

# Le Système solaire

## Le système solaire

(Naissance, vie et mort des étoiles, Soleil, planètes, astéroïdes, planètes naines, ceinture de Kuiper, comètes, nuage d'Oort)

## Au delà du système solaire

(Voie Lactée, exoplanètes, galaxies, groupes de galaxies, trous noirs, Big Bang, Univers)



# Le Système solaire, la Galaxie, l'Univers

## I Introduction

**AVERTISSEMENT AUX LECTEURS :** Ce document étudie tous les aspects du système solaire et, bien au-delà, replace cet ensemble dans notre Galaxie, celle-ci dans les groupes de galaxies, puis le tout dans l'univers. Nous évoquerons aussi quelques notions sur les trous noirs et le « **Big Bang** ». Par contre les informations concernant les planètes seront évoquées assez sommairement dans la mesure où sont déjà rédigés des textes spécifiques sur chacune des planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, les planètes naines, ainsi que les Instruments de l'Astronomie et la Conquête spatiale.

### A) Naissance d'une étoile – Présence d'une nébuleuse

La **naissance des étoiles** ou **formation stellaire**, voire stellogénèse ou stellogonie, est un domaine de recherche en astrophysique qui consiste en l'étude des modes de formation des étoiles et des systèmes planétaires. Les étoiles en formation sont fréquemment appelées "**étoiles jeunes**". En cosmologie, la formation des étoiles n'a lieu que durant la période de l'univers nommée « ère stellifère ». Selon le scénario actuellement admis, confirmé par l'observation, les étoiles se forment en groupe à partir de la contraction gravitationnelle d'une nébuleuse, un nuage de gaz et de poussière, qui se fragmente en plusieurs cœurs protostellaires. Ceux-ci se contractent en leur centre en formant une étoile, tandis que la matière en périphérie se retrouve sous forme d'une enveloppe et d'un disque d'accrétion. Ce dernier disparaît généralement avec le temps mais peuvent s'y former entre-temps des planètes. La formation stellaire est un domaine qui suscite l'intérêt, non seulement en raison des phénomènes complexes et mystérieux qui s'y déroulent comme l'accrétion et l'éjection de matière ou l'émission de rayons X, mais aussi parce qu'elle est liée à la « question des origines » : la compréhension de la genèse des étoiles et de leurs systèmes planétaires nous renseignent sur l'histoire du système solaire, et sur la chimie primitive qui eut lieu lors de la formation de la Terre et de l'apparition de la vie.

Deux méthodes d'étude sont utilisées pour comprendre la formation du système solaire :

- La première consiste à « remonter le temps » en utilisant des modèles d'évolution physico-chimique pour en déduire, à partir de ce que nous observons aujourd'hui dans le système solaire, les conditions de sa formation. Ce fut longtemps la seule disponible avant que les régions de formation stellaire ne fussent identifiées après la Seconde Guerre mondiale;
- La seconde consiste à observer des systèmes stellaires et planétaires à différents stades de leur évolution afin de déduire quels types de systèmes en formation aboutissent à des systèmes planétaires comparables au nôtre.

Malgré le nombre important d'étoiles jeunes observables aujourd'hui et les progrès en simulation numérique, les étoiles jeunes recèlent encore de nombreux secrets :

- la formation de planètes est-elle systématique, fréquente ou accidentelle ?
- quelle quantité de matière était présente dans le disque d'accrétion au moment de leur formation ?

Les processus en jeu sont nombreux et complexes, et certains phénomènes clefs ne sont pas encore maîtrisés par les physiciens :

- la viscosité turbulente;
- la magnétohydrodynamique.

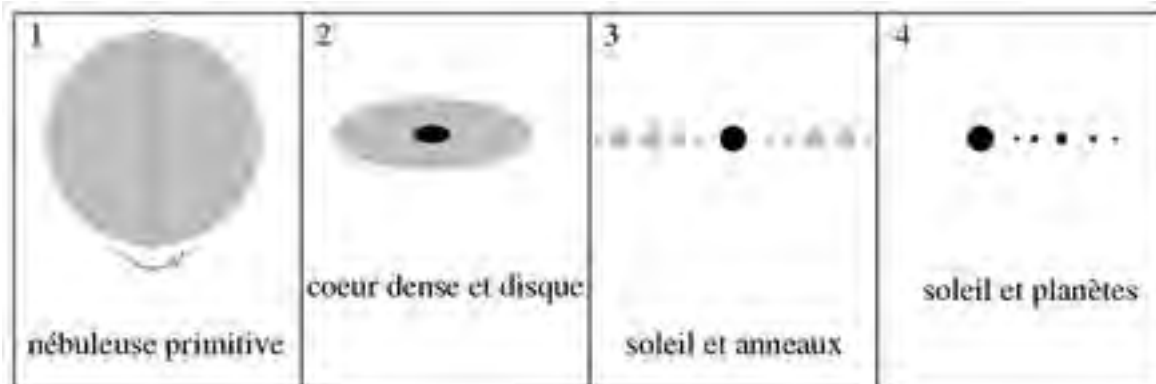
D'autres processus, bien que mieux compris, ne sont pas encore accessibles dans toute leur complexité aux ordinateurs actuels comme le transfert de rayonnement, qui est nécessaire pour déduire la structure des astres étudiés à partir des propriétés de la lumière observée. Enfin, les régions stellaires de formation les plus proches se situent à une distance typique de environ 100 pc (~326 a.l.), ce qui rend extrêmement difficile l'observation directe des étoiles jeunes et de leur environnement proche : au vu de leur éloignement, la distance Terre-Soleil, l'unité astronomique, n'est pas résolue, même par les meilleurs télescopes actuels — elle représente une séparation angulaire de 10 millisecondes d'arc (mas) contre un pouvoir de résolution typique de 100 mas en visible et infrarouge proche.

### Histoire

L'étude de la formation stellaire, sous sa forme moderne, est récente mais les idées principales remontent à la remise en cause de la vision aristotélicienne du monde durant la Renaissance. Parmi d'autres, Tycho Brahe contribua à changer l'idée de l'immuabilité de la voûte céleste par sa démonstration du caractère translunaire de la supernova de 1572 et d'une comète apparue en 1577, en notant qu'un objet proche devrait changer de position par rapport au fond du ciel selon l'endroit d'où il est observé (phénomène de parallaxe) :

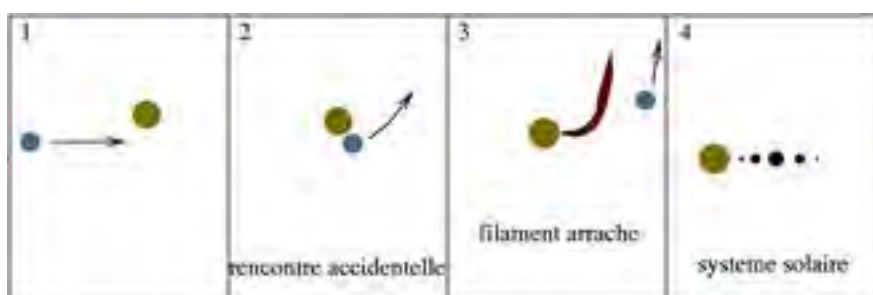
« Il est maintenant clair pour moi qu'il n'existe pas de sphères célestes dans les cieux. Ces dernières ont été construites par des auteurs pour sauver les apparences, n'existant que dans leur imagination, dans le but de permettre à l'esprit de concevoir le mouvement fait par les corps célestes. » (Tycho Brahe, *De mundi aetheri recentioribus phaenomenis*).

Mais la grande avancée est avant tout la remise en cause du géocentrisme avec Copernic, Galilée et Kepler sur la base, notamment, des observations de Tycho Brahe : la description du mouvement des planètes se simplifie avec une vision héliocentrique, d'une part, et, d'autre part, Galilée observe des satellites de Jupiter. Dès lors, la formation du système solaire devint un objet d'étude non plus théologique mais scientifique. Descartes, dans le *Traité du monde et de la lumière* (écrit au début des années 1630, publié à titre posthume en 1664), repris par Kant en 1755 dans son *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, conjecturait que Soleil et planètes ont même origine et se sont formés à partir d'une nébuleuse unique qui se serait contractée. En son sein se serait condensé le Soleil au centre et les planètes dans un disque nébulaire l'environnant. Laplace reprit et améliora le scénario en 1796 : la nébuleuse solaire primitive voit sa rotation accélérer à mesure qu'elle se contracte, ce qui produit un disque tournant autour d'un cœur dense en son centre. Ce disque, en se refroidissant, est le siège d'instabilités et se divise en anneaux qui forment par la suite les planètes; le cœur devient le Soleil. Cette théorie se heurte toutefois à un problème de taille, à savoir que la conservation du moment angulaire prédit un Soleil tournant beaucoup trop rapidement.



Formation du système solaire : scénario de la nébuleuse primitive de Laplace

L'hypothèse concurrente du scénario catastrophique, suggérée par Buffon dans son *Histoire naturelle* (XVIII<sup>e</sup> siècle), acquiert une certaine popularité vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle; elle postule que le passage d'une étoile au voisinage du Soleil en aurait arraché un filament de matière générant les planètes<sup>7</sup>. Elle est reprise et formalisée par Jeffreys en 1918. Cette hypothèse s'avéra par la suite douteuse. Russell montra en 1935 qu'une collision avec les vitesses stellaires observées, de l'ordre de quelques dizaines de km/s (typiquement cent mille kilomètres par heure), ne peut permettre d'arracher au Soleil de la matière possédant suffisamment de moment cinétique et Spitzer (1939) que le filament de matière supposément obtenu est instable. Ces études sonnèrent le glas du scénario catastrophique et annoncèrent un retour vers la théorie nébulaire.



