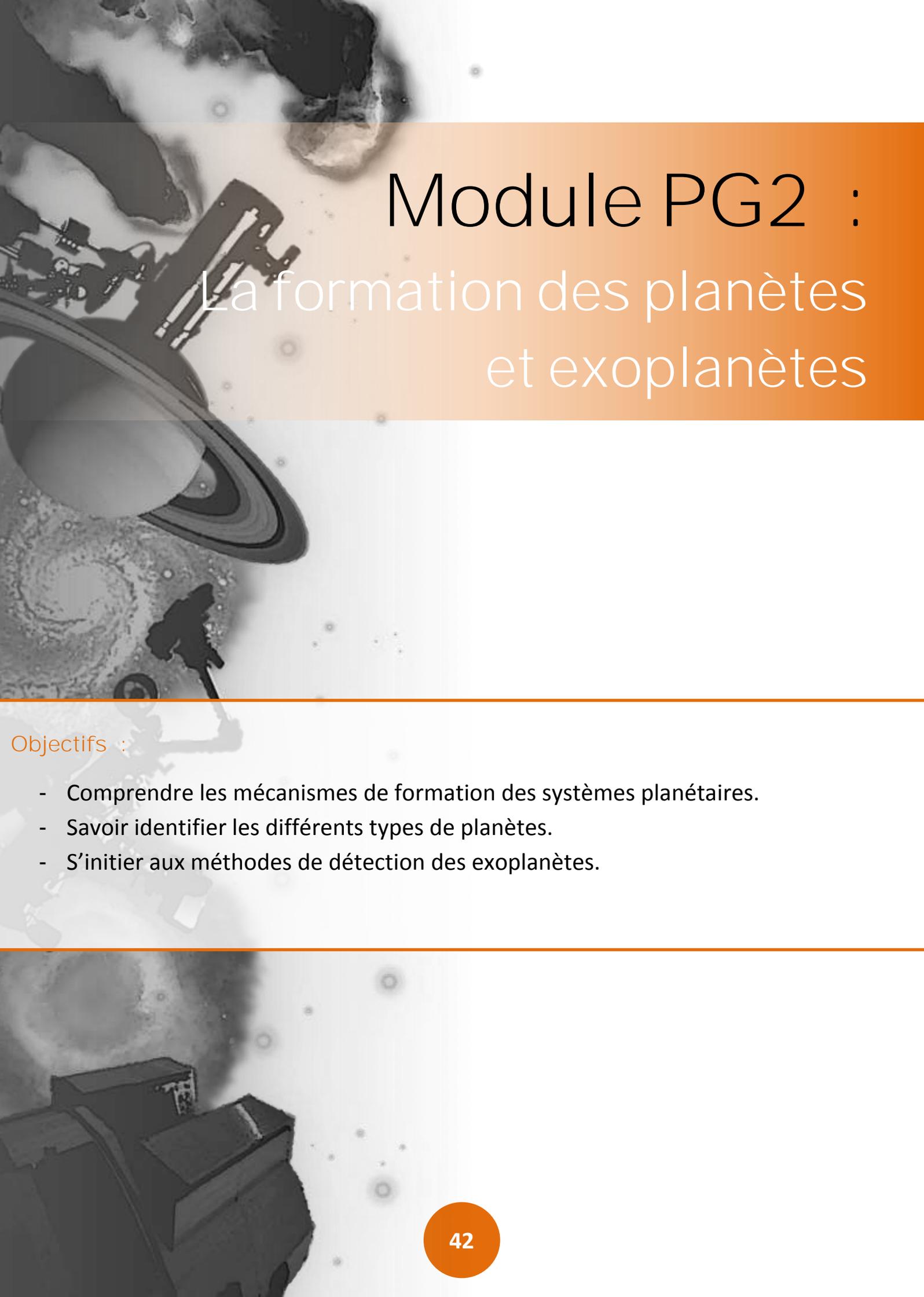
Le perse Abou Mas'har al-Bal'hi décrit le phénomène des marées.

Il est possible de jouer en mode coopératif : on discute ensemble (ou par petits groupes) de la position de chaque carte.

Variante : jouer non pas en classe entière mais par groupe de 4 ou 5, chaque groupe obtient une frise avec les cartes posées par ses joueurs. Une deuxième phase de jeu peut consister à fusionner les frises des différents groupes sur une longue table pour que chaque groupe repère comment s'insère ses cartes événements dans la chronologie globale.

Liens avec les programmes scolaires





Module PG2 :

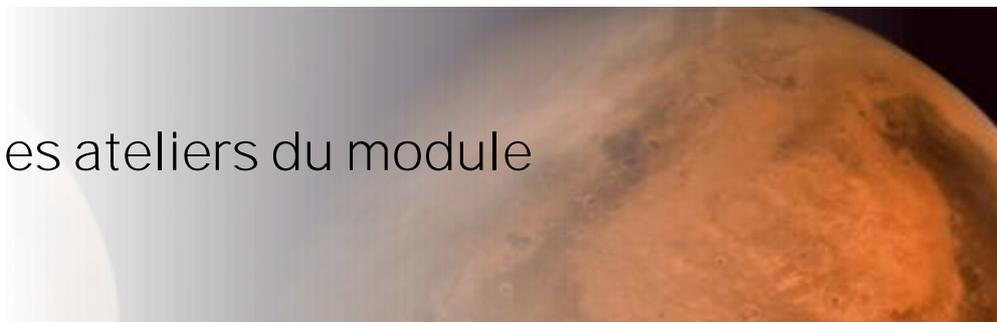
La formation des planètes et exoplanètes

Objectifs :

- Comprendre les mécanismes de formation des systèmes planétaires.
- Savoir identifier les différents types de planètes.
- S'initier aux méthodes de détection des exoplanètes.

Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	PGA1 PM	PG1 Petite malle	1
Prêt	PGA1 GM	PG1 Grande malle	1

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

Séquence 1

Formation du système solaire

Objectif :

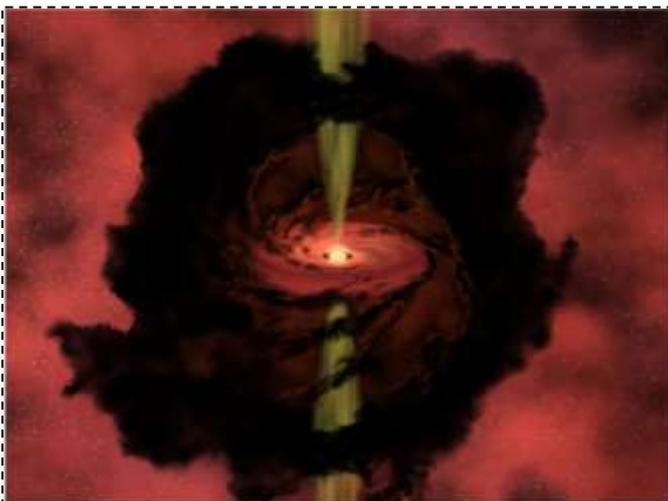
- Comprendre comment s'est formé le Soleil, puis le système solaire.

Durée : 30 min à 45 min

Etape 1 : Jeux formation du système solaire

Déroulement et explications :

Chaque association d'un texte et d'une illustration représente une étape de la formation du Soleil et du système solaire. Distribuez des cartes texte et illustration à des petits groupes d'élèves. Ils devront réfléchir ensemble et échanger des cartes et des informations avec les autres groupes pour associer les bons textes avec les bonnes illustrations d'une part, et mettre le tout dans l'ordre chronologique d'autre part.



Au centre du grumeau effondré, la matière est plus dense. Il y a donc plus de collisions entre les molécules et les atomes constituant ce nuage. Chaque collision leur fait perdre de l'énergie cinétique. L'énergie ne peut qu'être conservée, et elle se change en chaleur : le centre du grumeau chauffe et se densifie de plus en plus vite.

Exemple d'illustration et texte du Jeux de formation du système solaire

Séquence 2

Le mécanisme d'accrétion

Objectif :

- Comprendre comment et avec quoi se forment les planètes,
- Identifier leurs différences de types, de composition et de constitution..

Durée : 45 min à 1h15

Etape 1 : Jeux mécanisme d'accrétion

Déroulement et explications :

Il est conseillé de construire cet outil à l'avance, ou pendant qu'un collègue anime. La pose initiale des cubes de matière peut se faire avec les élèves si elle est utilisée pour comprendre les notions abordées.

Construction du support de jeu

Construire le support avec les plaques A1 à H1 et A2 à H2. Attention, placez-les dans l'ordre, sens horaire. Sinon, les plaques n'étant pas parfaites, il se peut que la dernière s'emboîte mal. Assurez-vous que vous placez le support sur une table bien plate (pas entre deux tables), sinon le mécanisme tournant de cet outil va se gripper sur les jointures des plaques.



Construire la partie supérieure avec les arcs de cercle en partant du bord (pour éviter un forçage lors de la pose). Avec de la patafix, coller la demi-boule de polystyrène au centre du support : elle représente l'étoile. Les cercles, mobiles les uns par rapport aux autres représentent des zones orbitales. Placer les clés et le dé à portée de main.

Pose initiale des cubes

Le nuage de gaz et de poussière restant autour du proto-soleil s'aplatit sous forme d'un disque en tournant autour, et les matériaux les plus denses migrent vers le centre du système. Les plus volatiles vers les parties externes.

On va donc se retrouver avec une concentration plus forte de métaux près de l'étoile, de roche un peu plus loin, et de glace après une certaine distance. Le tout baignant dans du gaz, très vite repoussé par le vent stellaire dans la partie externe du disque (au bout d'une durée de l'ordre de 1 million d'années).

On va donc placer les cubes sur les orbites selon la répartition approximative suivante :

Orbite / matériau	Métaux	Roches	Glaces	Gaz
1	5	5		
2	10	10		
3	5	10		5
4		5	10	20
5			20	30
6			20	15

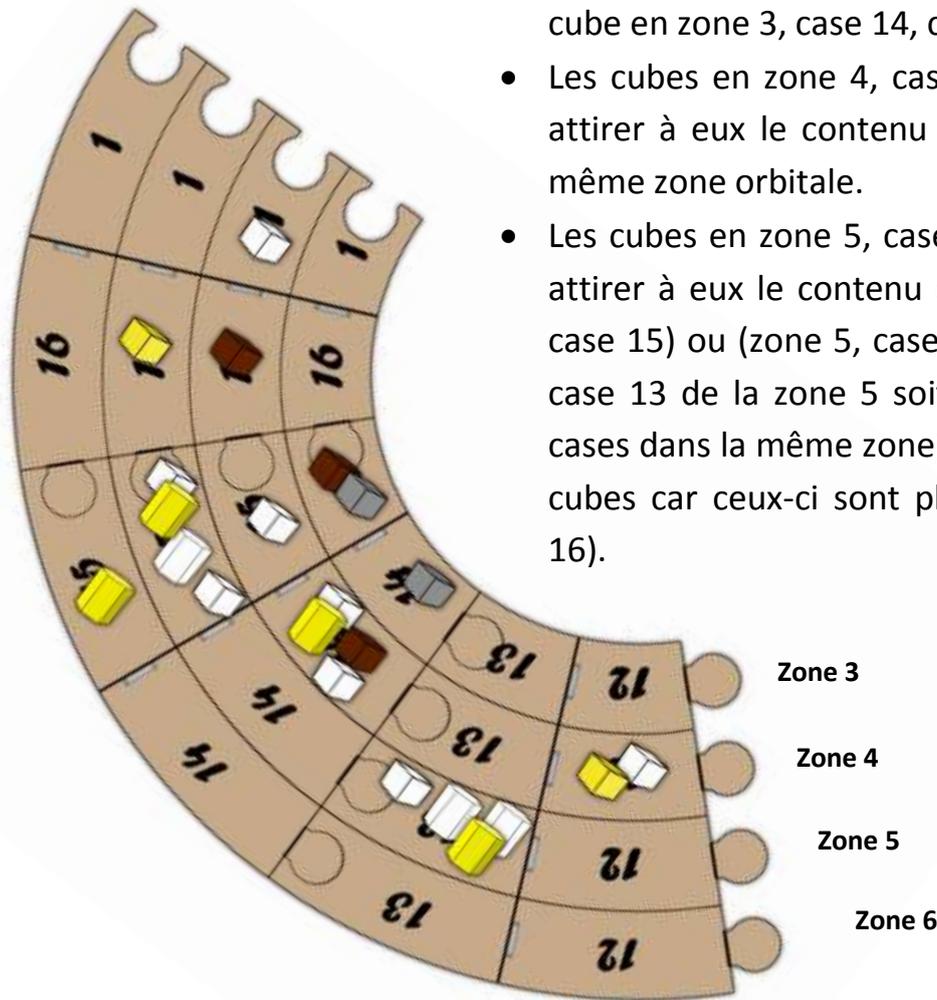
Les cubes de métaux sont gris, les cubes de roches sont marron, les cubes de glaces sont blancs, les cubes de gaz sont jaunes. Sur une orbite donnée, répartir les cubes aléatoirement sur les cases. Il peut donc y avoir plusieurs cubes par case. Vous disposez de cubes de 1 unité de masse, et de prismes hexagonaux de 5 unités de masse.

Tour de jeu

- Lancer le dé : le résultat indique une zone orbitale. La zone 1 est la plus interne.
- Choisir une case dans cette zone :
 - Si cette case initiale contient de 2 à 5 cubes inclus : compter le nombre de cubes présents sur les deux cases qui la jouxtent dans la même zone orbitale. Choisir l'une de ces cases qui contient strictement moins de cubes que la case initiale et transférez ces cubes sur la case initiale.
 - Si cette case initiale contient de 6 à 10 cubes inclus : même principe, vous choisissez une case dont vous prenez les cubes, mais vous pouvez aller chercher les cubes 1 case plus loin dans les deux directions.

- Si cette case initiale contient plus de 10 cubes : même principe, vous choisissez une case dont vous prenez les cubes, mais vous pouvez aller chercher les cubes sur les deux cases qui la jouxtent sur les deux zones orbitales voisines.

Exemple :



- Les cubes en zone 3, case 15 peuvent attirer à eux le cube en zone 3, case 14, car ils sont deux contre un.
- Les cubes en zone 4, case 14 sont 8, ils peuvent donc attirer à eux le contenu des cases 16, 15 ou 12 de la même zone orbitale.
- Les cubes en zone 5, case 15 sont 12, ils peuvent donc attirer à eux le contenu de (zone 6, case 15), (zone 4, case 15) ou (zone 5, case 16). En revanche, bien que la case 13 de la zone 5 soit à une distance accessible (2 cases dans la même zone), ils ne peuvent pas attirer ces cubes car ceux-ci sont plus nombreux qu'eux (ils sont 16).

Fin du tour de table

Avec l'aide des clés, on fait tourner le disque ainsi :

- Zone 6 : 1 case
- Zone 5 : 2 cases
- ...
- Zone 1 : 6 cases

Fin de la partie

La partie s'arrête lorsqu'il devient impossible d'accréter de nouveaux cubes. On explique que les gros paquets de cubes sont des proto-planètes, et que les cubes solitaires sont des briques inutilisées appelées planétésimaux. La phase d'accrétion est terminée, mais comme elle a produit une importante quantité de corps solides, ceux-ci vont mutuellement perturber leurs orbites et on va entrer dans une phase de collisions. Ainsi, le système va se dépeupler, et certains corps vont grossir : des proto-planètes deviendront des planètes et les planétésimaux restant deviendront des astéroïdes et des comètes.

On retire alors le contenu de quelques cases du jeu et on reconstitue ces proto-planètes. On peut ainsi expliquer le phénomène de différenciation : sous l'effet de la gravité, au sein d'une proto-planète, les matériaux les plus denses migrent vers le cœur, alors que les plus volatils restent dans les couches externes. On doit donc faire une sculpture avec les cubes gris au cœur, puis les marrons autour, puis les blancs, puis les jaunes.

On peut alors faire la distinction entre planètes géantes et planètes telluriques.

- Les planètes géantes se forment en deux temps : d'abord un cœur de glaces (5 à plus de 40 masses terrestres) avec parfois des roches mêlées en 1 million d'années, puis ce gros noyau capte une très grande quantité de gaz, de part sa masse, avant qu'il ne soit soufflé par l'étoile. Ces planètes ne peuvent donc que se former au-delà de la limite des glaces.
- Les planètes telluriques se forment proches de leur étoile, avec des matériaux lourds. Elles n'attirent que très peu de gaz durant leur formation, et celui-ci se trouve mélangé à ses roches. Une atmosphère se forme lorsqu'il est expulsé par du volcanisme.



Séquence 3

Comparaison d'intérieurs planétaires

Objectif :

- Faire le lien entre l'accrétion et la composition des planètes.

Durée : 30 min à 45 min

Etape 1 : Maquettes 3D

Vous disposez de 4 maquettes de planètes de notre système solaire. Une portion se détache pour révéler la composition et la structure internes de ces planètes.

On va distinguer deux cas :

- les planètes telluriques : qui contiennent des matériaux solides et fluides composés de roches (silice) et de métaux (fer, nickel). Ces matériaux étaient sous formes de grains solides de roches et de métaux dans le disque proto-planétaire (cubes marron et gris).
- Les planètes géantes qui contiennent des matériaux gazeux et fluide. Ces matériaux étaient sous forme de gaz et de grains de glace dans le disque proto-planétaire (cubes jaune et blancs).

Au cœur des planètes géantes, on trouve quelques traces de silice, de fer et de nickel, mais on ne trouvera pas de restes de glaces au sein des planètes telluriques. Le peu qui s'y trouve y est arrivé plus tard par les impacts de comètes venues des confins du système solaire.



Un problème de vocabulaire et de conventions :

Les astronomes font un abus de langage et continuent d'appeler « glaces » les molécules suivantes : H₂O (eau), NH₃ (ammoniac), CH₄ (méthane) lorsqu'elles sont à l'intérieur des planètes géantes. Si ces matériaux étaient bien sous forme de grains solides dans le disque proto-planétaires, ils sont désormais sous formes de liquides très chauds et très denses au sein des planètes géantes. Uranus et Neptune se sont formées à partir d'une plus grande proportion de glaces que de gaz. C'est pourquoi l'on donne l'appellation « planète géante glacée » à Uranus et Neptune. Mais elles sont absolument ni solides, ni gelées. Elles sont avant tout liquides.

De même, quand on dit que le manteau d'une planète tellurique est constituée de roches, il faut bien comprendre que cela n'est pas lié à l'état dans lequel se trouve cette matière : elle est solide près de la croûte, mais liquide près du cœur. Ce qu'on appelle roches, ce sont les molécules à base de silicium (La silice, SiO₂, par exemple).

Enfin, lorsqu'on parle de gaz, au sein d'une planète géante, celui-ci n'est absolument pas à l'état gazeux, mais bien liquide, à cause de la pression énorme qui y règne. Les planètes comme Jupiter et Saturne se sont formées à partir d'une plus grande proportion de gaz que de glaces, c'est pourquoi on les appelle « planètes géantes gazeuses ». Mais elles sont avant tout liquides. Ce qu'on appelle « gaz », ce sont l'hydrogène (H) et l'Hélium (He).

Cette façon d'écrire est assez peu commode car elle apporte une confusion entre la nature du matériau (les molécules qui le composent) et son état (solide, liquide, gaz, plasma). Vous la trouverez cependant sur toutes les sources d'information en planétologie : wikipedia, livres, conférences... A vous, animateur, de clarifier cela auprès de votre public.

Solution :

Le plus simple est de bien différencier les matériaux d'origine (dans le disque protoplanétaire) et les matériaux transformés (présents dans les planètes) :

- Les matériaux d'origine sont soit à l'état de gaz ou de plasma (H, He), soit solides : roches (SiO₂), glaces (H₂O, NO₃, CH₄), métaux (Fe, Ni). Et dans le jeu, cela correspond aux cubes jaunes, marron, blancs et gris respectivement.
- Les matériaux transformés peuvent être à l'état de plasma, de gaz, de liquides ou de solides et certains matériaux d'origine ont changé d'état.

Séquence 4

Détection d'exoplanètes

Objectif :

- Comprendre les principales méthodes de détection d'exoplanètes, et les informations qu'elles permettent d'obtenir.

Durée : 1h15 à 1h45

Etape 1 : Imagerie directe

Placer le spot au bout d'un long couloir sombre, et le cotillon à quelques cm sur le côté. Placer les observateurs à l'autre bout du couloir.

A l'œil nu, que voit-on ? On ne voit que le spot, et pas la réflexion du spot sur le cotillon. C'est un problème de contraste : l'écart de luminosité est trop grand entre l'étoile et sa planète.

Normalement, lorsqu'on a un problème de contraste en photographie, on change l'exposition, le temps de pose. En le diminuant, l'étoile paraîtrait moins lumineuse sur l'image... mais on n'aurait alors pas assez de temps de pose pour voir la planète, car le capteur n'est pas assez sensible. On pourrait aussi augmenter le temps de pose, afin de capter plus de photons venant de la planète, en faisant saturer l'étoile. Mais justement, comme la planète est très proche de l'étoile, le petit point qu'on verrait d'elle serait noyée dans la grosse tache saturée de l'étoile.

Alors, que faire ?

On peut essayer de cacher l'étoile avec un coronographe. Faire le test en tenant un disque en bois à bout de bras de manière à cacher le spot sans cacher le cotillon. Le problème c'est qu'un coronographe n'annule jamais complètement l'étoile.

Les astronomes ont besoin d'associer à cela d'autres techniques pour obtenir une image d'une exoplanète :

- Observer dans le domaine infrarouge, où l'étoile émet moins, et où la planète émet (car elle est chaude) sa propre lumière en plus de celle qu'elle réfléchit de son étoile. Cela diminue le contraste et rend la coronagraphie plus efficace.
- Utiliser un coronographe avec un masque d'une forme non-circulaire, mais finement calculée pour que les résidus de l'étoile soient le moins gênant possible.
- Utiliser l'optique adaptative pour corriger les effets de la turbulence atmosphérique qui déforment les images et empêchent de bien séparer l'étoile de la planète sur l'image.

Ce que permet d'obtenir l'imagerie directe :

- l'albedo de la planète
- ses caractéristiques orbitales
- la composition de son atmosphère / de sa surface (si on peut faire un spectre)

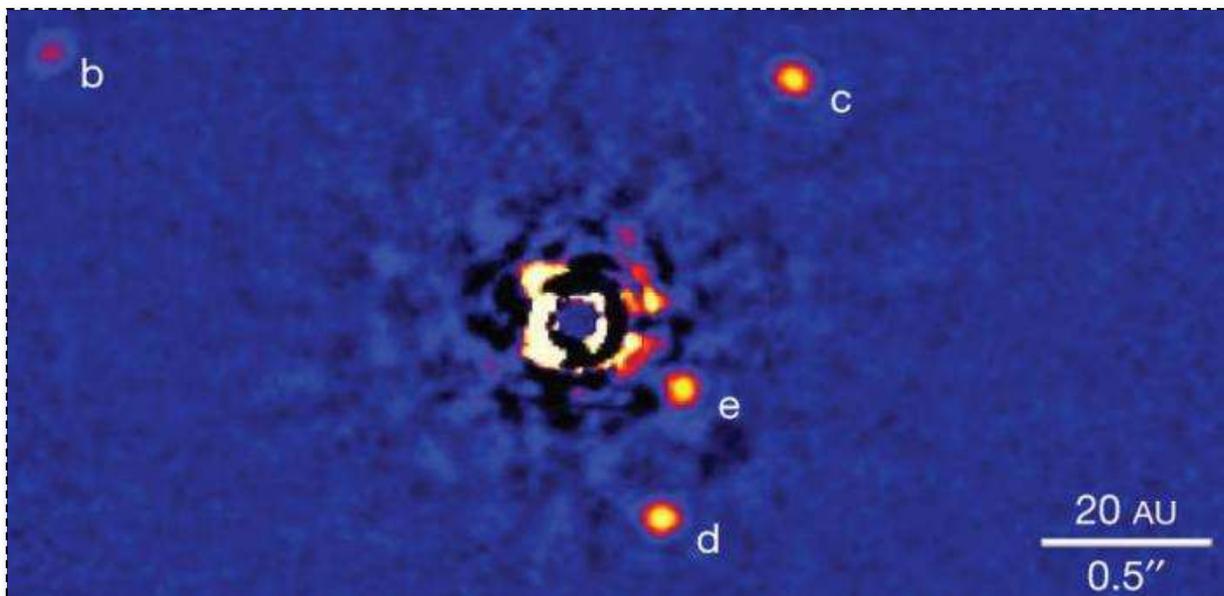


Image directe des 4 planètes en orbite autour de l'étoile HR8799. Le petit trait horizontal donne l'échelle : 20 AU (20 "unités astronomiques" correspond environ à la distance Soleil-Uranus. Cette image a été obtenue avec le télescope géant Keck, en masquant la lumière de l'étoile centrale avec un coronographe © J. Rameau (UdeM), C. Marois (NRC Herzberg)

Etape 2 : Transit planétaire

Cette méthode est indirecte. Il s'agit d'utiliser la photométrie et donc de mesurer le flux lumineux reçu d'une étoile à des instants successifs. Si le hasard fait que la ligne de visée est dans le plan de l'orbite d'une planète de cette étoile, cette planète va venir masquer une partie de la lumière de cette étoile, et les mesures de photométrie vont mettre en évidence une baisse du flux lumineux reçu. Pour confirmer l'existence d'une exoplanète par cette méthode, il faut vérifier que la baisse de flux lumineux observée n'a pas une autre cause. Comme la planète est en orbite, on va pouvoir observer plusieurs transits successifs et réguliers, et ainsi confirmer son existence.

Ce que permet d'obtenir la méthode des transits planétaires :

- la taille de la planète (si on connaît l'angle entre la ligne de visée et le plan de son orbite)
- sa période de révolution (si on connaît l'angle entre la ligne de visée et le plan de son orbite)
- la distance à son étoile (si on connaît l'angle entre la ligne de visée et le plan de son orbite)
- la présence de lune et/ou d'anneaux (qui provoquent des baisses de flux lumineux juste avant et/ou après le transit).
- la composition de son atmosphère dans certains cas particuliers où l'on peut voir la lumière de l'étoile passer au travers de l'atmosphère de la planète.

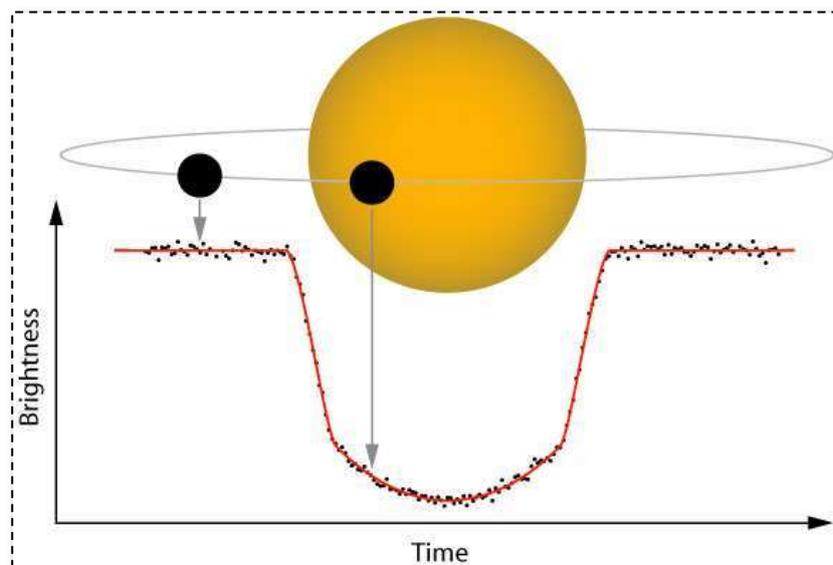


Schéma illustrant le principe du transit planétaire s'accompagnant d'une baisse de luminosité de l'étoile d'autant plus importante que l'exoplanète est de grande taille par rapport à son soleil.

Ex © Institute for Astronomy, University of Hawaiï

Faire le test en faisant passer des disques de carton juste devant le spot pendant que des observateurs construisent une courbe de lumière avec un photomètre au bout du couloir.

Pour faire cette expérience, on va devoir commencer par définir quelques mots, qui seront vus en détail lors de l'atelier suivant (PG3) :

- Puissance lumineuse : La puissance est la quantité totale d'énergie produite par une source en une seconde. La puissance lumineuse, aussi appelée luminosité en astronomie, est donc la quantité totale d'énergie lumineuse produite par une source (par exemple une étoile) en une seconde. Une puissance se mesure en général en **Watt (W)**. La puissance a pour dimension une énergie divisée par un temps, donc ML^2T^{-3} . On peut donc aussi écrire :

$$1W=1 J.s^{-1} \text{ ou encore } 1W=\underline{kg}\cdot\underline{m^2}\cdot\underline{s^{-3}}.$$

- Flux lumineux : Un flux est une puissance passant à travers une surface. Un flux lumineux est donc une puissance lumineuse émise ou reçue par une surface. Autrement dit, si je dispose d'un détecteur de lumière (un photomètre) possédant une surface sensible de $1m^2$, et que je le place face à une source lumineuse, il va mesurer la fraction de la puissance lumineuse reçue par ces $1m^2$. Si je disposais d'une surface sensible qui englobait totalement la source lumineuse, mon détecteur mesurerait la totalité de la puissance lumineuse de la source. Le flux lumineux se mesure en $W.m^{-2}$, ou en $J.s^{-1}.m^{-2}$ et a pour dimension MT^{-3} . Le flux lumineux que reçoit mon détecteur est $F=L/4\pi d^2$. C'est cette grandeur que l'on va mesurer dans cette expérience.

La surface du détecteur du photomètre est une demi-sphère de 23 mm de diamètre. Cette surface vaut $S_d=4\pi r^2/2$ avec $r=0,023m$. On trouve $S_d=0,0033m^2$.

Le photomètre dont on dispose est un luxmètre. Il mesure le flux lumineux sous forme de **lux**, qui peut s'écrire aussi $lm.m^{-2}$. Le lumen (lm) est une unité de puissance lumineuse, mais elle est définie exclusivement pour le domaine de longueurs d'onde visible. Dans le domaine visible, ce qui nous intéresse ici, on a $1W=683 lm$.

On a donc : $1 lux=0,00146 W.m^{-2}$.

Avec tous ces éléments, on va pouvoir faire l'expérience :

- 1) Choisir un disque de carton (une planète) et mesurer son diamètre à la règle. Noter ou retenir cette valeur.
- 2) Placer le spot allumé au bout du couloir.
- 3) Un élève emporte la planète et se place près du spot.
- 4) Un autre élève se place à l'autre bout du couloir avec le luxmètre. Bien repérer au sol ou au mur la distance à laquelle les mesures seront faites. Mesurer le flux lumineux reçu du spot lorsque la planète ne se trouve pas devant, puis lorsqu'il est complètement masqué (demander à l'élève près du spot de se mettre devant le spot). Ces deux points de mesure seront les maximum et minimum de flux lumineux que l'on pourra mesurer.
- 5) Connaissant ces deux valeurs, tracer les axes d'un diagramme flux lumineux (ordonnées) vs temps (abscisses) au tableau ou sur une feuille. Grader l'axe des ordonnées en lux ou en $W.m^{-2}$, et l'axe des abscisses en minutes.
- 6) On va utiliser de fausses minutes : l'élève va déplacer le disque de carton depuis la gauche du spot vers sa droite (ou l'inverse) pendant un nombre N d'étapes, avec un déplacement de même longueur à chaque étapes. Et on dira que chaque petit déplacement aura duré une minute en réalité. **Attention à bien faire passer le disque au centre de l'étoile : on va prendre une ligne de visée parallèle au plan de l'orbite de la planète.**
- 7) A chaque nouvelle position de la planète, mesurer le flux lumineux reçu et inscrire le point sur le diagramme.
- 8) Une fois le transit terminé, relier les points pour tracer la **courbe de lumière** du transit.
- 9) Repérer le point le plus bas de la courbe. Il correspond au flux F_{min} . Repérer la valeur du F_{max} du flux de l'étoile lorsque la planète n'est pas devant. Calculer le pourcentage maximum de baisse de luminosité : $P=100 \times F_{min}/F_{max}$.
Mesurer le petit côté a du spot lumineux en cm, et calculer sa surface S_{spot} en considérant que c'est un disque (approximation) : $S_{spot}=\pi(a/2)^2$. La surface de l'étoile masquée par la planète lorsqu'elle est entièrement devant est donc : $S_{masq}=P \times S_{spot}$. C'est la surface du disque de la planète ! On peut donc calculer le diamètre d de la planète : $d = 2\sqrt{S_{masq}/\pi}$ en cm.
- 10) Comparer le diamètre ainsi calculé avec celui mesuré à la règle.

Conclusion

On peut calculer le diamètre d'une planète grâce à un transit. Mais que se passe-t-il si la ligne de visée n'est pas parallèle au plan de son orbite ? Le minimum de la courbe de lumière se produira peut-être alors que la planète n'est pas entièrement devant son étoile ! et par conséquent, la valeur de son diamètre sera sous-estimé. Et si la planète est très grosse ou très éloignée de son étoile, il se peut qu'elle ait une taille apparente plus grande que son étoile et qu'elle cache plus que l'entièreté de son étoile au minimum de la courbe de lumière ! Là encore on va sous-estimer son diamètre.

Dans le cas réel d'une planète en orbite d'une étoile, on peut aussi calculer la distance de la planète à son étoile et sa période de révolution, toujours en supposant que la ligne de visée est parallèle au plan de son orbite.

1) Calculons la distance **A** de la planète à son étoile.

On peut calculer la vitesse orbitale de la planète de deux façons :

- A partir de la durée du transit : la planète a parcouru la distance **d** (son diamètre) pendant la durée **t** du transit, que l'on peut mesurer sur la courbe de lumière.
 $V_{orb} = d/t$.
- A partir de la troisième loi de Kepler (remise dans la bonne forme), si on connaît la masse **M** de l'étoile :

$$V_{orb} = \sqrt{GM/A}$$

$G = 6,67408 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ Constante gravitationnelle
--

Donc on a :

$$A = \frac{GMt^2}{d^2}$$

On peut calculer la période de révolution ainsi :

$$T = 2\pi A / V_{orb}$$

2) Autre méthode : Supposons que le transit se reproduit 2 ans après. La période de révolution de la planète est **T=2ans**, obtenue sans rien faire ! Supposons que l'on connaisse la masse **M** de l'étoile.

La troisième loi de Kepler nous dit que :

$$\frac{T^2}{A^3} = cste = \frac{4\pi^2}{GM}$$

$$A = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$$

Etape 3 : Vitesses radiales

Cette méthode indirecte utilise l'effet Doppler : la modification, induite par le mouvement d'une source, de la fréquence de l'onde qu'elle émet.

Prenons l'exemple d'un camion de pompiers sirène allumée, qui passe dans la rue lorsque vous êtes sur le trottoir. Pour simplifier, supposons que la sirène n'émet qu'une seule note. Représentons l'onde sonore comme des cercles émis à intervalles réguliers par le camion, centrés sur le camion et s'élargissant ensuite pour se propager dans l'air.

Si le camion est immobile, l'intervalle entre deux cercles, deux crêtes de l'onde est invariant avec le temps. La fréquence de l'onde ne change pas, et on perçoit continûment la même note.

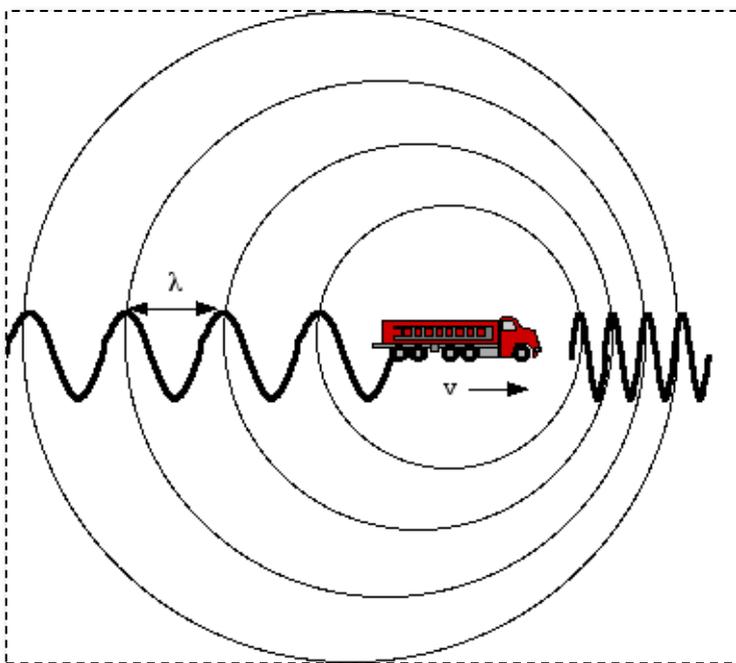


Illustration de l'effet Doppler avec la sirène d'un camion de pompier. © S.Ilovasky, observatoire de Haute Provence

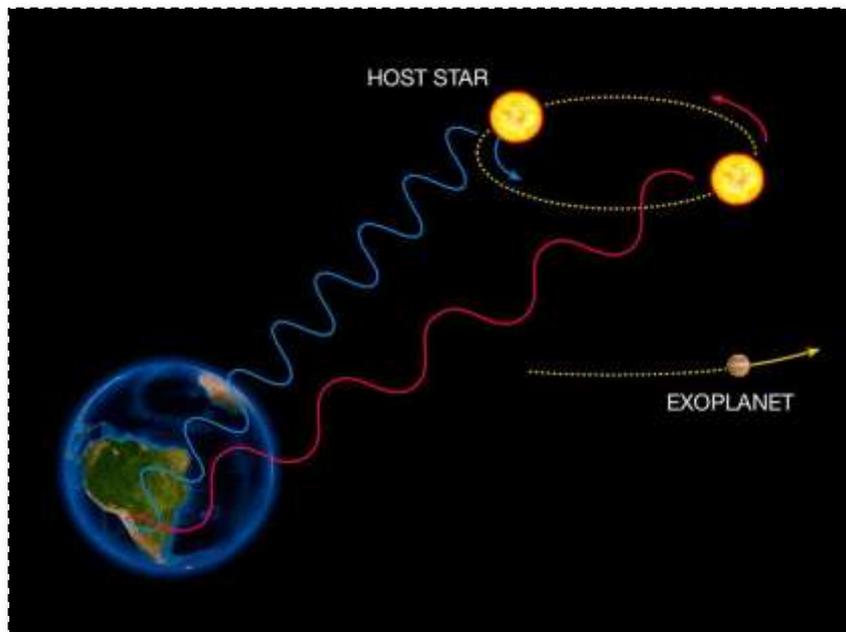
Si le camion est en mouvement les choses vont changer. Le cercle émis à l'instant t a été émis à une position plus avancée dans la direction et le sens du mouvement du camion que le cercle émis à l'instant $t-1$. Par conséquent, le cercle émis à l'instant t va rattraper une partie de son retard sur le cercle émis à l'instant $t-1$, dans la direction et le sens du mouvement du camion. Dans l'autre sens, le cercle émis à l'instant t va au contraire prendre du retard sur le précédent. Un observateur placé en amont du mouvement du camion va donc recevoir une onde sonore ayant une fréquence plus élevée (crêtes plus rapprochées) qu'un observateur placé en aval. Le son perçu va donc passer d'aigu à grave à mesure que le camion s'approche puis s'éloigne.

Si le camion est en mouvement les choses vont changer. Le cercle émis à l'instant t a été émis à une position plus avancée dans la direction et le sens du mouvement du camion que le cercle émis à l'instant $t-1$. Par conséquent, le cercle émis à l'instant t va rattraper une partie de son retard sur le cercle émis à l'instant $t-1$, dans la direction et le sens du mouvement du camion. Dans l'autre sens, le cercle émis à l'instant t va au contraire prendre du retard sur le précédent. Un observateur placé en amont du mouvement du camion va donc recevoir une onde sonore ayant une fréquence plus élevée (crêtes plus

rapprochées) qu'un observateur placé en aval. Le son perçu va donc passer d'aigu à grave à mesure que le camion s'approche puis s'éloigne.

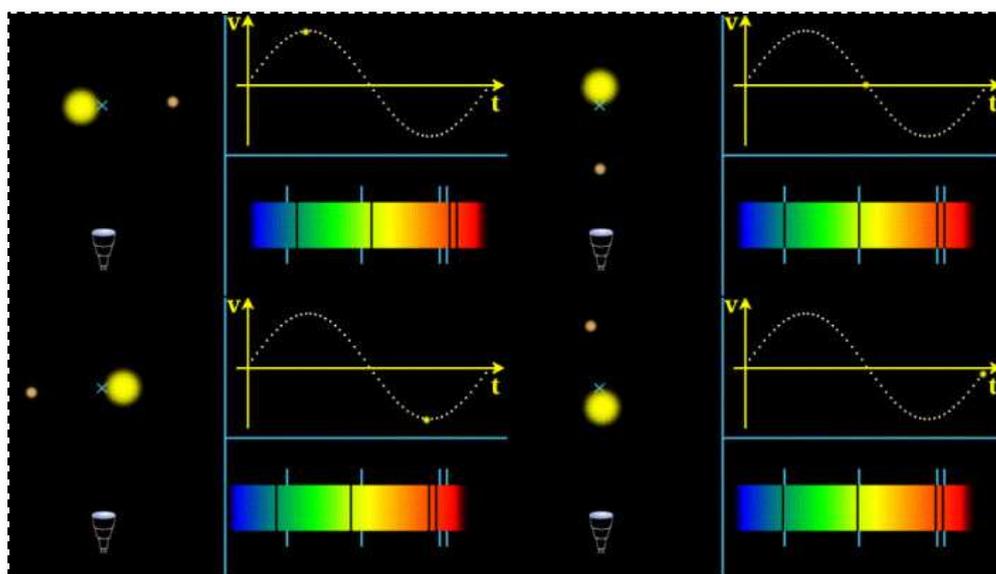
Dans le cas d'un avion qui dépasserait la vitesse de 340 m.s^{-1} , qui est la vitesse du son dans l'air, la crête émise à l'instant t dépasse celle émise à l'instant $t-1$ en amont du mouvement. Toutes les crêtes se trouvent compressées en amont du mouvement, ce qui provoque le « boum » caractéristique du « franchissement du mur du son ».

L'effet Doppler est valable pour n'importe quel type d'onde émis par une source en mouvement. Cela fonctionne donc également pour une étoile en mouvement : le spectre d'une étoile se rapprochant de l'observateur est décalé vers le bleu, et il est décalé vers le rouge lorsqu'elle s'éloigne. Or, une planète en orbite autour d'une étoile déplace le centre de gravité du système : celui-ci n'est pas au centre de l'étoile mais un peu décalé vers la planète. Si la planète est très massive et très



Le principe de la détection d'une exoplanète par la mesure d'un décalage spectral par effet Doppler-Fizeau. © Eso

éloignée de son étoile, le centre de gravité du système est situé en-dehors de l'étoile. Ce n'est donc pas exact de dire que la planète tourne autour de l'étoile. En fait, l'étoile et la planète tournent toutes deux autour du centre de gravité du système. De ce fait, si la ligne de visée n'est pas perpendiculaire au plan des orbites, on verra l'étoile s'approcher et s'éloigner de l'observateur périodiquement. En faisant le spectre d'une étoile, on peut donc observer un effet Doppler et en déduire la présence d'une ou plusieurs planètes. L'ampleur du décalage du spectre permet d'obtenir une estimation de la masse de la planète.



Effet Doppler sur la lumière provenant d'une étoile perturbée par une planète. La lumière est décalée vers le bleu (courtes longueurs d'onde) lorsque l'étoile se rapproche de nous, et vers le rouge quand elle s'éloigne. La courbe en haut à droite donne la courbe de vitesse radiale de l'étoile que l'on peut déduire de son décalage Doppler. © Observatoire de Paris/ASM Emmanuel Pécontal

Mais attention : ne connaissant pas l'angle i entre la ligne de visée et la normale au plan des orbites, on ne connaît pas la masse m de la planète mais seulement $m \times \sin(i)$. Si l'angle n'est pas trop petit, $\sin(\pi/2)$ valant 1 (système vu par la tranche), on ne fait pas une grande erreur, mais si l'angle est trop petit, l'erreur sera très importante : on va sous-estimer la masse de la planète.

On ne connaît pas non plus la distance de la planète à son étoile, ce qui empêche d'avoir une bonne estimation de la masse de la planète.

Ce que permet d'obtenir la méthode des transits planétaires :

- estimation de la masse de la planète
- systèmes multiples (si la courbe de variation du décalage spectral n'est pas régulière).

Expérience à réaliser :

On va faire une expérience pour mettre en évidence l'effet Doppler avec le son. Elle nécessite de se placer dans un long couloir éloigné des salles de cours, le hall, la cour, une rue ou un parc. Il est nécessaire de disposer d'une certaine distance pour courir et de pouvoir faire du bruit.

1. Découverte de l'effet Doppler

Un élève sera l'émetteur, les autres les récepteurs. Donner un accordeur à l'émetteur. Allumer l'accordeur en laissant appuyé sur le bouton « >/O ». Sélectionner la clé « C » en appuyant sur le bouton « M/T » si ce n'est pas déjà sélectionné. Pour émettre une note, appuyer normalement sur le bouton « >/O ». Pour changer la note, appuyer sur les flèches haut et bas. Pour éteindre, laisser appuyer sur le bouton « >/O ».

Aligner les récepteurs sur une certaine distance qui laisse la place à l'émetteur de courir quelques secondes. L'émetteur choisit une note et court en ligne droite parallèlement aux récepteurs en émettant la note avec l'accordeur.

On demande ensuite ce que les récepteurs ont entendu. On leur rejoue la note originale, et on leur demande si ce qu'ils ont entendu était plus grave ou plus aigu, et si elle a changé.

Normalement, la note entendue est plus aiguë lorsque l'émetteur s'approche, identique à l'originale lorsqu'il est au niveau du récepteur, plus grave lorsqu'il s'éloigne.

2. Faire varier les paramètres

On change la vitesse de l'émetteur. Que se passe-t-il s'il court plus vite ? moins vite ? L'effet Doppler, la différence de fréquence de l'onde sonore, se fera plus sentir s'il court plus vite. Et cette différence de fréquence sera plus grande s'il court plus vite.

Si on n'entend toujours pas la différence, il faut essayer de faire courir le récepteur et l'émetteur l'un vers l'autre. Ensuite, l'effet sera plus marqué si la note de base est plus aiguë.

Appelons cela la situation 1.

On peut également donner un vélo à l'émetteur, pour qu'il ait une vitesse plus élevée. Appelons cela la situation 2.

Conclusion : on doit pouvoir calculer la vitesse de l'émetteur en mesurant cette différence de fréquence !

Remarque : pensez à remplacer l'émetteur s'il est fatigué, mais aussi pour qu'il puisse entendre lui aussi l'effet Doppler en devenant récepteur.

3. Calculer la vitesse de l'émetteur

On va mesurer la note reçue avec l'autre accordeur, et on va mesurer la vitesse de l'émetteur avec un chronomètre pour pouvoir la comparer au résultat de l'expérience.

Situation 1 : Le récepteur et l'émetteur courent l'un vers l'autre

1) On mesure la distance d en mètres entre les deux points de départ de l'émetteur et du récepteur. On peut le faire en mesurant au préalable 1 pas moyen en m, et en comptant ensuite les pas. Ces deux élèves devront courir de façon constante d'un point à l'autre, l'un vers l'autre. Il n'est pas nécessaire qu'ils courent à la même vitesse l'un et l'autre.

Les étapes 2) et 3) sont simultanées.

2) On donne un chronomètre à deux élèves. Ces élèves vont rester immobiles, bien en vue des deux points. L'un va mesurer le temps t_{rec} mis par le récepteur, l'autre le temps t_{em} mis par l'émetteur, pour relier les deux points. Le temps doit être mesuré en seconde. On note ces valeurs.

3) On donne un accordeur à l'émetteur, et l'autre au récepteur. Vérifier que les deux accordeurs sont bien réglés sur la référence 440 Hz.

- L'accordeur de l'émetteur s'accompagne d'une enceinte portative. La mettre le plus fort possible. Faire émettre la note la plus aigüe possible à l'accordeur de l'émetteur. La note la plus aigüe que l'accordeur puisse émettre est le la de la 6^{ème} octave (en système américain), soit A6. Pour ne pas avoir de problème de limites de l'instrument, prendre plutôt le **sol 6 (G6)**, dont la fréquence est **$f_{G6}=3\ 136\ \text{Hz}$** (cf tableau des fréquences).
- L'accordeur du receveur s'accompagne d'un microphone. Lors de la mesure, l'accordeur indique le pourcentage d'erreur du son reçu par rapport à la note la plus proche. **Exemple** : si l'accordeur indique G6 +20%, cela correspond à une fréquence de **$f_{\text{rec}}=f_{G6}+0,2 \times f_{G6}$**

Si la vitesse V_{em} de l'émetteur est suffisamment grande, il est possible que le son passe à la note du dessus ou du dessous. Voici les notes et fréquences correspondantes : **$f_{F6\#}=2\ 960\ \text{Hz}$ et $f_{G6\#}=3\ 322\ \text{Hz}$.**

Mesurer f_{rec} lorsque que l'émetteur s'approche ou s'éloigne. Dans le premier cas, on doit avoir **$f_{\text{rec}} > f_{G6}$** , et dans l'autre **$f_{\text{rec}} < f_{G6}$** .

Remarque : Si on mesure f_{rec} lorsque que l'émetteur est au niveau du récepteur, on doit avoir **$f_{\text{rec}} \approx f_{G6}$** mais ce n'est pas ce qui nous intéresse.

Comme le récepteur et l'émetteur courent l'un vers l'autre, f_{rec} passe d'un coup d'une fréquence plus aigüe, à f_{G6} , puis à une fréquence plus grave. Cela ne dépend pas de la distance entre le récepteur et l'émetteur.

4) Une fois ces mesures effectuées, on fait le bilan.

Les élèves ayant mesuré les temps de parcours au chronomètre pourront ainsi calculer les vitesses de l'émetteur et du récepteur :

- $V_{\text{em_ch}}$ la vitesse de l'émetteur obtenue par le biais du chronomètre en m.s^{-1} .
- $V_{\text{rec_ch}}$ la vitesse du récepteur obtenue par le biais du chronomètre en m.s^{-1} .

On utilise v_{rec_ch} , f_{rec} et f_{G6} pour calculer v_{em} avec la formule de l'effet Doppler :

$$f_{rec} = \frac{c - v_{rec_ch}}{c - v_{em}} \times f_{G6}$$

$$v_{em} = c - (c - v_{rec_ch}) \times \frac{f_{G6}}{f_{rec}}$$

c =vitesse de l'onde.

ici, c est la vitesse du son, soit 340m.s^{-1} .

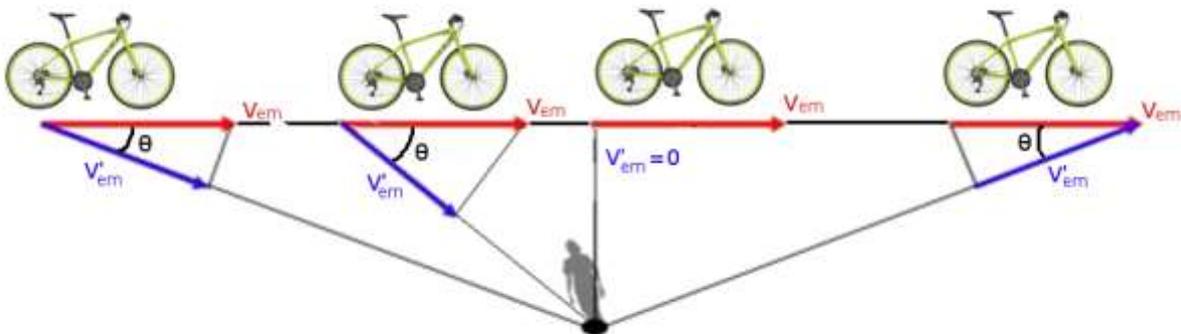
Les fréquences sont en **Hz**, les vitesses sont en **m.s⁻¹**.

5) On compare v_{em} avec v_{em_ch} . A-t-on calculé la bonne vitesse avec l'effet Doppler ?

Situation 2 : Le récepteur est immobile et l'émetteur se déplace à vélo.

Ce qui change :

- le récepteur est immobile, donc $v_{rec_ch} = \mathbf{0}$ dans la formule de l'effet Doppler.
- le récepteur doit être placé un peu plus à l'écart de la trajectoire de l'émetteur, pour éviter une collision.
- le récepteur ne voit pas l'émetteur arriver face à lui, mais sous un certain angle θ . Comme dans le schéma ci-dessous (l'angle entre la vitesse du vélo et la ligne de visée) :

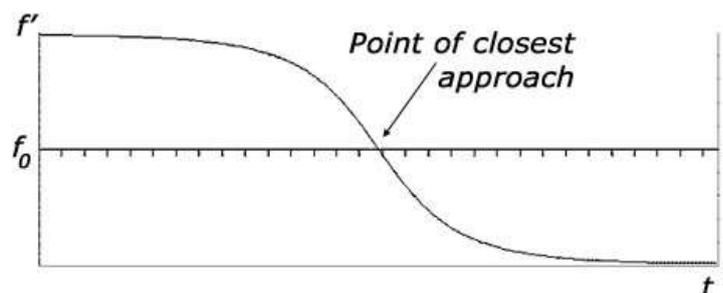


Il faut donc remplacer v_{em} par $v'_{em} = v_{em} \times \cos\theta$ dans la formule de l'effet Doppler.

La formule de l'effet Doppler devient donc :

$$f_{rec} = \frac{c}{c - v_{em} \cos\theta} \times f_{G6}$$

$$v_{em} = \frac{c}{\cos\theta} \left(1 - \frac{f_{G6}}{f_{rec}} \right)$$



Les étapes à suivre en même temps sont donc :

- 1) Mesurer la vitesse du vélo avec le chronomètre.
- 2) Mesurer f_{rec} quand le vélo est vu sous un angle θ choisi au départ. Le plus simple est de prendre $\theta = \pi/4$ soit 45° . Pour être certain de faire la mesure sous cet angle, le récepteur tend un bras à 45° du point de départ du vélo (le bras tendu à 90° correspond au moment où le vélo passe juste devant le récepteur). Lorsque le vélo est dans l'alignement du bras, faire la mesure.

Ensuite :

- 3) Faire le calcul de $v_{\text{em_ch}}$ et v_{em} , et comparer les résultats.

Conclusion de l'expérience

On peut mesurer une vitesse grâce à l'effet Doppler. Si on mesure la longueur d'onde de la lumière venant d'une étoile, on peut calculer la vitesse de l'étoile. Si elle est positive (décalage vers le bleu), elle s'approche de l'observateur, et si elle est négative (décalage vers le rouge), elle s'en éloigne. L'amplitude de ce mouvement permet d'estimer la masse de la planète en orbite, responsable du déplacement du centre de gravité du système.

Séquence 5

Comparaison de systèmes planétaires

Objectif :

- Appliquer la méthode de planétologie comparée aux systèmes exoplanétaires.
- Découvrir de nouveaux sous-types de planètes.

Durée : 30 min à 1h

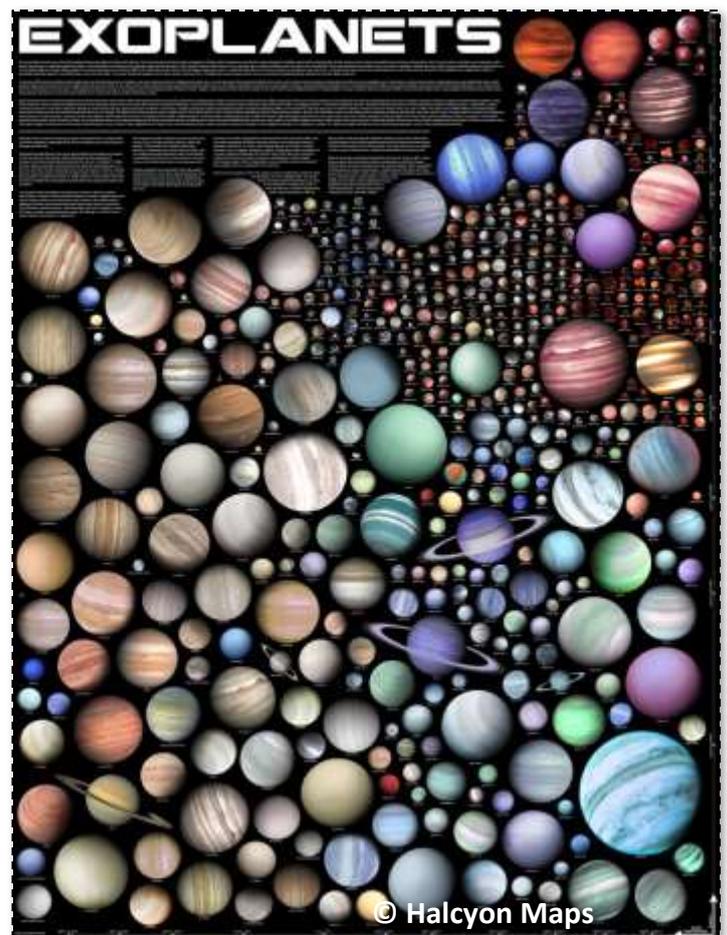
Etape 1 : la méthode de planétologie comparée

Déroulement et explications :

Le poster est en 4 morceaux et représente 500 des >3500 exoplanètes découvertes avant 2017, classées selon deux axes : la température de surface et la densité.

Le jeu consiste à retrouver dans cette foule les différentes planètes du système solaire.

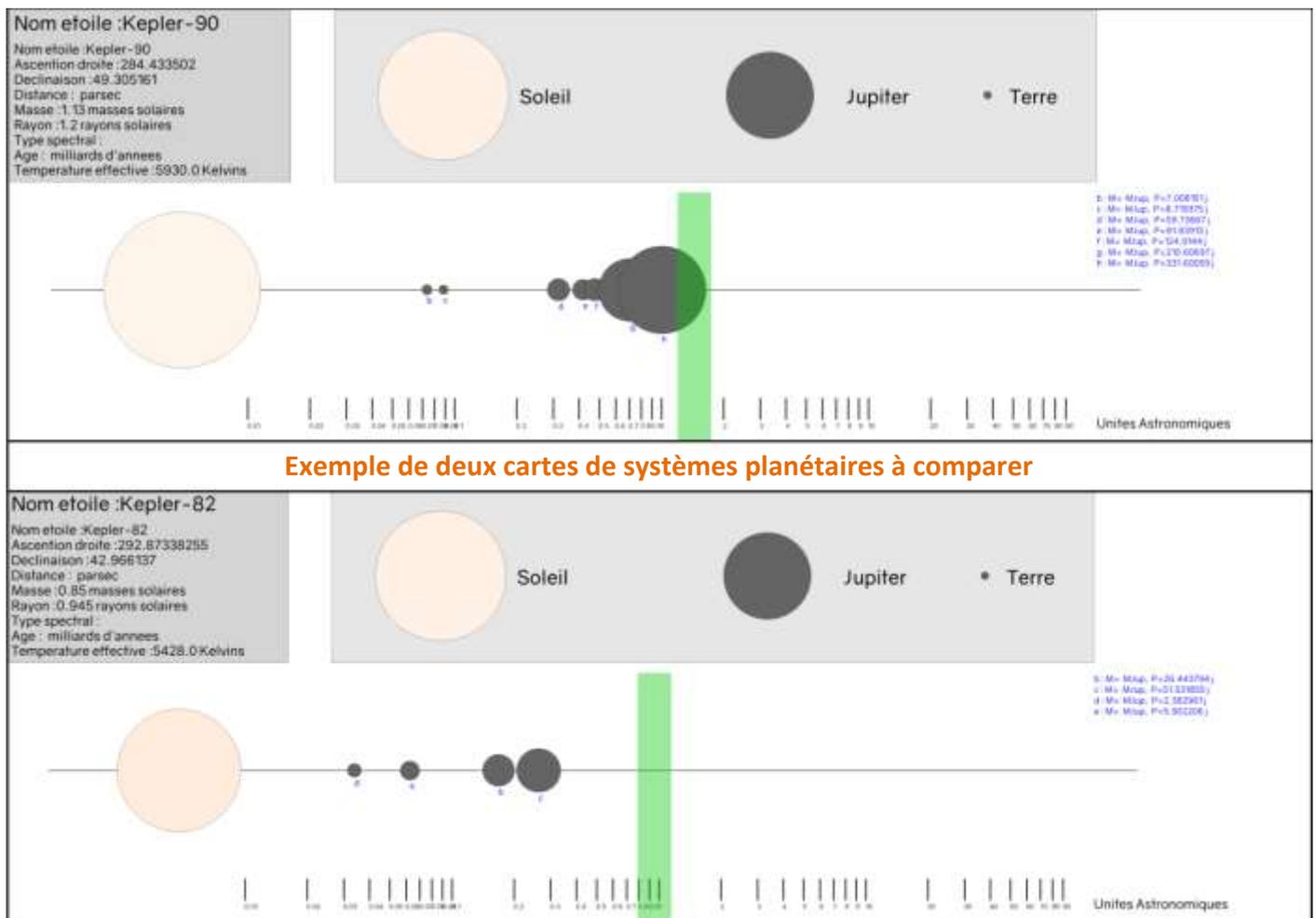
Pour y arriver, réfléchir aux valeurs que peuvent avoir leurs températures de surface et leurs densités.



Etape 2 : Jeux des systèmes planétaires

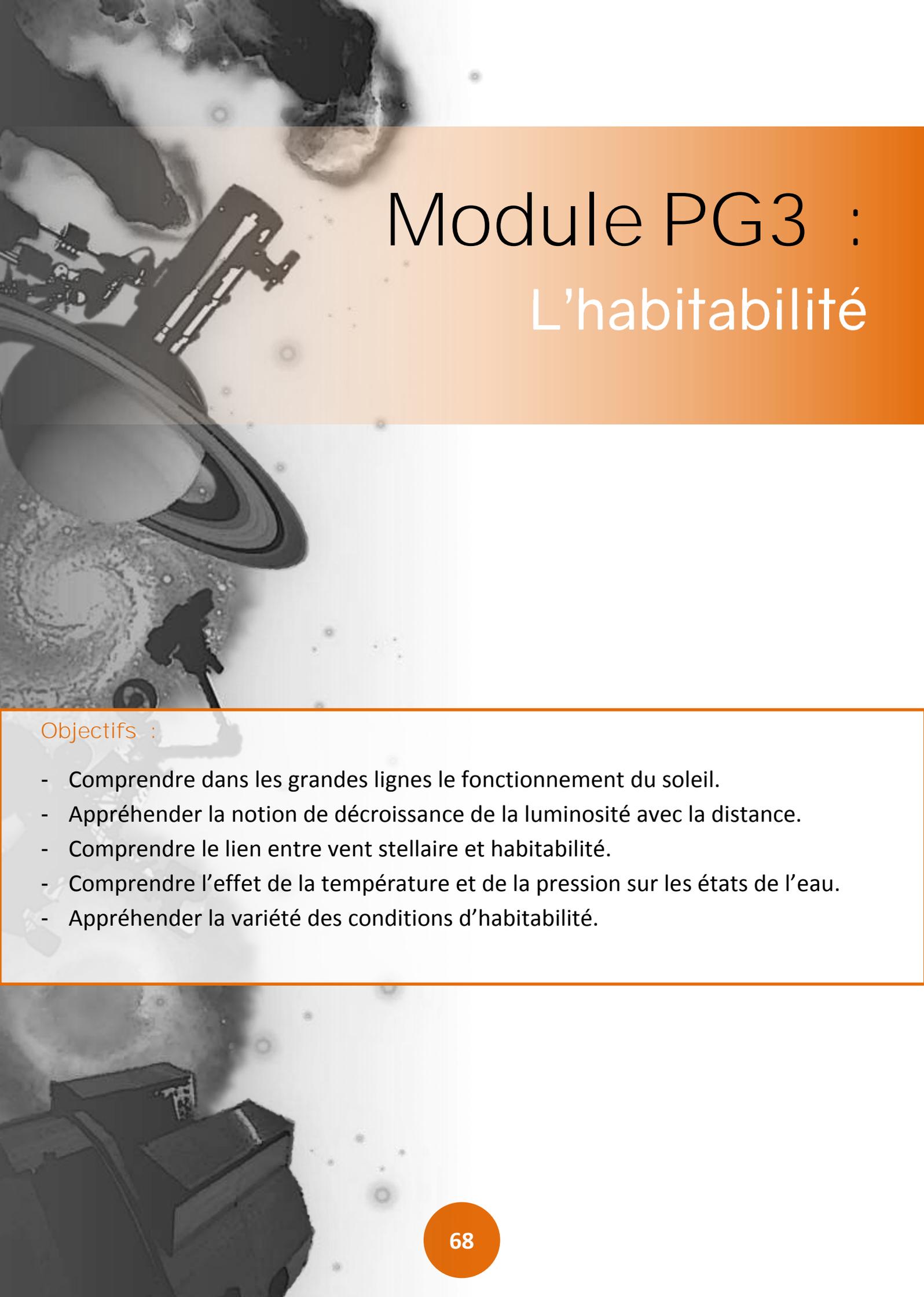
Distribuer ensuite des cartes systèmes planétaires et une carte système solaire à 4 petits groupes.

Avec tout ce qui a été vu dans les ateliers précédents, utiliser les différentes informations données sur les cartes pour comparer les systèmes planétaires entre eux et avec le nôtre.



Attention : on a vu avec l'étude des méthodes de détection d'exoplanètes que toutes ne permettent pas d'accéder aux mêmes informations. Egalement, il existe beaucoup de biais d'observation : il est plus facile de détecter une planète massive et volumineuse en général. Cependant, il est difficile de détecter les planètes ayant une longue période de révolution, car il faut attendre plusieurs années pour la détecter à nouveau et donc confirmer son existence. Prenez du temps pour discuter biais d'observation avec les jeunes. Cela peut se relier à la construction de l'individu et la méthode à adopter dans une recherche d'informations : est-ce que ce qu'on me dit, ce que je lis est biaisé ou non ? et si oui par quoi et à quel point ?



The background of the slide is a composite image. On the left, there is a detailed view of Saturn with its rings. Below it, a probe or lander is shown on a cratered surface, likely representing Mars. The right side of the slide is a solid orange gradient. The title 'Module PG3 : L'habitabilité' is written in white text on this orange background.

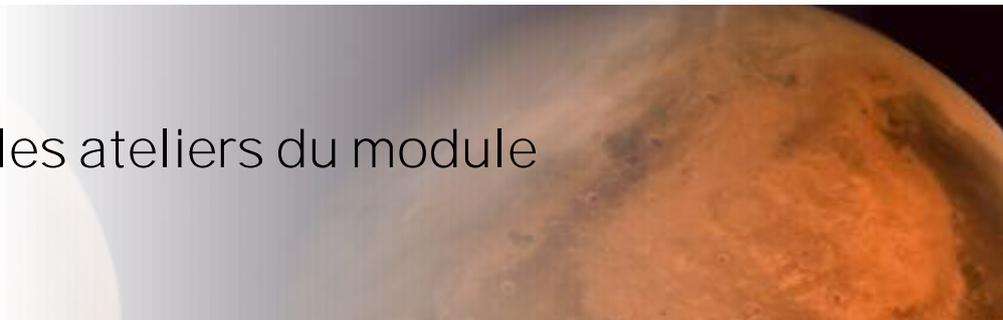
Module PG3 : L'habitabilité

Objectifs :

- Comprendre dans les grandes lignes le fonctionnement du soleil.
- Appréhender la notion de décroissance de la luminosité avec la distance.
- Comprendre le lien entre vent stellaire et habitabilité.
- Comprendre l'effet de la température et de la pression sur les états de l'eau.
- Appréhender la variété des conditions d'habitabilité.

Matériel

Pour réaliser les ateliers du module



Matériel nécessaire* :

Type	Réf	Nom	Quantité
Prêt	PGA3 PM	PG3 Petite malle	1
Prêt	PGA3 GM	PG3 Grande malle	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

Introduction sur le Soleil, notre étoile

Objectif :

- Comprendre dans les grandes lignes ce qu'est le Soleil et comment il fonctionne.

Durée : 1h à 1h30

Etape 1 : Observation du Soleil

Si le temps est **clair**, on **installe** la lunette sur le site d'observation, en présence des élèves. On projette l'image sur un écran ou sur un mur. 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 »*). Si le temps est **couvert**, on utilise directement la maquette du soleil.



Observation du Soleil par projection

Déroulement et explications :



On explique que la gravité du Soleil fait augmenter la pression du matériau qui le constitue, l'hydrogène, en son cœur. Avec la masse que possède le Soleil, cela a pour effet d'augmenter la température de son cœur jusque 14 millions de degrés. C'est la température nécessaire pour la fusion de l'hydrogène. Ce processus produit des atomes d'hélium et de la lumière dans le domaine gamma.

Ces photons s'échappent du cœur et se propagent d'atome en atome dans la zone radiative de l'enveloppe du Soleil, en étant à chaque fois absorbés puis réémis dans une autre direction aléatoire (ce qui peut durer très longtemps : les photons mettent jusqu'à 1 million

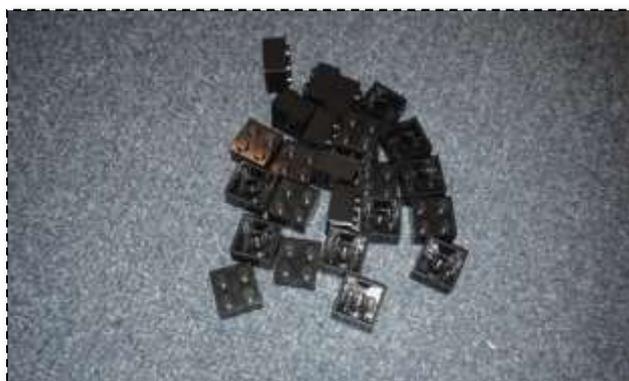
d'années pour sortir du Soleil). A chaque réémission, les photons perdent de l'énergie et se décalent progressivement vers le domaine des rayons X, puis des UV durs. En s'éloignant du cœur, la température baisse, et il arrive une température où l'énergie ne peut plus se propager par radiation, mais par des mouvements de matière. C'est la zone convective : la matière chaude à la frontière avec la zone radiative remonte vers les couches externes moins chaudes en perdant son énergie, puis retombe et chauffe à nouveau, comme l'eau dans une casserole.

L'énergie perdue est émise par la photosphère, la surface du Soleil, sous forme de lumière à nouveau, dans les domaines UV, visible, infrarouges et radio, moins énergétiques, cette fois. Cela nous permet de voir le Soleil (et les autres étoiles) et d'avoir des coups de Soleil.

Etape 2 : La fusion nucléaire « en LEGO »

1) Mise en place :

Placez **50 LEGO rouges** dans un saladier, et de même dans un autre. Placez **25 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.

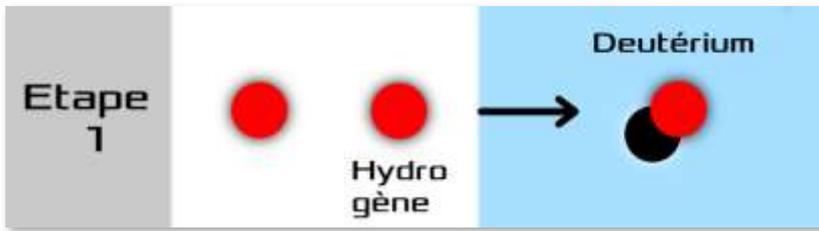
Règle n°4 : Si on produit un photon, on pioche un photon et on le place de l'autre côté de son saladier (ou on le donne à l'animateur jouant le rôle d'arbitre).

Attention :

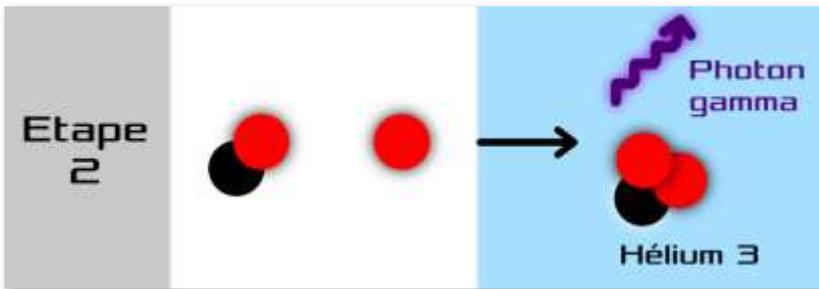
- Quand on pioche 2 **protons**, on fabrique l'élément **deutérium** : on retire du jeu (i.e on ne le remet pas dans le saladier) l'un des deux **protons**, et on prend un **neutron** à la place, et on accroche ce **proton** et ce **neutron**. On replace ainsi ce **deutérium** dans le saladier.
- Quand 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 ?

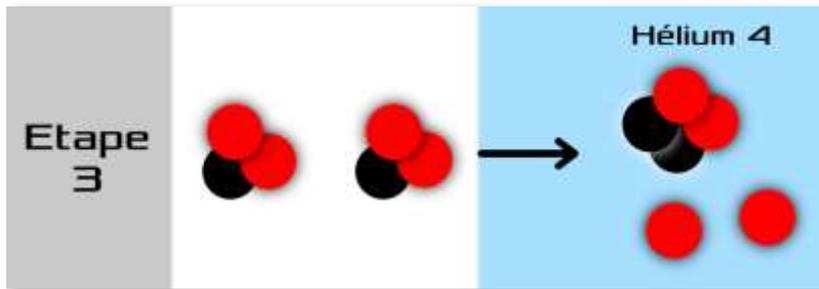
La règle de collision :



Etape 1 : Deux protons se rencontrent. L'un d'eux devient un **neutron**. Les deux sont liés sous la forme de l'élément **Deutérium**.



Etape 2 : Un proton rencontre un élément de deutérium. Ils **produisent un photon** en se liant sous la forme de l'élément **Hélium 3**.



Etape 3 : Deux éléments Hélium 3 se rencontrent. Deux **protons** sont libérés. Les 4 autres éléments se lient sous la forme de l'élément **Hélium 4**.

Toute autre rencontre est sans effet : les joueurs reposent les LEGO piochés dans le saladier.

Séquence 2

La notion de zone habitable

Objectif :

- Comprendre la notion de zone habitable.
- Comprendre la loi de décroissance de la luminosité avec la distance.
- Comprendre les notions de puissance lumineuse et de flux lumineux.
- Comprendre le lien entre flux lumineux et habitabilité.

Durée : 45 min à 1h

Etape 1 : Présentation des notions

Déroulement et explications :

On va introduire la notion de zone habitable. Pour cela il faut introduire les notions suivantes :

- **Energie**

L'énergie est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur.