Formation du système solaire : scénario catastrophique de Buffon

Le milieu du XX<sup>e</sup> siècle marqua le début d'une vision moderne de la genèse du système solaire, en particulier, et de la formation stellaire en général, avec la confirmation de la théorie nébulaire. Dans les années quarante, Joy découvrit des étoiles possédant un comportement « déviant » dans le nuage sombre du Taureau et du Cocher : d'un type spectral caractéristique d'étoiles froides et de très faible masse, elles présentent des raies en émission, de fortes variations de luminosité et une connexion manifeste avec des nébuleuses en absorption ou en émission. Bien que leur nature ne fût pas comprise d'emblée, la découverte allait enfin apporter du grain à moudre, des éléments observationnels, pour la compréhension de la formation stellaire. Leur extrême jeunesse fut rapidement suggérée par Ambartsumian dans la fin des années 1940, mais cela prit un certain temps pour qu'elle fût confirmée et acceptée, dans les années 1960. Un nouveau bond en avant fut permis par le progrès des détecteurs infrarouges dans les années soixante : Mendoza (1966) découvrit chez ces étoiles un excès infrarouge important difficile à expliquer du seul fait de l'extinction (absorption du rayonnement par de la matière en avant-plan, ce qui se manifeste par un rougissement de la lumière); cet excès fut interprété comme la présence d'un Disque protoplanétaire accrétant sur l'étoile.

Cette hypothèse fut confirmée dans les années 1990 avec l'obtention d'images de ces disques grâce au télescope spatial Hubble (télescope optique situé en orbite), au VLT en optique adaptative (télescope en lumière visible et infrarouge sis au Chili) et à l'interféromètre millimétrique du Plateau de Bure (radiotélescope situé en France). L'interférométrie optique a permis depuis 1998 de confirmer ces résultats autour d'autres étoiles jeunes et de mesurer le diamètre apparent de dizaines de disques protoplanétaires. D'autres structures associées aux étoiles jeunes comme les jets ont été imagées.



*Nébuleuse du cône, zone de formation stellaire*

*Images mise à disposition par la NASA  
et le Space Telescope Institute*



*Observation de disques en absorption autour d'étoiles jeunes dans la nébuleuse d'Orion. La matière circumstellaire, sous forme d'un disque d'accrétion opaque, se traduit par une tache sombre sur le fond brillant*

## Scénario de formation stellaire

### Des nébuleuses aux systèmes planétaires

Le scénario actuel de formation des étoiles de faible masse et de masse intermédiaire — jusqu'à quelques masses solaires, soit la grande majorité des étoiles implique la contraction gravitationnelle d'une nébuleuse ainsi que sa fragmentation, qui crée des « cœurs protostellaires ». Au centre de ceux-ci se forme une étoile qui grossit par accrétion de la matière environnante; un disque d'accrétion et une enveloppe circumstellaire accompagnent cette étoile. L'accrétion est accompagnée d'éjection d'une partie significative de la matière chutant sur l'étoile sous la forme de jets d'éjection polaires. Dans le disque d'accrétion se forment des corps par agrégation de poussière appelés planétésimaux. Une fois atteinte une masse critique, ces planétésimaux se mettent à leur tour à accréter la matière environnante pour former des planètes. L'accrétion sur l'étoile et les planètes ainsi que l'éjection finissent par épuiser la matière présente autour de l'étoile : celle-ci est alors « nue » et entourée d'un système planétaire.

### Les modes de formation stellaire

La formation des étoiles est généralement schématisée par trois modes principaux :

1. une formation sporadique en systèmes de petite taille, de une à quelques étoiles;
2. une formation en groupes d'étoiles d'une dizaine à une centaine de membres, comme dans la région du Taureau et du Cocher;
3. une formation en amas, dans des nuages moléculaires géants, où un grand nombre d'étoiles naissent dans un système dense et gravitationnellement lié, comme dans Orion B.

La différence entre les deux premiers modes et le troisième tient à la densité d'étoiles qui est susceptible d'influer sur le processus de formation stellaire et des premières phases de leur évolution : dans un amas dense, la probabilité est élevée de former des étoiles massives, qui influencent leur environnement par un champ ultraviolet intense et par l'onde de choc au stade de supernova, qui peut survenir avant même que les étoiles de faible masse du même amas aient fini leur formation. De plus, les interactions dynamiques menant à la destruction des disques protoplanétaires, la création et la destruction de systèmes multiples ou la diffusion des planètes sur des orbites excentriques sont beaucoup plus importantes lors de la formation en amas. La séparation entre ces trois modes est arbitraire et la réalité offre plutôt un continuum allant de la formation de systèmes de quelques étoiles à la formation de centaines de milliers d'étoiles dans les amas globulaires.

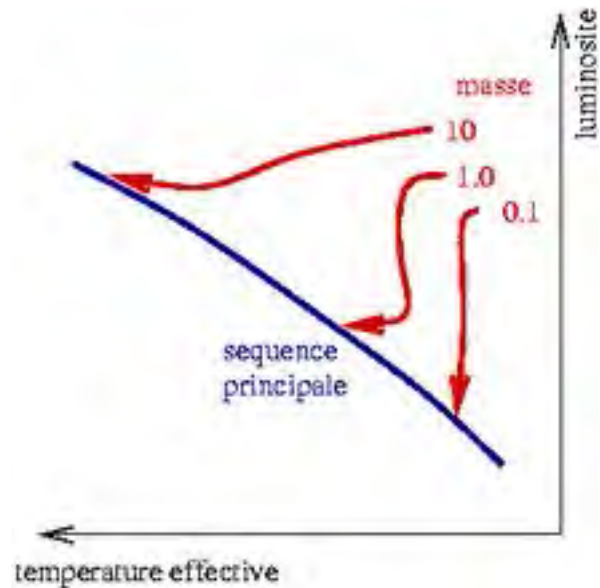
### Évolution dans le diagramme de Hertzsprung-Russell

Les étoiles jeunes occupent dans le diagramme de Hertzsprung-Russell une zone au-dessus de la séquence principale. Les étoiles de faible masse — typiquement moins de 0,5 masse solaire — finissent ainsi leur formation de manière isotherme tandis que les étoiles de forte masse le font à luminosité constante. Les étoiles de type solaire connaissent, elles, deux phases :

- une phase de contraction isotherme;
- une phase de contraction à luminosité constante.

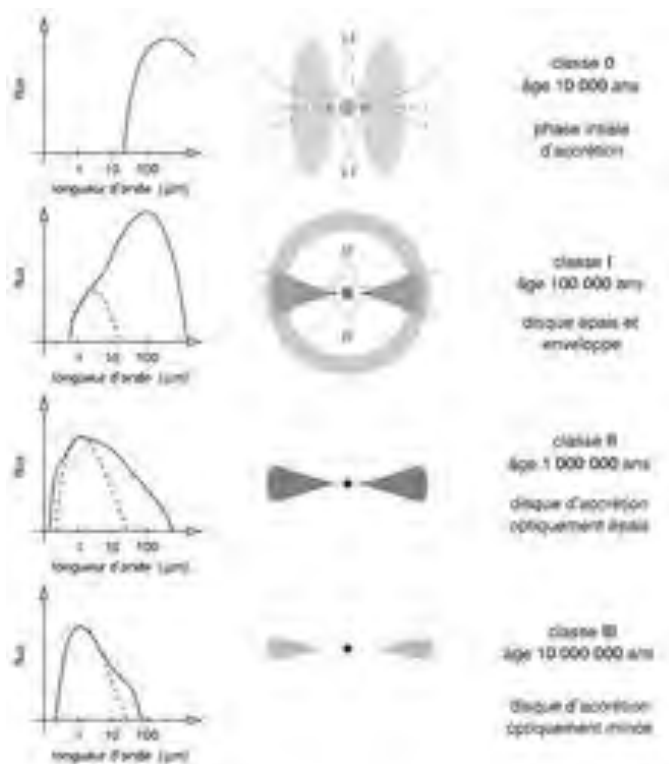
Les étoiles jeunes occupent la même zone du diagramme de Hertzsprung-Russell que les étoiles évoluées. En l'absence d'observations complémentant la photométrie visible et proche-infrarouge, il est parfois impossible de les distinguer de ces dernières.

Évolution d'une étoile jeune dans le diagramme de Hertzsprung-Russell à partir du moment où elle devient visible (classe II) jusqu'à la séquence principale. L'image illustre les cas d'étoiles de très faible masse (0,1 masse solaire), de masse solaire et de forte masse (10 masses solaires)



### Formation des étoiles de faible masse

La formation de la grande majorité des étoiles, celles de masse solaire ou de plus faible masse, est divisée en quatre phases définies par les propriétés du spectre de ces objets.



Scénario de formation des étoiles de faible masse : les quatre classes observationnelles résumées par Philippe André (1994).

À gauche : évolution du spectre au cours de la formation stellaire.

Au centre : schéma de la géométrie du système.

À droite : Commentaires et ordre de grandeur de l'âge du système.

Au début de leur formation, les protoétoiles sont enfouies dans un environnement de gaz et de poussière (dit enveloppe) qui empêche la lumière visible de nous parvenir; ces objets ne peuvent être observés que dans le domaine des ondes radio — et des rayons X — qui parviennent à traverser cette enveloppe (classe 0). On nomme cet état globule obscur. À mesure que l'enveloppe s'amincit (classe I) puis disparaît (classe II), les rayonnements infrarouge (provenant notamment du disque d'accrétion) et visible (provenant de l'étoile) finissent par nous parvenir. Lorsque le disque d'accrétion s'amenuise et que s'y forment les planètes, cet excès infrarouge diminue (classe III).

Ces classes observationnelles sont définies de manière statistique, les étoiles jeunes pouvant dévier de ces classes pour différentes raisons. Par exemple :

- dans les systèmes multiples serrés, la matière circumstellaire est perturbée et peut être dissipée plus rapidement;
- certains systèmes de classe II présentent un disque d'accrétion vu par la tranche, dont la matière opaque occulte le rayonnement en visible et proche infrarouge;

- certains systèmes de classe II présentent des sursauts d'accrétion importants et rapides — augmentation de la puissance d'accrétion d'un facteur cent en quelques années — qui modifient radicalement l'allure du spectre visible infrarouge.

### Formation des étoiles de forte masse

Localisation : Au cœur d'amas très denses ou parfois isolées. On ne sait pas exactement comment se forme une étoile massive. Les modèles théoriques ne parviennent pas encore à expliquer l'existence d'étoiles de plus de 8 masses solaires, l'accrétion de matière étant censée être stoppée au-delà de cette masse du fait de la pression de radiation de la proto-étoile.