Il existe différentes formes d'énergie, et l'on peut convertir l'énergie d'une forme à l'autre avec le phénomène ou le mécanisme adéquat : énergie potentielle, énergie mécanique, énergie cinétique, lumière, énergie électrique, chaleur, etc...

Une quantité d'énergie se mesure en général en Joules (J). L'énergie a la dimension ML^2T^{-2} : c'est une masse multipliée par une distance au carré et divisée par une durée au carré. Donc : $1 J = 1 kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$.

Remarque : du point de vue de la relativité d'Einstein, la matière et l'énergie, les deux constituants de l'Univers, sont reliés par l'équation : $E=mc^2$. Avec E la quantité d'énergie (J), m la masse de matière (kg), et c pour vitesse de la lumière ($m \cdot s^{-1}$).

- **Lumière**

La lumière, ou énergie lumineuse, est une forme d'énergie, qui se propage sous forme de photons, qui sont à la fois des ondes et des particules. Cette forme d'énergie, une fois émise, peut se propager dans le vide, c'est-à-dire en l'absence de tout support matériel. Ce qui n'est pas le cas de la chaleur, par exemple.

Selon la quantité d'énergie transportée par un photon, celui-ci aura une longueur d'onde (distance entre deux crêtes des vagues de l'onde) différente. Il existe ainsi une convention délimitant des domaines de longueur d'onde. Du plus énergétique au moins énergétique (de la plus courte à la plus longue longueur d'onde) : gamma, X, ultraviolet, visible, infrarouge, et les ondes radio (dont micro-ondes, millimétrique, ultra-courtes, courtes, moyennes et grandes ondes).

Quelques exemples de sources lumineuses avec leur domaine principal d'émission :

- supernovae (gamma)
- radiographie médicale (X)
- lampe à bronzer (UV)
- ampoule (visible)
- radiateur (infrarouge)
- radar (millimétrique)
- four à micro-ondes (micro-ondes)
- poste de radio (ondes ultra-courtes)

• Puissance lumineuse

La puissance est la quantité totale d'énergie produite par une source en une seconde. La puissance lumineuse, aussi appelée luminosité en astronomie, est donc la quantité totale d'énergie lumineuse produite par une source (par exemple une étoile) en une seconde.

Une puissance se mesure en général en Watt (W). La puissance a pour dimension une énergie divisée par un temps, donc ML^2T^{-3} . On peut donc aussi écrire :

$1W=1 J.s^{-1}$ ou encore $1W=kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$.

• Flux lumineux

Un flux est une puissance passant à travers une surface. Un flux lumineux est donc une puissance lumineuse émise ou reçue par une surface.

Autrement dit, si je dispose d'un détecteur de lumière (un photomètre) possédant une surface sensible de $1m^2$, et que je le place face à une source lumineuse, il va mesurer la fraction de la puissance lumineuse reçue par ces $1m^2$.

Si je disposais d'une surface sensible qui englobait totalement la source lumineuse, mon détecteur mesurerait la totalité de la puissance lumineuse de la source. Le flux lumineux se mesure en $W.m^{-2}$, ou en $J.s^{-1}.m^{-2}$ et a pour dimension MT^{-3} .

On peut également expliquer que la surface d'une étoile est une sphère lumineuse, et a donc une surface $S=4\pi r^2$, r étant son rayon en m. A travers cette surface elle émet l'énergie qu'elle produit chaque seconde, donc sa puissance lumineuse L , sous forme d'un flux lumineux $F=L/4\pi r^2$.

Au bout d'un moment, la lumière émise à un instant donné s'est propagée jusqu'à une distance d du centre de l'étoile. La surface de la sphère sur laquelle est répartie cette énergie à cet instant est $S=4\pi d^2$. Cette surface est plus grande que celle de l'étoile, donc on se retrouve avec la même quantité d'énergie répartie sur une plus grande surface.

Maintenant, si avec mon détecteur de lumière, j'en prends $1 m^2$, ce $1 m^2$ recevra moins d'énergie à la distance d que si je le plaçais à la surface de l'étoile. Le flux lumineux que reçoit mon détecteur est $F=L/4\pi d^2$.

Nos yeux sont également des détecteurs de lumière. Notre surface sensible est la rétine. C'est le phénomène qu'on vient de décrire qui explique qu'une source lumineuse lointaine paraît faible à nos yeux : nous ne recevons qu'une portion de la lumière qu'elle émet. Le restant a été émis dans d'autres directions et ne nous atteint pas.

Pour vulgariser cela en utilisant une image mentale plus simple, on peut décrire une source lumineuse comme un robot lançant simultanément 20 balles dans toutes les directions de façon homogène, et le détecteur comme un panier recevant des balles.

Si l'on place ce panier très proche de la source, il recevra plusieurs balles, alors que si on le place très éloigné, il n'en recevra qu'une ou deux, les autres ne l'atteignant pas car parties dans d'autres directions. Et enfin, on peut trouver une distance à partir de laquelle le panier ne recevra plus aucune balle. Cela correspond au fait que vous ne pouvez pas percevoir ce ver luisant à 1km. Mais avec un plus grand panier, vous pourrez attraper quelques balles ! de même avec un télescope, vous pourrez voir le ver luisant.

- Conversion de la lumière en chaleur

La lumière, quand elle atteint de la matière, peut être absorbée par celle-ci sous certaines conditions (notamment la structure et la nature du matériau). Cela fonctionne bien les constituants des planètes notamment. Cela fonctionne moins bien pour un matériau ayant un fort pouvoir réfléchissant.

Une fois absorbée par les atomes et molécules d'un matériau, cette énergie lumineuse doit changer de forme : les atomes et molécules s'agitent et produisent de la chaleur.

Etape 2 : La zone habitable

Si votre planète est trop proche de son étoile, il va faire très chaud et l'eau va s'évaporer. Si votre planète est trop éloignée de son étoile, il va faire très froid et l'eau va geler. Entre les deux, si l'atmosphère est suffisamment dense, c'est-à-dire si elle offre suffisamment de pression, l'eau pourra être liquide. Cet entre-deux s'appelle la zone habitable.

Expérience :

Pour expliquer tout cela, on utilise le photomètre, une source lumineuse (smartphone par exemple) et une boule de polystyrène, pour expliquer la quantité d'énergie que reçoit une planète à chaque instant, compte-tenu de sa surface exposée à la lumière de son étoile, et de sa distance à celle-ci.

En comparant les surfaces éclairées sur les deux hémisphères, on peut aussi parler des saisons.

On peut également mesurer la puissance de la lampe avec la relation entre le flux F et la luminosité L .

La surface du détecteur du photomètre est une demi-sphère de 23 mm de diamètre. Cette surface vaut $S_d = 4\pi r^2/2$ avec $r = 0,023\text{m}$. On trouve $S_d = 0,0033\text{m}^2$.

Le photomètre dont on dispose est un luxmètre. Il mesure le flux lumineux sous forme de lux, qui peut s'écrire aussi $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$. Le lumen (lm) est une unité de puissance lumineuse, mais elle est définie exclusivement pour le domaine de longueurs d'onde visible. Dans le domaine visible, ce qui nous intéresse ici, on a $1\text{W} = 683\text{lm}$.

On a donc : $1\text{lux} = 0,00146\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.



Séquence 3

La notion de vent stellaire

Objectif :

- Comprendre la notion de plasma.
- Comprendre pourquoi certains plasmas sont lumineux.
- Comprendre la notion de ligne de champ magnétique.
- Comprendre le lien entre vent stellaire et habitabilité.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Plasma, le quatrième état de la matière

Déroulement et explications :

Le Soleil émet en permanence des particules chargées, des ions et des électrons dans toutes les directions. Ces deux types de particules vivent chacun leur vie, contrairement à un gaz où les électrons sont associés aux noyaux des atomes et se meuvent avec. Le vent stellaire est une matière dans l'état d'un gaz ionisé, autrement appelé plasma. C'est le 4ème état de la matière et c'est le plus courant dans l'Univers. Ces ions sont principalement des ions hydrogène et des ions hélium. Ce plasma s'appelle le vent solaire. On parle de vent stellaire pour les autres étoiles.

Parfois, les protubérances solaires (voir séquence 1) rompent et une éruption solaire se produit : une grande quantité de plasma est envoyée d'un coup dans l'espace. Cela a pour effet de densifier le vent stellaire : comme un tsunami à l'assaut des planètes du système. Par conséquent, une planète non protégée contre cela risque de ne pas être très habitable !

Expériences :

Avec la boule à plasma, on peut visualiser la matière à l'état de plasma lumineux : un champ électrique se crée entre l'électrode centrale et la surface de l'ampoule, ce qui a pour effet d'ioniser le gaz à l'intérieur. En permanence, des ions se recombinaient à des électrons, produisant ainsi de la lumière. Faire attention à bien différencier le champ électrique de la boule à plasma du champ magnétique de la Terre.

Etape 2 : Le champ magnétique

Déroulement et explications :

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.

Expérience :

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.



Etape 3 : Aurores polaires

Déroulement et explications :

En arrivant aux pôles, les particules chargées viennent interagir avec les molécules et atomes de la haute atmosphère. Se faisant, les ions se recombinent : ils retrouvent des électrons, qui perdent alors de l'énergie cinétique. Celle-ci est transformée en lumière, et on observe alors des draperies lumineuses et mouvantes dans le ciel, qui suivent des lignes de champ magnétiques. L'activité et l'étendue des aurores polaires varient selon l'activité du Soleil ! à son maximum, survenant tous les 11 ans, les aurores peuvent être vues jusqu'à la latitude de la Provence ! Egalement, lors d'importantes éruptions, le cercle auroral s'étend et atteint de basses latitudes, et les aurores sont plus intenses.

Expérience :

On peut utiliser les diverses affiches et la maquette du champ magnétique terrestre pour expliquer tout cela.



Séquence 4

Les états de l'eau sur Terre et ailleurs

Objectif :

- Comprendre l'effet de la température et de la pression sur les états de l'eau.
- Découvrir l'existence de différents environnements et climats planétaires.
- Comprendre le lien entre conditions de pression et température et habitabilité.

Durée : 30 min à 1h

Etape 1 : Les conditions chimiques

Une des conditions principales à l'existence d'une vie sur une planète, du moins telle qu'on la comprend, est la présence d'un substrat liquide, sur lequel se basera toute la chimie de cette biosphère. Plusieurs substrats sont possibles, toujours en utilisant les chaînes de Carbone (C) comme base pour les molécules organiques (on peut imaginer une vie basée sur le Silicium (Si), mais la diversité des molécules organiques constructibles est moins riche).

Toujours en restant sur une base carbonée, on peut compter sur un substrat d'eau (H₂O), de méthane (CH₄), d'ammoniac (NH₃) etc...

La vie que l'on connaît se base sur l'eau. Travaillons donc sur ce sujet.

Trouve-t-on de l'eau sur les autres corps du système solaire ?

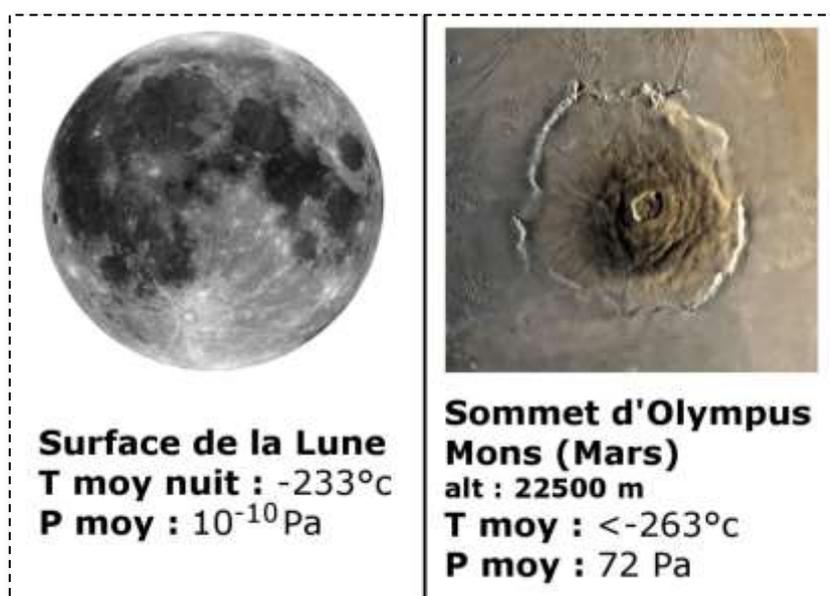
Une affiche plastifiée donne les états de l'eau et les changements d'état de l'eau selon la pression, en atmosphères (atm), et la température, en degrés celsius (°C).

1 atm = 1 bar = 10⁵ Pa = pression moyenne de l'atmosphère à la surface de la Terre.

On peut tracer les axes au tableau, en mettant la pression en pascals (Pa) et la température en Celsius (°C). On peut indiquer juste les points de fusion/congélation (10⁵ Pa, 0°C) et d'ébullition (10⁵ Pa, 100°C) de l'eau à la pression moyenne de la surface de la Terre. On

trace ensuite les séparations entre les zones d'états de l'eau et on gradue les axes (échelle log, c'est mieux).

On distribue ensuite les cartes « environnements planétaires ». Sur chacune, on trouve un lieu dans le système solaire, avec une photographie ou une carte de terrain, une pression et une température. Par petits groupes, on laisse les élèves réfléchir sur quelques cartes pour savoir sous quelle forme on peut y trouver l'eau (si elle est présente), puis on vérifie en plaçant la carte au tableau sur le diagramme (elles sont aimantées). S'ensuit une discussion.



Etape 2 : Les changements d'états de l'eau

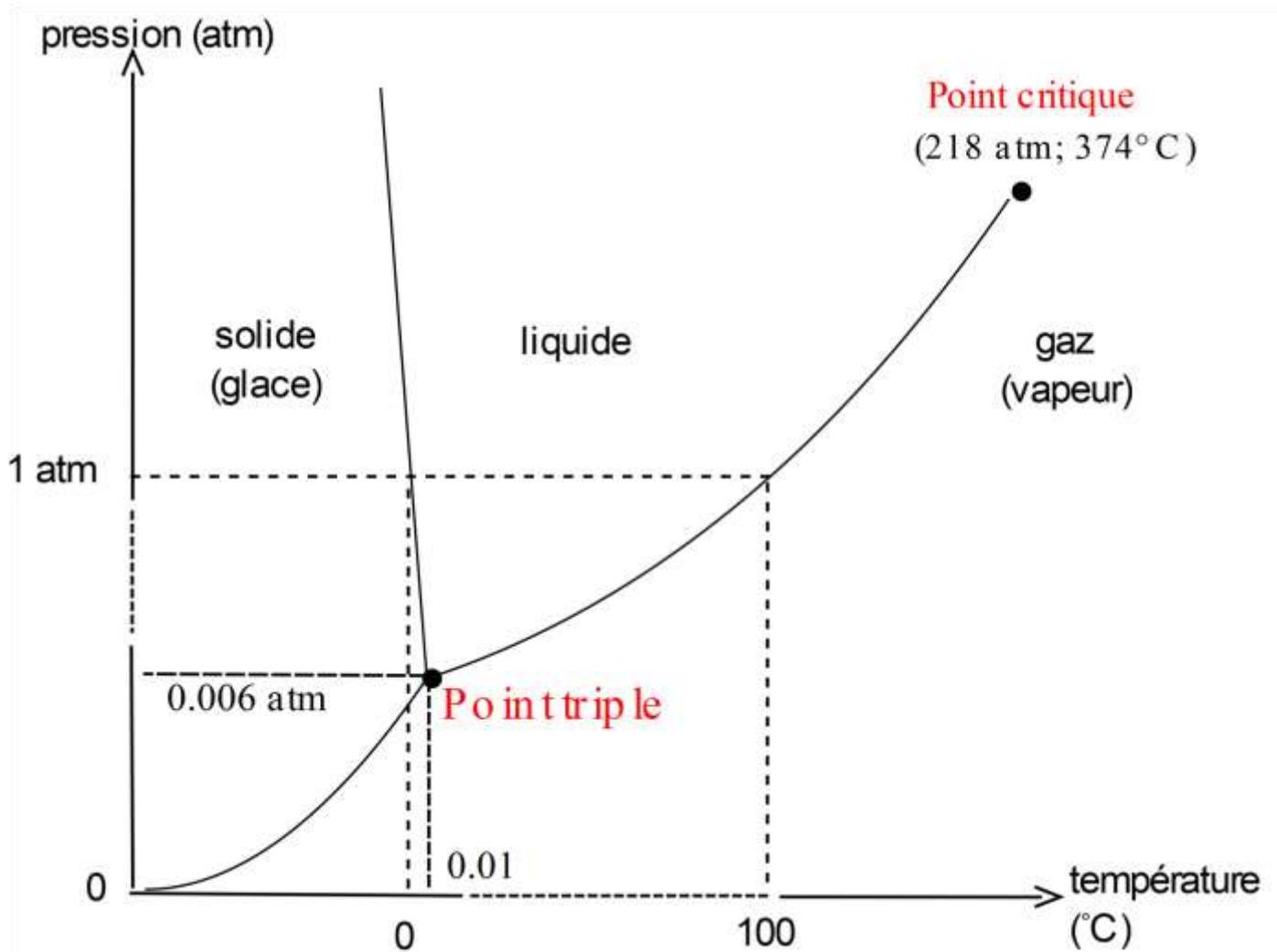
En se référant au diagramme, on demande aux élèves comment on peut faire évaporer de l'eau. Deux solutions : augmenter la température ou baisser la pression.

Problème : autant il est facile de faire bouillir de l'eau avec une source de chaleur, une bouilloire, autant il est difficile de faire baisser la pression suffisamment avec une pompe à main pour qu'une eau liquide à température ambiante s'évapore. On voit sur le diagramme la quantité de pression à enlever pour croiser la frontière.

Solution : faire baisser la pression de l'air au-dessus d'une eau déjà chaude mais pas bouillante. Pour cela, faire bouillir une pleine bouilloire d'eau liquide. Verser dans le récipient de la pompe à vide à main. Attendre que cela arrête de bouillir, puis fermer hermétiquement et pomper vigoureusement. L'eau bout à nouveau : la température est inférieure à 100°C, mais la pression est inférieure à 105 Pa, du coup, l'eau bout !

Remarque : c'est le cas au sommet de l'Everest où l'eau bout à moins de 100°, et gèle à un peu moins de 0°C.

Remarque importante : si l'eau contient des impuretés, du sel, notamment, les températures de ses points de fusion et d'évaporation baissent, à pression constante. C'est pour cela qu'une neige aspergée de sel fond alors qu'il fait 0°C. Sur Europe, une lune de Jupiter, recouverte d'une épaisse couche de glace, on trouve des geysers (volcans de glace) qui expulsent de l'eau gelée. Et dans les traces après les éruptions, on détecte des sels. Cela augmente les chances que l'eau soit liquide sous la glace. L'autre raison à la présence d'un océan sous la glace est l'effet des forces de marées de Jupiter qui fait augmenter la température interne d'Europe et fait donc fondre la glace au contact de son manteau.



Séquence 5

Les conditions d'habitabilité

Objectif :

- Comprendre les conditions d'habitabilité.
- Comprendre que les situations habitables sont très variées et que la vie peut se trouver dans des environnements auparavant jugés « impossibles »

Durée : 45 min à 1h15

Etape 1 : Jeu de l'habitabilité

C'est la séquence la plus longue de l'atelier car la plus importante. On va ici mettre en œuvre tout ce qui a été vu durant les 3 ateliers et apprendre de nouvelles choses, pour trouver des situations, dans des systèmes planétaires, où la vie peut se développer.

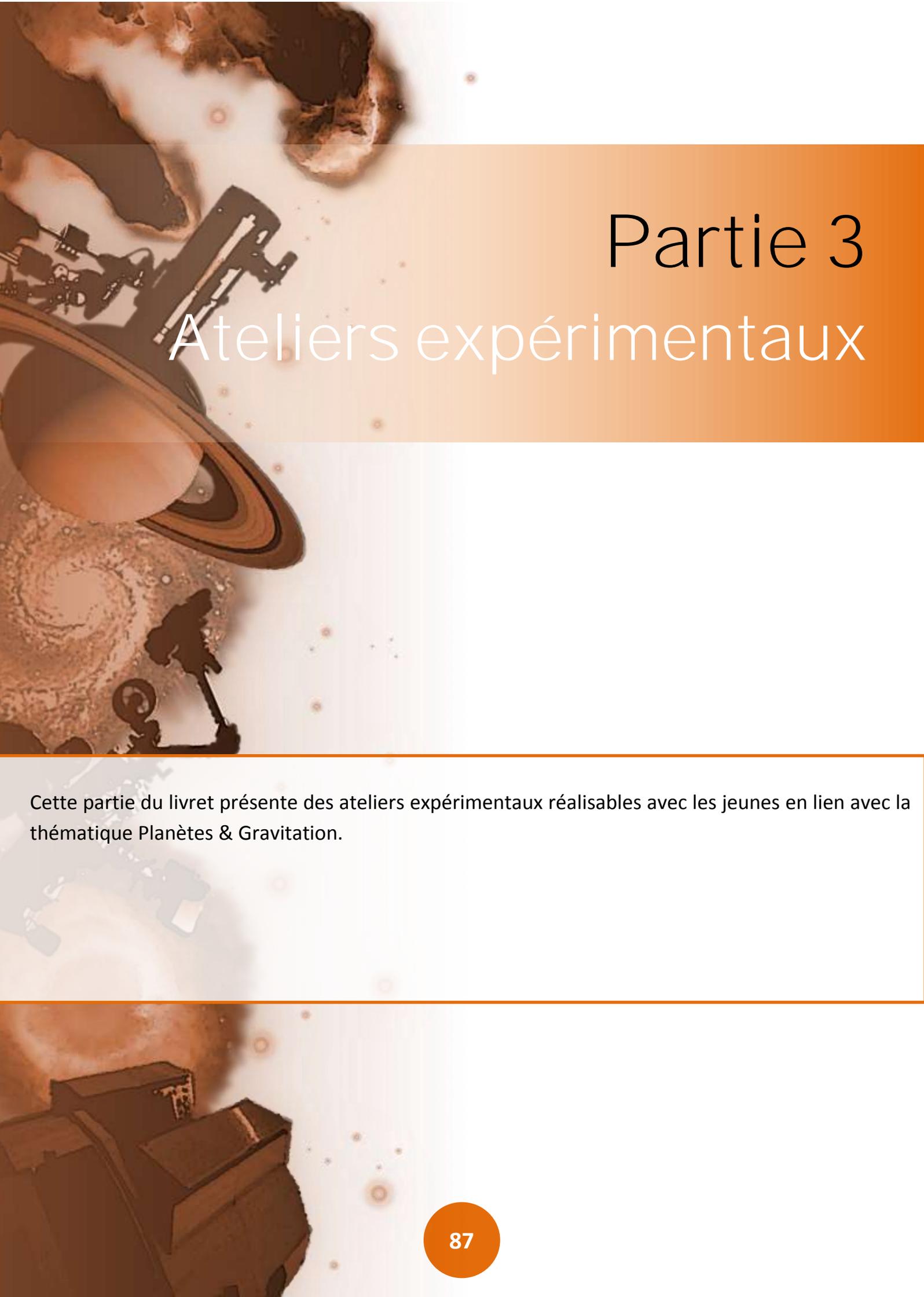
On donne des étoiles et des planètes à quelques petits groupes et on leur demande de choisir une planète (ou une lune et une planète géante, s'ils y pensent), et une ou plusieurs étoiles et de réfléchir à la possibilité de trouver la vie dans cette situation. Après quelques minutes, le groupe passe au tableau, place ses cartes aimantées dessus. L'animateur leur pose alors des questions : à quelle distance mettriez-vous la planète de son étoile ? l'étoile, est-elle lumineuse ? est-elle variable ? Où se situerait la zone habitable ? etc ... Vous disposez de petites réglettes aimantées avec des curseurs pour régler ces paramètres. Une fois réglés, placez-les à proximité des étoiles et planètes concernées.

Selon les phénomènes impliqués, vous disposez d'illustrations aimantées à ajouter : vent stellaire, champ magnétique, effet de serre, êtres extrémophiles, océan sub-glaciaire, limite de Roche (un corps trop massif et trop proche du corps autour duquel il orbite éclate à cause des forces de marées, produisant notamment des anneaux de débris), forces de marées... Vous pouvez utiliser ces illustrations pour expliquer que ces phénomènes sont présents vu les choix des élèves, ou pour expliquer qu'ils le seraient s'ils avaient fait d'autres choix.

Mais rien n'est perdu, vous pouvez proposer aux élèves de trouver des solutions si ces phénomènes sont dangereux pour la vie.

Exemple : Ma planète est autour d'une étoile massive, émettant beaucoup de vent stellaire. Il me faut un champ magnétique intense pour contrer cela. Oui, mais ma planète a donc besoin de tourner sur elle-même et d'avoir une activité interne. Ah, mais pour avoir une activité interne, il faut qu'elle soit assez massive. Or, ma planète est très légère. On change la planète. Est-ce que ça marche ? Oui... à condition qu'elle ne soit pas trop âgée. Réglette âge de la planète. Si elle est jeune, c'est bon. Si elle est âgée, la planète s'est refroidie, et n'a donc presque plus d'activité interne, et donc plus de champ magnétique. Ah... mais si elle a une atmosphère épaisse, il va falloir un peu de temps avant qu'elle ne soit soufflée. D'ici-là elle protège un peu du vent stellaire, donc c'est bon. Ah si elle avait de quoi se faire réalimenter... des volcans ? ah non il faut une activité interne. Terraformation active par une civilisation ? pas mal... Euh oui mais en fait, la planète ne peut pas avoir cet âge-là, car son étoile est très massive. Une étoile très massive ne vit pas longtemps... donc la planète elle n'a déjà plus d'étoile. Bon. On change l'étoile.



The background of the page is a collage of space-related images. On the left, there's a large, detailed illustration of Saturn with its rings. Below it, a portion of Mars is visible, showing its reddish surface and craters. A rover is depicted on the Martian surface. In the upper left, there's a close-up of a rocky celestial body, possibly an asteroid or comet. The right side of the page is dominated by a large, semi-transparent orange rectangle that serves as a background for the title. The overall color palette is warm, with various shades of orange, brown, and tan.

Partie 3

Ateliers expérimentaux

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

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

- **Les points cardinaux :**
Comment repérer le Nord de jour comme de nuit sans boussole ?
Connaître les points cardinaux (Nord, Sud, Est, Ouest) et savoir les situer par rapport à notre position.
Qu'est qu'une constellation ?
- **Vénus, l'étoile du berger :**
Qu'est qu'une étoile ? Qu'est qu'une planète ? Reconnaître une étoile d'une planète à l'œil nu. Observer Vénus au télescope, s'agit-il d'une étoile ou d'une planète ?
Observer la différence entre les deux au télescope.
Pourquoi appelons nous Vénus « Étoile du berger » ?
- **La Lune, notre satellite naturel :**
La Lune est elle visible de jour ou de nuit ? Pourquoi ? Qu'est qu'un satellite ? La formation de la Lune. Les phases de la Lune et les marées. La cratérisation de la Lune. Observation de la Lune à l'œil nu puis au télescope.
- **Le soleil, notre étoile:**
Le Soleil est-il vraiment jaune ? Le Soleil est une étoile mais les autres étoiles ressemblent-t-elles au Soleil ? Allons voir !
- **Préparation d'une observation**
Détail page 90.
- **Mesure de la masse de Jupiter**
- **Détection d'une exoplanète**
- **Mesure de la taille d'une montagne lunaire**





Atelier PGAE1 : Préparation d'une observation

Objectifs :

- préparer une observation astronomique
- appréhender les notions de luminosité, magnitude et couleur des astres

Matériel

Pour réaliser l'atelier



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 : 15 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.

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 : 15 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 PGAE2 :

Mesure de la masse de Jupiter

Objectifs :

-

Matériel

Pour réaliser l'atelier



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 PGAE3 :

Détection d'une exoplanète

Objectifs :

-

Matériel

Pour réaliser l'atelier



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 PGAE4 :

Mesure de la taille d'une montagne lunaire

Objectifs :

-

Matériel

Pour réaliser l'atelier



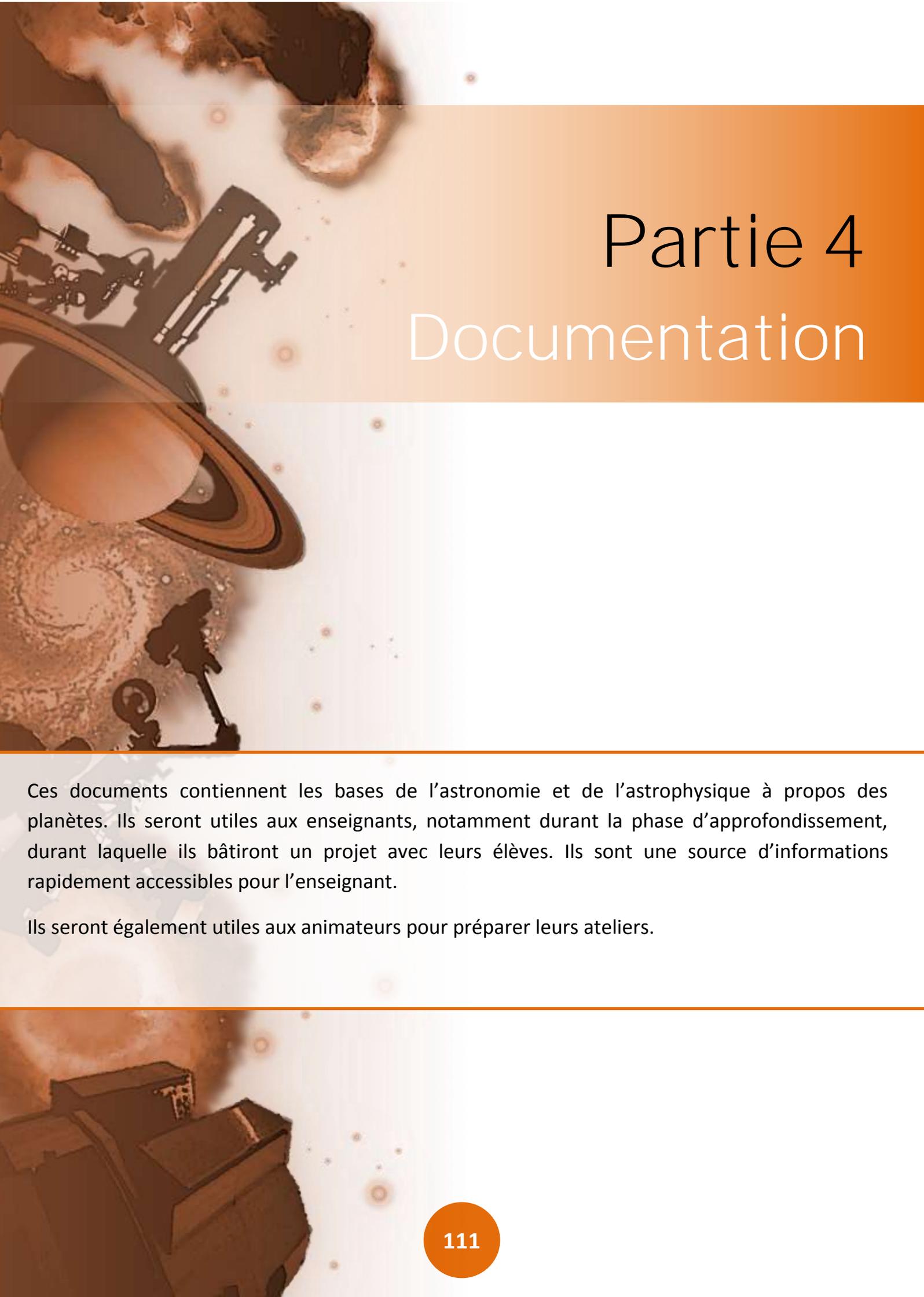
Matériel nécessaire* :

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.



The background of the page is a composite image with a warm, orange-brown color palette. On the left side, there is a detailed illustration of Saturn with its rings, positioned above a rover on the surface of Mars. The rest of the background is a light, hazy space scene with several small, distant planets or stars scattered across it.

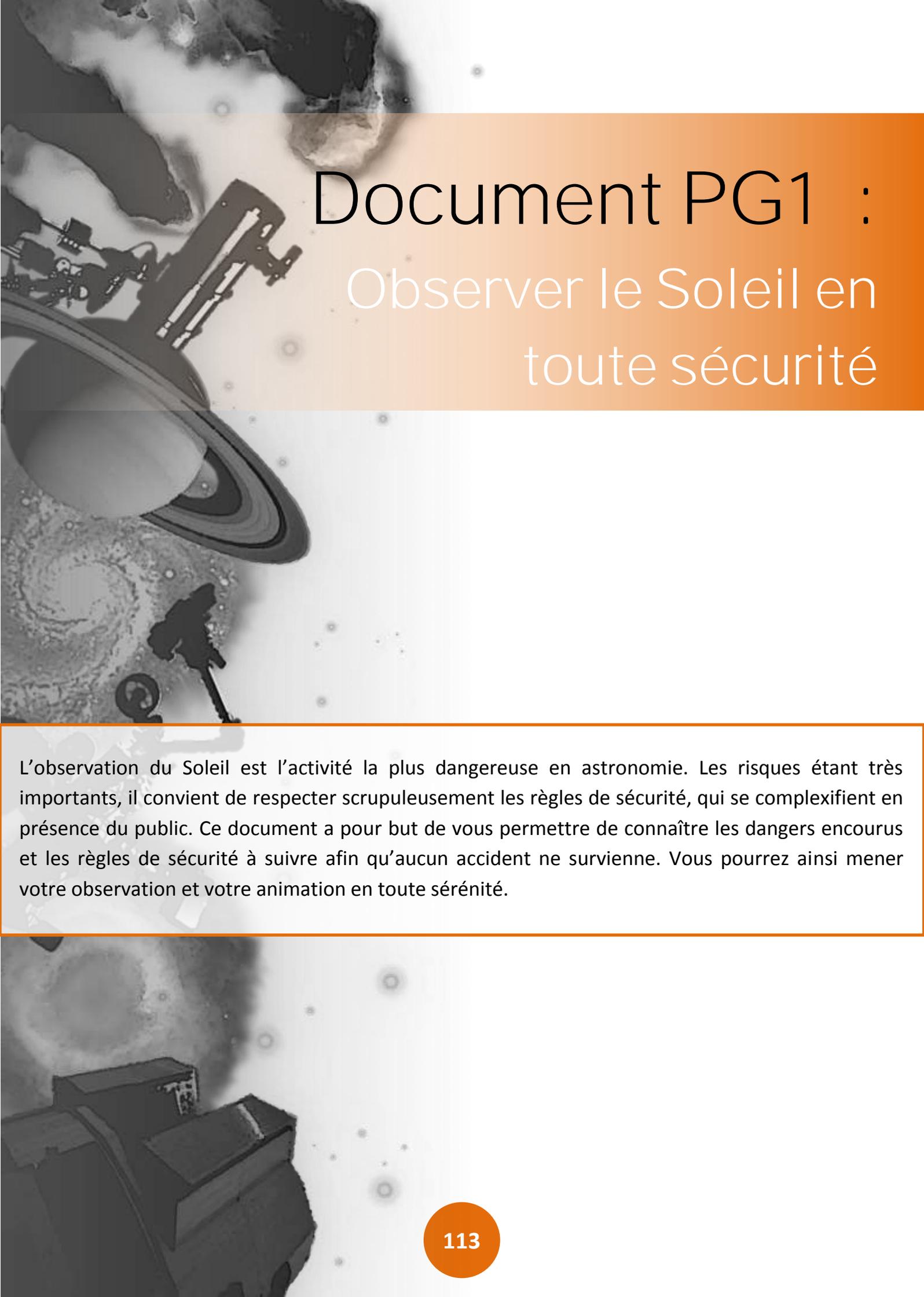
Partie 4

Documentation

Ces documents contiennent les bases de l'astronomie et de l'astrophysique à propos des planètes. 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.



The background of the page features a grayscale astronomical image. In the upper left, the planet Saturn is visible with its prominent rings. Below it, a telescope is mounted on a tripod. The rest of the background is filled with various celestial objects, including stars and nebulae, creating a deep space atmosphere.

Document PG1 :

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 PG1

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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.

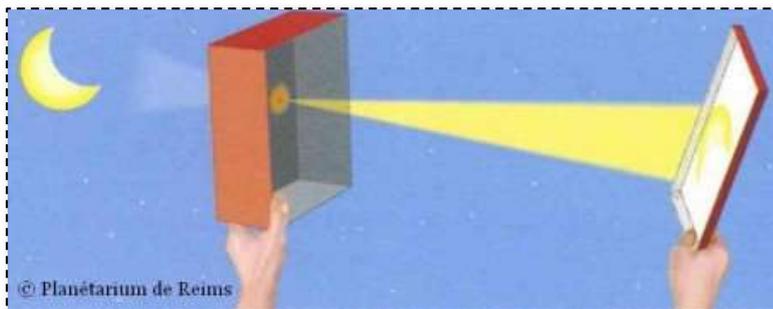
Placé face au Soleil, ce petit trou jouera le rôle d'une lentille et fera converger les rayons lumineux. Après le point focal, l'endroit où les rayons se croisent, vous pourrez former une image sur un écran.

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 (téléscope ou lunette), vous verrez une image beaucoup moins lumineuse.



La technique du sténopé

Les dangers de cette méthode :

Aucun danger connu.

3) Méthode semi-directe : la coronographie

La coronographie 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.



Photographie obtenue par coronographie

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.

II. Comment pointer le soleil ?

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.**

III. 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

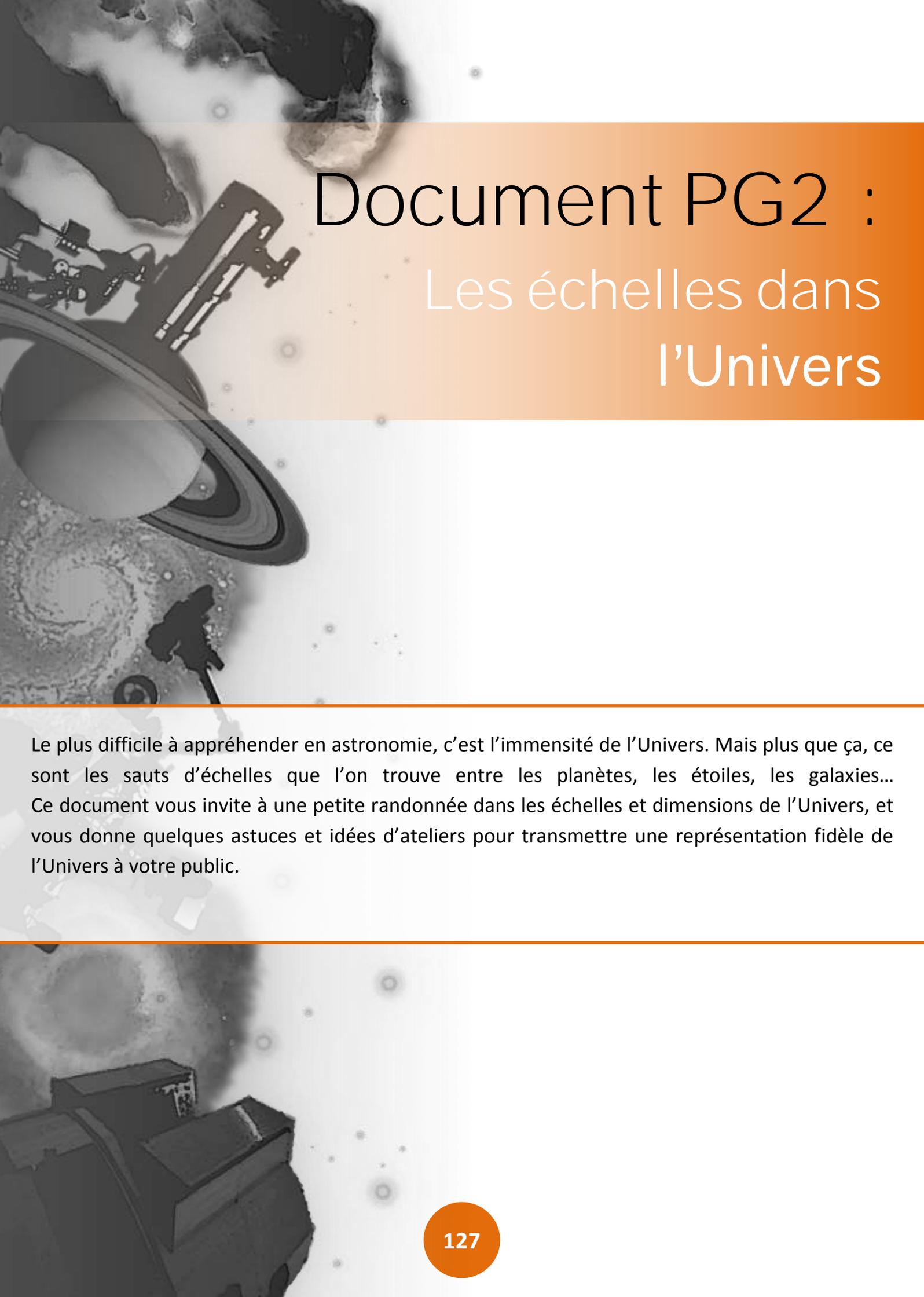
2) Assurer la sécurité des personnes

- 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.





Document PG2 :

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 PG2

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



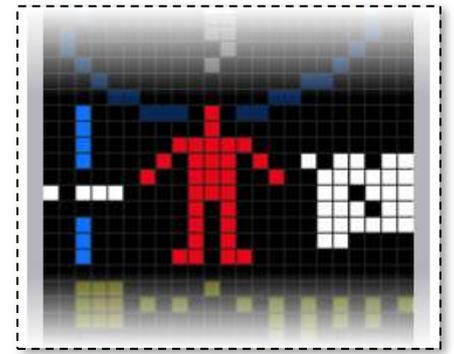
Le ciel nocturne ©Théo Nguyen

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**.



Partie du message d'Arecibo transmis en 1974.

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.



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

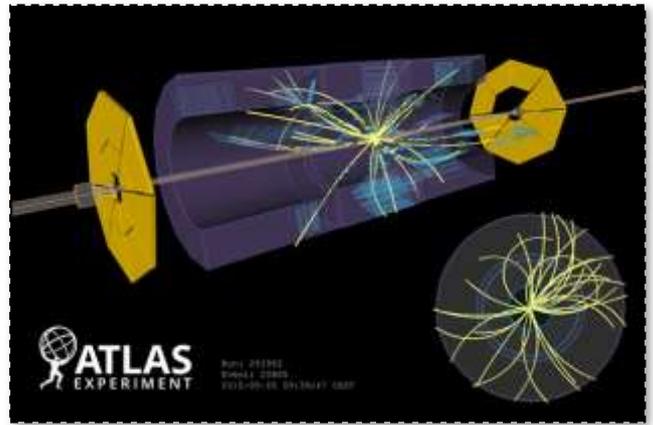
Prenons une araignée. On peut dire que sa taille est de l'ordre du 1cm, ou deux ordres de grandeur de moins que l'être humain (elle mesure quelques cm). Une araignée est en moyenne 100 fois plus petite qu'un être humain. Quand on passe à la fourmi, on tombe déjà au facteur 1000. C'est le propre des échelles, 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 100 μ m, c'est aussi l'épaisseur type d'un cheveu.

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

1) L'infiniment petit

- **10^{-6} m ou 1 μ m**, 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.



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.
- $1,616\ 252 \times 10^{-35}$ 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 !



Le Mont Blanc

- **10^4 m, 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.



Paris vue de la tour Montparnasse

- **10^5 m, 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.
- **10^6 m, ou 1000 km**, l'ordre de grandeur de taille d'un pays, d'un océan, d'un continent.



L'Europe



Notre planète, la Terre

- **Et enfin, 10^7 m, 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

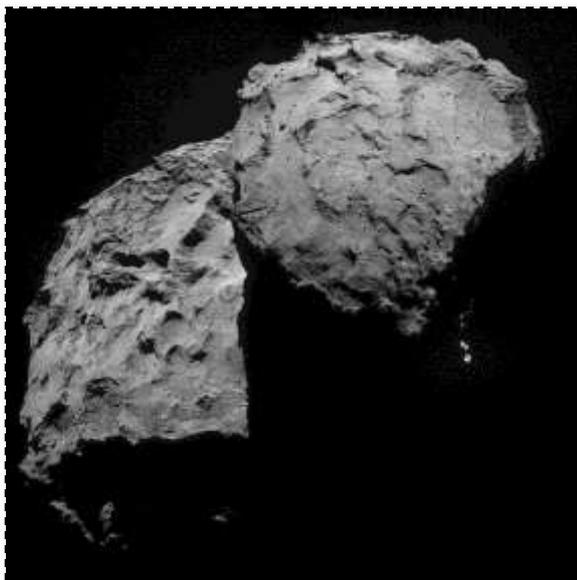
Dans un premier temps, nous allons abandonner le mètre, et utiliser le kilomètre comme unité de référence... parce que notre système solaire est trop grand pour continuer à utiliser le mètre. Sauf peut-être pour les petits astéroïdes, gros rochers tournant autour du Soleil. Les plus petits observables 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.

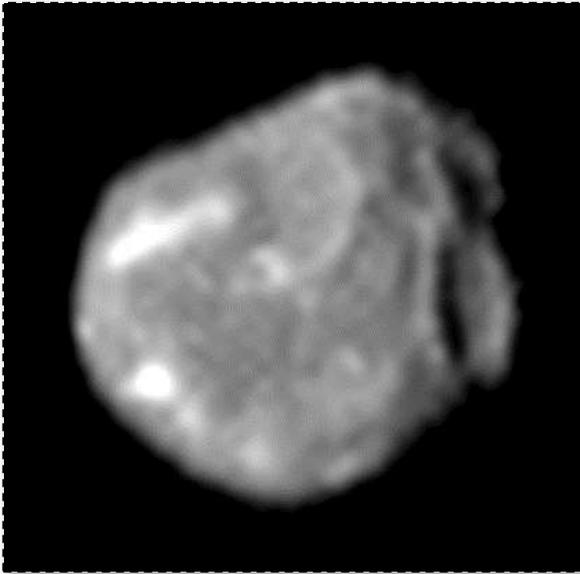


Comète Churyumov–Gerasimenko par la sonde Rosetta

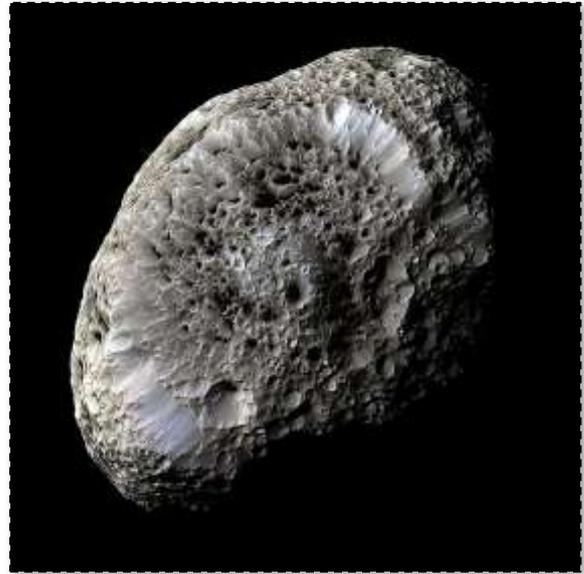


Nix, satellite de Pluton, par la sonde New Horizons

- **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.

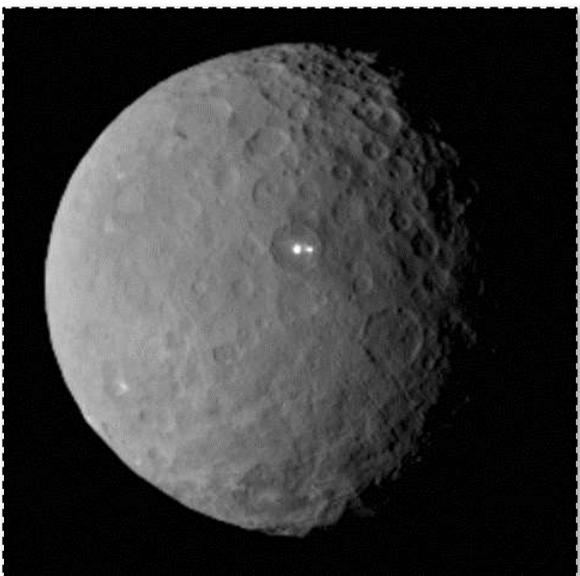


Amalthée, satellite de Jupiter



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.

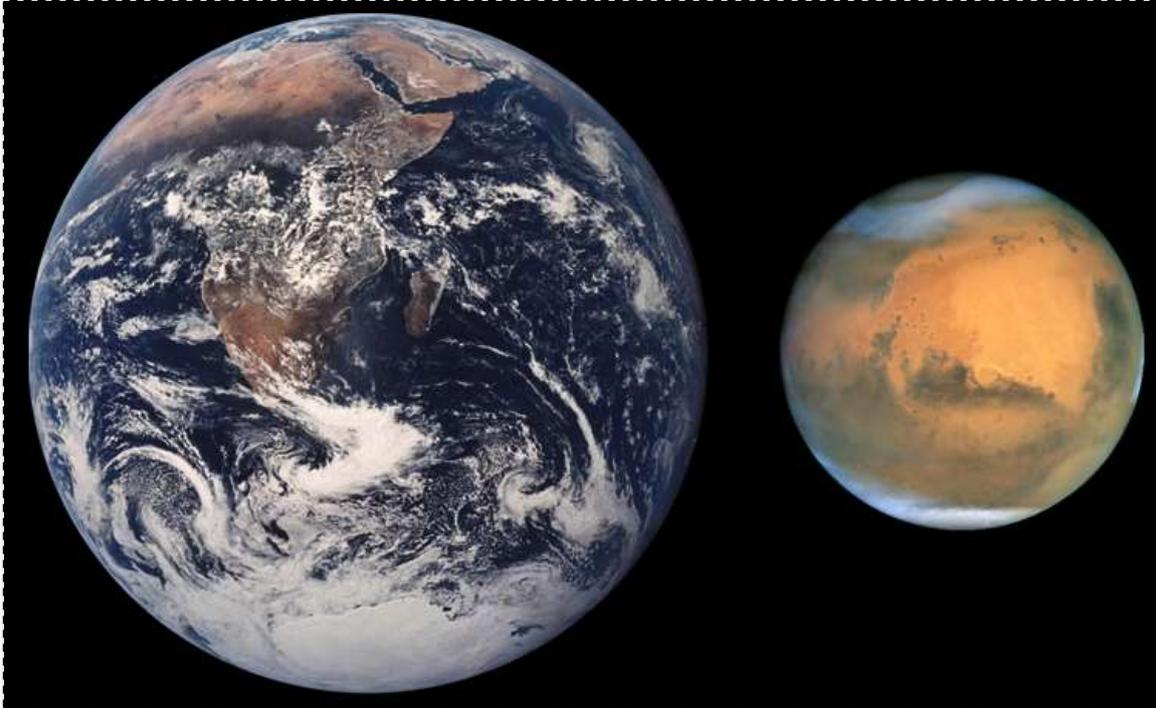


Cérès, planète naine du système solaire

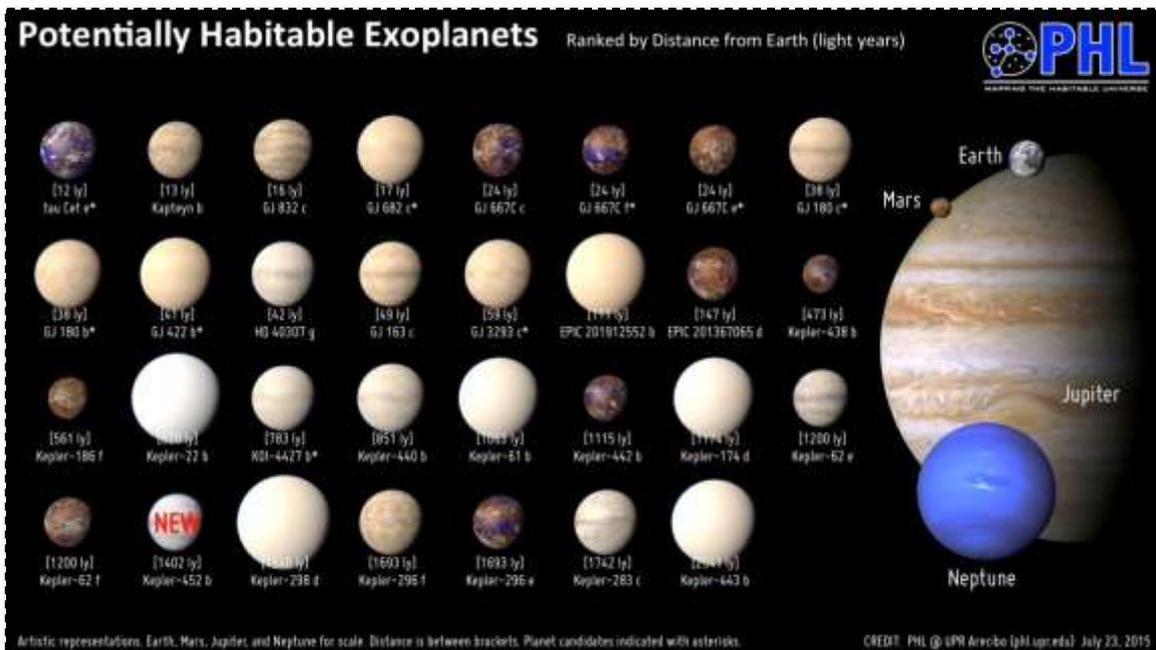


Pluton, planète naine du système solaire

- **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.

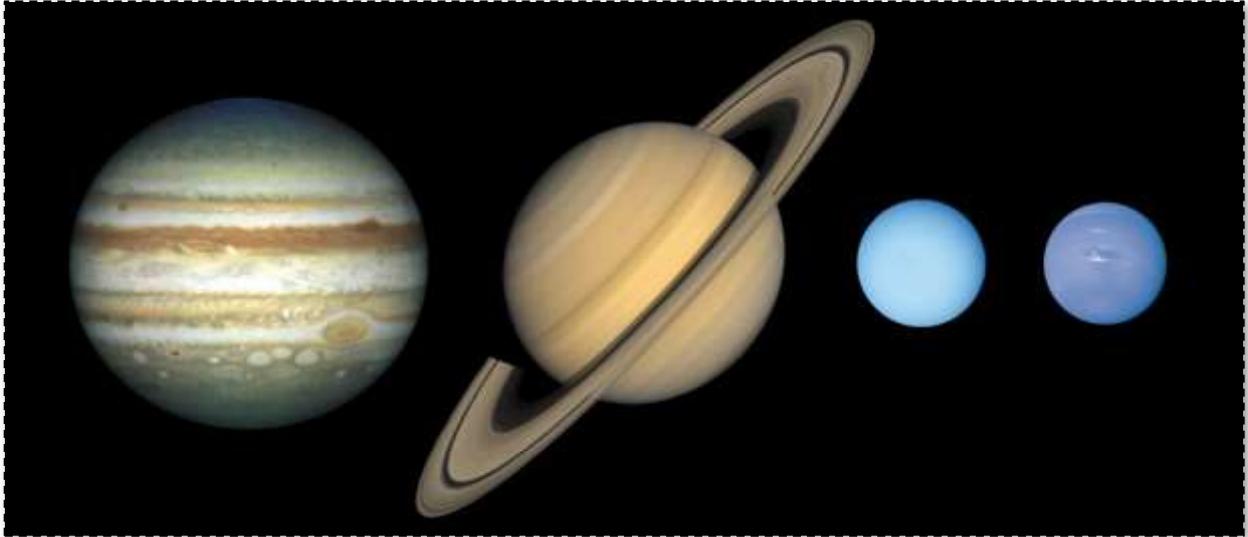


Comparaison des tailles de la Terre et Mars



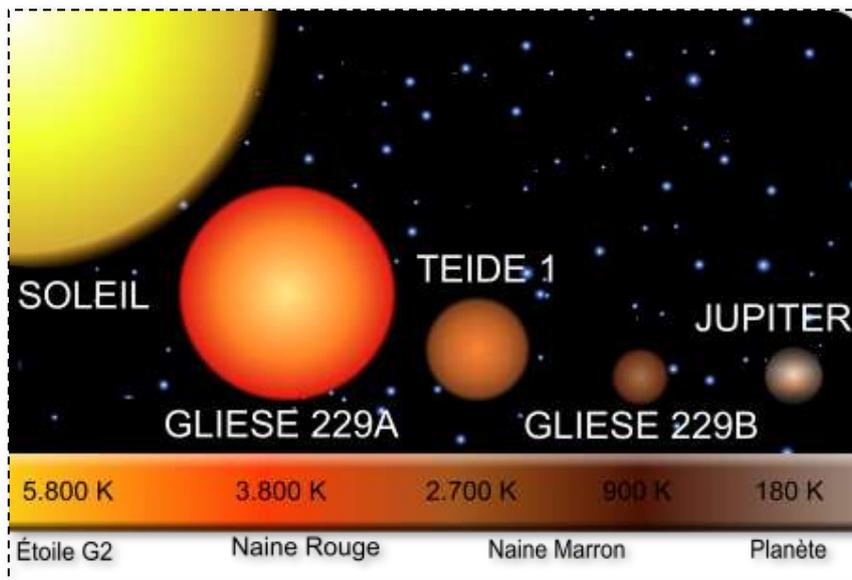
Tailles comparées d'exoplanètes de type tellurique et telluriques super-Terres

- **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.



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.



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

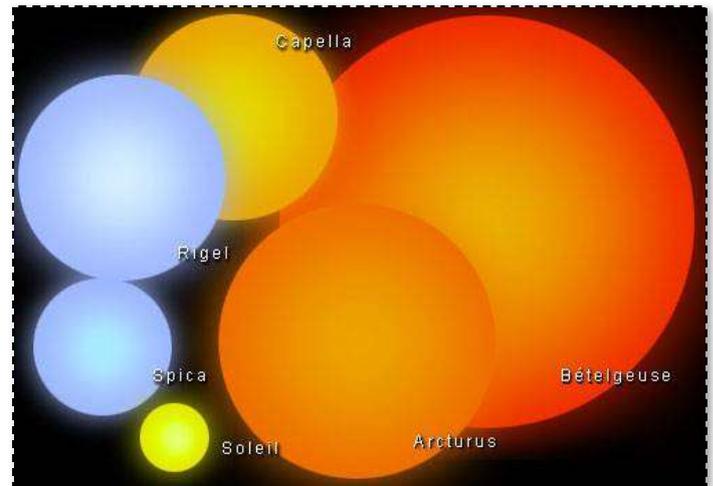
5) Les tailles des étoiles

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

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

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

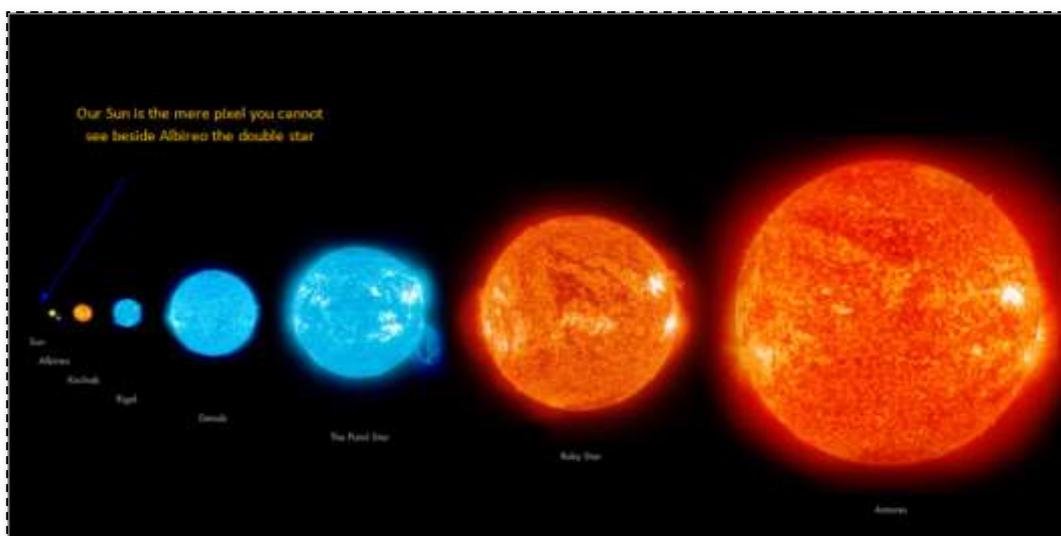
Les étoiles bleues, lourdes et très chaudes, ont une tailles de **2 à 100 R_{\odot}** . **100 R_{\odot}** , c'est quelque chose comme 11 ordres de grandeur au-dessus de nous ! Sirius a un rayon de $1.711 R_{\odot}$, Rigel a un rayon de **80 R_{\odot}** . Cela correspond également aux géantes rouges comme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



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 !

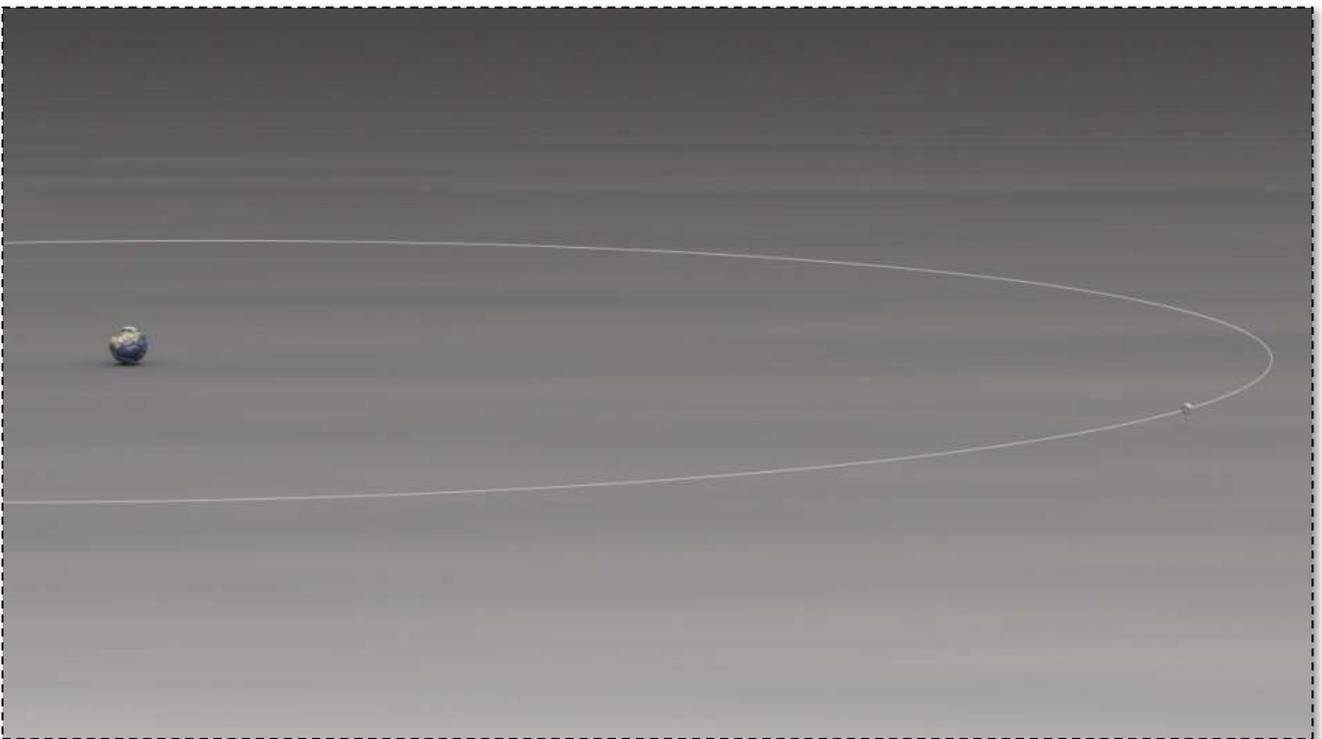


Taille du Soleil comparée des naines bleues, des géantes rouges et des super-géantes rouges

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.

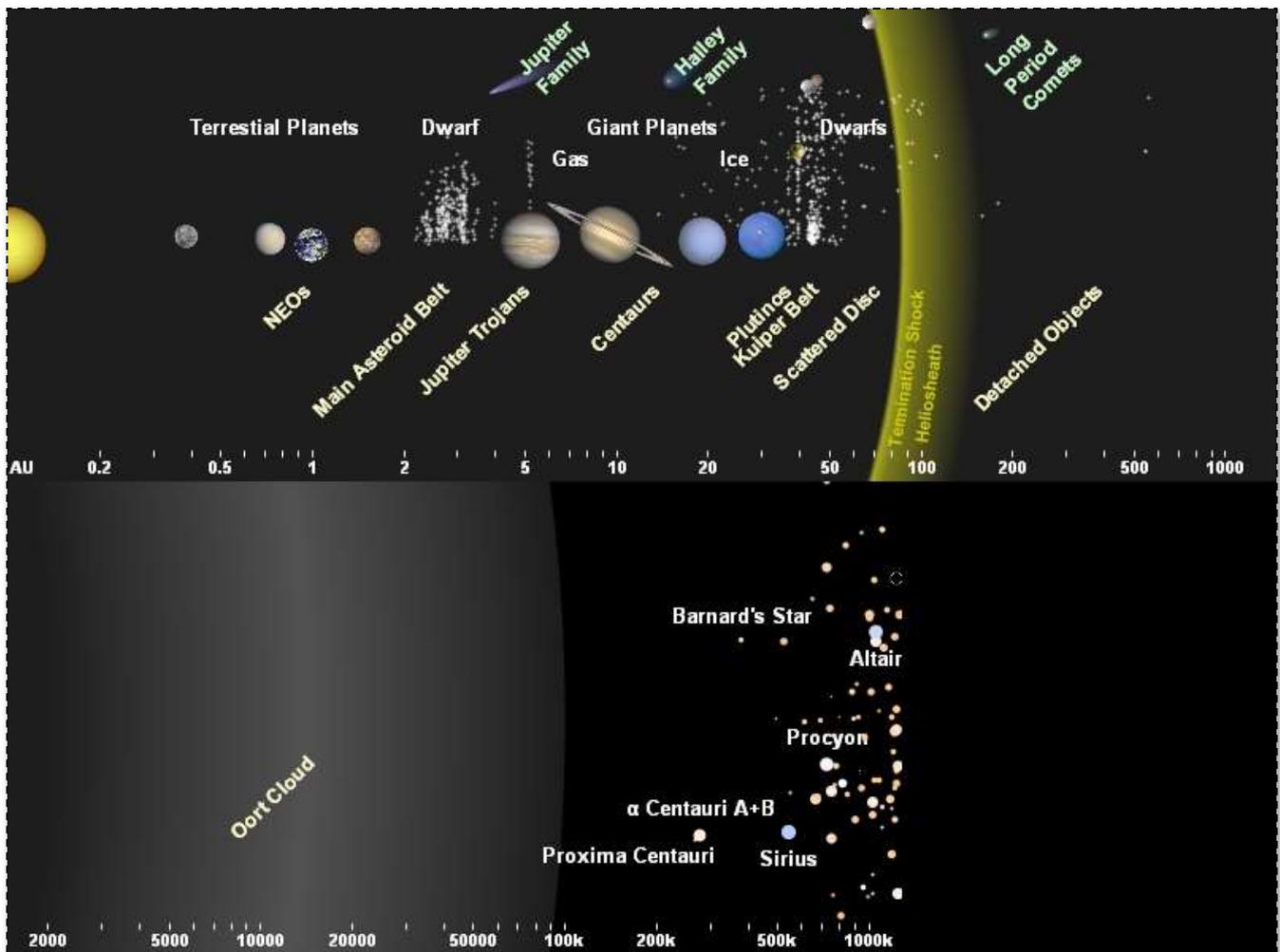
Autrement, dans un système planétaire, ou dans un système d'étoiles multiples (des étoiles en orbite autour d'autres étoiles, comme dans le système de Tataouine dans Star Wars), on utilise l'unité astronomique (U.A.). C'est la distance Terre-Soleil. $1 \text{ U.A.} = 150 \times 10^6 \text{ km}$.



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.



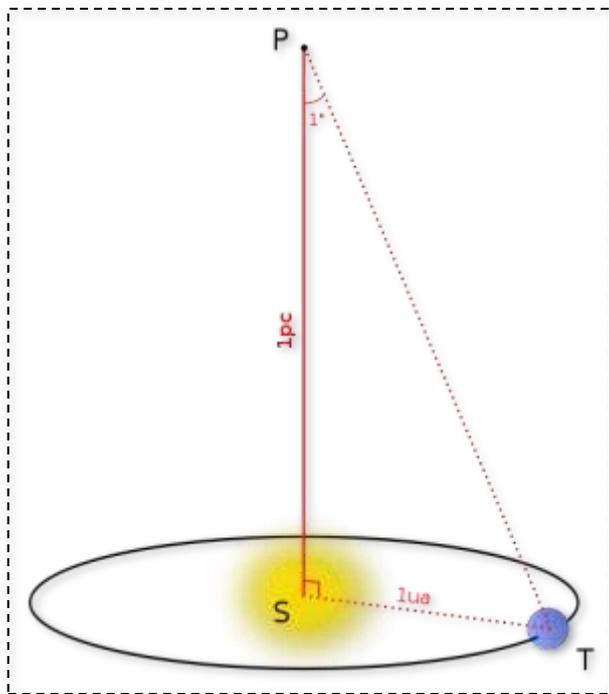
Distances dans le système solaire et au-delà en U.A.

- 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 $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

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



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.

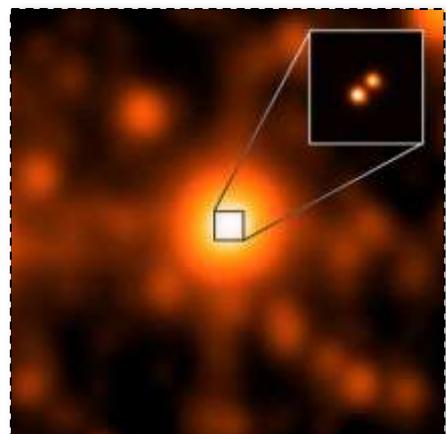
$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ A.L.} = 3,08567758 \times 10^{16} \text{ m}$$

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.

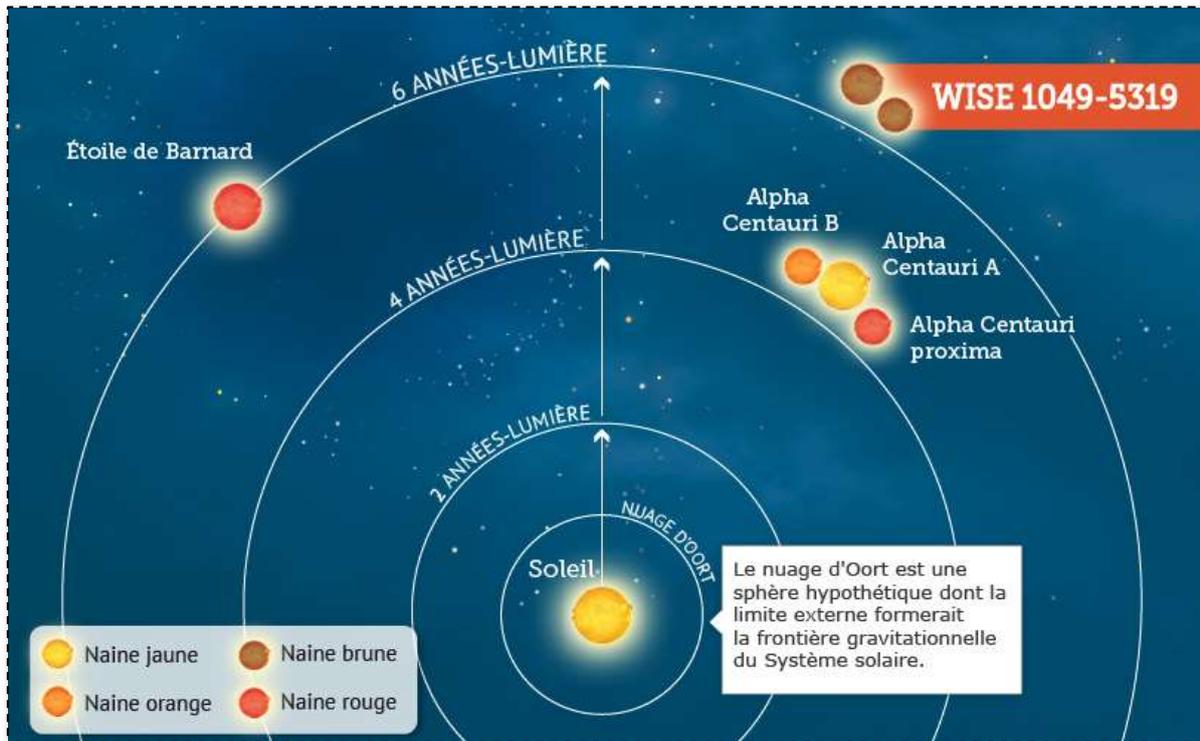


Vue d'artiste d'une partie du système d'Alpha du Centaure avec la planète Alpha Centauri Bb.



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.