Hypothèse du modèle physique

- Collision des disques d'accrétion de protoétoiles de moindre masse
- « Accrétion à haute concentration de gaz » via un taux d'accrétion plus fort, permis par le puits de potentiel gravitationnel de l'amas

Hypothèse du modèle statistique

- Hasard dans la distribution en masse des étoiles au moment de leur formation (fonction de masse initiale)
- Hasard dans la distribution en taille des amas.

Incidences des étoiles massives

- Elles influencent leur environnement par un champ ultraviolet intense → créent des régions d'hydrogène ionisé (ou régions HII) qui peuvent à leur tour abriter de la formation stellaire
- Elles provoquent une onde de choc au stade de supernova avant même que les étoiles de faible masse aient fini leur formation
- Les interactions dynamiques importantes provoquent une instabilité du système

Remarque: On n'observe pas de planètes autour des étoiles massives, car le disque proto-planétaire est balayé par les vents puissants de l'étoile centrale avant même que des planètes aient pu se former.

### Observation des étoiles en formation

Scénario actuel de formation des étoiles de faible masse et de masse intermédiaire (la grande majorité)

- Les pouponnières d'étoiles
- Les cœurs protostellaires
- Formation des T Tauri
- Les éjections de matière
- Formation des planétésimaux

### Produits de la formation stellaire

#### Fonction de masse initiale

L'observation des étoiles de notre environnement proche indique que la plupart des étoiles sont de faible masse, inférieure à celle du Soleil, tandis que les étoiles massives sont rares. La répartition en masse des étoiles formées s'appelle la fonction de masse initiale et constitue un domaine de recherche actif en astrophysique : l'observation dans différents amas de notre Galaxie ainsi que dans des amas extragalactiques (notamment dans les nuages de Magellan) tend à indiquer que cette distribution est universelle et suit la loi de Salpeter : le nombre d'étoiles formées entre les masses  $M$  et  $dM$  est proportionnel à  $1/M^{2,35} dM$ .

#### Naines brunes

La formation stellaire ne produit pas uniquement des étoiles : certains objets formés sont trop peu massifs (moins de 8 % de la masse du Soleil) pour pouvoir allumer des réactions nucléaires et sont appelés naines brunes en raison de leur faible luminosité, uniquement due à la chaleur produite par la contraction initiale. Le mode de formation de ces astres reste encore mystérieux. La fonction de masse substellaire suit une loi inverse à celle de la fonction de masse initiale, à savoir que les naines brunes moins massives sont produites en moins grand nombre que les naines brunes plus massives. Cette différence tend ainsi à indiquer que le mode de formation des naines brunes n'est pas identique à celui des étoiles. Mais la faible proportion de naines brunes en orbite serrée autour d'une étoile semble également invalider l'hypothèse d'une formation de type planétaire : en effet, les planètes sont formées à quelques dizaines d'unités astronomiques (au plus) de « leur » étoile.

#### Objets libres de masse planétaire

On conjecture également la formation de planètes « libres », c'est-à-dire d'objets de masse et de caractéristiques similaires à celles des planètes, mais formés de même manière que les étoiles — et non dans un disque protoplanétaire.

## B) Formation d'un disque protoplanétaire

Un **disque protoplanétaire** est un disque circumstellaire constitué de gaz et de poussières à partir duquel se forment les corps (planètes, planètes naines, petits corps et leurs satellites). Les étoiles se forment à partir d'un nuage de gaz et de poussières dont la partie centrale s'effondre sur elle-même. Puis, à l'intérieur de la nébuleuse résiduelle, la matière se condense éventuellement en un disque qui va donner naissance aux planètes. Les astronomes parlent de disque protoplanétaire.

#### De la nébuleuse primitive aux protoplanètes

L'état actuel des connaissances ne permet que d'esquisser des schémas évolutifs plausibles, parmi lesquels figure le suivant, qui s'inscrit dans un schéma d'évolution stellaire classique. Tout d'abord, un nuage de matière interstellaire atteint un état critique (perturbation ou mécanisme régulier) où s'amorce sa contraction. Ce nuage, tournant sur lui-même, possédant un champ

magnétique interne, contenant des masses de plasma, est le siège d'interactions entre forces gravitationnelles, centrifuges, thermiques et magnétiques; il se contracte en s'échauffant, en accélérant sa rotation, et s'aplatit en un disque nébulaire. Autour du centre de gravité se développe une condensation protostellaire massive, qui attire à elle seule la plus grande partie (99 %) de la matière du nuage (essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium). Le disque nébulaire, quant à lui, se refroidit, s'amincit et se rétrécit, en prenant une structure annulaire où apparaît une condensation équatoriale de corpuscules plus denses (poussières, cristaux, glaces, corps rocheux, etc.), animés de mouvements chaotiques sur des orbites très variées. Cette théorie ressemblant grandement à des théories de la naissance de la galaxie, celle-ci proposerait un système selon lequel les trous noirs seraient à leur origine. La théorie repose sur des observations montrant que des trous noirs seraient encore reliés à certaines galaxies, cette théorie s'apparente en grande partie à celle-ci du fait que la description de cette "condensation protostellaire massive" s'apparente au fait qu'un trou noir soit un objet astral d'une masse si élevée qu'elle serait capable d'attirer à elle des objets infimes, vérifiable grâce à des formules telles que celles de la gravitation terrestre.

### Magnétisme

Une variable récemment découverte par des astrophysiciens du CNRS est la présence de champs magnétiques très puissants entre l'étoile nouvellement née et son disque d'accrétion. Le champ magnétique tisse son lien entre la bébé-étoile et son disque d'accrétion.

Comment les étoiles comme le Soleil se forment-elles ? Comment les systèmes planétaires naissent-ils ? Pour répondre à ces questions, les astrophysiciens doivent découvrir les processus qui transforment de vastes nuages de gaz en disques d'accrétion, puis en étoiles et en planètes. Il semblerait que, parmi les ingrédients majeurs, le champ magnétique figure en bonne place. Une équipe internationale d'astrophysiciens, conduite par JF Donati du CNRS (Observatoire Midi-Pyrénées à Toulouse - INSU), vient juste de réussir à cartographier les arches et les tubes que le champ magnétique tisse entre les bébés-étoiles et leur disque d'accrétion. Ces observations, réalisées avec le spectropolarimètre ESPaDO nS installé au foyer du télescope Canada-France-Hawaii, devraient permettre de préciser comment les étoiles interagissent avec leur disque d'accrétion pour former leur propre système planétaire.

L'équipe internationale d'astrophysiciens vient d'observer une des pouponnières stellaires les plus proches du Soleil pour tenter de mieux comprendre comment les étoiles comme le Soleil se forment. Située dans la constellation d'Ophiuchus, la bébé-étoile qu'ils ont examinée s'appelle V2129 Ophiuchi. Bien que presque aussi chaude que le Soleil et environ 2,5 fois plus grosse que lui (n'ayant pas encore achevé sa contraction), elle est pourtant environ un million de fois trop peu lumineuse pour être visible à l'oeil nu, du fait de sa distance à la Terre de 420 années-lumière. Elle n'est âgée que de 2 millions d'années; à l'échelle de la vie humaine, c'est une bébé-étoile d'à peine quelques jours, qui doit encore passer une année entière à se contracter pour devenir une étoile adulte comme le Soleil, accompagnée de son cortège de planètes.

Les étoiles comme V2129 Oph prennent vie lorsqu'une portion du nuage moléculaire parent s'effondre sous son propre poids. Dans ce processus, le globule en effondrement se met à tourner sur lui-même de plus en plus vite, formant ainsi progressivement un disque aplati, que l'on nomme disque d'accrétion, avec au centre un coeur qui donne naissance à la nouvelle étoile tandis que le disque qui l'entoure engendre les planètes. Cette théorie, prédite par Laplace, n'est que très approximative; elle prédit en particulier que les étoiles très jeunes doivent tourner très vite sur elles-mêmes, une propriété qui n'est pas confirmée par les observations. Il est donc clair qu'il nous manque certains des ingrédients élémentaires pour expliquer le processus.



*Vue d'artiste d'une bébé-étoile tissant des liens magnétiques avec son disque d'accrétion © Chandra*

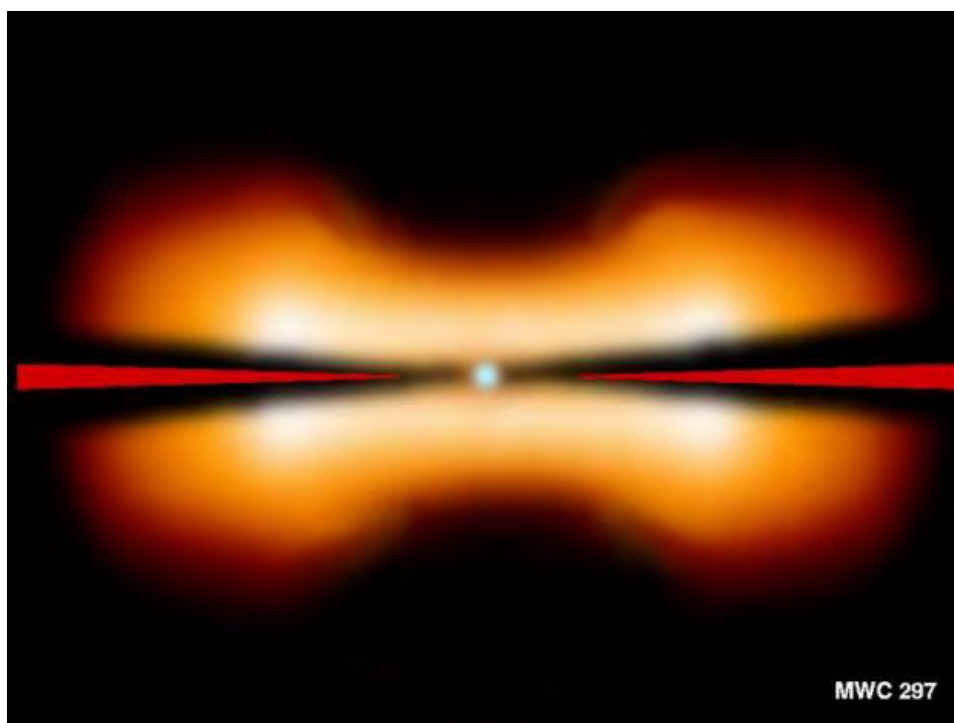
L'ingrédient manquant est probablement le champ magnétique. Présent au niveau du Soleil, les champs magnétiques sont probablement beaucoup plus puissants dans les régions de formation d'étoiles. On pense qu'ils permettent de contrôler la dynamique des disques d'accrétion en évacuant la matière des régions centrales des disques d'accrétion et servent à guider la matière du bord interne du disque jusqu'à la surface de la jeune étoile dans des « tubes magnétiques ». Comprendre les détails physiques de ces processus est essentiel pour comprendre la formation d'étoile comme le Soleil et de son cortège de planètes. C'est en mesurant la polarisation que les champs magnétiques engendrent dans la lumière de V2129 Oph que les chercheurs ont pu cartographier pour la première fois les gigantesques arches magnétiques qui relient la jeune étoile à son disque d'accrétion. Grâce à leur travail, les théoriciens devraient pouvoir développer de nouveaux modèles plus précis de la formation des étoiles et des planètes. Pour ce faire, ils ont utilisé le spectropolarimètre ESPaDO nS, installé sur le Télescope Canada-France-Hawaii de 3.6m au sommet du Mauna-Kea.