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 _☉)	Luminosité (L _☉)	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

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

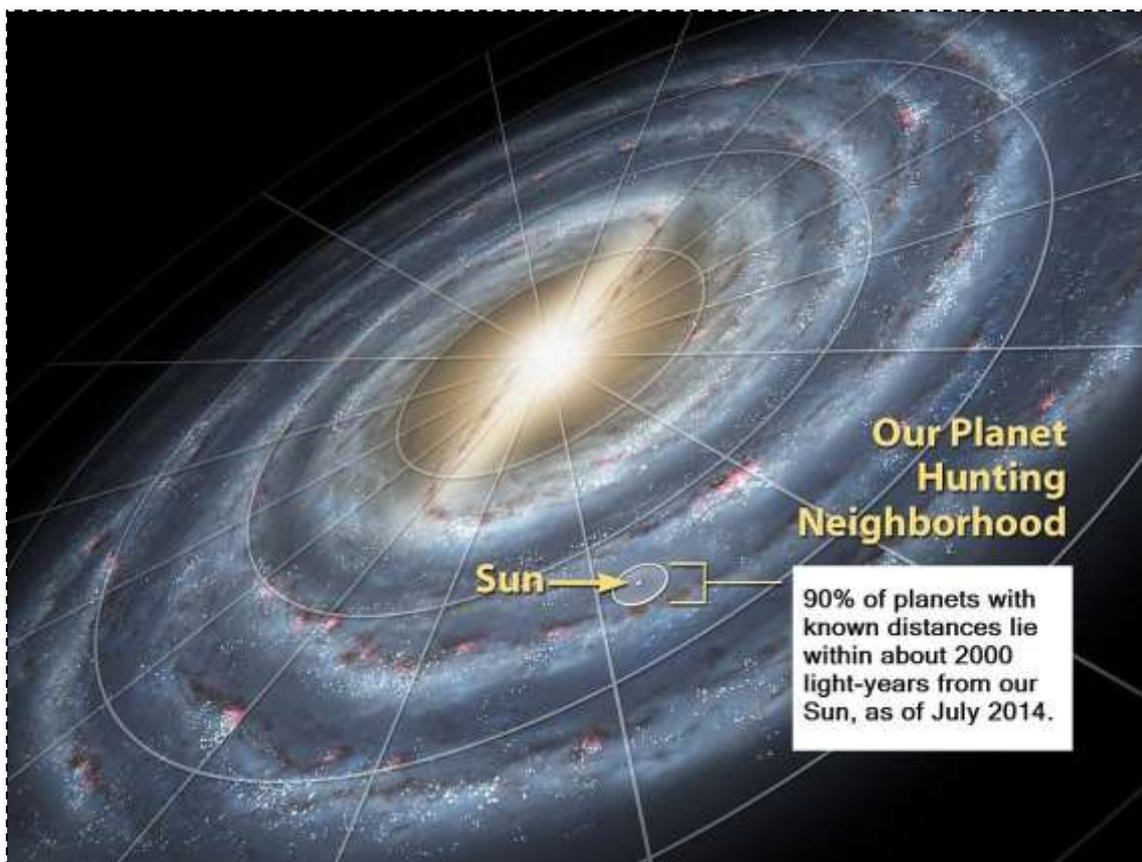
Quelques explications des informations de ce tableau :

- 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.



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.



Nébuleuse de l'Aigle, région de formation d'étoiles.

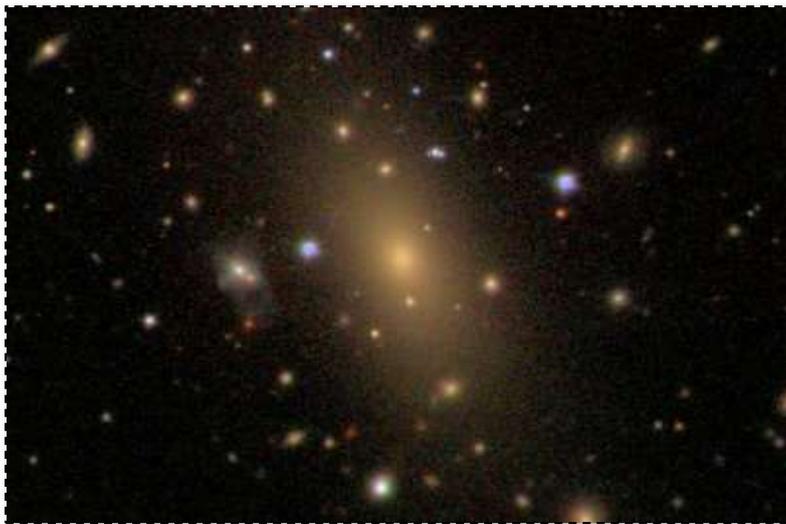
Notre Galaxie, elle, a un diamètre de **30 kpc** (kiloparsec), et une épaisseur de 1kpc (3kpc au centre).

- 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.



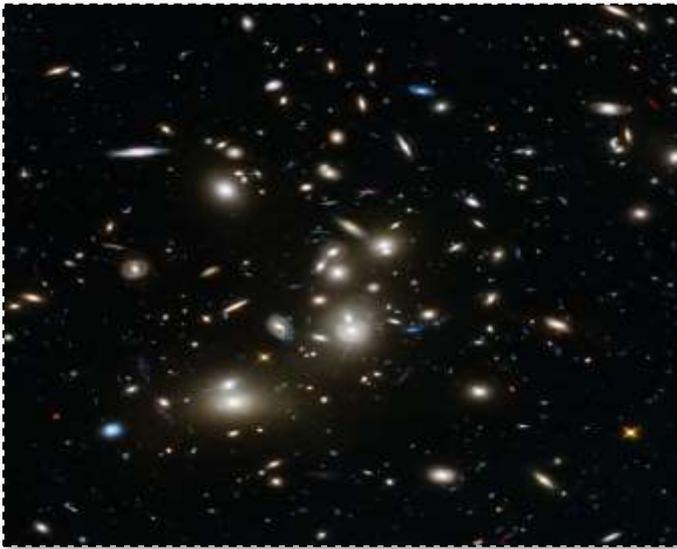
IC 1101, la plus grande galaxie connue.
Les autres sources lumineuses sur l'image sont des galaxies d'avant et d'arrière-plan.

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.



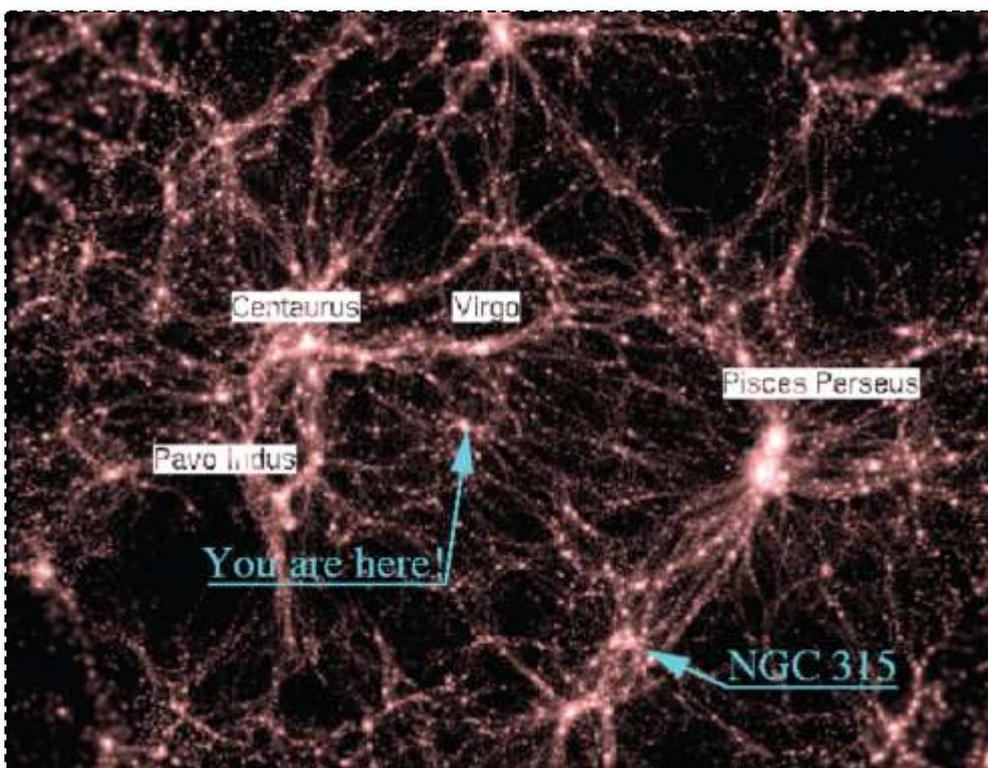
L'amas géant de galaxies Abell 2744.

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.

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.

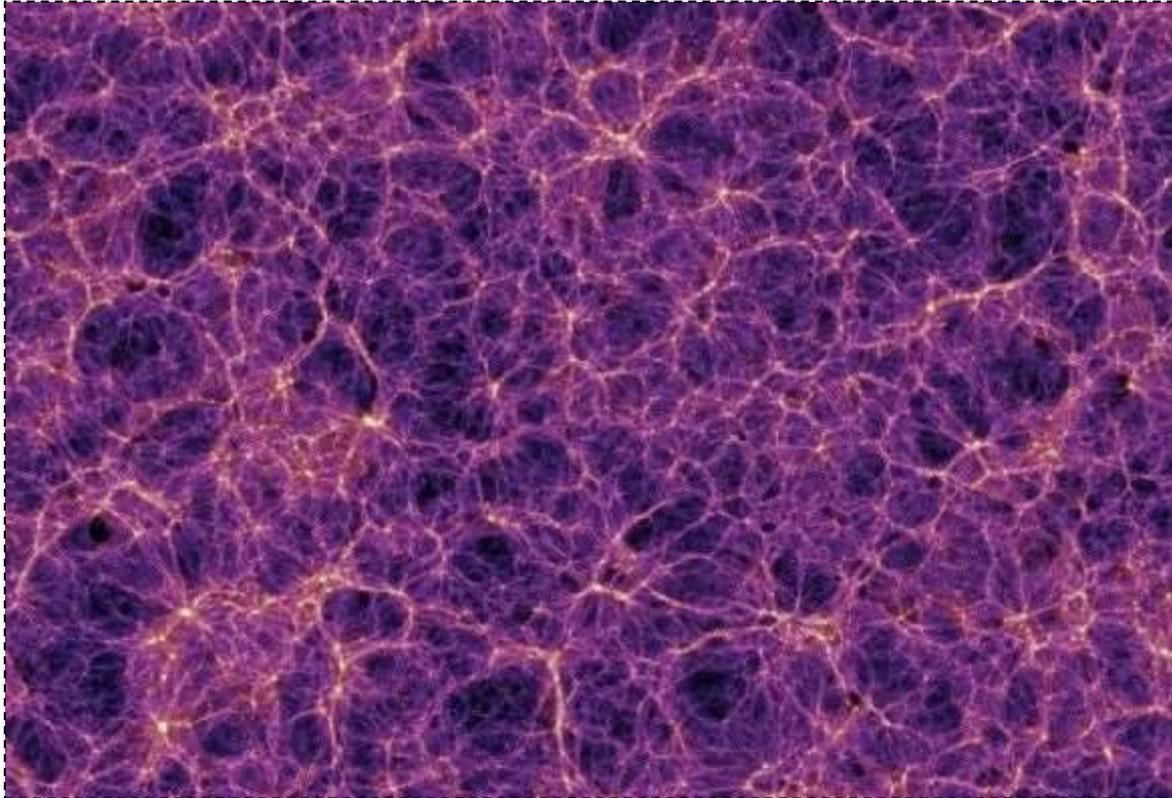
160 Mpc, c'est de l'ordre de 10^{24} m.



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.



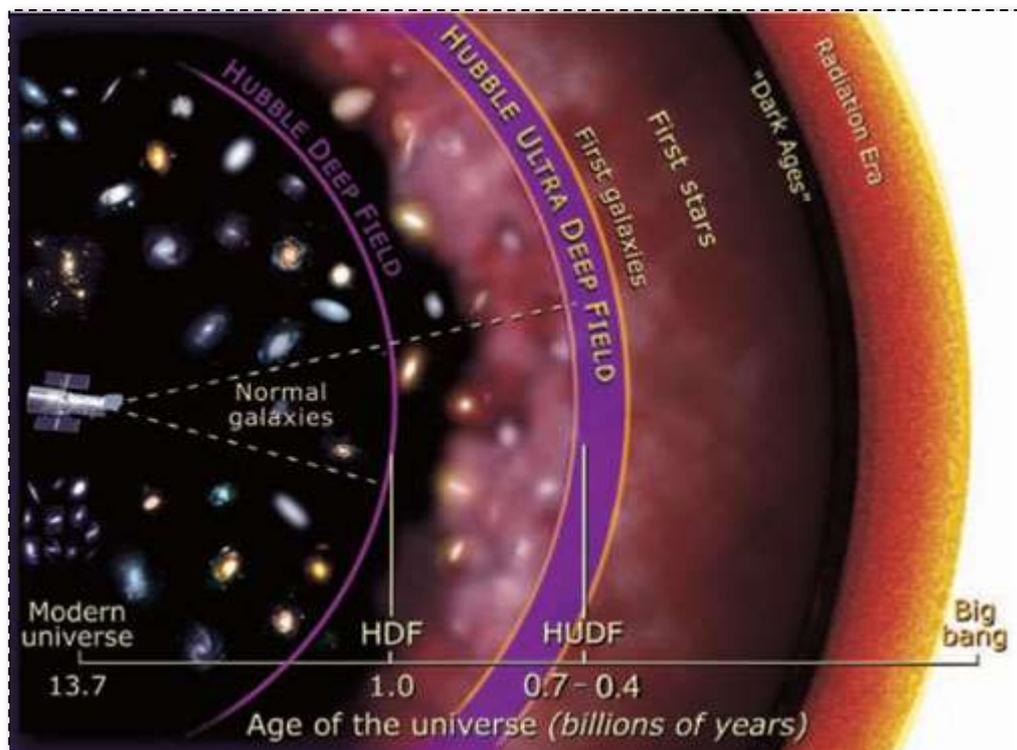
Filaments d'amas et de super-amas de galaxies. Source : <http://indicible.blog.lemonde.fr/2011/10/06/le-tissu-cosmique/>

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.

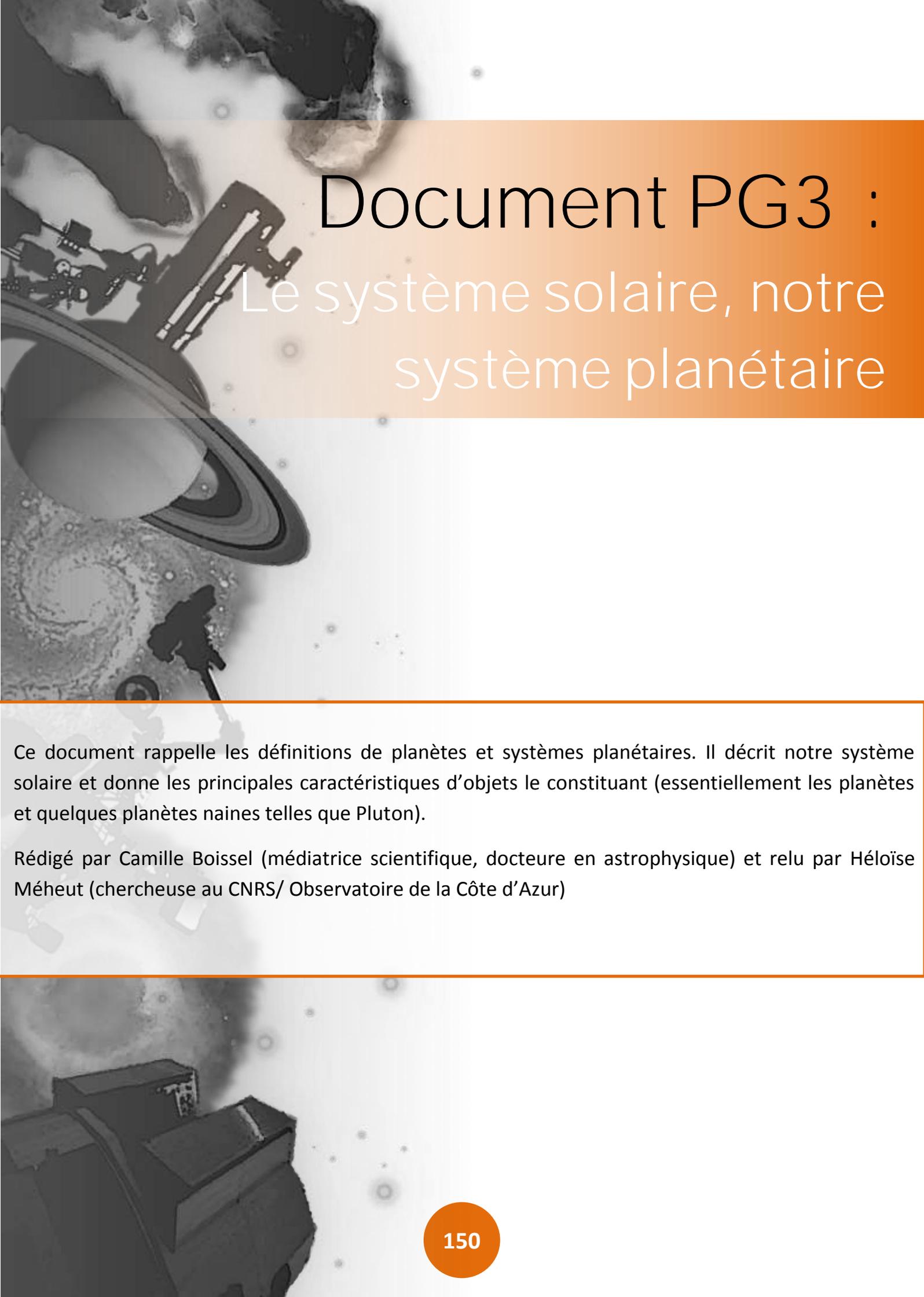


3,7 milliards d'A.L., c'est la distance au-delà de laquelle il est impossible de voir, car la lumière émise par ces objets n'a pas encore eu le temps de nous atteindre. Source : forums.futura-sciences.com

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

Unités de distance avec le mètre pour référence et ordres de grandeur de distance.





Document PG3 :

Le système solaire, notre système planétaire

Ce document rappelle les définitions de planètes et systèmes planétaires. Il décrit notre système solaire et donne les principales caractéristiques d'objets le constituant (essentiellement les planètes et quelques planètes naines telles que Pluton).

Rédigé par Camille Boissel (médiatrice scientifique, docteure en astrophysique) et relu par Héloïse Méheut (chercheuse au CNRS/ Observatoire de la Côte d'Azur)

Document PG3

Le système solaire, notre système planétaire

I. Premiers pas

Commençons par quelques définitions et par lever une ambiguïté. Qu'est-ce qu'un système planétaire ? Qu'est-ce qu'un système stellaire ? Qu'est-ce qu'on appelle le système solaire ?

1) Un système planétaire

Un système planétaire est un ensemble de planètes en révolution autour d'une étoile ou de plusieurs étoiles liées entre elles par gravitation. Ces planètes suivent des orbites elliptiques autour du centre de gravité du système, qu'on appelle aussi barycentre des masses. Ce barycentre occupe l'un des foyers de chaque orbite.

Ces planètes se sont formées autour de la ou des étoiles centrales dans une structure en forme de disque que l'on appelle disque proto-planétaire. Il contient les résidus de gaz et de poussière non utilisés par la formation de la ou des étoiles centrales.



Dessin d'artiste d'un disque proto-planétaire (Credit: Pat Rawlings / NASA Source)

2) Un système stellaire

Un système stellaire est un ensemble d'étoiles liées par gravité au point d'être en orbite les unes autour des autres. Plus précisément, le centre de gravité du système occupe l'un des foyers de chacune des orbites. Plusieurs configurations d'orbites sont possibles : une étoile autour d'une étoile, une étoile autour d'un couple de deux étoiles, un couple de deux étoiles autour d'un couple de deux étoiles, *etc.* Lorsqu'un système stellaire contient plus d'une étoile, on utilise le terme d'étoile multiple.

On peut trouver des systèmes planétaires complexes avec plusieurs étoiles dans toutes sortes de configurations. Par exemple, on peut trouver des planètes autour de chacune des deux étoiles d'une étoile double, ou bien des planètes autour d'un couple d'étoiles.

3) Le système solaire

Le système solaire désigne le cas particulier du système planétaire dans lequel se trouve la Terre : un système stellaire avec une seule étoile, le soleil, possédant un système planétaire. On pourrait tout à fait personnaliser le nom d'un système planétaire d'une autre étoile si cela s'avérait utile. Mais pour l'instant, nous découvrons beaucoup trop d'exoplanètes pour donner des noms à tous ces systèmes planétaires.

II. Qu'est-ce qu'une planète ?

Et quelle est la différence avec ce qu'on appelle une étoile ?

1) La différence entre une étoile et une planète

Une étoile est un objet constitué de plasma, le quatrième état de la matière, et qui produit sa propre lumière par un processus de fusion nucléaire. Un plasma est ce que l'on obtient quand on place un gaz à très haute température : les électrons et les noyaux des atomes se séparent.

Une planète est un objet constitué de solide, de liquide et de gaz et qui ne fait que réfléchir (renvoyer) la lumière qu'elle reçoit d'une étoile.

Ces deux définitions sont assez sommaires et partielles, mais elles seront plus détaillées plus loin. L'important est pour le moment de bien comprendre cette différence fondamentale entre les natures de ces deux types d'objets, car c'est une confusion très commune dans l'esprit du grand public et des jeunes publics non-initiés.

2) La définition d'une planète

C'est l'Union Astronomique Internationale qui a autorité pour définir les mots de l'astronomie et de l'astrophysique. Ces conventions, et seulement celles-ci, sont utilisées par toutes les personnes travaillant dans ce domaine.

Une définition n'est rien d'autre qu'une case construite par nous pour simplifier la communication. Elle n'est pas dictée par le monde physique, mais elle nous permet de le lire et d'en comprendre ses parties et ses mécanismes. Par conséquent, changer une définition ne fait pas disparaître ce qu'elle désigne, mais rend sa désignation plus pratique et plus utile pour comprendre le monde. Quand de nouvelles découvertes rendent une définition obsolète ou peu pratique, on décide d'en changer. C'est pourquoi, en 2006, l'UAI a décidé de modifier la définition du mot « planète ». Voici donc la définition de ce que l'humanité considère comme étant une planète :

1. **Est en orbite autour du Soleil**
2. **A une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique (une forme presque ronde contrainte par la gravité)**
3. **A nettoyé le voisinage de son orbite (tout ce qui s'y trouvait a été expulsé, mis sur orbite autour de la planète, est entré en collision avec elle ou s'est disloqué à son approche)**

L'existence des exoplanètes, planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil va nous amener probablement à modifier cette définition. Une définition plus pratique serait :

1. **N'est pas une étoile**
2. **Est en orbite autour d'une étoile**
3. **A une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique**
4. **A nettoyé le voisinage de son orbite.**

3) La définition d'une planète naine

Depuis la découverte d'Eris, corps de taille semblable à Pluton en orbite autour du Soleil à de plus grandes distances, la définition de planète est devenue peu pratique. Cette découverte est survenue dans une période où l'on commençait à découvrir de plus en plus de corps suffisamment lourds pour être sphériques, en orbite dans la ceinture de Kuiper, dont Pluton fait partie. On était en train de découvrir toute une famille d'objets, qui surpassait en nombre (des dizaines connus de tailles diverses) les 9 planètes que l'on

connaissait déjà. Il a donc fallu définir une nouvelle catégorie pour ces objets : les planètes naines. La définition d'une planète naine est :

1. **N'est pas une étoile**
2. **Est en orbite autour d'une étoile**
3. **A une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique**

Le point 4 est ce qui différencie les planètes naines des planètes. La différence tient dans le choix d'une masse limite. Trop léger ? le corps n'influe pas assez la course des corps évoluant à proximité, il ne nettoie donc pas son orbite, c'est donc une planète naine. Dans le groupe des planètes naines, aujourd'hui on trouve : Cérès, Eris, Pluton, Makemake et Hauméa. L'UAI ajoutera probablement bientôt : 2007 OR₁₀, Charon, Quaoar, Sedna, Orcus, Varuna, 2002 MS₄ et Salacie. Au fil des découvertes, qui s'accroissent depuis 1992, le nombre de corps identifiés comme planètes naines est amené à augmenter.

4) Planète géante et planète tellurique

On classe aujourd'hui les planètes en deux grandes catégories, bien qu'avec les découvertes d'exoplanètes qui se multiplient, on commence à entrevoir une plus grande diversité. Ces deux grandes catégories sont les planètes telluriques et les planètes géantes.

a) Planète géante

Une planète géante est une planète de grande taille et de faible densité, sans surface solide à proprement parler, composés de matériaux légers. On les classe en deux catégories : les géantes gazeuses et les géantes glacées, mais ces deux termes peuvent porter à confusion.

- Les **planètes géantes gazeuses**, comme Jupiter ou Saturne, contiennent surtout du fluide, un état gazeux ou liquide, sous une atmosphère de 300 km de gaz et de vapeurs. La transition entre les deux est continue. Ces planètes sont composées en majorité d'hydrogène (H) et d'hélium (He), des éléments volatils que l'on trouve uniquement sous forme de gaz ou de plasma à l'extérieur d'une planète. Un cœur fait de matériaux plus lourds se trouve probablement en son centre, vestige du noyau de roches et de glaces qui s'est formé dans un premier temps avant d'attirer à lui ces éléments volatils. On appelle aussi ces planètes des planètes joviennes, i.e : semblables à Jupiter.
- Les **planètes géantes glacées**, comme Uranus ou Neptune, contiennent elles aussi une phase fluide sous une atmosphère épaisse, avec une transition continue, mais

elles sont majoritairement composées de molécules plus lourdes, telles que l'eau (H_2O), le méthane (CH_4) ou l'ammoniac (NH_3). Ces matériaux se trouvent principalement dans l'atmosphère, pour le cas des planètes joviennes. Dans le champ d'étude des planètes géantes, ces matériaux sont appelés abusivement des glaces. La raison est qu'à l'extérieur d'une planète, le seul état possible de ces matériaux est la glace. Les noyaux originels de ces planètes étaient composés presque uniquement de glaces. Les géantes glacées n'ont d'hydrogène et d'hélium que sous forme de gaz dans leur atmosphère.

La différence entre ces deux types de planètes géantes vient de leur lieu de formation, plus ou moins éloigné de leur étoile (ici, le Soleil). Jupiter, plus proche du Soleil à sa formation, a pu intégrer de la roche dans son cœur et capter plus d'hydrogène et d'hélium, plus abondants à cette distance. Neptune ne disposait que de glaces pour construire son cœur, et de moins d'éléments volatils pour son atmosphère, car plus éloignée du Soleil.

Important

En planétologie, on utilise parfois abusivement certains termes pour désigner des matériaux, ce qui provoque des confusions si l'on n'y prend pas garde :

- Le terme de **gaz** est parfois utilisé pour ne désigner que les éléments volatils comme l'hydrogène et l'hélium, notamment quand il s'agit de la composition interne d'une planète, même si ces éléments ne sont pas à l'état gazeux.
- Le terme de **glace** est parfois utilisé pour désigner l'eau, le méthane ou l'ammoniac, notamment quand il s'agit de la composition interne d'une planète, même si ces molécules ne sont pas à l'état solide.
- Le terme de **roche** est parfois utilisé pour désigner le silicium, le carbone et le fer, notamment quand il s'agit de la composition interne d'une planète, même si ces éléments ne sont pas à l'état solide.

Ceci vient du fait que ces divers éléments et molécules, soumises au vide de l'espace, se trouvent respectivement sous forme gazeuse, solide (glaces) et solide (roches). Ce sont les matériaux de base de la formation des planètes. Les planétologues continuent à les dénommer gaz, glaces et roches une fois la planète formée, même si ce nouveau milieu les amène à changer d'état.

Lorsqu'on s'intéresse à la surface ou l'atmosphère des planètes, cette confusion disparaît, car on utilise dans ce cas de nouveau les termes corrects pour désigner l'état des

différents matériaux : il y a bien de la « vraie » glace d'azote à la surface de Pluton, et de la « vraie » glace d'eau aux pôles de la Terre.

Dans une animation, il est donc préférable d'utiliser le terme de **fluide** pour désigner l'état de la matière à l'intérieur des planètes géantes, pour ainsi éviter de rendre la connaissance confuse. Il faut donc expliquer qu'un fluide est un état intermédiaire entre gaz et liquide. Ainsi, on contribue à limiter l'expansion de ces abus de langage !

b) Planète tellurique

Une planète tellurique est un corps majoritairement solide et dense, constituée de roches, de métaux et/ou de glaces, avec possiblement une atmosphère gazeuse et des éléments liquides à sa surface. Dans cette catégorie se trouvent aussi les planètes naines et les corps de taille planétaire en orbite autour de planètes. La Terre est une planète tellurique.

c) Autres types de planètes

Avec la découverte des exoplanètes, de plus en plus nombreuses et de caractéristiques variées, on commence à définir de nouveaux types de planètes. Ils représentent pour certains des sous-catégories de celles que l'on connaissait, et pour d'autres des catégories et sous-catégories complètement nouvelles. Nous verrons cela dans le document sur les exoplanètes.

5) Petits corps du système solaire

Tout corps solide (composé de roches, de métaux et/ou de glaces) et non-artificiel qui correspond aux points 1) et 2) uniquement de la définition d'une planète :

- 1. N'est pas une étoile**
- 2. Est en orbite autour d'une étoile**

est appelé un petit corps.

On trouve dans la famille des petits corps : les astéroïdes, les comètes et d'autres objets ayant des caractéristiques très spécifiques.

6) Cas particuliers des satellites naturels ou « lunes »

Tout corps solide et non-artificiel en orbite autour d'une planète, planète naine ou petit corps s'appelle un satellite naturel ou une lune.

Cependant, c'est une définition basée non plus sur la nature du corps mais sur sa situation dans l'espace. En effet, Titan, la plus grosse lune de Saturne, est aussi grosse que la planète Mars et est composée de roches avec une surface glacée. De plus elle possède une atmosphère très épaisse. Elle a donc la même nature qu'une planète. Mais le fait qu'elle tourne autour de Saturne lui donne l'appellation de lune. Ici aussi, on voit que la définition officielle du mot planète est imparfaite, et sera probablement encore modifiée dans un avenir proche.

7) Evolution du nombre de planètes dans le système solaire

Toute définition étant par nature artificielle, et étant inventée pour permettre le tri dans les objets que l'on étudie, celles-ci peuvent évoluer avec le temps, le progrès des découvertes et des connaissances, le contexte social, culturel et politique. Ce fut le cas pour la définition d'une planète. Avant d'obtenir la définition acceptée par l'UAI en 2006, nous sommes passés par d'autres, qui fonctionnaient à leur époque, mais qui ne permettraient plus de classer correctement les astres que l'on connaît aujourd'hui dans le système solaire.



Dans l'antiquité, ne disposant pas de télescopes ni de lunettes, les grecs définirent les planètes par leur mouvement apparent : ces astres se déplacent sur le fond du ciel, repéré par des étoiles fixes. Le mot planète vient du grec et signifie « astre errant ». A ce moment,

on dénombrait 7 planètes dans le système solaire. Il s'agissait de la Lune, des 5 planètes que l'on voyait à l'œil nu : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, et du Soleil. On remarque que la Terre n'était pas encore comprise comme étant de même nature que ces astres errants, qu'on ne connaissait pas la nature différente du Soleil, qui est une étoile, et qu'on ne comprenait pas la Lune comme étant satellite de la Terre.

Lorsque la Terre fut délogée du centre de l'Univers par Nicolas Copernic en 1543, le Soleil a perdu son statut de planète, et la Terre l'a remplacé (7 planètes). La découverte des 4 plus grandes lunes de Jupiter par Galilée au début du 17^{ème} siècle (11 planètes), puis celles de Saturne par Jean-Dominique Cassini entre 1671 et 1684 vint changer de nouveau le nombre de planètes (16 planètes). Au début du 17^{ème} siècle, on comprit que ces nouveaux astres, étant satellites de planètes, pouvaient être classifiés différemment (6 planètes). William Herschel découvrit la planète Uranus en 1781 (7 planètes). La découverte des gros astéroïdes vint ensuite : Cérès (1801), Vesta (1807) et Junon (1804) (11 planètes). Ces petits corps s'appellent aujourd'hui (1) Cérès, (2) Pallas, (4) Vesta et (3) Junon, le chiffre représente l'ordre de leur découverte (Cérès, plus gros, fut plus facile à découvrir et donc fut le premier à être découvert). Un autre astéroïde fut découvert en 1845 (12 planètes), puis la planète Neptune par Johann Galle en 1846 suivant les calculs d'Urbain le Verrier. (13 planètes). Les astéroïdes furent définis comme tels dans les années 1850 (8 planètes). En 1859, Le Verrier, par des anomalies mesurées dans l'orbite de Mercure, fait l'hypothèse de la planète Vulcain, entre le Soleil et Mercure, et par des anomalies dans l'orbite de Neptune fait l'hypothèse d'une planète au-delà de celle-ci (10 planètes). Au début du XX^{ème} siècle, ces deux planètes hypothétiques ont été réfutées (les anomalies ont été expliquées autrement) (8 planètes). En 1930, Pluton fut découverte et ajoutée à la famille des planètes (9 planètes). Enfin, en 2006, Pluton a pris le statut de planète naine (8 planètes).

III. Visite du système solaire

Partons du Soleil, et visitons les différents corps du système solaire, orbite après orbite, jusqu'à ses confins ! **Source : Wikipedia.**

1) La planète Mercure

Type : planète tellurique.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	57 909 176 km / (0,38709893 UA)

Aphélie	69 817 079 km / (0,46669835 UA)
Périhélie	46 001 272 km / (0,30749951 UA)
Période de révolution	87,96934 j
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	2 439,7 km / (0,383 Terre)
Masse	$330,2 \times 10^{21}$ kg / (0,055 Terre)
Masse volumique	5 427 kg/m ³
Gravité de surface	3,701 m/s ² / (0,377 g)
Vitesse de libération	4,435 km/s
Période de rotation	58,6462 j
Inclinaison de l'axe	0,0352 ± 0,0017°
Albédo de Bond	0,119
Température de surface (max / moy / min)	700 K (427 °C) / 442 K (169 °C) / 90 K (-183 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très ténue (exosphère)
Pression à la surface	10^{-9} Pa / 10^{-14} bar
Composition	K (31,7 %), Na (24,9 %), O* (9,5 %), Ar (7,0 %), He (5,9 %), O ₂ (5,6 %), N (5,2 %), CO ₂ (3,6 %), H ₂ O (3,4 %), H ₂ (3,2 %)



a) **Orbite**

Mercure est la planète la plus proche du Soleil et la moins massive du Système solaire. Son éloignement au Soleil est compris entre 0,31 et 0,47 unité astronomique (UA) (46 et 70 millions de km). Elle est visible à l'œil nu depuis la Terre mais son observation est rendue difficile par sa proximité au Soleil : elle est noyée le plus souvent dans l'éclat du Soleil. Mercure est une planète tellurique.

Mercure a la particularité d'être en résonance 3:2 sur son orbite, sa période de révolution autour du soleil valant exactement 1,5 fois sa période de rotation sur elle-même. Autrement dit, la révolution et la rotation de Mercure sont couplées : à chaque révolution, la planète effectue 1,5 rotation. L'inclinaison de l'axe de rotation de Mercure sur son plan orbital est la plus faible du système solaire, à peine 2 minutes d'arc (1 minute d'arc = 1/60 degré).

Depuis la surface de Mercure le Soleil apparaît, en fonction de l'orbite elliptique, entre 2,1 et 3,3 fois plus gros que depuis la Terre, et sa lumière est environ 7 fois plus intense, avec un flux de rayonnement solaire de 9,1266 kW/m².

b) **Caractéristiques physiques**

Elle est près de trois fois plus petite et presque vingt fois moins massive que la Terre mais presque aussi dense qu'elle, avec une gravité de surface pratiquement égale à celle de Mars (qui est pourtant près de deux fois plus massive). Cette forte densité est due à l'importance de son noyau métallique, qui occuperait plus de 40 % de son volume, contre seulement 17 % pour la Terre.

c) **Surface**

Dépourvue de véritable atmosphère, sa surface est très fortement cratérisée, et globalement similaire à la face cachée de la Lune.

Du fait de l'inclinaison quasi nulle de son axe de rotation, les zones polaires de Mercure ne reçoivent les rayons solaires que rasants, ce qui doit entraîner une température d'équilibre en sous-sol bien inférieure à celles des latitudes plus basses, et induire des températures de surface inférieures à 50 K (-223 °C) dans le fond des cratères polaires, où la lumière solaire ne pénètre jamais. De la glace pourrait y être conservée, car à ces températures elle ne se sublime quasiment plus (la pression partielle de vapeur de la glace est très basse). Par comparaison, la température sur Terre varie seulement d'environ 11 K (sans tenir compte du climat ou des saisons, uniquement par l'effet du rayonnement solaire).

La surface de Mercure est couverte d'un tapis poussiéreux de minéraux (silicates), de cassures et de cratères. La planète ne montre aucun signe d'activité interne. Pour les astronomes, ces cratères sont très anciens et racontent l'histoire de la formation du système solaire, lorsque les planétésimaux entraient en collision avec les jeunes planètes pour fusionner avec elles, au moment du grand bombardement tardif (Late Heavy Bombardment ou LHB en anglais). Pour en savoir plus sur le LHB, voir le document sur la formation du système solaire.

Certaines portions de la surface de Mercure semblent lisses, vierges de tout impact. Il s'agit probablement d'anciennes coulées de lave recouvrant un sol plus ancien et plus marqué par les impacts. Ces plaines datent d'une époque plus récente, postérieure à la période du LHB. La découverte des plaines volcaniques sur la surface permet de mettre en cause des chutes d'énormes astéroïdes atteignant le manteau, et pouvant créer en même temps des éruptions volcaniques à l'opposé de la planète.

Le plus remarquable de ces cratères est le Bassin Caloris, un impact météoritique d'un diamètre d'environ 1 550 km, qui fut formé après la chute d'un astéroïde d'une taille avoisinant les 150 km; il y a près de 3,85 milliards d'années. Son nom (« Caloris », chaleur en latin) vient du fait qu'il est situé sur l'un des deux « pôles chauds » de la surface de Mercure, le point qui fait directement face au Soleil lorsque la planète est au plus proche de celui-ci. Il s'agit d'une grande dépression circulaire, avec des anneaux concentriques. Plus tard, de la lave a certainement coulé dans ce grand cratère, et en a lissé la surface. Seule la partie est a pu être photographiée par la sonde Mariner 10, la partie ouest étant plongée dans l'ombre au moment du survol de Mercure²⁸. L'impact aurait « creusé » jusqu'au manteau planétaire de Mercure, créé des ondes de choc qui ont perturbé et traversé le noyau, puis causé des plissements à l'opposé de ce cratère sur la planète.

d) Atmosphère

Cette exosphère est principalement composée de potassium (31 %), de sodium (25 %) et d'oxygène (9,5 %). On y trouve aussi des traces d'argon, de néon, d'hydrogène et d'hélium.

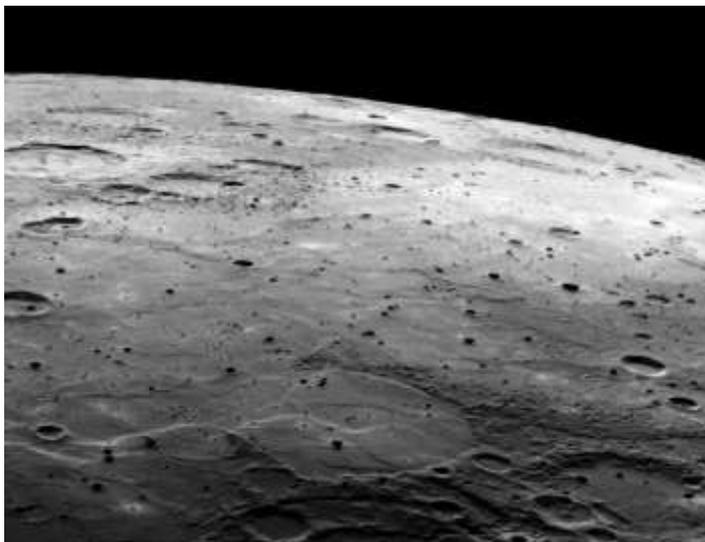
Le vent solaire et le dégazage du sol expliquent cette exosphère transitoire, d'une très faible pression et la variation considérable de la composition de l'atmosphère. Les impacts météoritiques (résiduels), comprenant les poussières du nuage zodiacal, qui éjectent des particules arrachées à la surface de la planète, contribuent aussi à la formation de cette infime « atmosphère ».

La quasi-absence d'atmosphère combinée à la proximité du Soleil engendre des températures en surface allant de 90 K (-183 °C) dans l'hémisphère nocturne et au fond des

cratères polaires (là où les rayons du Soleil ne parviennent jamais) jusqu'à 700 K (427 °C) au point subsolaire (le point de la surface duquel on voit le Soleil au zénith) au périhélie.

Histoire humaine autour de Mercure :

La planète Mercure doit son nom au dieu Mercure du commerce et des voyages, également messenger des autres dieux dans la mythologie romaine. La planète a été nommée ainsi par les Romains à cause de la vitesse à laquelle elle se déplaçait.



2) La planète Vénus

Type : planète tellurique.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	108 208 930 km / (0,723332 UA)
Aphélie	108 942 109 km / (0,72823128 UA)
Périhélie	107 476 259 km / (0,71843270 UA)
Période de révolution	224,701 j
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	6 051,8 ± 1,0 km / (0,952 Terre)
Masse	4,8685×10 ²⁴ kg / (0,815 Terre)
Masse volumique	5,204×10 ³ kg/m ³
Gravité de surface	8,87 m/s ² / (0,905 g)
Vitesse de libération	10,46 km/s
Période de rotation	-243,023 j
Inclinaison de l'axe	177,36°

Albédo de Bond	0,75
Température de surface (max / moy / min)	763 K (490 °C) / 735 K (462 °C) / 719 K (446 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Epaisse et dense (atmosphère)
Pression à la surface	$9,3 \times 10^6$ Pa / 93 bar
Composition	CO ₂ (96,5 %), N ₂ (3,5 %), SO ₂ (150 ppm), Ar (70 ppm), H ₂ O (20 ppm), CO (17 ppm), He (12 ppm), Ne (7 ppm), HCl (100 à 600 ppb), HF (1 à 5 ppb), COS (traces)

ppm = partie par million

ppb = partie par milliard



La distance de **Vénus** au Soleil est comprise entre 0,718 et 0,728 UA, avec une période orbitale de 224,7 jours. Vénus est une planète tellurique, comme le sont également Mercure, la Terre et Mars. Elle possède un champ magnétique très faible et n'a aucun

satellite naturel. Elle est, avec Uranus, l'une des deux seules planètes du Système solaire dont la rotation est rétrograde, et la seule ayant une période de rotation (243 jours) supérieure à sa période de révolution. Vénus est presque aussi grande que la Terre — son diamètre représente 95 % de celui de notre planète — et a une masse équivalente aux quatre cinquièmes de celle de la Terre. Sa surface est dissimulée sous d'épaisses couches de nuages très réfléchissants qui lui confèrent un albédo de Bond de 0,75 et une magnitude apparente dans le ciel pouvant atteindre -4,6, valeur dépassée uniquement par la Lune et le Soleil. Étant plus proche du Soleil que la Terre, elle présente des phases au même titre que la Lune et Mercure selon sa position relative par rapport au Soleil et à la Terre, son élongation ne dépassant jamais 47,8°.

L'atmosphère de Vénus est la plus épaisse de celle de toutes les planètes telluriques, avec une pression au sol atteignant 9,3 MPa (91,8 atm) au niveau de référence des altitudes vénusiennes. Cette atmosphère est composée d'environ 96,5 % de dioxyde de carbone et 3,5 % d'azote, avec de faibles concentrations de dioxyde de soufre et de divers autres gaz. Elle contient d'épaisses couches nuageuses opaques constituées de gouttelettes de dioxyde de soufre et d'acide sulfurique surmontées d'une brume de cristaux de glace d'eau qui donne à la planète son aspect laiteux lorsqu'on l'observe depuis l'espace. Ces nuages réfléchissent l'essentiel du rayonnement solaire, de sorte que la puissance solaire parvenant au sol sur Vénus représente moins de 45 % de celle reçue au sol sur Terre, et est même inférieure d'un quart à celle reçue à la surface de la planète Mars¹. L'atmosphère de Vénus est près de cent fois plus massive que celle de la Terre et possède une dynamique propre, indépendante de la planète elle-même, avec une super-rotation dans le sens rétrograde en quatre jours terrestres, ce qui correspond à une vitesse linéaire au sommet des nuages d'environ 100 m/s (360 km/h) par rapport au sol. Compte tenu de sa composition et de sa structure, cette atmosphère génère un très puissant effet de serre à l'origine des températures les plus élevées mesurées à la surface d'une planète du Système solaire : près de 740 K (environ 465 °C) en moyenne à la surface — supérieures à celles de Mercure, pourtant plus proche encore du Soleil, où les températures culminent à 700 K (environ 425 °C) — et ceci bien que l'atmosphère ne laisse passer que le quart de l'énergie solaire incidente.

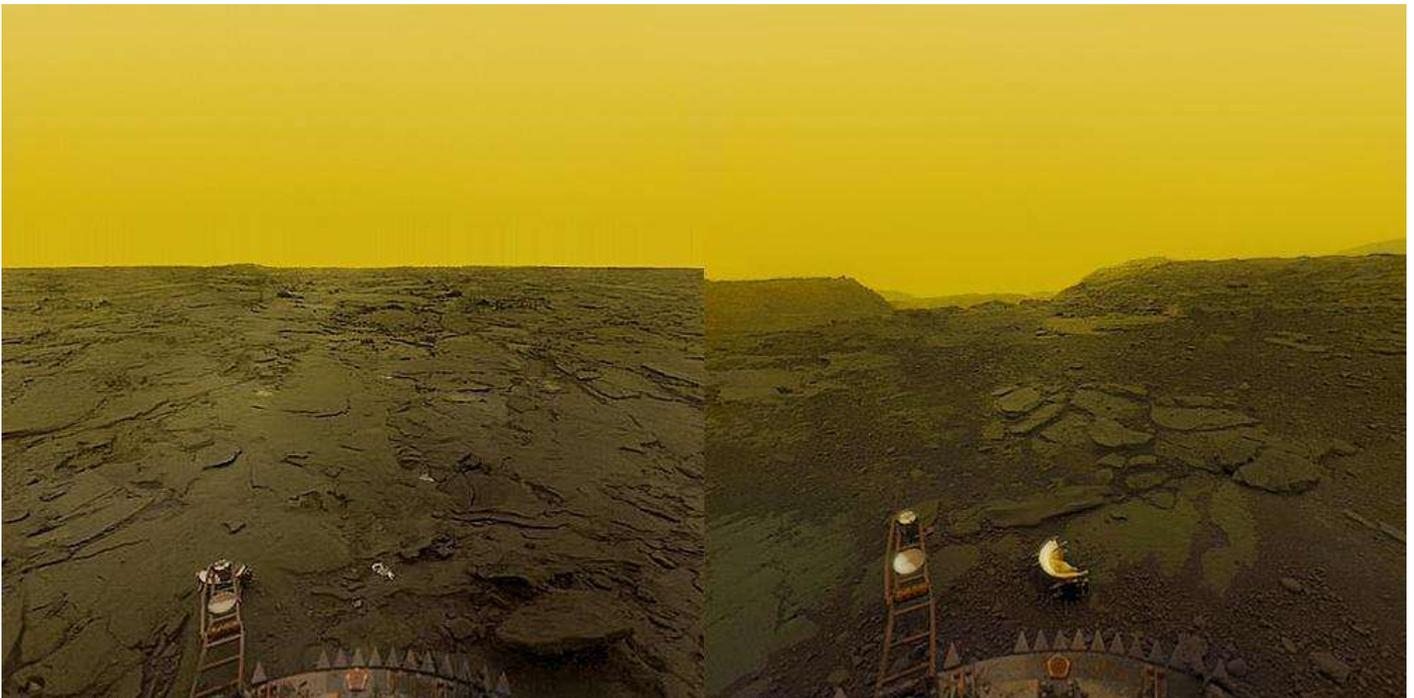
À cette pression (9,3 MPa) et à cette température (740 K), le CO₂ n'est plus un gaz, mais un fluide supercritique (intermédiaire entre un gaz et un liquide), d'une masse volumique voisine de 65 kg/m³.

La topographie de Vénus présente peu de reliefs élevés, et consiste essentiellement en de vastes plaines *a priori* volcaniques géologiquement très jeunes — quelques centaines de millions d'années tout au plus. De très nombreux volcans ont été identifiés à sa surface — mais sans véritables coulées de lave, ce qui constitue une énigme. En l'absence de tectonique des plaques identifiée à la surface de la planète, on pense que Vénus évacue sa

chaleur interne périodiquement lors d'éruptions volcaniques massives qui remodelent entièrement sa surface, ce qui expliquerait que celle-ci soit si récente. Entre ces épisodes de volcanisme global, le refroidissement de la planète serait trop lent pour entretenir un gradient thermique suffisant dans la phase liquide du noyau pour générer un champ magnétique global par effet dynamo².

Par ailleurs, des mesures d'émissivité à 1,18 μm réalisées en 2008³ ont suggéré une relative abondance des granites et autres roches felsiques sur les terrains les plus élevés — qui sont généralement les plus anciens — de la planète, ce qui impliquerait l'existence passée d'un océan global assorti d'un mécanisme de recyclage de l'eau dans le manteau susceptible d'avoir produit de telles roches. À l'instar de Mars, Vénus aurait ainsi peut-être connu, il y a plusieurs milliards d'années, des conditions tempérées permettant l'existence d'eau liquide en surface, eau aujourd'hui disparue — par évaporation puis dissociation photochimique dans la haute atmosphère — au point de faire de cette planète l'une des plus sèches du Système solaire.

La planète Vénus a été baptisée du nom de la déesse Vénus de la féminité et de l'amour physique dans la mythologie romaine. Elle était déjà connue des Babyloniens à l'Âge du bronze, associée à la déesse Ishtar de la mythologie mésopotamienne.



3) La planète Terre

Type : planète tellurique.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	149 597 887,5 km / (1,0000001124 UA)
Aphélie	152 097 701 km / (1,0167103335 UA)
Périhélie	147 098 074 km / (0,9832898912 UA)
Période de révolution	365,256363 j
Satellites connus	1 (Lune)

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	6 371,008 km
Masse	$5,9736 \times 10^{24}$ kg
Masse volumique	$5,515 \times 10^3$ kg/m ³
Gravité de surface	9,80665 m/s ² / (1 g)
Vitesse de libération	11,186 km/s
Période de rotation	0,99726949 j / ((23 h 56 min 4,084 s))
Inclinaison de l'axe	23,4371460°
Albédo de Bond	0,306
Température de surface (max / moy / min)	56,7 °C / 15 °C / -93,2 °C

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Epaisse (atmosphère)
Pression à la surface	101 325 Pa / 1,01325 bar
Composition	N ₂ (78,084 %), O ₂ (20,946 %), Ar (0,9340 %), CO ₂ (400 ppm), Ne (18,18 ppm), He (5,24 ppm), CH ₄ (1,79 ppm), Kr (1,14 ppm), H ₂ (550 ppb), N ₂ O (300 ppb), CO (100 ppb), Xe (90 ppb), O ₃ (0 à 70 ppb), NO ₂ (20 ppb), I (10 ppb), H ₂ O (0,4 %)



La Terre s'est formée il y a 4,54 milliards d'années environ et la vie est apparue moins d'un milliard d'années plus tard². La planète abrite des millions d'espèces vivantes, dont les humains³. La biosphère de la Terre a fortement modifié l'atmosphère et les autres caractéristiques abiotiques de la planète, permettant la prolifération d'organismes aérobies de même que la formation d'une couche d'ozone, qui associée au champ magnétique terrestre, bloque une partie des rayonnements solaires, permettant ainsi *la vie* sur Terre⁴. Les propriétés physiques de la Terre, de même que son histoire géologique et son orbite, ont permis à la vie de subsister durant cette période et la Terre devrait pouvoir maintenir la vie (telle que nous la connaissons actuellement) durant encore au moins 500 millions d'années^{5,6}.

La croûte terrestre est divisée en plusieurs segments rigides appelés plaques tectoniques qui se déplacent sur des millions d'années. Environ 71 % de la surface terrestre est couverte par des océans d'eau salée qui forment l'hydrosphère avec les autres sources d'eau comme les lacs, les fleuves ou les nappes phréatiques. Les pôles géographiques de la Terre sont principalement recouverts de glace (inlandsis de l'Antarctique) ou de banquises. L'intérieur de la planète reste actif avec un épais manteau composé de roches silicatées (généralement solides, mais localement fondues), un noyau externe de fer liquide qui génère un champ magnétique, et un noyau interne de fer solide.

La Terre interagit avec les autres objets spatiaux, principalement le Soleil et la Lune. Actuellement, la Terre orbite autour du Soleil en 365,256363 jours solaires ou une année sidérale^a. L'axe de rotation de la Terre est incliné de $23,437^{\circ 7}$ par rapport à la

perpendiculaire du plan de l'écliptique, ce qui produit des variations saisonnières sur la surface de la planète avec une période d'une année tropique (365,24219 jours solaires)⁸. Le seul satellite naturel connu de la Terre est la Lune qui commença à orbiter il y a 4,5 milliards d'années. Celle-ci provoque les marées, stabilise l'inclinaison axiale et ralentit lentement la rotation terrestre. Il y a environ 3,8 milliards d'années, lors du grand bombardement tardif, de nombreux impacts d'astéroïdes causèrent alors d'importantes modifications de sa surface.

La Terre a pour particularité, du point de vue de l'être humain, d'être le seul endroit connu de l'univers à abriter la vie telle que *nous la connaissons*, comme la faune (dont entre autres l'espèce humaine) et la flore. Les cultures humaines ont développé de nombreuses représentations de la planète, dont une personnification en tant que déité, la croyance en une terre plate, la Terre en tant que centre de l'univers et la perspective moderne d'un monde en tant que système global nécessitant une gestion raisonnable.

La science qui étudie la Terre est la géologie. Compte tenu de l'influence de la vie sur la composition de l'atmosphère, des océans et des roches sédimentaires, la géologie emprunte à la biologie une partie de sa chronologie et de son vocabulaire.



4) La Lune

Type : satellite de planète

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	384 399 km / (0,00257 UA) (autour de la Terre)
Aphélie	405 696 km / (0,0027 UA)
Périhélie	363 104 km / (0,0024 UA)
Période de révolution	27,321582 j / (27 j 7 h 43.1 min)
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	1 737,4 km / (0,273 Terre)
Masse	$7,3477 \times 10^{22}$ kg / (0,0123 Terre)
Masse volumique	$3,3464 \times 10^3$ kg/m ³
Gravité de surface	1,622 m/s ² / (0,1654 g)
Vitesse de libération	2,38 km/s
Période de rotation	27,321582 j
Inclinaison de l'axe	6,687°
Albédo géométrique	0,136
Température de surface (max / moy / min)	396 K (123 °C) / 250 K (-23 °C) / 40 K (-233 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très ténue (exosphère)
Pression à la surface	10^{-10} Pa
Composition	?

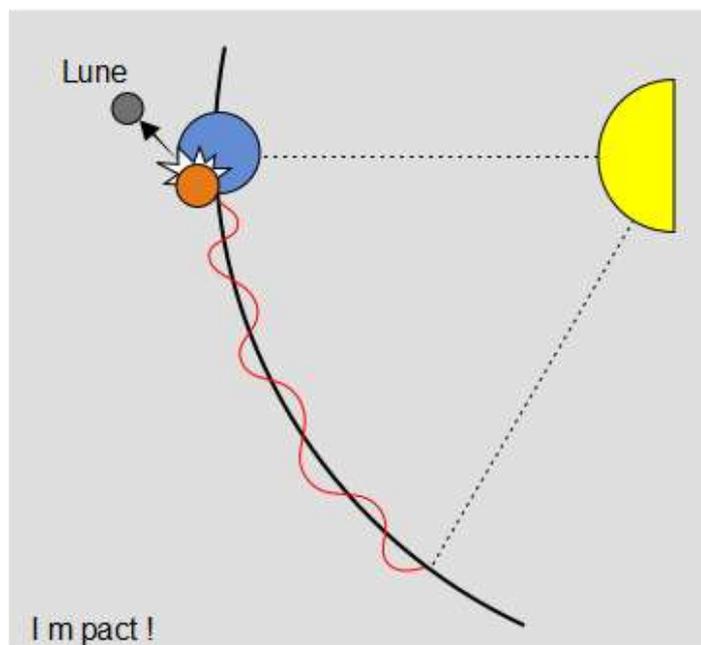
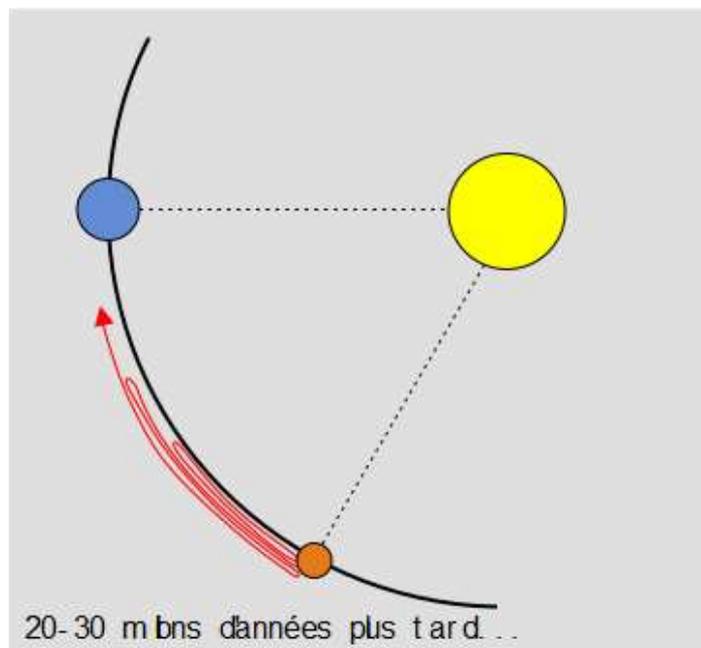
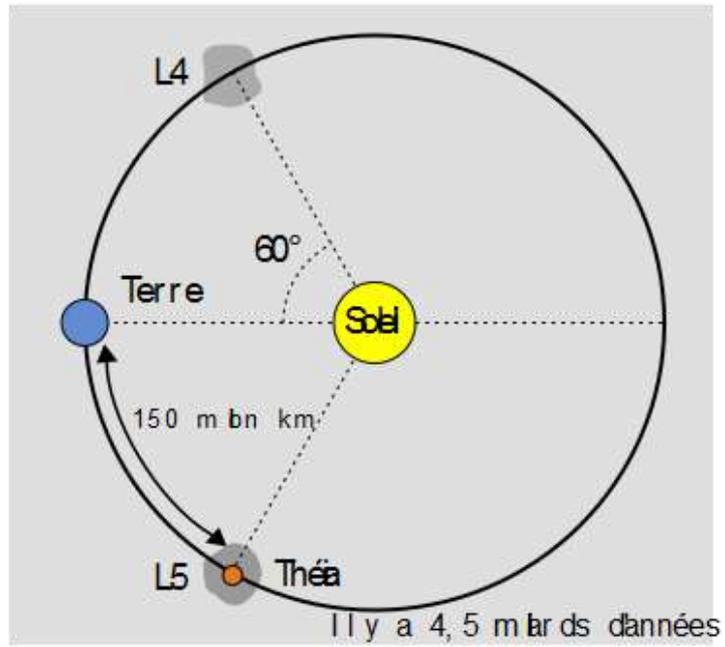
La **Lune** est l'unique satellite naturel de la Terre. Elle est le cinquième plus grand satellite du Système solaire, avec un diamètre de 3 474 km. La distance moyenne séparant la Terre de la Lune est de 384 467 km³. La Lune est le premier et le seul objet non terrestre visité par l'Homme. Le premier à y avoir marché est l'astronaute Neil Armstrong le 21 juillet 1969. Après lui, onze autres hommes ont foulé le sol de la Lune, tous membres du programme Apollo.

Le mouvement de révolution de la Lune autour de la Terre induit un effet gravitationnel différentiel (par rapport à l'effet gravitationnel Lune-Terre, vu du centre de la Terre) sur les eaux qui constituent les océans et les mers, provoquant une hausse locale du niveau d'eau à la surface de la Terre, approximativement dans la direction Terre-Lune, et dans la direction opposée. Cet effet différentiel est supérieur à celui dû au Soleil, même si sur Terre le champ de gravitation du Soleil est supérieur à celui de la Lune. L'onde de marée est en

retard par rapport au mouvement de la Lune du fait de la déformabilité de l'eau ; il s'ensuit un lent ralentissement du mouvement de rotation de la Terre, et un très lent éloignement de la Lune.

La période de rotation de la Lune est la même que sa période orbitale et elle présente donc toujours le même hémisphère (nommé « face visible de la Lune ») à un observateur terrestre (l'autre hémisphère est donc appelé « face cachée de la Lune »). Cette rotation synchrone résulte des frottements qu'ont entraînés les marées causées par la Terre à la Lune, et qui ont progressivement amené la Lune à ralentir sa rotation sur elle-même, jusqu'à ce que la période de ce mouvement coïncide avec celle de la révolution de la Lune autour de la Terre. Actuellement les effets de marée de la Lune sur la Terre ralentissent la rotation de cette dernière et provoquent un léger éloignement des deux astres d'environ 3,78 cm par année^{11,12}. Du fait de cet éloignement et du ralentissement qui fait que la durée du jour terrestre augmente de 15 μ s par an, la Lune à sa naissance orbitait à une distance 2 fois moindre qu'aujourd'hui et la Terre tournait alors sur elle-même en 6 heures^{13,14}.

Une collision entre la Terre en formation (proto-Terre) et un objet de la taille de Mars dénommé Théia, aurait éjecté de la matière autour de la Terre, qui aurait fini par former la Lune que nous connaissons aujourd'hui. Cet impact est estimé à 42 millions d'années après la naissance du Système solaire, soit il y a 4,526 milliards d'années, pendant la période d'intense bombardement initial ayant donné lieu à la formation des planètes telluriques. Il s'agit donc d'une sorte d'hybride entre la théorie de la fission et la théorie de l'accrétion¹⁷, l'impact ayant éjecté de la matière de la Terre, et cette matière s'étant peu à peu agrégée



pour former la Lune.

La principale raison qui pousse une majorité de scientifiques et de spécialistes à adopter cette théorie est que, comparativement aux lunes des différentes planètes du Système solaire, celle de la Terre est beaucoup plus grande que la moyenne et sa distance avec la Terre est inférieure à celle entre les autres planètes et leurs lunes. Il est donc improbable qu'il s'agisse d'un corps céleste capturé comme pour les lunes des autres planètes.

4) La planète Mars

Type : planète tellurique

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	227 936 637 km / (1,52366231 UA)
Aphélie	249 228 730 km / (1,66599116 UA)
Périhélie	206 644 545 km / (1,38133346 UA)
Période de révolution	686,9601 j / (1,8808 a)
Satellites connus	2 (Phobos et Deimos)

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	3 389,5 km / (0,532 Terre)
Masse	$641,85 \times 10^{21}$ kg / (0,107 Terre)
Masse volumique	$3\,933,5 \pm 0,4$ kg/m ³
Gravité de surface	3,711 m/s ² / (0,379 g)
Vitesse de libération	5,027 km/s
Période de rotation	1,025957 d / (24,622962 h)
Inclinaison de l'axe	25,19°
Albédo de Bond	0,25
Température de surface (max / moy / min)	270 K (-3 °C) / 210 K (-63 °C) / 140 K (-133 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Ténue (atmosphère)
Pression à la surface	636 (30 à 1 155) Pa
Composition	CO ₂ (96,0 %), Ar (1,93 %), N ₂ (1,89 %), O ₂ (0,145 %), CO (0,07 %), H ₂ O (0,03 %), NO (130 ppm), H ₂ (15 ppm), Ne (2,5 ppm), HDO (850 ppb), Kr (300 ppb), HCHO (130 ppb), Xe (80 ppb), O ₃ (30 ppb), H ₂ O ₂ (18 ppb), CH ₄ (10,5 ppb)



Mars (prononcé en français : /maʁs/) est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil et la deuxième par masse et par taille croissantes sur les huit planètes que compte le Système solaire. Son éloignement au Soleil est compris entre 1,381 et 1,666 UA (206,6 à 249,2 millions de kilomètres), avec une période orbitale de 686,71 jours terrestres.

C'est une planète tellurique, comme le sont Mercure, Vénus et la Terre, environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune. Sa topographie présente des analogies aussi bien avec la Lune, à travers ses cratères et ses bassins d'impact, qu'avec la Terre, avec des formations d'origine tectonique et climatique telles que des volcans, des rifts, des vallées, des mesas, des champs de dunes et des calottes polaires. La plus grande montagne du Système solaire, Olympus Mons (qui est aussi un volcan bouclier), et le plus grand canyon, Valles Marineris, se trouvent sur Mars.

Mars a aujourd'hui perdu la presque totalité de son activité géologique interne, et seuls des événements mineurs surviendraient encore épisodiquement à sa surface, tels que des glissements de terrain, sans doute des geysers de CO₂ dans les régions polaires, peut-être des séismes, voire de rares éruptions volcaniques sous forme de petites coulées de lave³.

La période de rotation de Mars est du même ordre que celle de la Terre et son obliquité lui confère un cycle des saisons similaire à celui que nous connaissons ; ces saisons sont toutefois marquées par une excentricité orbitale cinq fois et demie plus élevée que celle de la Terre, d'où une asymétrie saisonnière sensiblement plus prononcée entre les deux hémisphères.

Mars peut être observée à l'œil nu, avec un éclat bien plus faible que celui de Vénus mais qui peut, lors d'oppositions rapprochées, dépasser l'éclat maximum de Jupiter, atteignant une magnitude apparente de $-2,91^4$, tandis que son diamètre apparent varie de 25,1 à 3,5 secondes d'arc selon que sa distance à la Terre varie de 55,7 à 401,3 millions de kilomètres. Mars a toujours été caractérisée visuellement par sa couleur rouge, due à l'abondance de l'hématite amorphe — oxyde de fer(III) — à sa surface. C'est ce qui l'a fait associer à la guerre depuis l'Antiquité, d'où son nom en Occident d'après le dieu Mars de la guerre dans la mythologie romaine, assimilé au dieu Arès de la mythologie grecque. En français, Mars est souvent surnommée « la planète rouge » en raison de cette couleur particulière.

Avant le survol de Mars par Mariner 4 en 1965, on pensait qu'il s'y trouvait de l'eau liquide en surface et que des formes de vie similaires à celles existant sur Terre pouvaient s'y être développées, thème très fécond en science-fiction. Les variations saisonnières d'albédo à la surface de la planète étaient attribuées à de la végétation, tandis que des formations rectilignes perçues dans les lunettes astronomiques et les télescopes de l'époque étaient interprétées, notamment par l'astronome amateur américain Percival Lowell, comme des canaux d'irrigation traversant des étendues désertiques avec de l'eau issue des calottes polaires. Toutes ces spéculations ont été balayées par les sondes spatiales qui ont étudié Mars : dès 1965, Mariner 4 permit de découvrir une planète dépourvue de champ magnétique global, avec une surface cratérisée rappelant celle de la Lune, et une atmosphère ténue.

Depuis lors, Mars fait l'objet de programmes d'exploration plus ambitieux que pour aucun autre objet du Système solaire : de tous les astres que nous connaissons, c'est en effet celui qui présente l'environnement ayant le plus de similitudes avec celui de notre planète. Cette exploration intensive nous a apporté une bien meilleure compréhension de l'histoire géologique martienne, révélant notamment l'existence d'une époque reculée — le Noachien — où les conditions en surface devaient être assez similaires à celles de la Terre à la même époque, avec la présence de grandes quantités d'eau liquide ; la sonde Phoenix a ainsi découvert à l'été 2008 de la glace d'eau à une faible profondeur dans le sol de Vastitas Borealis⁵.

Mars possède deux petits satellites naturels, Phobos et Déimos.

Le 28 septembre 2015, la Nasa annonce y avoir détecté des écoulements de « saumures de différentes compositions, faites de chlorate et perchlorate de magnésium et de perchlorate de sodium, mêlés à un peu d'eau. »⁶.



5) La ceinture principale d'astéroïdes

Type : astéroïdes

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	
Aphélie	
Périhélie	
Période de révolution	
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	
Masse	
Masse volumique	
Gravité de surface	
Vitesse de libération	
Période de rotation	
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	
Température de surface (max / moy / min)	

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	
Pression	
Composition	

6) La planète naine Cérès

Type : planète naine et astéroïde

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	414 103 605,88742368584 km / (2,7681342 ua)
Aphélie	447,838 164×10 ⁶ km / (2,978 ua)
Périhélie	381,419 582×10 ⁶ km / (2,5585725 ua)
Période de révolution	1 679,819 j / (4,61 a)
Satellites connus	0

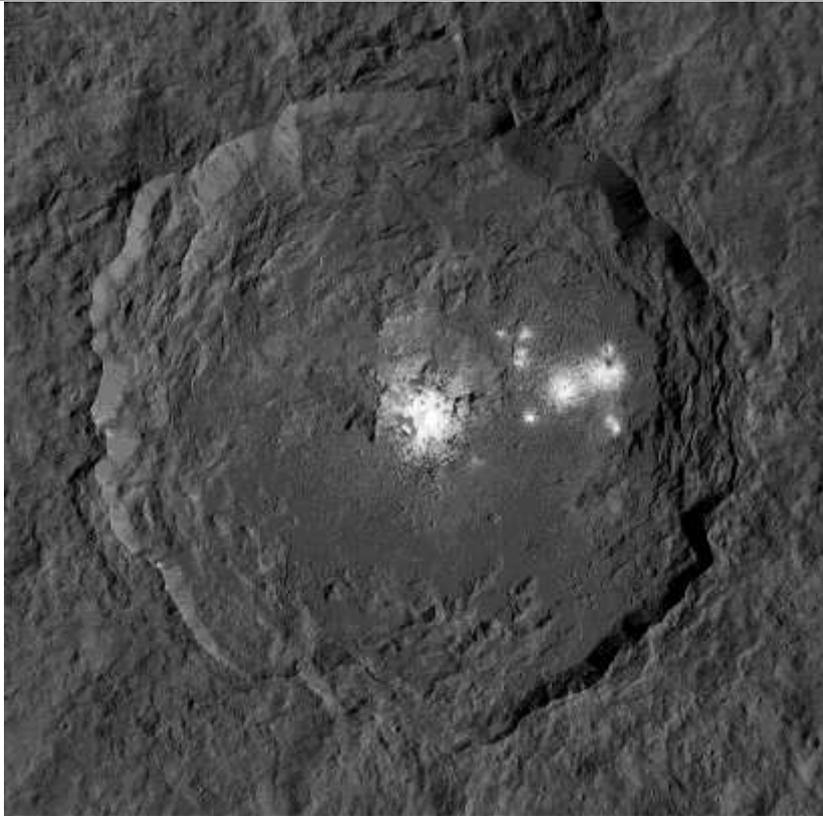
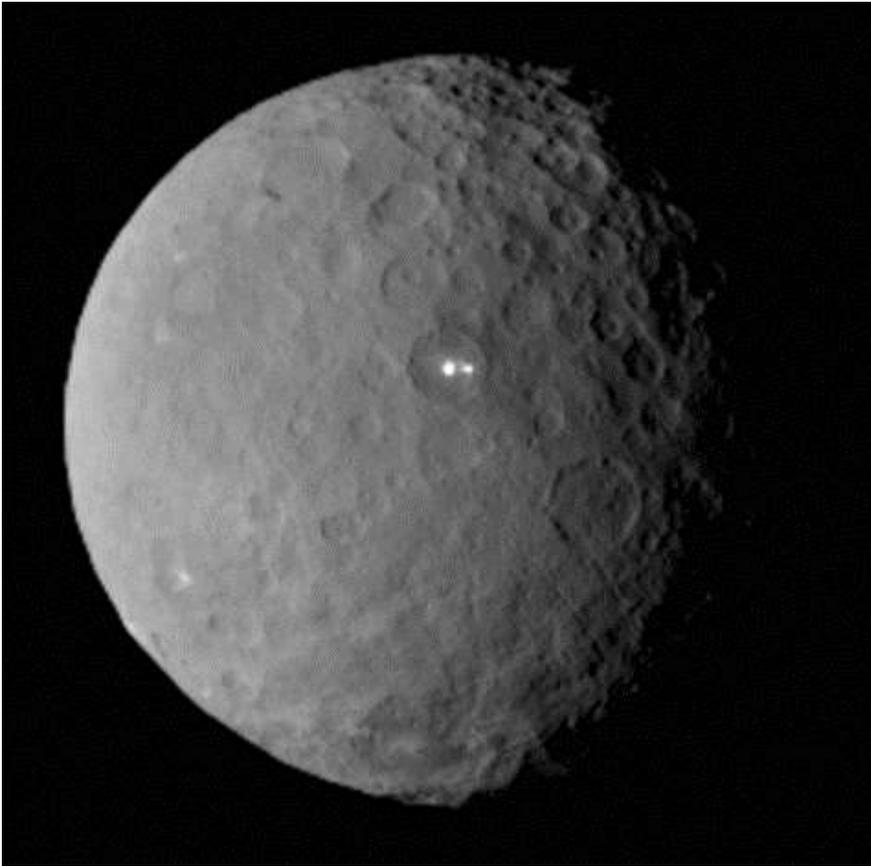
Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	(476,2 ± 1,8) km
Masse	(9,46 ± 0,04)×10 ²⁰ kg
Masse volumique	(2 077 ± 36) kg/m ³
Gravité de surface	0,27 m/s ²
Vitesse de libération	0,51 km/s
Période de rotation	0,3781 j / (9 h 4 min 27 s)
Inclinaison de l'axe	3°
Albédo de Bond	0,090 ± 0,0033
Température de surface (max / moy / min)	239 K / 167 K / ?

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Traces
Pression à la surface	
Composition	Vapeur d'eau

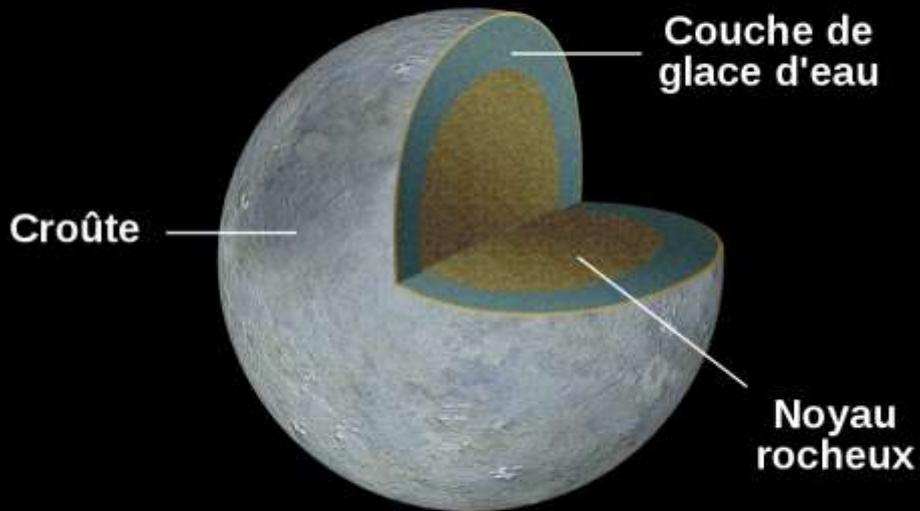
Cérès, officiellement désignée par **(1) Cérès** (désignation internationale *(1) Ceres*), est la plus petite planète naine reconnue du Système solaire ainsi que le plus gros astéroïde de la ceinture principale ; c'est d'ailleurs la seule planète naine située dans la ceinture d'astéroïdes. Elle fut découverte le 1^{er} janvier 1801 par Giuseppe Piazzi et porte le nom de la déesse romaine Cérès.