## C) Création d'un système planétaire et autres corps

### *Coup d'œil sur la zone de formation des planètes autour d'une jeune étoile*

Une équipe internationale, dirigée par des chercheurs du CNRS, vient d'obtenir les premiers résultats avec l'instrument AMBER qui équipe le VLTI de l'ESO. Ces chercheurs ont observé la jeune étoile MCW 297 et ont pu mesurer la taille de son disque protoplanétaire et mettre en évidence un vent composé d'hydrogène en forte expansion. Avec ces résultats et l'aide d'un modèle décrivant les rôles respectifs du disque et du vent stellaire, les chercheurs ont pu décrire précisément l'environnement de cette jeune étoile.

L'étoile MWC 297 est âgée tout au plus de quelques millions d'années, ce qui rapporté à l'échelle humaine où le Soleil serait dans sa belle quarantaine, correspond à quelques dizaines d'heures après sa venue au monde. En observant cet astre, les astronomes ont pu directement étudier les conditions dans lesquelles ils pensent que les étoiles évoluent, et plus précisément la région autour de l'étoile où les planètes se forment. Pour cela, il a fallu l'observer avec deux télescopes en parallèle, grâce au mode interférométrique du Very Large Telescope de l'ESO, ce qui équivaut à un télescope d'une taille de 45 m. En observant ce type d'étoile, les astronomes espèrent comprendre les premiers balbutiements des jeunes étoiles possédant en leur sein les clés de la formation stellaire et planétaire.



*L'environnement proche de l'étoile MWC 297 tel que déduit par les observations VLTI/AMBER.*

*Dans cette vue de profil, l'étoile est au centre, le disque protoplanétaire autour de celle-ci, et le vent stellaire au-dessus et au-dessous du disque.*

*La partie interne du système solaire a été ajoutée pour donner un ordre de grandeur des échelles sondées par AMBER.*

© VLTI/AMBER. LAOG. OSUG. CNRS. INSU. ESO.

L'équipe internationale conduite par Fabien Malbet, chercheur du CNRS au LAOG vient d'observer cet objet avec le VLTI de l'ESO installé sur le site du Paranal au Chili. Cet interféromètre disposait du nouvel instrument AMBER construit par un consortium européen mené par Romain Petrov, chercheur du CNRS au LUAN. Il s'agit en outre d'un des premiers résultats obtenu avec cet équipement. Les données ont été confrontées à un modèle théorique développé au sein de la collaboration AMBER, qui combine une modélisation du vent et du disque d'accrétion des étoiles en cours de formation.

Le disque domine l'émission de lumière dans l'infrarouge, domaine spectral d'observation d'AMBER, tandis que le vent est à l'origine d'une raie spectrale de l'hydrogène ( $B\gamma$ ) deux fois plus intense que l'émission du disque, mais dans un domaine spectral restreint. AMBER en séparant les domaines spectraux a permis de mesurer l'extension spatiale de ces deux phénomènes. Le disque a un diamètre de l'ordre de 1,75 unités astronomiques (1 UA = 150 millions de km), tandis que la raie spectrale de l'hydrogène ionisé provient d'une région correspondant à une région d'un diamètre d'environ 2,5 UA situé de part et d'autre du disque d'accrétion.

Le modèle développé par les chercheurs ayant construit AMBER, s'appuyant sur le programme SIMECA rend parfaitement compte des observations réalisées avec AMBER et nous donne une vision précise de l'environnement de cet objet. L'étoile MCW 297 est entourée d'un disque équatorial d'accrétion qui est lui même entouré d'une région d'hydrogène ionisé, se situant juste au-dessus du disque. Cette région a une vitesse d'expansion assez faible de l'ordre de 60 km/s, alors que le reste du vent stellaire s'échappe de façon beaucoup plus rapide au pôle qu'à l'équateur, avec des vitesses pouvant atteindre 600 km/s. Cette avancée scientifique permet d'ouvrir les portes à des explorations minutieuses de l'environnement très proches des étoiles en formation à des échelles spatiales où les astronomes s'attendent à la formation de planètes.



## D) Vie et mort d'une étoile

Le grand cycle de vie et de mort des étoiles anime les galaxies. Des nuages de gaz froid et dense se contractent. Ils s'effondrent en nodosités brillantes, enrobées d'un cocon gazeux : ce sont les toutes premières étoiles de l'Univers ! Elles luisent du feu de la fusion thermonucléaire en leur cœur. Puis, elles meurent. Elles se dilatent ou explosent en gigantesques feux d'artifice. Le fruit de leurs entrailles se disperse : carbone, azote, oxygène, silicium et fer sont si vitaux pour la vie. Et de nouvelles générations d'astres naissent...

Les premiers embryons de galaxies se sont condensés. Autour de cœurs de matière noire, exotique et inconnue, le magma exhalé des forges brûlantes du Big Bang s'est rassemblé. Puis ces nuages d'hydrogène et d'hélium primordiaux se refroidissent. Ils se contractent sous leur propre poids. La gravité fait son œuvre. Les atomes s'associent en molécules. La chaleur piégée au sein des nébuleuses s'évacue. L'avalanche s'instaure. La matière se concentre et se fragmente. Le mouvement cessera lorsque poindront des lueurs éclatantes... Soumis à une compression terrible, le gaz surchauffé s'est embrasé. Il luit du feu de la fusion thermonucléaire. Les premières étoiles de l'Univers sont nées. C'est Broadway et les néons de Manhattan, Piccadilly Circus ou les Champs-Élysées... Les couleurs resplendent ! Ces soleils primitifs sont de véritables monstres : 100 à 1000 fois plus massifs que notre astre du jour. Ils brûlent leur existence par les deux bouts. Puis, ils explosent en supernovae ou hypernovae cataclysmiques. Ce faisant, les éléments chimiques lourds - synthétisés dans leur foyer nucléaire - ensemencent et fertilisent l'espace autour d'eux. Ces temps immémoriaux remontent à moins d'un milliard d'années après l'aube de l'Univers. Le cosmos avait alors 7 % de son âge actuel, estimé à environ 14 milliards d'années. Depuis, les générations d'étoiles se succèdent inlassablement. Tour à tour, chacune ajoute sa nouvelle 'pincée' de noyaux de carbone, azote, oxygène, silicium ou fer à la soupe cosmique. Notre galaxie, la Voie lactée, s'enrichit toujours selon ce mode. En mourant, les étoiles dispersent le précieux fruit de leurs entrailles. Et "*nous sommes tous des poussières d'étoiles*", disent les chercheurs-poètes.

### Une étoile, qu'est-ce que c'est ?

"Une étoile se présente comme un immense globe de gaz chaud", définit Jean-Paul Zahn astronome émérite au Laboratoire de l'Univers et de ses théories à l'observatoire de Paris-Meudon. "*Elle se distingue par sa source d'énergie interne : en effet, l'astre tire sa lumière des réactions de fusion thermonucléaire à l'œuvre dans son cœur. Au centre, les conditions sont si infernales que les noyaux d'atomes – surtout de simples protons – se heurtent avec violence. Du coup, des réactions vigoureuses s'amorcent. Le Soleil, comme la majorité des étoiles du cosmos, utilise cette combustion de l'hydrogène. Notre astre du jour fonctionne à la manière d'une gigantesque bombe H autoentretenue, régulée et contrôlée.*" Le rendement est important : 0,7 % de la masse se transforme ainsi en énergie, selon la fameuse équation de la relativité d'Albert Einstein  $E=mc^2$ . C'est plus que ce que produisent les centrales nucléaires électriques sur Terre, avec les seuls processus de la fission. À chaque seconde, le Soleil engloutit 600 millions de tonnes d'hydrogène. Ce faisant, il les convertit en hélium et 4 millions de tonnes disparaissent pour être transformées en pure énergie. "Dans sa bonté, mère-nature fabrique une vive puissance à partir de substance inerte. Le taux de change appliqué est avantageux : il équivaut numériquement à un facteur 100 millions de milliards, ou 10<sup>17</sup>, le carré de la vitesse de la lumière ! "Dans ces conditions, l'annihilation totale d'un gramme de matière - le poids d'une cigarette – assurerait un jour de la consommation et l'activité d'une grande ville", indique l'ancien directeur des observatoires de Nice et Midi-Pyrénées (Toulouse).