Avec un diamètre d'environ 950 kilomètres, Cérès est l'objet le plus grand et le plus massif de la ceinture d'astéroïdes situé entre les orbites des planètes Mars et Jupiter. Elle constitue le tiers de la masse totale de la ceinture. Des observations récentes ont révélé qu'elle possède une forme sphérique, à la différence des corps plus petits qui ont une forme irrégulière⁹. Sa surface est probablement composée d'un mélange de glace d'eau et de divers hydrates minéraux comme les carbonates ou l'argile⁸. Il semble que Cérès possède un noyau rocheux et un manteau de glace². Elle pourrait héberger un océan d'eau liquide, ce qui en fait une piste pour la recherche de vie extraterrestre¹¹. Cérès est entourée d'une atmosphère ténue contenant de la vapeur d'eau¹², ce qui a été confirmé le 22 janvier 2014 par l'observatoire spatial *Herschel* de l'Agence spatiale européenne¹³. Avec une magnitude apparente qui évolue entre 6,7 et 9,3 dans le spectre visible, Cérès n'est pas observable à l'œil nu¹⁴.

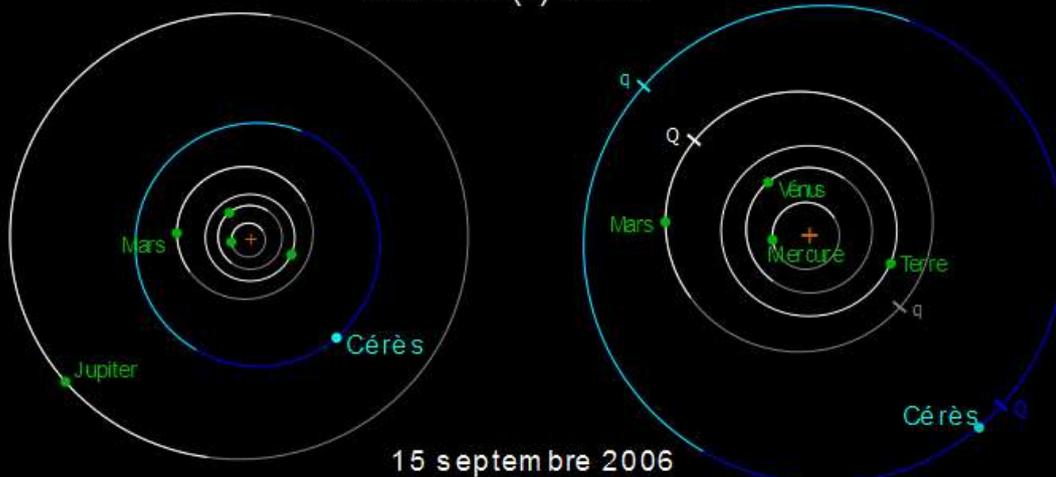
Le 27 septembre 2007, la sonde spatiale *Dawn* de la NASA a été lancée afin de l'explorer. Après avoir étudié l'astéroïde Vesta, en 2011-2012, elle a été dirigée vers Cérès, autour de laquelle elle s'est mise en orbite à 61 000 km d'altitude le 6 mars 2015¹⁵. Du 9 mai au 6 juin, son système de propulsion ionique a été rallumé pour abaisser l'orbite à 4 400 km¹⁶. Du 6 août au 15 octobre, l'orbite de *Dawn* a été une nouvelle fois abaissée à 1 450 km^{17,18}. À la fin de l'année, et pour la troisième fois, l'altitude a été fortement réduite : depuis le 8 décembre, la sonde survole Cérés à 385 km¹⁹, altitude qu'elle conservera jusqu'à l'épuisement de son carburant.



Structure géologique de Cérès

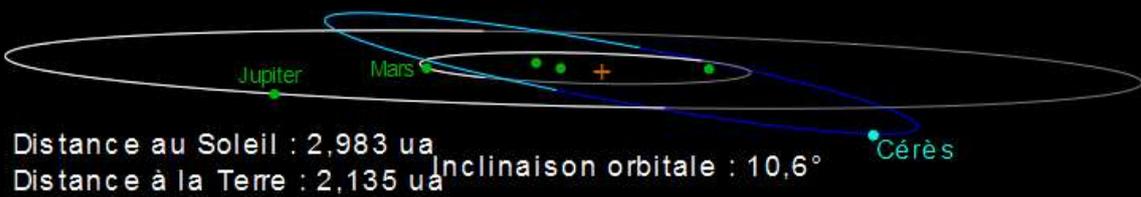


Orbite de (1) Cérès



Excentricité : 0,080
Période orbitale : 4,599 ans

Périhélie (q) : 2,544 ua
Aphélie (Q) : 2,987 ua



7) La planète Jupiter

Type : planète géante jovienne

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	778 412 027 km / (5,20336301 UA)
Aphélie	816 620 000 km / (5,46 UA)
Périhélie	740 520 000 km / (4,95 UA)
Période de révolution	4 335,3545 j / (11,862 a)
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	69 911 km / (10,973 Terres)
Masse	1,8986×10 ²⁷ kg / (317,8 Terres)
Masse volumique	1 326 kg/m³
Gravité de surface	24,7964249 m/s² / (2,358 g)
Vitesse de libération	59,5 km/s
Période de rotation	0,41351 d / (9 h 55 min 27,3 s)
Inclinaison de l'axe	3,12°
Albédo de Bond	0,343
Température de surface (à 10 kPa / à 100 kPa)	112 K (-161 °C) / 165 K (-108 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très épaisse (atmosphère)
Pression	Augmentation progressive avec la profondeur
Composition	H ₂ (86 %), He (13 %), CH ₄ (0,1 %), H ₂ O (0,1 %), NH ₃ (0,02 %), C ₂ H ₆ (0,0002 %), PH ₃ (0,0001 %), H ₂ S (< 0,0001 %)

Jupiter est une planète géante gazeuse. Il s'agit de la plus grosse planète du Système solaire, plus volumineuse et massive que toutes les autres planètes réunies, et la cinquième planète par sa distance au Soleil (après Mercure, Vénus, la Terre et Mars).

Jupiter est ainsi officiellement désignée¹, en français comme en anglais², d'après le dieu romain Jupiter³, assimilé au dieu grec Zeus.

Le symbole astronomique de la planète était « ♃ » qui serait une représentation stylisée du foudre de Jupiter ou bien serait dérivé d'un hiéroglyphe⁴ ou, comme cela ressortirait de certains *papyrus d'Oxyrhynque*⁵, de la lettre grecque zêta, initiale du grec ancien Ζεύς (*Zeús*). L'Union astronomique internationale recommande de substituer au symbole

astronomique « ♃ » l'abréviation « J », correspondant à la lettre capitale J de l'alphabet latin, initiale de l'anglais *Jupiter*⁶.

Visible à l'œil nu dans le ciel nocturne, Jupiter est habituellement le quatrième objet le plus brillant de la voûte céleste, après le Soleil, la Lune et Vénus⁷. Parfois, Mars apparaît plus lumineuse que Jupiter et de temps en temps Jupiter apparaît plus lumineuse que Vénus⁸. Jupiter était au périhélie le 17 mars 2011⁹ et sera à l'aphélie le 17 février 2017¹⁰.

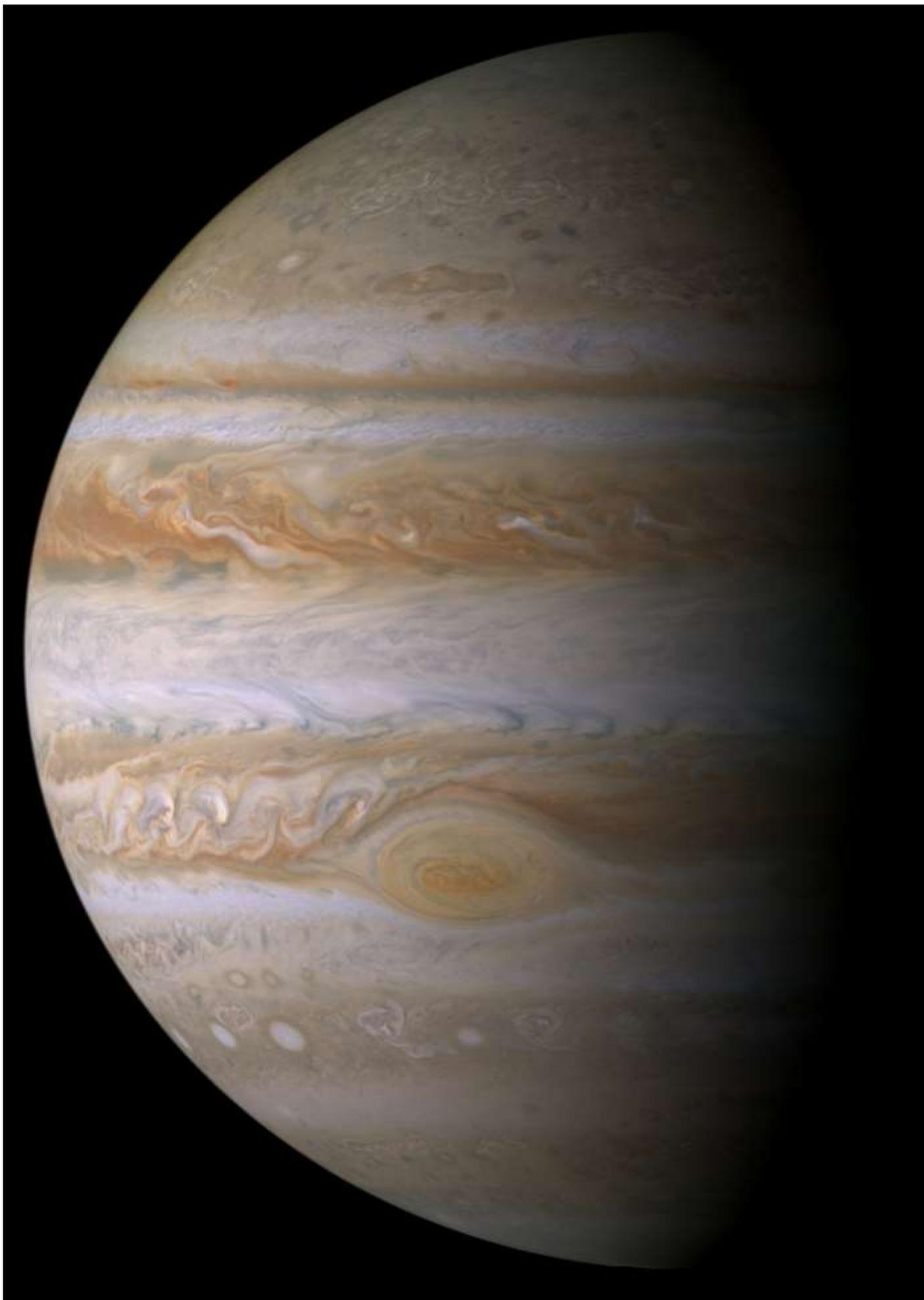
Comme sur les autres planètes gazeuses, des vents violents, de près de 600 km/h, parcourent les couches supérieures de la planète. La Grande Tache rouge, un anticyclone qui fait trois fois la taille de la Terre, est une zone de surpression qui est observée au moins depuis le XVII^e siècle.

Regroupant Jupiter et les objets se trouvant dans sa sphère d'influence, le système jovien est une composante majeure du Système solaire externe. Il comprend notamment les nombreuses lunes de Jupiter dont les quatre *lunes galiléennes* — Io, Europe, Ganymède et Callisto — qui, observés pour la première fois en 1610 par Galilée au moyen d'une lunette astronomique de son invention, sont les premiers objets découverts par l'astronomie télescopique. Il comprend aussi les anneaux de Jupiter, un système d'anneaux planétaires observés pour la première fois, en 1979, par la sonde spatiale américaine *Voyager 1*.

L'influence de Jupiter s'étend, au-delà du système jovien, à de nombreux objets dont les astéroïdes troyens de Jupiter.

La masse jovienne est une unité de masse utilisée pour exprimer la masse d'objets substellaires tels que les naines brunes.





8) La planète Saturne

Type : planète géante jovienne

Demi-grand axe	1 429 394 069 km / (9,554909 UA)
Aphélie	1 503 983 449 km / (10,05350840 UA)
Périhélie	1 349 467 375 km / (9,02063224 UA)
Période de révolution	10 757,7365 j / (29 a 165 d 11,68 h)
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	58 232 km / (9,014 Terres)
Masse	568,46×10 ²⁴ kg / (95,152 Terres)
Masse volumique	687,3 kg/m³
Gravité de surface	10,44 m/s² / (1,064 g)
Vitesse de libération	35,5 km/s
Période de rotation	0,448 d / (10 h 44 min 32 s)
Inclinaison de l'axe	26,73°
Albédo de Bond	0,342
Température de surface (à 10 kPa / à 100 kPa)	84 K (-189 °C) / 134 K (-139 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très épaisse (atmosphère)
Pression	Augmentation progressive avec la profondeur
Composition	H ₂ (> 93 %), He (> 5 %), CH ₄ (0,2 %), H ₂ O (0,1 %), NH ₃ (0,01 %), C ₂ H ₆ (0,0005 %), PH ₃ (0,0001 %)

Saturne est la sixième planète du Système solaire par ordre de distance au Soleil et la deuxième après Jupiter tant par sa taille que par sa masse^{1,2,3}.

Plus lointaine des planètes du Système solaire observables à l'œil nu dans le ciel nocturne depuis la Terre⁴, elle est connue depuis la Préhistoire⁵ et correspond au *Phaénon* (Φαίνων (*Phaínōn*)) de l'astronomie grecque, au *Zohal* (زُحَل) de l'astronomie arabe ainsi qu'au *Tǔxīng* (土星 / « étoile de la terre ») de l'astronomie chinoise.

Elle est ainsi désignée⁴, à la suite d'un usage antique^{Note 1}, d'après *Saturne*, un dieu de la mythologie romaine, assimilé au titan *Cronos* de la mythologie grecque. Son symbole « ♄ », d'origine ancienne⁶ représenterait la faucille du dieu Saturne⁷ ou serait dérivé de la lettre grecque *kappa* minuscule, initiale du grec ancien Κρόνος (*Krónos*)⁸. Néanmoins,

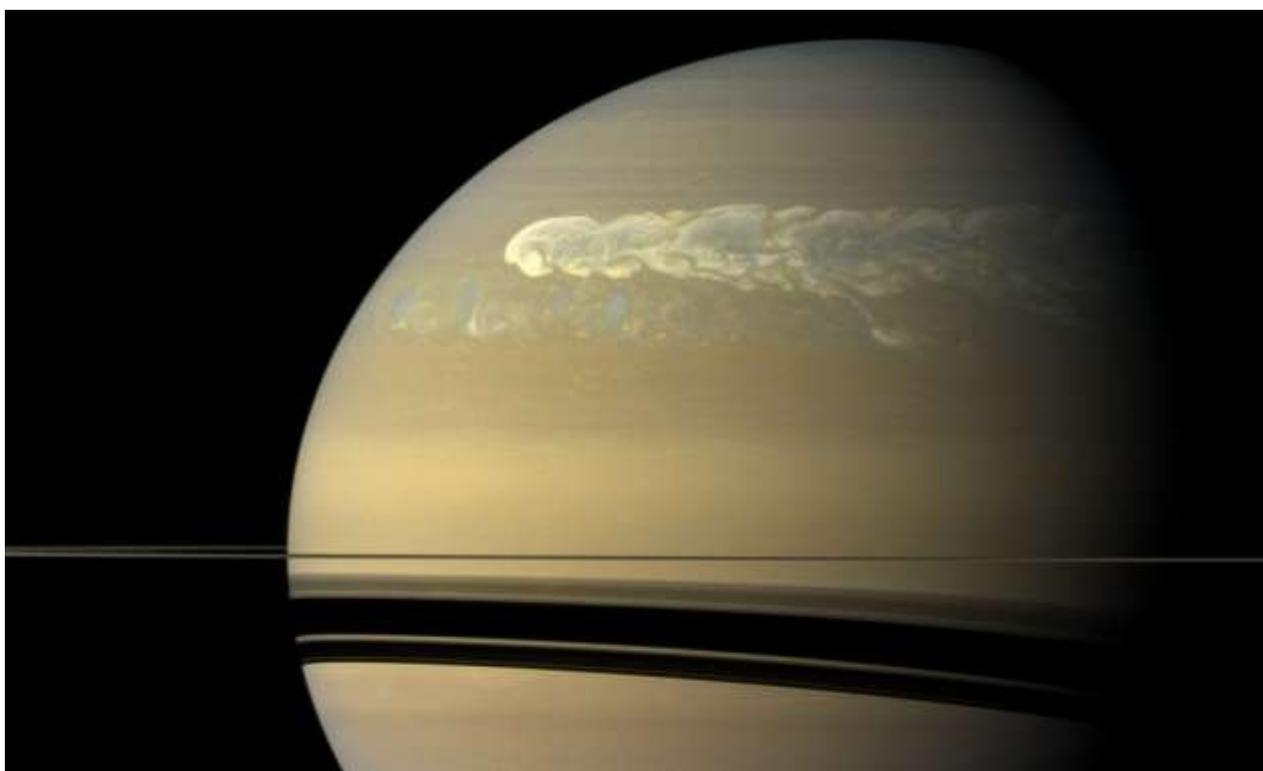
L'Union astronomique internationale recommande de substituer au symbole « ♄ » l'abréviation « S », correspondant à la lettre latine S majuscule, initiale de l'anglais *Saturn*⁹.

Saturne est une planète géante, au même titre que Jupiter, Uranus et Neptune, et plus précisément une géante gazeuse^{10,11} de type Jupiter froid comme Jupiter^{Note 2}. D'un diamètre d'environ neuf fois et demi celui de la Terre, elle est majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium. Sa masse vaut 95 fois celle de la Terre¹² et son volume 900 fois celui de notre planète¹. Sa période de révolution est d'environ 29 ans. Elle était au périhélie le 26 juillet 2003¹³. Elle sera à l'aphélie le 17 avril 2018 puis au périhélie le 27 juin 2018¹⁴.

Saturne a un éclat bien plus faible que celui des autres planètes observables à l'œil nu. Sa magnitude apparente peut atteindre lors de l'opposition un maximum de 0,43¹⁵, tandis que son diamètre apparent varie de 14,5 à 20,5 secondes d'arc tandis que sa distance à la Terre varie de 1,66 à 1,20 milliards de kilomètres¹⁵.

Saturne possède un système d'anneaux, composés principalement de particules de glace et de poussière. Saturne possède de nombreux satellites, dont cinquante-trois ont été confirmés et nommés. Titan est le plus grand satellite de Saturne et la deuxième plus grande lune du Système solaire après Ganymède autour de Jupiter. Titan est plus grand que la planète Mercure et est la seule lune du Système solaire à posséder une atmosphère significative.

La vitesse du vent sur Saturne peut atteindre 1 800 kilomètres par heure, une valeur supérieure à celles relevées sur Jupiter mais moindre que sur Neptune¹⁶.



9) La planète Uranus

Type : planète géante dite « glacée »

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	2 870 658 186 km / (19,189165 UA)
Aphélie	3 006 318 143 km / (20,096 UA)
Périhélie	2 734 998 229 km / (18,282 UA)
Période de révolution	30 687,15 j / (84,016846 ans)
Satellites connus	

Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	25 559 ± 4 km / (4,007 Terres)
Masse	8,6810×10 ²⁵ kg / (14,536 Terres)
Masse volumique	1 270 kg/m³
Gravité de surface	8,87 m/s² / (0,904 g)
Vitesse de libération	21,3 km/s
Période de rotation	-0,718 d / - (17.23992 h)
Inclinaison de l'axe	97,8°
Albédo de Bond	0,300
Température de surface (à 10 kPa / à 100 kPa)	53 K (-220 °C) / 76 K (-197 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très épaisse (atmosphère)
Pression	Augmentation progressive avec la profondeur
Composition	H ₂ (83 %), He (15 %), CH ₄ (2,3 %), NH ₃ (0,01%), C ₂ H ₆ (2,5 ppm), C ₂ H ₂ (100 ppb), CO (traces), H ₂ S (traces)

Uranus est une planète géante de glaces de type Neptune froid. Il s'agit de la 7^e planète du Système solaire par sa distance au Soleil, de la 3^e par la taille et de la 4^e par la masse. Elle doit son nom à la divinité romaine du ciel, Uranus, père de Saturne et grand-père de Jupiter. Uranus est la première planète découverte à l'époque moderne. Bien qu'elle soit visible à l'œil nu comme les cinq planètes déjà connues, son caractère planétaire ne fut pas identifié en raison de son très faible éclat (à la limite de la visibilité) et de son déplacement apparent très lent. William Herschel annonce sa découverte le 26 avril 1781, élargissant les frontières connues du Système solaire pour la première fois à l'époque moderne. Uranus est la première planète découverte à l'aide d'un télescope.

Uranus et Neptune ont des compositions internes et atmosphériques différentes de celles des deux plus grandes géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Les astronomes les placent donc de nos jours généralement dans une catégorie différente, celle des géantes glacées ou des sous-géantes. L'atmosphère d'Uranus, bien que composée principalement d'hydrogène et d'hélium, contient une proportion plus importante de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane, ainsi que les traces habituelles d'hydrocarbures. Uranus est la planète du Système solaire dont l'atmosphère est la plus froide, sa température minimale étant de 49 K (-224 °C), à la tropopause (vers 56 km d'altitude et 0,1 bar, le niveau zéro étant défini à une pression d'un bar).

À l'instar des autres géantes gazeuses, Uranus a un système d'anneaux, une magnétosphère et de nombreux satellites naturels. Le système uranien est unique dans le Système solaire car son axe de rotation est pratiquement dans son plan de révolution autour du Soleil ; les pôles nord et sud sont situés où les autres planètes ont leur équateur. En 1986, les images de Voyager 2 ont montré Uranus comme une planète sans caractéristique particulière en lumière visible. De même, les bandes nuageuses ou tempêtes observées sur les autres planètes gazeuses ne semblent pas présentes ici. Cette visite de la sonde se produit près du solstice, l'hémisphère éclairé était alors principalement son hémisphère austral.

Cependant, les observateurs terrestres ainsi que le télescope spatial *Hubble* ont depuis constaté des signes de changements saisonniers et une augmentation de l'activité météorologique ces dernières années, Uranus approchant alors de son équinoxe, qu'il a atteint le 8 décembre 2007.

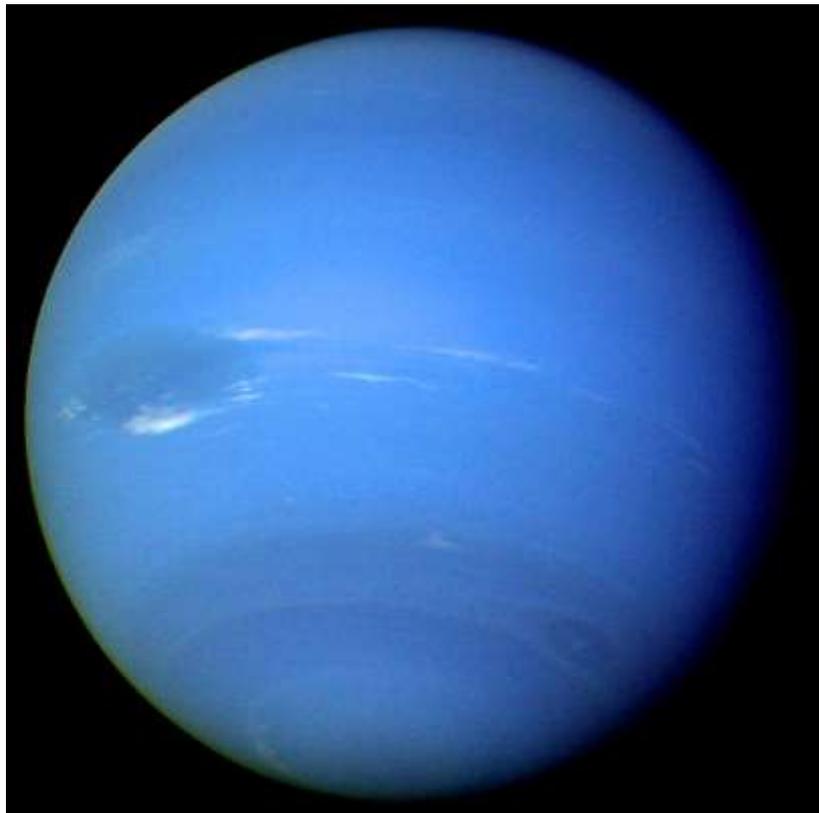
10) La planète Neptune

Type : planète géante dite « glacée »

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	4 503 443 661 km / (30,10366151 UA)
Aphélie	4 553 946 490 km / (30,44125206 UA)
Périhélie	4 452 940 833 km / (29,76607095 UA)
Période de révolution	60 224,9036 j / (164 a 323 j 21,7 h)
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	24 622 km / (3,865 Terres)
Masse	102,43×10 ²⁴ kg / (17,147 Terres)
Masse volumique	1 638 kg/m³
Gravité de surface	11,15 m/s² / (1,14 g)
Vitesse de libération	23,5 km/s
Période de rotation	0,67125 d / (16 h 6,6 min)
Inclinaison de l'axe	29,58°
Albédo de Bond	0,29
Température de surface (à 10 kPa / à 100 kPa)	55 K (-218 °C) / 72 K (-201 °C)

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Très épaisse (atmosphère)
Pression	Augmentation progressive avec la profondeur
Composition	H ₂ (80 ± 3,2 %), He (19 ± 3,2 %), CH ₄ (1,5 ± 0,5 %), HD (190 ppm), NH ₃ (100 ppm), C ₂ H ₆ (2,5 ppm), C ₂ H ₂ (100 ppb)



11) La ceinture de Kuiper

Type : objets trans-neptuniens, comètes et planètes naines

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	
Aphélie	
Périhélie	
Période de révolution	
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	
Masse	
Masse volumique	
Gravité de surface	
Vitesse de libération	
Période de rotation	
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	
Température de surface (max / moy / min)	

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	
Pression	
Composition	

12) La planète Naine Pluton

Type : planète naine et objet trans-neptunien

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	5 900 898 440,58310867 km / (39,4450697 ua)
Aphélie	7 375 927 931 km / (49,3161476 ua)
Périhélie	4 436 824 613 km / (29,5733917 ua)
Période de révolution	90 487,2769 j / (247.74 a)
Satellites connus	5

Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	1 185 ± 10 km
Masse	(1,314 ± 0,018)×10 ²² kg
Masse volumique	(1 885 ± 60) kg/m³
Gravité de surface	0,625 m/s²
Vitesse de libération	1,22 km/s
Période de rotation	- 6,387 j
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	0,60
Température de surface (moy)	48 K

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	Ténue (atmosphère)
Pression	0,15 Pa
Composition	N ₂ (90 %), CO (10 %), CH ₄ (traces)

Pluton, officiellement désignée par **(134340) Pluton** (désignation internationale (134340) *Pluto*)^{note 1}, est la planète naine la plus volumineuse (2 372 km de diamètre, contre 2 326 km pour Éris) connue du Système solaire et la deuxième au niveau de la masse (après Éris). À ce titre, Pluton est donc le neuvième plus gros objet orbitant autour du Soleil (exception faite des lunes des géantes gazeuses) et le dixième au niveau de la masse. Premier objet transneptunien identifié, Pluton orbite autour du Soleil à une distance variant entre 30 et 49 unités astronomiques et appartient à la ceinture de Kuiper, ceinture dont il est (tant par la taille que par la masse) le plus grand membre connu.

Après sa découverte par l'astronome américain Clyde Tombaugh en 1930, Pluton était considérée comme la neuvième planète du Système solaire. À la fin du XX^e siècle et au début du XXI^e siècle, de plus en plus d'objets similaires furent découverts dans le Système solaire externe, en particulier Éris, alors estimé légèrement plus grand et plus massif que

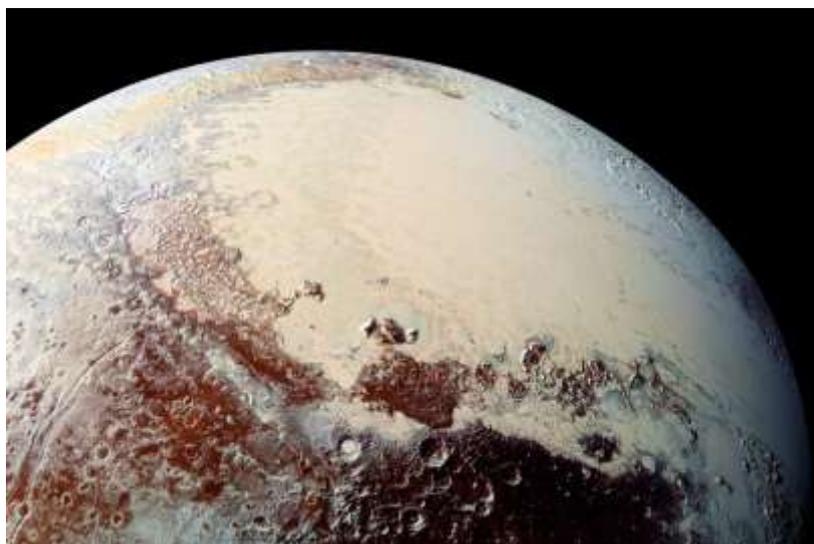
Pluton. Cette évolution amena l'Union astronomique internationale (UAI) à redéfinir la notion de planète ; Cérès, Pluton et Éris étant depuis le 24 août 2006 classées comme des planètes naines⁶. L'UAI a également décidé de faire de Pluton le prototype d'une nouvelle catégorie d'objet transneptunien. À la suite de cette modification de la nomenclature, Pluton a été ajoutée à la liste des objets mineurs du Système solaire et s'est vu attribuer le numéro 134340 dans le catalogue des objets mineurs⁷.

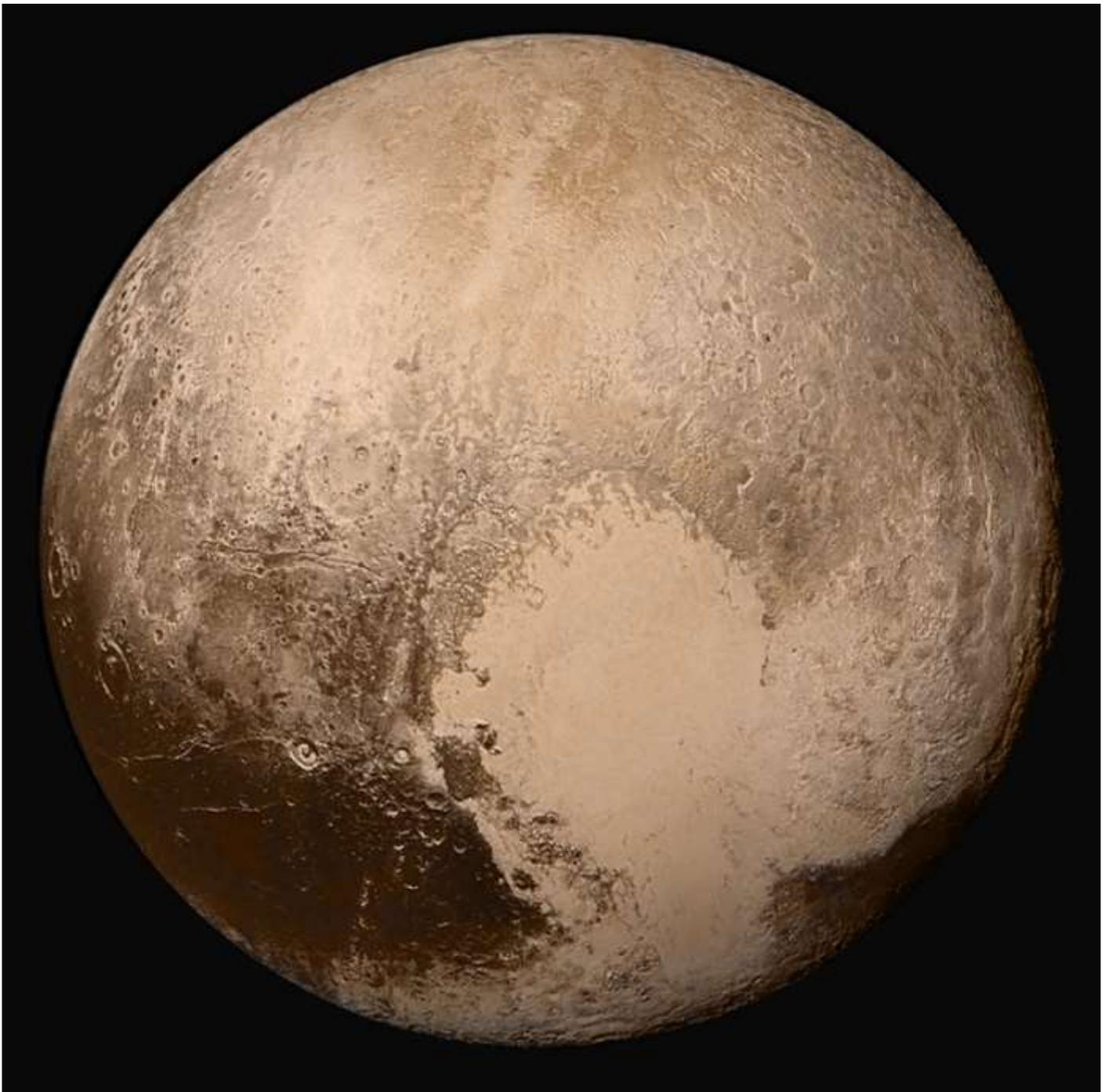
Pluton est principalement composée de roche et de glace de méthane, mais aussi de glace d'eau et d'azote gelé. Son diamètre est d'environ les deux tiers de celui de la Lune.

Pluton est le corps principal du système plutonien. Le couple que forme Pluton avec son grand satellite, Charon (diamètre 1 207 km), est souvent considéré comme un système double, car la différence de masse entre les deux objets est l'une des plus faibles de tous les couples corps primaire/satellite du système solaire (rapport 8 pour 1) et le barycentre de leurs orbites ne se situe pas à l'intérieur d'un des deux corps (il est légèrement à l'extérieur de Pluton).

Quatre autres satellites naturels, nettement plus petits et tous en orbite à peu près circulaires (excentricité < 0,006) à l'extérieur de l'orbite de Charon, complètent le système tel qu'actuellement connu (dans l'ordre en s'éloignant) : Styx, Nix, Kerbéros et Hydre. Tous quatre furent découverts avec l'aide du télescope spatial *Hubble* : les deux plus importants, Nix et Hydre (respectivement 54×41×36 km et 43×33 km), en 2005, Kerbéros (environ 12×4 km) en 2011^{8,9} et Styx (environ 7×5 km) en 2012. Ces deux derniers ont reçu leur nom officiel en juillet 2013. Les dimensions mentionnées correspondent à des mesures effectuées ultérieurement à leur découverte, et non aux premières estimations qui purent être faites.

La sonde spatiale *New Horizons*, lancée en janvier 2006 par la NASA, est la première sonde à explorer le système plutonien ; elle le traverse le 14 juillet 2015 à une distance minimale de 11 095 km de Pluton, après un voyage de 6,4 milliards de kilomètres.





12) La lune Charon

Type : satellite naturel de Pluton et objet trans-neptunien

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe (autour du barycentre)	17536±4 km
Demi-grand axe (autour de Pluton)	19571±4 km
Période de révolution autour de Pluton	6,387 230 4 ± 0,000 001 1 j / (6 d 9 h 17 m (36.7 ± 0.1) s)
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	606±3 km / (0.095 Earths, 0.51 Plutos)
Masse	(1.586±0.015)×10 ²¹ kg / (2.66×10 ⁻⁴ Earths) / (12.2% of Pluto)
Masse volumique	1.707±0.013 g/cm ³
Gravité de surface	0.288 <u>m/s²</u>
Vitesse de libération	0.59 km/s
Période de rotation	6,387 230 4 ± 0,000 001 1 j / (6 d 9 h 17 m (36.7 ± 0.1) s)
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	0,36 à 0,39
Température de surface (moy)	40 <u>K</u>

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	
Pression	> 30 μPa (10 ⁻⁹ bar)
Composition	

Charon, officiellement **(134340) Pluton I Charon** (désignation internationale *(134340) Pluto I Charon*), est le plus grand satellite naturel de Pluton et un objet massif de la ceinture de Kuiper. Le satellite porte le nom d'un personnage de la mythologie grecque, Charon, le « passeur des Enfers », et à ce titre se prononce [kæʁɔ̃]. Charon se tient aux portes du royaume d'Hadès, dieu grec des Enfers qui fut identifié dans la mythologie romaine à Pluton.