En définitive, la **structure de l'astre** résulte du délicat équilibre qui s'instaure entre deux forces rivales et concurrentes : la pression interne, d'une part, provient de la chaleur dégagée par les réactions nucléaires et elle tend à dilater l'atmosphère de l'objet; la gravité, d'autre part, est fille de l'attraction universelle et elle agit, au contraire, dans le sens d'une contraction. Au total, le Soleil représente quelque deux milliards de milliards de milliards de tonnes (2.10<sup>27</sup> t) de matière; ou 300 000 fois la masse de la Terre. Au centre, le « moteur » nucléaire fournit l'énergie et entretient la température au niveau de 15 millions de degrés. La pression avoisine alors 200 milliards de fois celle de l'air sur notre planète... Inévitablement, l'excès de chaleur fuit vers l'extérieur. Mais, la matière environnante est si dense et si opaque que, statistiquement, un grain de rayonnement (photon) met un million d'années à s'échapper... Notre étoile brille. Elle dispense une puissance équivalente à 4.10<sup>17</sup> gigawatts : la production de 400 millions de milliards de nos pâles centrales nucléaires sur Terre... Or, ce phénomène ferait éclater l'astre s'il n'était soumis à une action exactement opposée : la gravité pèse de tout son poids. Elle comprime les masses de gaz "empilées" autour du noyau. Au final, la surface incandescente du Soleil est portée à 6000 degrés. Partout, à toutes les profondeurs, la stabilité se maintient. Si, par malheur, les réactions du cœur s'emballent, l'atmosphère enflamme aussitôt et la pression diminue en conséquence : la situation retourne bien vite à la normale. Notons qu'une mince fraction, 12 % seulement, de la substance du Soleil sera affectée par la fusion. Pour le profane, c'est peu. Mais en fait, les réserves de combustible suffisent pour que l'astre vive à ce rythme pendant 10 milliards d'années. Son âge est estimé à 4,6 milliards d'années. Il se trouve, donc, à peu près au milieu de son existence.

### Chaud brasier nucléaire

On est loin des minuscules têtes d'épingles qui apparaissent comme piquées sur le velours noir du ciel. De tous temps, l'éclat des étoiles a impressionné la rétine et l'esprit des peuplades humaines. Les constellations marquent l'imaginaire : Grande Ourse, Cassiopée, Aigle, Carène du Navire, Centaure... Mais on a dû attendre longtemps avant de pouvoir identifier précisément la nature de ces balises et jalons. Rapprocher en pensée notre Soleil des fines étoiles - visibles à l'arrière-plan et la nuit seulement - n'a pas été aisé. L'un éclaira nos jours de ses rayons ardents; les autres se tiennent à la limite de détection de l'œil nu dans l'obscurité. Pourtant, ce contraste reste une simple apparence. "*Le Soleil est la plus proche des étoiles*", confirme Jean-Paul Zahn. "*On le sait depuis le début du XIXe siècle avec les premières mesures de distances.*" Pêle-mêle : Alpha et

Proxima du Centaure, Sirius du Grand Chien, Procyon du Petit Chien ou Altaïr de l'Aigle se sont réparties sur des éloignements compris entre 4 et 15 années-lumière. *"Du coup, la comparaison avec l'astre du jour devient possible. Si, par artifice, il reculait jusqu'à ses cousines célestes, son éclat se confondrait, peu ou prou, avec le leur. Un saut est franchi. Le Soleil représente une étoile parmi tant d'autres dans l'Univers."*

Pendant longtemps, cependant, on s'est demandé de "quel bois" se chauffe notre astre. Telle une chaudière ou une machine à vapeur de l'ère industrielle, puiserait-il son énergie vitale dans la combustion du charbon ? Assurément, non. Une telle proposition pourrait faire sourire aujourd'hui. Car l'ordre de grandeur n'y est pas du tout. Un peu plus tard, le Britannique William Thomson, sir Kelvin (1824 - 1907), et l'Allemand Hermann Helmholtz (1821 - 1894) suggéreront que la luminosité du Soleil s'expliquerait s'il s'effondrait sur lui-même, par gravité. Au bout du compte, c'est le Français Jean Perrin (1870 - 1942), physicien atomiste, futur lauréat du prix Nobel 1926, fondateur du Palais de la découverte à Paris et du Centre national de la recherche scientifique CNRS, qui pointera du doigt la solution en 1919. En 1920, son collègue sir Arthur Eddington (1882 - 1944) le suit et lance un fameux défi pour trouver la prolifique source d'énergie des étoiles. La réponse flotte dans l'air depuis l'avènement de la relativité d'Einstein ( $E=mc^2$ ) et des premières réactions qui mettent en jeu des noyaux d'atomes. La fusion de l'hydrogène s'impose - puisque le Soleil, à l'instar du reste du cosmos, se compose de 72 % d'hydrogène et de 26 % d'hélium. Ce seront, finalement, le Strasbourgeois émigré aux États-Unis Hans Bethe (1906 - 2005) et l'Allemand Carl von Weizsäcker qui identifieront, en 1939, les processus détaillés. Hans Bethe est devenu, par la suite, l'un des pères de la bombe atomique à Los Alamos (Nouveau-Mexique). Il a reçu le prix Nobel 1967.

### Lumière et couleur

Par une belle nuit, dans une obscurité d'encre : le ciel au-dessus de nos têtes recèle jusqu'à 3000 étoiles décelables à l'œil nu. C'est plus que les 1080 astres recensés 150 ans avant notre ère par le Grec Hipparque. Mais, c'est peu devant les centaines de milliards de consœurs du Soleil qu'héberge au total notre Galaxie, la Voie lactée. Les plus jeunes se regroupent par essaims bleutés le long des bras de la spirale de la Galaxie. Leurs homologues, plus âgées, affichent un teint rouge. Elles résident au sein du bulbe central ou dans les amas globulaires qui parcourent le halo autour du disque de notre univers-île. De prime abord, les étoiles du cosmos se caractérisent par trois paramètres simples : luminosité, couleur et position. Le premier se déduit de l'éclat apparent (ou magnitude) et de la distance. La couleur, elle, correspond à la température externe de l'astre. La supergéante rouge Bételgeuse d'Orion affiche ainsi 3000 degrés. Tandis que la naine jaune Soleil frise 6000 degrés et la belle bleue Spica, l'Épi de la Vierge, 24 000 degrés.

Cependant, il existe une autre grandeur que les astronomes aiment connaître : la masse de l'astre. C'est-à-dire, la quantité de matière qu'il renferme. Cette propriété s'avère assez délicate à évaluer. Mais, elle se révèle plus favorablement lorsque l'étoile est liée - en orbite autour d'une compagne. On parle alors de « étoile double » ou de « système binaire ». Ce cas est plus fréquent qu'on ne croit. En fait, plus de la moitié des étoiles vivraient ainsi en couples ou en groupes. Elles affectionnent la société... Sous l'influence de la gravité, les deux objets considérés tournent l'un autour de l'autre comme dans une ronde. Les lois du mouvement sont bien connues : elles ont été énoncées dès le début du XVIIe siècle par l'astronome allemand Johannes Kepler (1571 - 1630), puis interprétées par le Britannique Isaac Newton (1642 - 1727). On en déduit la valeur de la masse de chacun des corps impliqués. *"Ceci donne une idée de la quantité de combustible disponible au sein de l'étoile"*, explique Jean-Paul Zahn. *"La luminosité, elle, représente le débit d'énergie. Autrement dit, le rythme auquel les réserves de carburant sont dépensées. Au final, le rapport des deux entités exprime la durée de vie. On commence à aborder ici la physique en jeu. Par exemple, on s'est ainsi aperçu que les étoiles les plus massives évoluent très rapidement. Elles brillent quelques millions d'années, seulement, avant d'exploser. Des milliers de ces astres naissent actuellement à 1500 années-lumière de distance dans la nébuleuse d'Orion, l'un des berceaux privilégiés de la Galaxie."*

### Télescope story

Pour en apprendre davantage à propos de leurs favorites, les astronomes ont aussi dû apprendre à exploiter au maximum les messagers naturels qu'elles leur adressent. Et, en premier lieu : la lumière. Fini les observations à l'œil nu, les évaluations imprécises de couleurs ou de magnitudes. Ce travail est, désormais, effectué de manière automatique - à distance, sans se déplacer - avec des instruments programmés, pilotés et contrôlés par ordinateur. Les scientifiques disposent d'une palette de détecteurs ultrasophistiqués qui décryptent le rayonnement reçu. Cela passe par la collecte des maigres rayons lumineux issus des étoiles. Ici, le principe consiste à utiliser la plus grande surface possible afin de recueillir les photons. De l'œil humain à la lunette de Galilée en 1609, puis du télescope d'Isaac Newton en 1669 aux géants contemporains : tous ont exploité une « pupille » d'entrée de plus en plus large. Le Keck Télescope d'Hawaï et le Very Large Telescope européen du Chili sont équipés de deux, respectivement quatre, miroirs de 10 ou 8 mètres de diamètre. Une puissance unique. Elle est épaulée dans l'espace par le télescope Hubble et les satellites sensibles aux rayons X Axaf-Chandra ou XMM-Newton. Ces derniers ont fourni récemment des images saisissantes des jeunes étoiles de la nursery d'Orion.

Une fois capté, le précieux rayonnement doit ensuite être analysé avec soin. Là encore, il existe une large gamme de dispositifs, de systèmes optimisés et intelligents. *"Le spectrographe disperse la lumière en fonction des couleurs qui la composent à la manière d'un prisme"*, souligne Jean-Paul Zahn. *"On obtient, en sortie, une sorte d'empreinte. La carte d'identité infalsifiable - de l'astre visé. On en déduit sa composition. Le Soleil est ainsi constitué de 72 % d'hydrogène, 26 % d'hélium et 2 % d'éléments chimiques lourds dont les métaux. Avec cette méthode, même les éléments les plus rares, à l'état de traces, apparaissent. La mesure révèle la température et les mouvements violents dans l'atmosphère de l'étoile. Au final, les objets sont classés en diverses catégories selon leurs caractéristiques. Les valeurs effectives trouvées pour les masses s'étalent de 2 % à cent fois celle du Soleil. Les luminosités vont de 1 % à 100 000 fois l'éclat de notre étoile. Les températures s'échelonnent de 2000 à 100 000 degrés. Et les dimensions se répartissent de 10 % à 1000 fois celles de l'astre du jour."* Le bestiaire est vaste et varié.