Lors de sa découverte par James W. Christy de l'Observatoire naval des États-Unis le 22 juin 1978 en examinant des images fortement agrandies de Pluton sur des plaques

photographiques prises deux ou trois mois auparavant, Charon fut temporairement désigné **S/1978 P 1**, selon la convention de nommage qui venait récemment d'être instituée. James Christy choisit immédiatement le nom « Charon » (qui apparaît dès mars 1978 dans une publication d'Ernst Öpik³), mais son adoption officielle par l'Union astronomique internationale ne fut annoncée que le 3 janvier 1986⁴. « Charon » fait aussi référence au prénom de l'épouse de Christy, Charlene⁵.

Charon est également dénommé suivant la désignation systématique **Pluton I**. Son nom complet officiel est donc **(134340) Pluton I Charon**^{note 2}.

Des observations d'occultations du couple Pluton–Charon ont permis, en 2005, d'estimer le diamètre de Charon à $(1\,207,2 \pm 2,8)$ kilomètres ; cette valeur a été confirmée avec les mesures réalisées par l'instrument LORRI de la sonde *New Horizons* lors de son passage dans le système plutonien en juillet 2015⁸. Charon est donc d'une taille comparable à certains satellites des géantes gazeuses, comme Téthys (satellite de Saturne) ou Umbriel (satellite d'Uranus). Le diamètre de Charon est environ le tiers de celui de la Lune et fait un peu plus de la moitié de celui de Pluton lui-même. En 2007, il s'agissait également de l'un des plus gros objets transneptuniens connus, après Éris, Pluton, Orcus, Quaoar et probablement Sedna.

La découverte de Charon a permis de calculer la masse du système plutonien et les occultations mutuelles des deux corps ont révélé leur taille. La découverte des lunes extérieures de Pluton en 2005 a permis de déterminer les masses respectives de Pluton et Charon : la masse de Charon vaut approximativement 11,65 % de celle de Pluton. En conséquence, la masse de Charon atteint $1,52 \pm 0,06 \times 10^{21}$ kilogrammes¹, soit un quatre-millième de celle de la Terre. Sa masse volumique est de $1,65 \pm 0,06$ gramme par centimètre cube¹.

Charon ne possède aucune atmosphère détectable⁹. Dans un article publié en août 2016, Alan Stern et ses collaborateurs montrent que la pression partielle de 14 espèces chimiques atomiques ou moléculaires est, pour chacune d'elles, inférieure à 0,3 nanobars (c'est-à-dire 30 micropascals).

À la différence de Pluton, qui est recouvert de glaces de méthane et d'azote, la surface de Charon semble être principalement constituée de glace d'eau moins volatile. En 2007, des observations de l'observatoire Gemini semblent avoir mis en évidence des zones d'hydrates d'ammoniac et de cristaux d'eau à la surface de Charon, suggérant des geysers froids¹⁰.

Les observations faites par la sonde *New Horizons* en juillet 2015 ont permis de découvrir une zone sombre au nord de ce satellite dénommée provisoirement Mordor par l'équipe de la NASA¹².

13) La planète Naine Eris

Type : planète naine et objet trans-neptunien

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	
Aphélie	
Périhélie	
Période de révolution	
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	
Masse	
Masse volumique	
Gravité de surface	
Vitesse de libération	
Période de rotation	
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	
Température de surface (max / moy / min)	

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	
Pression	
Composition	

13) Le nuage d'Oort

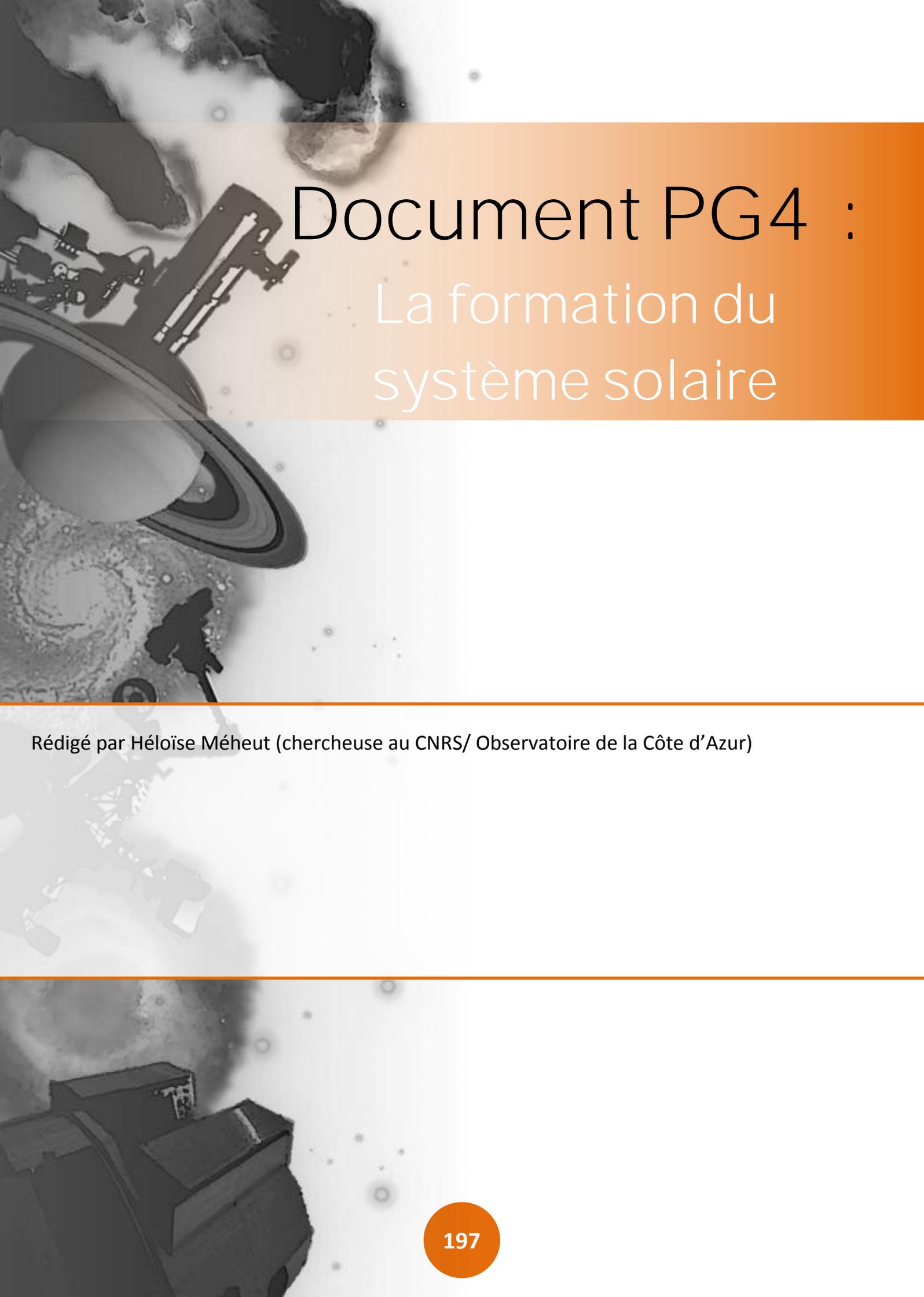
Type : comètes (hypothétique)

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	
Aphélie	
Périhélie	
Période de révolution	
Satellites connus	0

Caractéristiques physiques	
Rayon moyen	
Masse	
Masse volumique	
Gravité de surface	
Vitesse de libération	
Période de rotation	
Inclinaison de l'axe	
Albédo de Bond	
Température de surface (max / moy /min)	

Caractéristiques de l'atmosphère	
Type	
Pression	
Composition	





Document PG4 :

La formation du système solaire

Rédigé par Héloïse Méheut (chercheuse au CNRS/ Observatoire de la Côte d'Azur)

Document PG4

La formation du système solaire

I. La nébuleuse pré-stellaire et le disque protoplanétaire

I.1. La formation des étoiles

Les étoiles naissent de l'effondrement de nuages de gaz et de poussière : les nébuleuses. Quand les nébuleuses sont comprimées, par des mouvements dans la galaxie (la voie lactée) ou par l'explosion d'une étoile à proximité, 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 la pression (celle qui permet de garder un ballon gonflé) ou le champ magnétique produit par les ions présents dans ces grumeaux qui cherche à repousser la matière. Lorsque la gravité gagne, 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.



Zoom sur la nébuleuse d'Orion jusqu'à un disque protoplanétaire
(Credit Bill Dickinson & Hubble, NASA)

Souvent, le gaz et la poussière dans les grumeaux initiaux ont des mouvements un peu aléatoires, une partie de cette matière va être empêché de s'effondrer (par gravité) sur l'étoile en cours de formation, du fait de la force centrifuge. La force centrifuge est celle que l'on ressent dans les virages en voiture et qui nous pousse vers l'extérieur. La matière dont le mouvement correspond à un virage autour de l'étoile va aussi être repoussée vers l'extérieur ce qui l'empêche de tomber sur l'étoile. C'est pourquoi, de nombreuses étoiles se forment entourée d'un disque protoplanétaire, c'est à dire de gaz et de poussière qui n'ont pas pu tomber sur l'étoile et qui continuent de tourner autour. C'est dans ce disque protoplanétaire que les planètes vont pouvoir se former. C'est la raison pour laquelle les planètes sont en rotation autour des étoiles.

I.2. Le disque protoplanétaire

Puisqu'il s'agit du lieu de formation des planètes, arrêtons-nous quelques instants sur ce que sont ces disques protoplanétaires, parfois appelés pouponnières de planètes.

Un disque protoplanétaire est composé de gaz (~90%) et un peu de poussière (~10%), qui tournent autour d'une étoile, et forment une structure assez fine, d'où le nom de disque. Pour comprendre cette forme de disque, on utilise souvent la métaphore de la pâte à pizza qui prend aussi une forme de disque lorsqu'on la fait tourner suffisamment vite.



Vision d'artiste des disques protoplanétaires (Crédit R. Hurt (NASA/JPL-Caltech/IPAC))



Pizzaiolo faisant tourner une pâte à pizza (Credit : Valle Valerio)

La matière est en équilibre entre la force de gravité de la jeune étoile qui l'attire vers le centre, et la force centrifuge, due à sa rotation, qui la pousse vers l'extérieur. Comme on sait que la force de gravitation est plus forte lorsque l'on est plus près de l'étoile (**voir l'équation de la force de gravitation**), cet équilibre correspond à du gaz qui tourne plus rapidement au centre qu'à l'extérieur. C'est exactement le même raisonnement qui permet d'expliquer pourquoi la vitesse de rotation de Mercure autour du Soleil est plus élevée que celle de Jupiter située plus loin. Ainsi la vitesse et le temps de rotation de la matière situé exactement à la même distance du Soleil que la Terre actuellement (1 unité astronomique), sont les même que pour la Terre. Le gaz et la poussière situés à 1AU du soleil tournaient en 1 an autour du Soleil.

I.3. L'évolution du disque

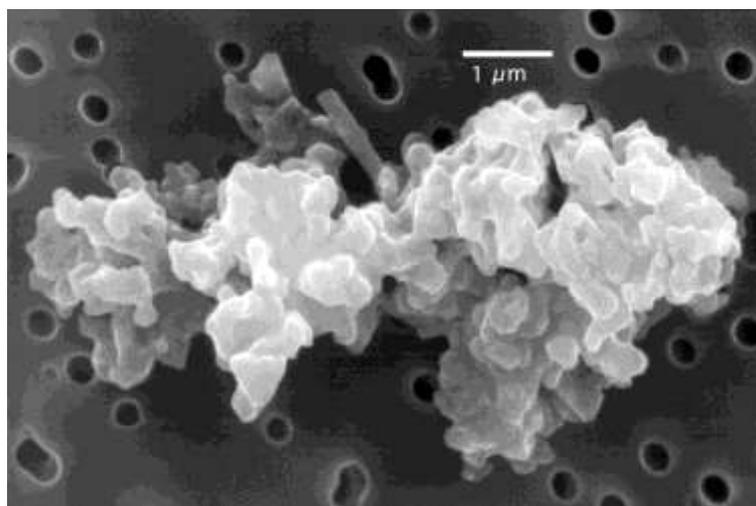
Heureusement, cet équilibre présenté dans le paragraphe précédent, n'est pas exactement parfait. Cela permet au disque protoplanétaire d'évoluer au cours du temps mais sur des échelles de temps beaucoup plus longues que celle de la rotation autour du Soleil. On a vu que la matière situé à 1AU du soleil fait une révolution en 1 an ; le disque, lui, évolue sur des échelles de temps de l'ordre du million d'années. Après quelques millions d'années, le disque protoplanétaire a disparu et a laissé place à un cortège de planètes qui se sont formées au cours de l'évolution du disque.

II. La formation des planètes

Le sujet de la formation des planètes, est un domaine de recherche très vivant actuellement car de nombreuses questions restent mal comprises. Plusieurs modèles sont proposés pour expliquer comment se sont formées les planètes à partir du gaz et des poussières initiaux. Nous avons choisi de présenter ici le modèle le plus communément admis pour la formation du système solaire. Dans ce modèle, les planètes se forment par étapes, par croissance des solides depuis les poussières, puis les cailloux, les planétésimaux (les briques des planètes), les cœurs planétaires et finalement l'enveloppe de gaz.

II.1. Formation des cailloux

Tout le monde sait ce qui se passe lorsque l'on laisse la poussière évoluer sans la retirer : elle s'accumule, et forme éventuellement des grumeaux (des moutons). En effet les particules de poussières ont tendances à se coller les unes aux autres (du fait des forces électrostatiques) ; c'est la première étape de la formation planétaire. Ces grumeaux peuvent entrer en collision ce qui va les condenser, et/ou leur permettre de grossir. Ce sont donc des interactions proches entre les grains solides qui permettent initialement leur croissance. C'est ainsi que des solides jusqu'à la taille de cailloux peuvent se former.



Grain de poussière interplanétaire (Crédit : Donald E. Brownlee)

II.2. Formation des planétésimaux

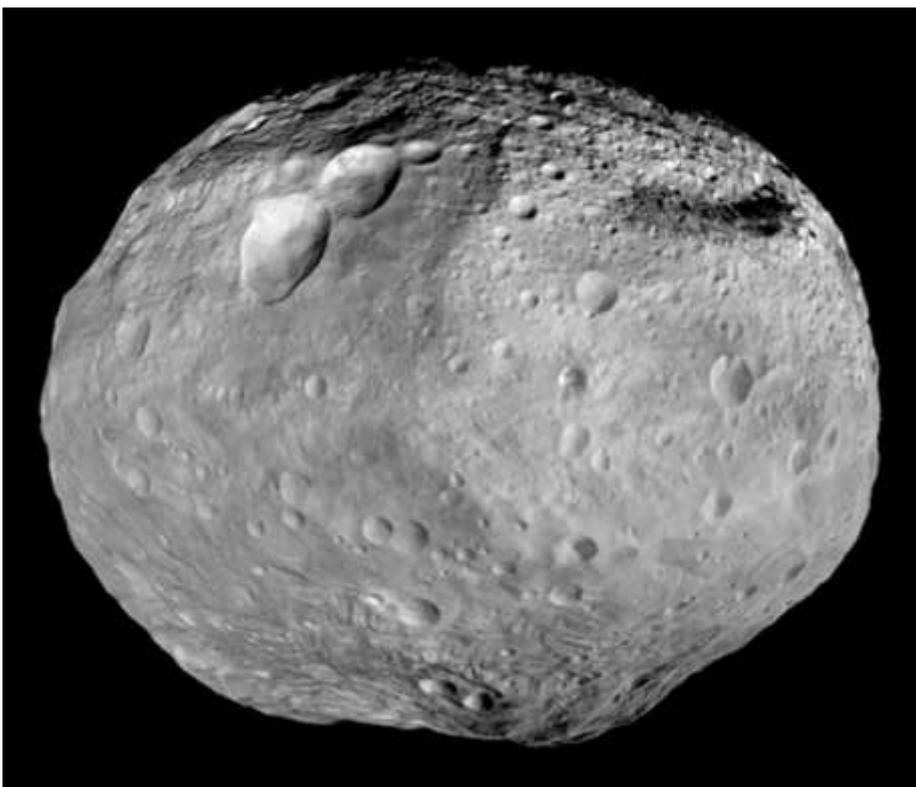
La croissance des solides au-delà de la taille de cailloux, n'est actuellement pas comprise. En effet, lors des collisions, les cailloux ont davantage tendance à être détruit qu'à croître. De plus, du fait de l'entraînement des cailloux par le gaz qui les entoure (un

peu comme une rivière qui déplacerait les cailloux vers les berges), les cailloux tombent sur l'étoile au centre.

Les principales idées proposées pour résoudre ce mystère de la formation des planétésimaux, s'appuient sur des effets collectifs, où ce sont les mouvements d'ensemble du gaz et des solides qui permettent la concentration des solides. Un exemple, assez visuel, de ce type de mouvement d'ensemble, est celui des vortex qui se formeraient dans le disque protoplanétaire, et qui concentreraient les solides dans l'oeil du cyclone. Une fois concentré, les solides pourraient plus facilement croître par collision, voire s'effondrer sous leur propre poids (de manière similaire à la formation des étoiles) pour former une structure de la taille du kilomètre : des planétésimaux.

II.3. Formation des proto-planètes et des enveloppes

Lorsque des planétésimaux sont formés, c'est ensuite la force de gravité de ces objets qui prends le relai pour poursuivre leur croissance. L'attraction gravitationnelle est à l'origine des collisions entre planétésimaux, ainsi qu'à l'attraction de cailloux et de gaz autour des premières proto-planètes ; permettant ainsi leur croissance. Si la protoplanète s'est formée avant que le disque de gaz ne disparaisse (quelques millions d'années), celle-ci va pouvoir attirer une grande quantité de gaz, et formera une planète gazeuse. La composition de la planète ainsi formée dépend donc de la composition des solides et du gaz qu'elle a rencontré pendant cette phase d'accumulation ; sa masse dépendra de la quantité de matière qu'elle aura pu faire tomber à sa surface.



Vesta peut être vue comme une protoplanète qui a survécu sous cette forme (credit NASA/JPL-Caltech/UCAL/MPS/DLR/IDA).

III. L'évolution des planètes

Avant même d'avoir atteint leur masse et composition finale, les planètes commencent à évoluer.

1.1 Position

La distance d'une planète au Soleil n'est pas fixe, elle a pu beaucoup changer dans les premiers temps. En présence du disque protoplanétaire, les planètes interagissent avec le gaz qui les entoure, du fait de leur propre gravité. Cela forme des vagues dans le disque qui prennent une forme spirale comme les spirales des galaxies.



Exemple de spirale formée par une planète dans un disque protoplanétaire (Crédit : F. Masset)

En réaction à ces vagues, la planète peut se déplacer dans le disque : se rapprocher ou s'éloigner significativement de l'étoile. On pense par exemple que la planète Jupiter a pu se rapprocher du Soleil jusqu'à dépasser l'orbite actuelle de Mars, avant de prendre sa place actuelle à une distance bien plus grande du Soleil.

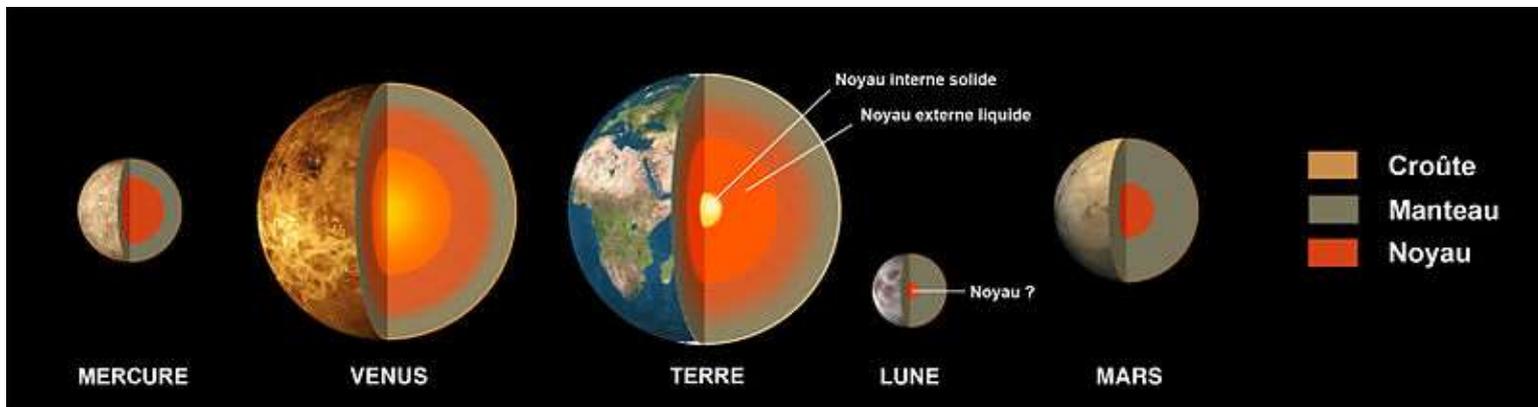
Après la disparition du disque de gaz, la position des planètes continue d'évoluer du fait des interactions mutuelles entre planètes. Avec autant de planètes et autres objets en rotation autour du Soleil, le système solaire n'a pas toujours été aussi stable qu'aujourd'hui ; il a certainement vécu des épisodes d'instabilité avec de nombreux mouvements de planètes ou d'objets plus petits comme les astéroïdes. Par exemple, une partie des nombreux cratères de la Lune traduisent un bombardement de la Lune, pendant une courte durée, par de nombreux objets du système solaire.



Image de cratères de la Lune
(Credit : NASA)

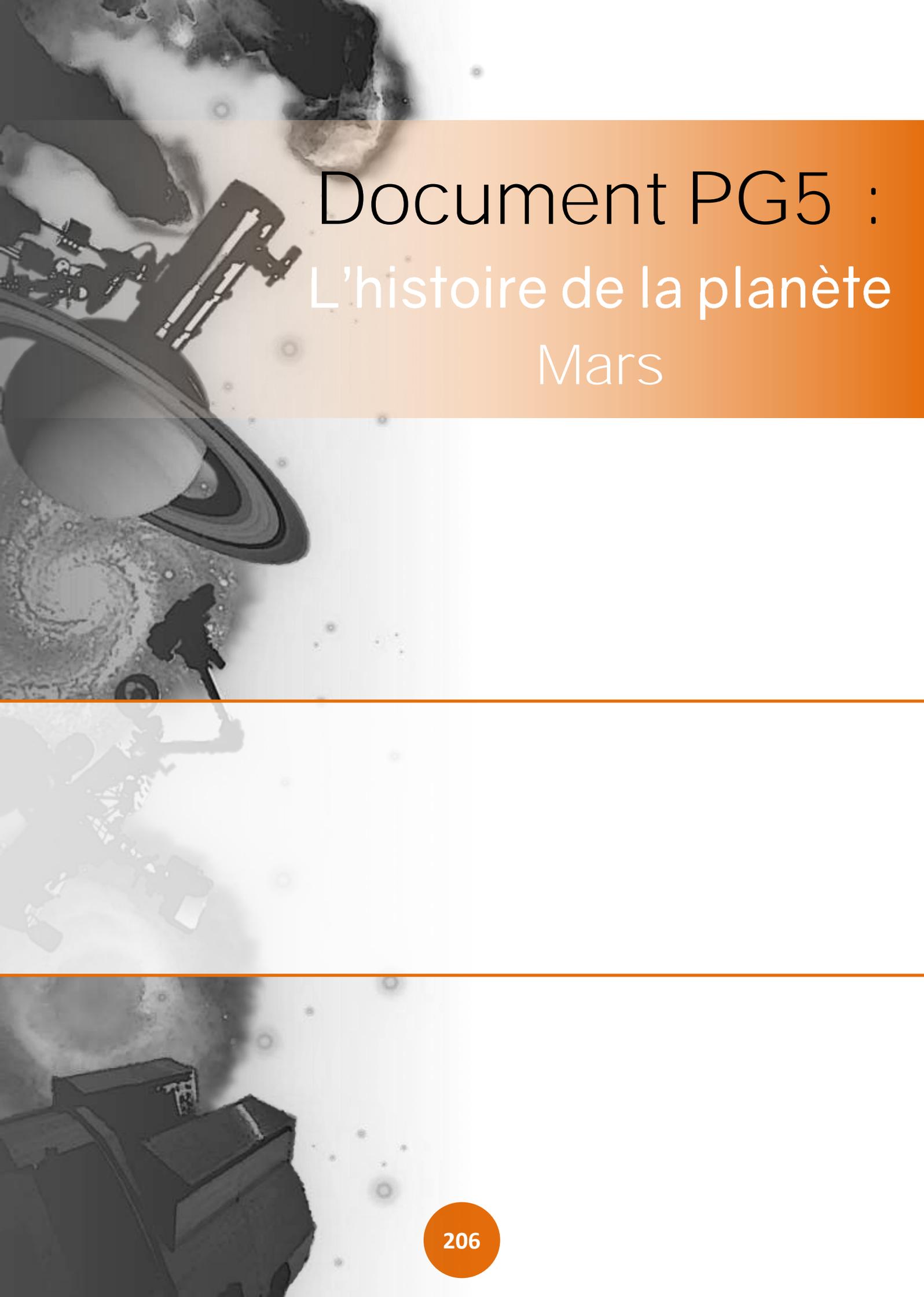
1.2 Structure interne

Dès la formation de la protoplanète, la gravité peut commencer à modifier sa structure interne, en faisant tomber les éléments les plus lourds (ceux composé de fer par exemple) au centre de la planète tandis que les plus légers peuvent remonter vers la surface. C'est ainsi que vont se former les noyaux des planètes, tandis que les gaz les plus légers forment l'atmosphère de la planète.



Structure interne des planètes tellurique (Crédit : NASA)



The background of the page is a composite of space-related images. On the left, there is a large, detailed image of Saturn with its rings. Below it, a Mars rover is shown on the surface of the planet. The right side of the page is dominated by a large, semi-transparent orange banner that contains the title text. The overall theme is space exploration and planetary science.

Document PG5 : L'histoire de la planète Mars

Document PG5

L'histoire de la planète Mars



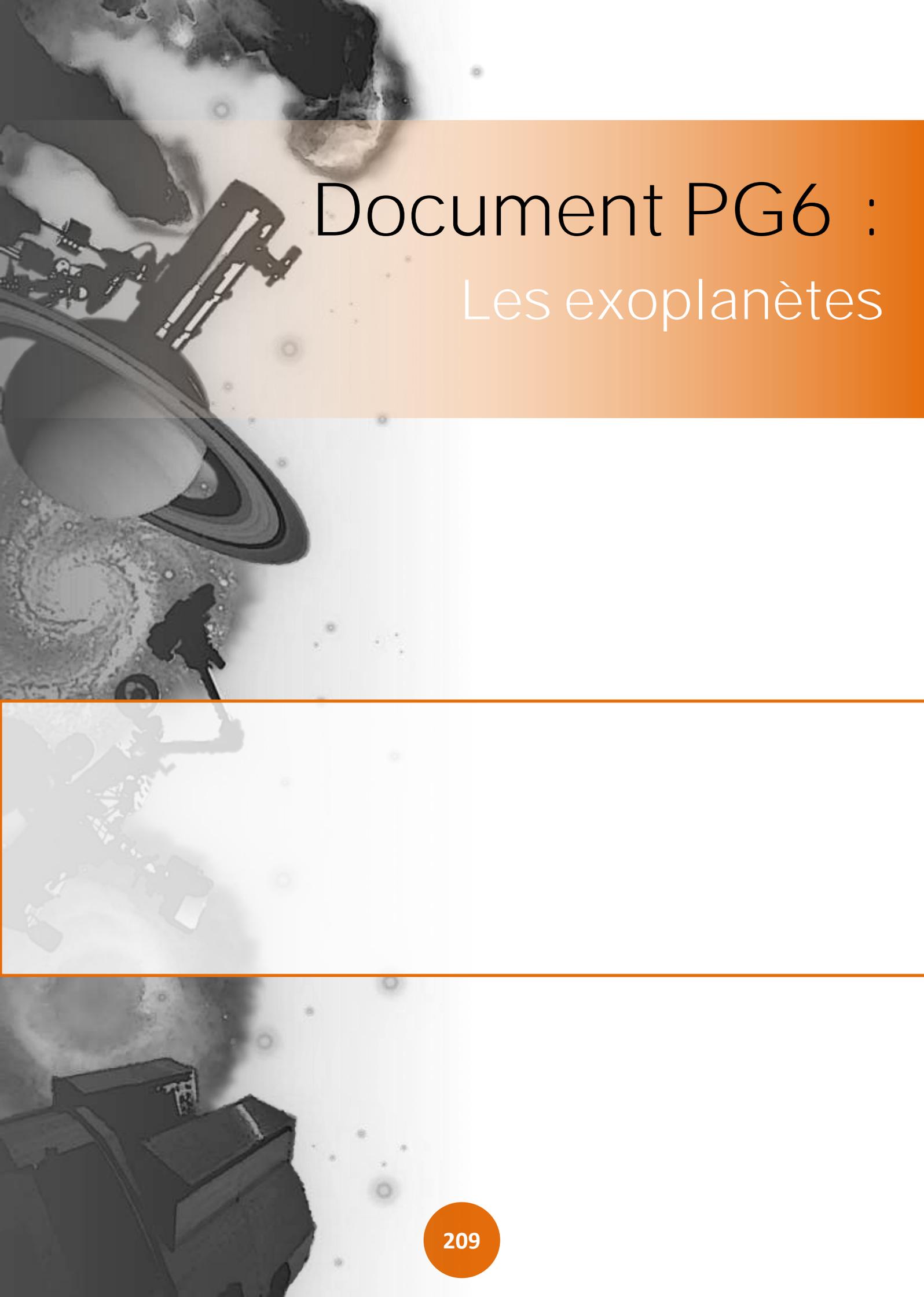
I. Qu

En

1) La

Une



The background of the page is a grayscale illustration of space. In the upper left, Saturn is shown with its rings. Below it, the surface of Mars is visible with craters and a small rover. In the lower left, a portion of a space station or satellite is depicted. The background is filled with numerous small, distant stars.

Document PG6 :

Les exoplanètes

Document PG6

Les exoplanètes



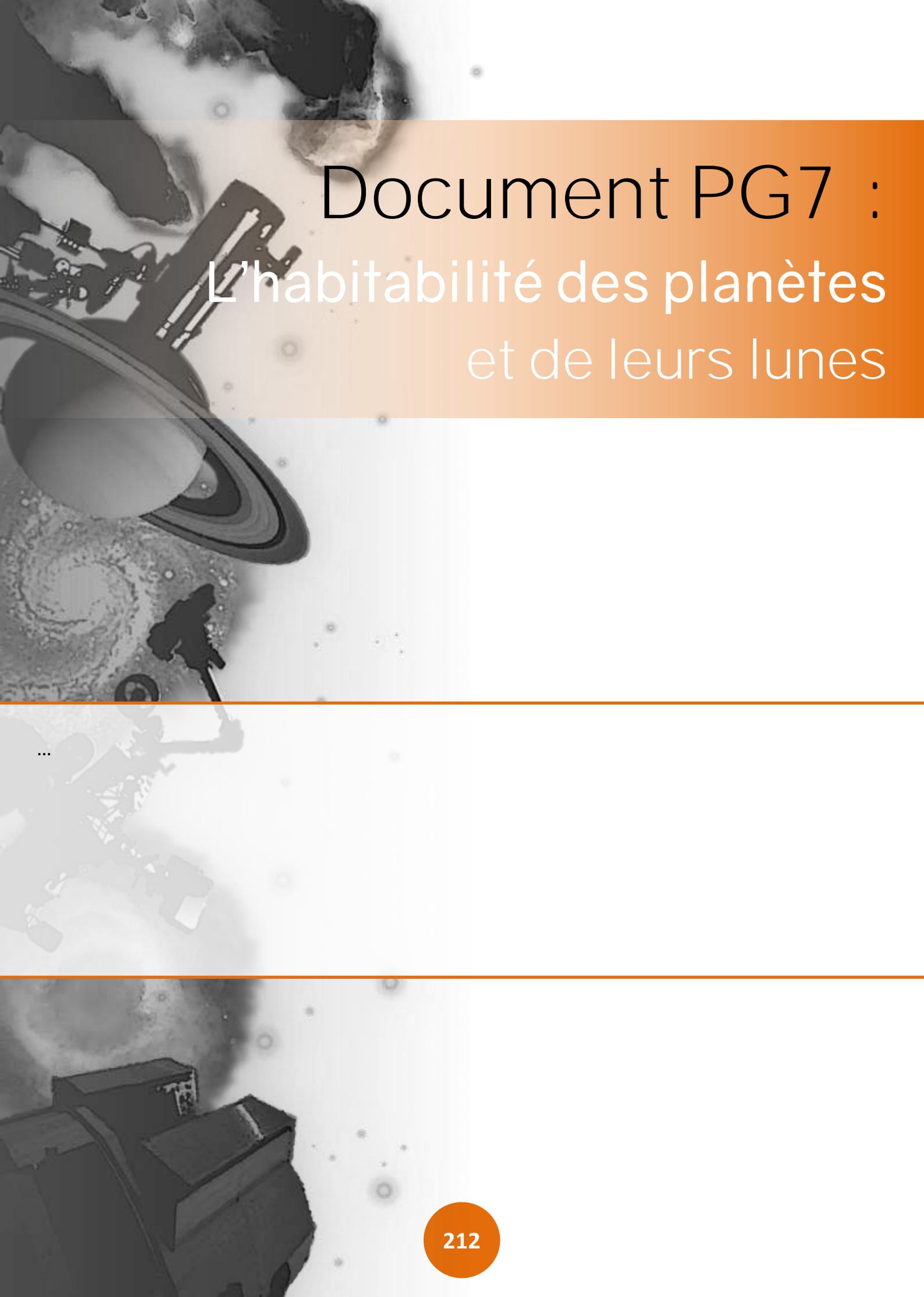
II. Qu'est

Le

2) La

Une



The background of the page is a grayscale collage of space-related images. In the upper left, there's a close-up of Saturn's rings. Below it, a rover is shown on the surface of Mars. In the lower left, another rover is visible. The right side of the page is dominated by a large, semi-transparent orange rectangle containing the title text. The overall aesthetic is scientific and exploratory.

Document PG7 : L'habitabilité des planètes et de leurs lunes

Document PG7

L'habitabilité des planètes et de leurs lunes



I. Des

Une.

1) Comment

Une.



The background of the page is a composite image. On the left side, there is a vertical strip showing a grayscale image of Saturn with its rings, a space probe with various instruments, and a planet with a cratered surface. The rest of the page has a light beige background with a subtle pattern of small, faint celestial bodies.

Document PG8 :

Les voyages interplanétaires

Document PG8

Les voyages interplanétaires



I. Introduction

Le



The background of the page is a space-themed illustration. On the left side, there is a large, detailed depiction of Saturn with its rings. Above it, a telescope is shown pointing towards the right. The background is a light beige color with scattered small brown spots representing stars or dust. The top right corner has a solid orange gradient background where the title is located.

Partie 5

Données

Cette partie 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	$(560 \times 544 \times$	$2,7 \times 10^{20}$		2,36

		454) ± 24		
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
Rhée	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±0.75)×10 ¹⁹	129 390
Ariel	578.9±0.6	(1.353±0.120)×10 ²¹	191 020
Umbriel	584.7±2.8	(1.172±0.135)×10 ²¹	266 000
Titania	788.4±0.6	(3.527±0.09)×10 ²¹	435 910
Obéron	761.4±2.6	(3.014±0.075)×10 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	3,1×10 ¹⁹	5 513 787

Pluton (5)

Corps	Rayon ou dimensions (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)
Charon	606±3	(1.586±0.015)×10 ²¹	19 571±4
Styx	3.5 × 2.5		42 656±78
Nix	54 × 41 × 36	(4.5±4.0)×10 ¹⁶	48 694±3
Kerberos	6 × 2		57 783±19
Hydra	43 × 33	(4.8±4.2)×10 ¹⁶	64 738±3

I. Paramètres du Soleil

Paramètre	Notation	Valeur
Rayon	R _☉	6.955×10 ⁵ km
Masse	M _☉	(1.98855±0.00025)×10 ³⁰ kg
Luminosité bolométrique	L _{bol☉}	3.846×10 ²⁶ W
Magnitude absolue bolométrique	M _{bol☉}	4.74
Magnitude absolue en bande visible	M _{V☉}	4,83
Magnitude apparente en bande visible	m _{V☉}	-26,74
Métallicité	Z _☉	0.0122
Température	T _☉	5750

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		

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		

3) Les naines orange : entre 0.45 et $0.8 M_{\odot}$, classe spectrale K

Températures	3900 à 5200 K	Luminosités	0.1 à $0.4 L_{\odot}$
Couleur	Orange à jaune	Rayons	0.6 à $0.85 R_{\odot}$
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 $1.10 M_{\odot}$, classe spectrale G

Températures	5200 à 5900 K	Luminosités	0.7 à $1.26 L_{\odot}$
Couleur	Jaune à blanc	Rayons	0.93 à $1.05 R_{\odot}$
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_{\odot} , classes spectrale F

Températures	6000 à 7200 K	Luminosités	1.3 à 6 L_{\odot}
Couleur	Blanc	Rayons	1.1 à 1.3. R_{\odot}
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		

II. 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
Altair	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 Géminorum	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	33.7 ± 0.09	2.04±0.3	8.8±0.1	43	4 666±95	724
Procyon	Petit Chien	Alpha Canis Minoris	11.4 ± 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	25.0 ± 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
Altair	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 Ursae 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	Multiplie ? (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	
Mérok	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	Cassiopée	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.