## Les étoiles cachent leur âge

Ici, une petite difficulté supplémentaire survient. Car les étoiles, coquettes, montrent difficilement leur âge. Il n'est pas aisé d'apprécier leur degré d'évolution. Pendant longtemps, seul le Soleil a fait l'objet d'une datation précise grâce à la désintégration radioactive de l'uranium en plomb (un chronomètre naturel). Les mesures effectuées sur la météorite d'Allende, tombée en 1969 au Mexique, indiquent que les minéraux y ont cristallisé il y a 4,566 milliards d'années, à plus ou moins 2 millions d'années près. C'est désormais la référence pour le Système solaire. Mais qu'en est-il des autres astres ? Il faut noter l'exception de l'étoile primitive immatriculée CS 31082-001 dans notre Galaxie. Grâce à des déterminations d'abondance de l'uranium obtenues avec le Very Large Telescope européen du Chili, l'équipe de Roger Cayrel, à l'observatoire de Paris, est parvenue à lui attribuer un âge de 12,5 milliards d'années. Prouesse. Mais dans la majorité des cas, il faut renoncer à dater les étoiles individuelles ou isolées. Cependant, une méthode statistique permet d'accéder à l'âge collectif d'un amas d'étoiles, toutes nées ensemble. La méthode est due au Danois Ejnar Hertzsprung (1873 - 1967) et à l'Américain Henry Russell (1877 - 1957). Ils l'ont élaborée en 1911 et 1913. On trace un diagramme qui représente la luminosité et la couleur (ou la température). On s'aperçoit alors qu'il existe des zones caractéristiques des naines, géantes ou supergéantes. L'analyse livre, ensuite, l'âge commun de la population ainsi que les luminosités absolue et la distance.

## Découverte d'une étoile presque aussi vieille que l'univers (10/2/2014). - L'astre, vieux de 13,6 milliards d'années et exceptionnellement pauvre en fer, appartiendrait à la deuxième génération d'étoiles formée dans le cosmos.

C'est une fenêtre ouverte sur l'enfance du cosmos. Une équipe internationale de chercheurs, dirigée par l'astronome Stefan Keller de l'Université nationale australienne et comprenant l'astrophysicien Brian Schmidt (Prix Nobel 2011 pour ses travaux sur l'accélération de l'expansion de l'univers), vient d'annoncer la découverte de la plus vieille étoile jamais observée. Un astre âgé de 13,6 milliards d'années, qui se serait formé seulement 200 millions d'années après le big bang si les calculs des chercheurs sont exacts. Jusque-là, les plus anciennes étoiles identifiées - décrites respectivement en 2007 et 2013 - n'affichaient que 13,2 milliards d'années. Issue d'une supernova (explosion d'étoile en fin de vie) dont la masse était d'environ soixante fois celle du Soleil, la "petite nouvelle", baptisée SMSS J031300.36-670839.3, appartiendrait à la seconde génération d'étoiles, **portant en elle l'empreinte d'un astre primordial**. "C'est la première fois que nous sommes formellement en mesure de dire que nous sommes en présence de données provenant de la première génération d'étoiles. Nous allons maintenant pouvoir mettre cette pièce à sa place dans le puzzle", affirme Stefan Keller, auteur principal de l'étude publiée dans la revue Nature.

### L'horloge du fer

Repérée grâce au télescope SkyMapper basé au sud-est de l'Australie, cette étoile de notre Voie lactée, située à seulement 6.000 années-lumière de la Terre, avait pourtant, de prime abord, une allure tout à fait ordinaire. Ce n'est qu'en analysant son spectre lumineux que les chercheurs ont compris à quoi ils avaient affaire. Car, à leur grande surprise, ils n'y trouvaient pas trace de fer. Or, ce métal est un peu aux astronomes ce que le carbone 14 est aux archéologues. "Avec le temps, la concentration de fer dans l'univers s'élève. Si une étoile contient très peu de fer, cela signifie qu'elle est très ancienne", explique Stefan Keller. "Dans le cas de notre étoile, la quantité de fer correspond à moins d'un millionième de celle de notre Soleil, et à au moins soixante fois moins que celle de n'importe quelle autre étoile", ajoute-t-il. Pour s'assurer qu'il n'y avait pas d'erreur, les scientifiques ont ensuite confirmé leurs premiers résultats à l'aide du télescope Magellan érigé au Chili, dans la cordillère des Andes. Avec succès : l'étoile, uniquement composée d'hydrogène, d'hélium, de carbone, de magnésium et de calcium, présentait bien une quantité très faible de fer.

### L'empreinte d'une étoile primordiale

L'intérêt d'une telle découverte est qu'elle constitue un premier pas vers la connaissance des toutes premières étoiles de l'univers, mais aussi de l'origine de tous les matériaux dont nous avons besoin pour vivre. Car, au commencement, l'univers était uniquement hydrogène et hélium, assortis d'un soupçon de lithium. Tous les autres éléments ont été fabriqués par les astres. Les scientifiques pensent que les étoiles primordiales étaient très différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. Extrêmement massives, elles se seraient éteintes rapidement, au bout de seulement quelques millions d'années, alors que notre soleil, lui, affiche déjà près de 4,6 milliards d'années. "Pour fabriquer une étoile comme notre soleil, en plus de l'hydrogène et de l'hélium issus du big bang, vous ajoutez une énorme quantité de fer, de l'ordre de mille fois la masse de la Terre", résume Stefan Keller. "Pour obtenir cette antique étoile, vous n'avez besoin d'ajouter qu'un astéroïde de fer de la taille de l'Australie et une grosse dose de carbone. C'est une recette très différente qui nous en dit long sur la nature des toutes premières étoiles et sur leur mort", conclut-il. Jusqu'ici, les cosmologistes pensaient que les premières étoiles, en explosant, avaient largué de grandes quantités de fer dans l'univers. Mais, vu la composition de SMSS J031300.36-670839.3, il y a désormais de quoi en douter...

## Naissance, formation et évolution : une odyssée

Il devient maintenant possible de suivre le sort de ces astres étincelants. Depuis leur naissance jusqu'à leur mort, on peut décrire pas à pas les grandes lignes de leur histoire. "*Des étoiles se forment en ce moment même dans notre Galaxie et les autres de l'Univers*", explique le chercheur théoricien. "*Le phénomène peut être observé à l'aide des radiotélescopes qui percent à travers les nuages denses de gaz de molécules et de poussières. Ce sont les sites privilégiés de condensation des étoiles.*" Soumis à des instabilités, les masses gazeuses s'effondrent. Elles se contractent et, à l'intérieur, des fragments de matière se compriment. Ils s'échauffent. Leurs dimensions s'amenuisent. La température, au centre, s'élève jusqu'au seuil fatidique où les réactions de fusion thermonucléaire s'enclenchent. L'étoile est alors mature. Après s'être débarrassée de ses langes vaporeux, elle continuera à vivre sur ce mode pendant l'essentiel de son existence.

## Les étapes de la vie stellaire

Près de 90 % des étoiles du cosmos brillent ainsi en brûlant leur hydrogène. À ce titre, le Soleil incarne une naine jaune moyenne. On dit qu'il évolue sur la séquence principale du diagramme de luminosité et de température tracé, il y a près d'un siècle, par Hertzsprung et Russell. Mais, question : que se passe-t-il lorsque, finalement, l'hydrogène vient à manquer au centre ? "*Le carburant s'épuise et une nouvelle phase d'évolution s'enclenche*", répond Jean-Paul Zahn. "*Les réactions de fusion s'éteignent. Une autre étape s'amorce, où le cœur se contracte et l'atmosphère se dilate. En parallèle, la combustion de l'hydrogène se poursuit dans une mince coquille autour du noyau. L'étoile devient une géante rouge semblable à Aldébaran*

du Taureau ou Arcturus du Bouvier. La température du noyau remonte alors jusqu'à 100 millions de degrés. Et la réaction suivante démarre : la fusion de l'hélium en carbone et oxygène, commence par un flash violent." Puis, elle s'assagit et se poursuit. Notre astre du jour passera par là dans 5 milliards d'années environ. Ses dimensions seront alors multipliées par 100. Son atmosphère englutira la planète Mercure voire Vénus et plus ! Sur Terre, l'astre remplira un tiers du ciel visible et la chaleur décimera toute vie. Mais l'homme a bien le temps de se préparer à ce spectacle grandiose ! Car l'étoile, devenue instable et variable, soufflera alors littéralement son atmosphère dans l'espace. C'est le stade dit de la nébuleuse planétaire. De somptueux exemples le préfigurent dans le ciel : l'anneau de la Lyre, la Rosette de la Licorne ou Hélix du Verseau. Au centre, subsiste le cœur incandescent de l'astre défunt. Grande comme une Terre, cette naine blanche étincelante repose sur un curieux état quantique de la matière, caractérisé par son énorme densité : de l'ordre d'une tonne par centimètre-cube. Une cuillerée à café d'une telle substance pèserait autant... qu'une voiture sur Terre ! Il existe, cependant, une limite. En 1930, l'Indo-américain Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 - 1995), futur prix Nobel 1983, a calculé qu'au-delà de 1,44 fois la masse du Soleil, l'objet compact sera inéluctablement conduit à s'effondrer sous l'effet son propre poids. Le résidu du Soleil, lui, restera bien en deçà. La naine blanche résultante luirait pendant des milliards d'années avant de s'éteindre... en naine noire.

### Explosion catastrophique

Ce qui précède vaut pour **des étoiles moyennes de masse comprise entre 0,5 et 8 fois celle du Soleil**. Elles achèveront, donc, leur existence en belle nébuleuse planétaire irisée, illuminée par le rayonnement de la brûlante naine blanche, au centre. Ceci illustre le phénomène de perte de matière : il emporte l'atmosphère de l'astre à l'agonie, en fin de vie, sous forme de vents vers l'espace. Les objets de moins d'une demi-masse solaire, eux, ne connaîtront pas cette phase. Ils déclineront en simple naine blanche enrichie en hélium.

**Mais, qu'advient-il au juste des étoiles trappées et conséquentes, de plus de 8 masses solaires ?** Meurent-elles de la même façon que leurs frères congénères lorsque le carburant vient à s'amenuiser au cœur ? Assurément, non. "*L'issue devient beaucoup plus dramatique et spectaculaire*", avertit Jean-Paul Zahn. "*D'abord, la combustion des éléments chimiques se poursuit par étapes jusqu'à synthétiser le silicium et le fer. L'astre présente alors une structure en pelure d'oignon, avec le fer au centre, surmonté d'éléments de plus en plus légers, jusqu'à l'hélium et l'hydrogène dans l'atmosphère.*" Or, le fer est l'élément le plus stable de la nature. Ses 26 protons et 30 neutrons sont très fortement liés. Engendrer des noyaux plus gros et complexes, tels que le plomb ou l'uranium, consommerait de l'énergie au lieu d'en dégager. La fusion s'arrête, donc, à ce stade... et le moteur de l'étoile flanche. Son cœur s'effondre à nouveau. "*Une fulgurante explosion de supernova s'en suit. Pendant quelques jours, elle brillera davantage que la galaxie qui l'héberge. Parfois, elle rayonnera autant que des milliards de soleils... En 1987, une telle catastrophe est apparue à 170 000 années-lumière de distance dans le Grand nuage de Magellan, une galaxie naine satellite de la nôtre. Depuis lors, on en détecte couramment et, même, jusqu'aux confins du cosmos. La Voie lactée, quant à elle, n'en produit guère qu'une ou deux par siècle en moyenne.*" Reste à déterminer le déroulement exact des événements et la nature du résidu dense qui subsiste au centre...

### Étoile à neutrons...

La population de la Galaxie apparaît dominée par les naines blanches ou jaunes, sosies du Soleil ainsi que les naines rouges, beaucoup plus nombreuses et moins massives. Ce gros des troupes est voué à une mort douce. Les étoiles massives et chaudes, de leur côté, telles l'Épi de la Vierge, évoluent rapidement afin de devenir des géantes bleues comme Rigel d'Orion. Ensuite, la fabrication des éléments chimiques lourds jusqu'au fer s'opère pendant la phase de supergéante rouge, personnifiée par Bételgeuse, également dans la région d'Orion. Et finalement resplendira le feu d'artifice cataclysmique de la supernova. Cependant, on l'a vu, ceci ne saurait aboutir à la création d'une simple naine blanche comme dans le cas des étoiles moins consistantes. Car le résidu compact dépasserait alors la limite infranchissable de Chandrasekhar, 1,44 masse solaire, et il s'effondrerait sous l'effet de son propre poids. D'où la question : quel type de vestiges peuvent engendrer les astres les plus conséquents ? Quels cadavres ramassés laissent-ils derrière eux ? Quel est leur sort ultime ? "*Deux possibilités se dessinent ici*", poursuit Jean-Paul Zahn. "*Pour un astre né avec une masse initiale comprise entre 8 et 25 fois celle du Soleil, on atteint un nouvel état de la matière extrêmement comprimé et contraint. La pression a écrasé le cœur de l'astre disparu. Du coup, les électrons ont pénétré les protons et les ont convertis en neutrons. Il se forme ainsi une étoile à neutrons de typiquement 10 kilomètres de diamètre. Elle présente une densité inouïe un milliard de tonnes par centimètre-cube. Une cuillerée à café de sa substance pèserait autant qu'une montagne sur Terre.*" De tels objets, extrêmes, existent bel et bien. Le pulsar (pulsating star) de la nébuleuse du Crabe M 1 en est un bon exemple. Il correspond au vestige de la supernova historique observée, par les Chinois, en 1054 dans la constellation du Taureau.

### ... ou trou noir ?

Le comportement de la matière au sein de telles étoiles à neutrons reste bien mystérieux. Cependant, comme pour la naine blanche, les spécialistes sont convaincus qu'il existe une masse limite, aux alentours de trois fois celle du Soleil. Ceci correspond pour l'étoile d'origine - juste après sa naissance, bien avant le bouquet final - à un poids lourd de 20 ou 30 masses solaires. En deçà du seuil, la pression exercée par les neutrons - serrés les uns contre les autres, dans une mer indistincte - parvient à résister au poids de l'astre. Il est stable. Mais, au-delà, c'est le point de non retour. Gravité et attraction imposent leur domination. C'est l'effondrement. Inéluctable et infernal. Un trou noir apparaît. Une portion d'espace et de temps se détache du reste de l'Univers et se referme sur elle-même. L'entité insolite formée est telle que rien ne s'en échappe. Ni matière, ni lumière. Notre Galaxie recèlerait des centaines de millions de ces astres obscurs. Foule silencieuse. Selon les calculs, des milliers de gouffres sombres seraient ainsi liés, par gravité, à une étoile normale. Leur présence occasionne de violents transferts de matière au sein de systèmes binaires serrés. Ils se trahissent, indirectement, par leurs émissions d'énergie. Les couples célestes connus pour bien répondre à cette description sont : Cygnus X-1, V404 Cygni et le microquasar GRS 1915+105 de l'Aigle.

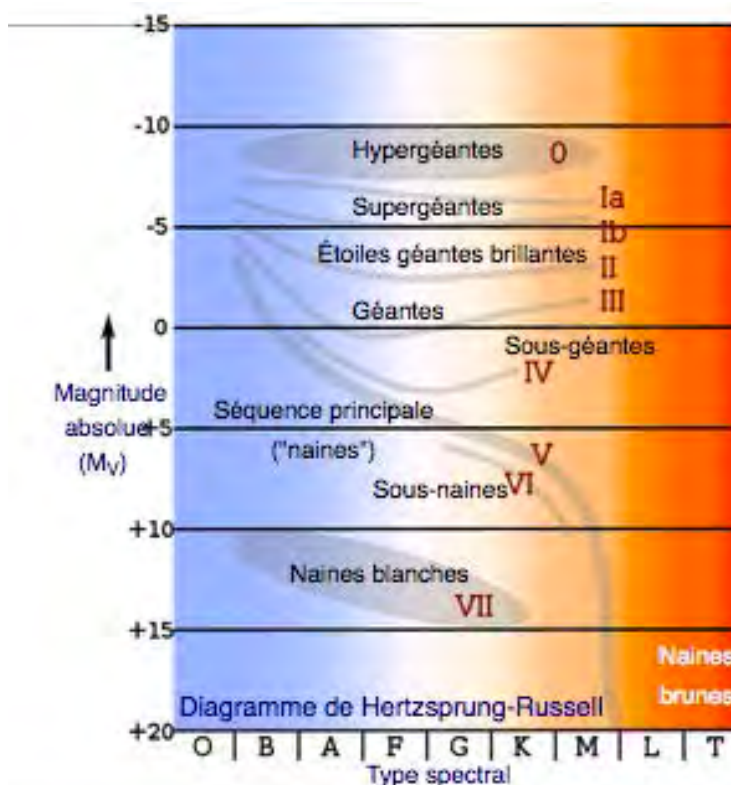
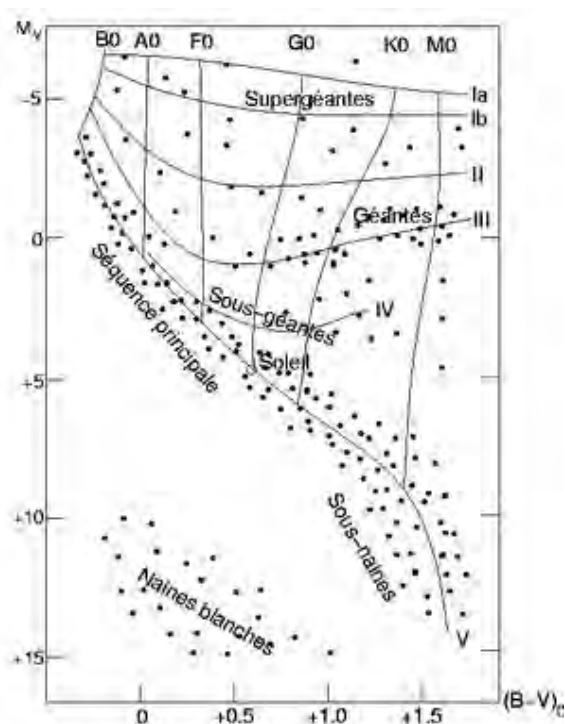
## Le cycle cosmique de la matière, astrochimie

Le voyage a commencé au sein de nuages de gaz qui se condensent en générations d'étoiles successives. Puis, celles-ci meurent. Elles rejettent, dans l'espace qui les a vues naître, les éléments synthétisés dans leur ardent foyer. Des noyaux atomiques de plus en plus lourds, élaborés et sophistiqués se constituent. Partout, le cosmos évolue vers la complexité. Ça et là, des creusets s'allument. Les conditions sont réunies pour que s'initient les réactions qui mènent aux molécules. Puis, aux cellules. Voire, aux neurones de l'intelligence... Au cœur du processus : les étoiles ! Massives, elles explosent et multiplient leur luminosité par un million. Le cycle de naissance, vie et mort des étoiles prend un sens profond. De nouveaux éléments s'insèrent dans la gestation de jeunes astres et, peut-être, de planètes propices à l'apparition de la vie... Ainsi, les étoiles qui ont précédé la formation du Système solaire ont produit le carbone des molécules du vivant sur Terre. Elles ont forgé l'azote et l'oxygène de l'air que nous respirons. Certaines ont créé le silicium des minéraux et des roches de notre planète. Enfin, des supernovae particulières - dues aux relations fantasques entre une naine blanche et une compagne - ont expulsé le fer de l'hémoglobine du sang qui irrigue nos veines ! La mythologie le disait : nos civilisations plongent leurs racines dans le cosmos. C'est si vrai que les étoiles jouent le rôle d'usines chargées d'enrichir la substance intime de l'Univers. Paradoxe : les explosions en supernovae d'étoiles massives détruisent les noyaux de fer fabriqués juste auparavant dans le cœur... Mais en contrepartie, elles relancent de plus belle l'alchimie nucléaire dans l'enveloppe de l'étoile déchiquetée. Des captures de neutrons y produisent alors une ribambelle d'entités difficiles à obtenir : cuivre, zinc, plomb, platine, or et uranium. Nous y sommes. Le cosmos a revêtu ses habits de magicien-joaillier-métallurgiste. L'origine de tous ses constituants s'explique. C'est un tour de force de l'esprit humain. Il a valu, entre autres, son prix Nobel à William Fowler du laboratoire Kellogg, au California Institute of Technology. Et tous les écoliers du monde apprennent que chaque atome de leur corps est une précieuse "poussière d'étoile". (Source CNRS)

## E) Typologie spectrale des étoiles et évolutions stellaires

En astronomie, les étoiles présentent quatre caractéristiques principales : température de surface, gravité à la surface, masse et luminosité. Ces caractéristiques ne sont pas indépendantes les unes des autres et ne sont pas directement mesurables. Cependant, elles permettent d'associer un type spectral à chaque étoile. Les étoiles se présentent dans une variété de couleurs déterminées par leur température de surface. Les étoiles chaudes sont bleues tandis que les étoiles froides sont rouges. Dans un ordre croissant de température, une étoile sera rouge, orange, jaune, blanche, bleue et violette. Cet ordre peut sembler étrange, car les humains associent souvent le rouge au chaud et le bleu au froid, mais la physique montre l'inverse. Plus un corps est chaud, plus les photons qui s'en échappent ont d'énergie, et plus leur longueur d'onde est faible. *A priori*, les étoiles peuvent être classées selon leur température de surface en utilisant la loi de Wien, mais ceci pose quelques difficultés. Les caractéristiques du spectre électromagnétique permettent de classer les étoiles différemment, en utilisant indirectement des informations qui concernent leur température ou leur gravité. En effet, les raies d'absorption présentes dans le spectre électromagnétique des étoiles ne peuvent être observées que dans une certaine gamme de températures car ce n'est que dans cette gamme que les niveaux d'énergie nucléaire relatifs à ces raies sont peuplés. De même, la largeur des raies d'absorption dépend de la gravité à la surface de l'étoile et donc de sa luminosité.

### Diagramme de Hertzsprung-Russell

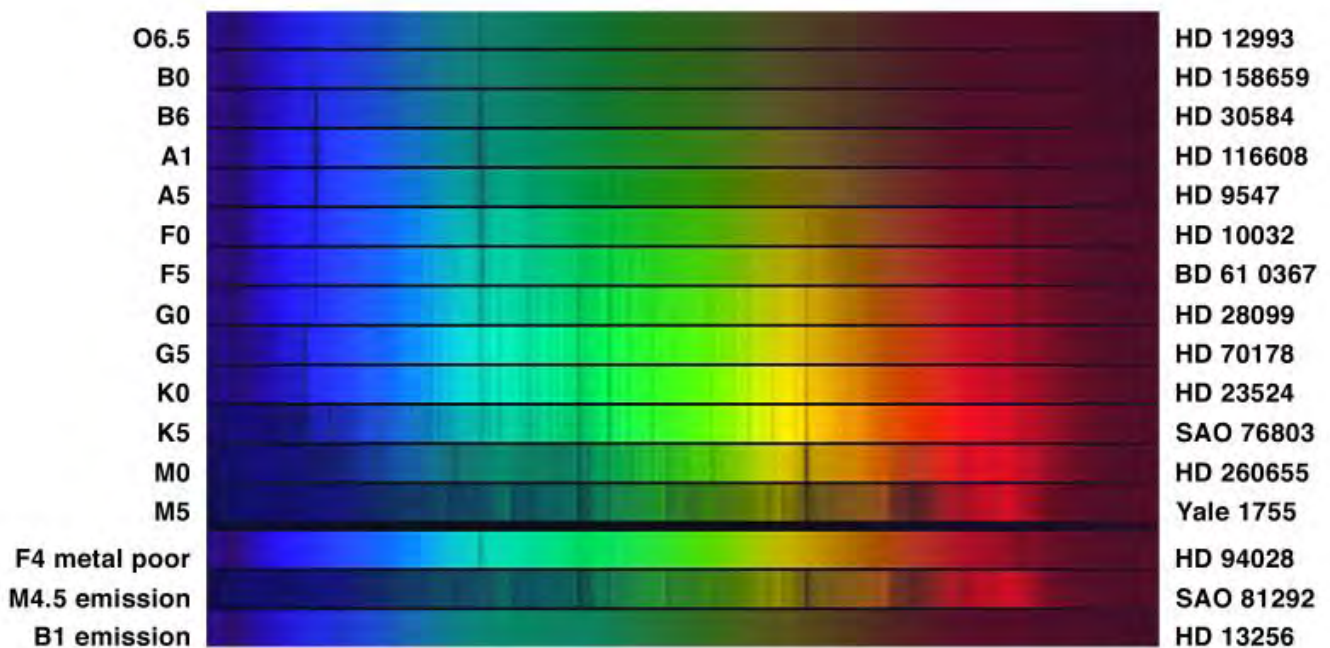


Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russell étudièrent la relation entre la luminosité et la température de surface des étoiles. Ils arrivèrent indépendamment à la conclusion que la majorité des étoiles se trouvent dans une région précise d'un graphique luminosité-température. On désigne maintenant un tel graphique « diagramme de Hertzsprung-Russell » (ou plus simplement « diagramme HR »). En effet, 80 % des étoiles se situent sur une bande diagonale du graphique, la « séquence principale ». Elle démontre une relation de proportionnalité entre la température et la luminosité. La plupart des étoiles s'y retrouvent puisqu'elles y passent la plus grande partie de leur vie. Les étoiles situées en dehors de la séquence principale sont soit au début soit à la fin de leur vie. Ce sont, sauf pour les naines blanches, des phases transitoires de plus ou moins courte durée. Ainsi, une étoile se déplace sur le diagramme. À la fin de sa vie, elle quitte la séquence principale et devient une étoile géante puis une naine blanche.

### Classification de Harvard

La classification de Harvard est celle qui attribue un type spectral à une étoile, et correspond globalement à une échelle de température. La classification de Yerkes est celle qui attribue une classe de luminosité à une étoile, et correspond globalement à une échelle de rayon (voir loi de Stefan-Boltzmann) pour une température donnée. Cette méthode fut développée à l'observatoire de Harvard au début du XX<sup>e</sup> siècle par Henry Draper. Après la mort de Draper, sa veuve légua à l'observatoire une somme d'argent pour continuer le travail de classification. La plus grande partie de ce travail fut effectué par les « filles » de l'observatoire, principalement Annie Jump Cannon et Antonia Maury en se fondant sur le travail de Williamina Fleming. Ce travail s'acheva par la publication du *Henry Draper Catalogue* (HD) entre 1918 et 1924. Le catalogue contenait 225 000 étoiles jusqu'à la neuvième magnitude. La classification de Harvard est fondée sur des raies d'absorption qui sont surtout sensibles à la température plutôt qu'à la gravité de surface. Les différentes classes et leurs températures sont les suivantes :

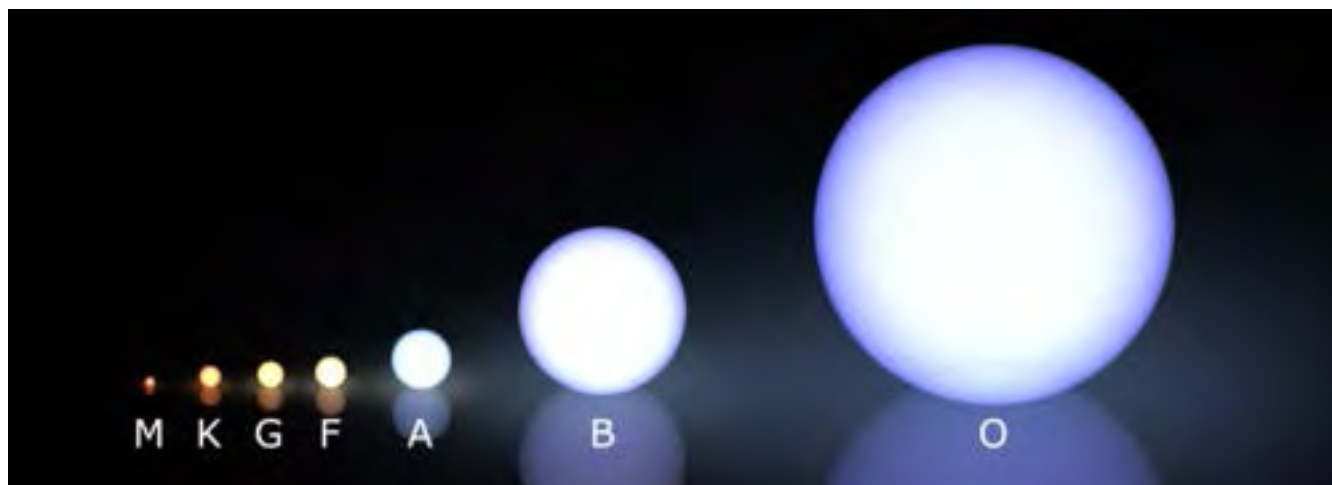
Classe	température	couleur	raies d'absorption
<b>O</b>	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
<b>B</b>	10 000 - 25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène
<b>A</b>	7 500 - 10 000 K	blanche	hydrogène
<b>F</b>	6 000 - 7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
<b>G</b>	5 000 - 6 000 K	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux
<b>K</b>	3 500 - 5 000 K	jaune-orange	métaux et monoxyde de titane
<b>M</b>	< 3 500 K	rouge	métaux et monoxyde de titane



Représentation des spectres d'étoile

Pour mémoriser l'ordre des types spectraux (OBAFGKM), les anglophones utilisent la phrase « *Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me!* », ce qui se traduit par « Oh! Sois une gentille fille/un gentil gars, embrasse-moi ». La raison de l'arrangement étrange des lettres est historique. Quand les premiers spectres d'étoiles furent pris, on remarqua que la raie de l'hydrogène variait beaucoup et l'on classa les étoiles selon l'intensité de la raie de Balmer : de **A**, la plus forte, à **Q**, la plus faible. Puis les raies d'autres éléments chimiques vinrent en jeu : les raies **H** et **K** du calcium, la raie **D** du sodium, etc. Plus tard, il apparut que beaucoup de ces classes se chevauchaient et furent retirées. Ce n'est que bien plus tard encore qu'on découvrit que l'intensité des raies dépendait essentiellement de la température de surface de l'étoile. Actuellement, ces classes sont subdivisées à l'aide des chiffres (0-9) : **A0** pour les étoiles les plus chaudes de la classe **A** et **A9** pour les moins chaudes. Par exemple, le soleil est une

étoile de type **G2**. Plus récemment, la classification a été étendue en **W O B A F G K M L T Y** et **R N C S**, où **W** sont les étoiles Wolf-Rayet, **L**, **T** et **Y** représentent des étoiles extrêmement froides, des naines brunes, et **R N C S** sont utilisés pour les étoiles carbonées.



*Représentation de la classification de Harvard*

### Les LBV

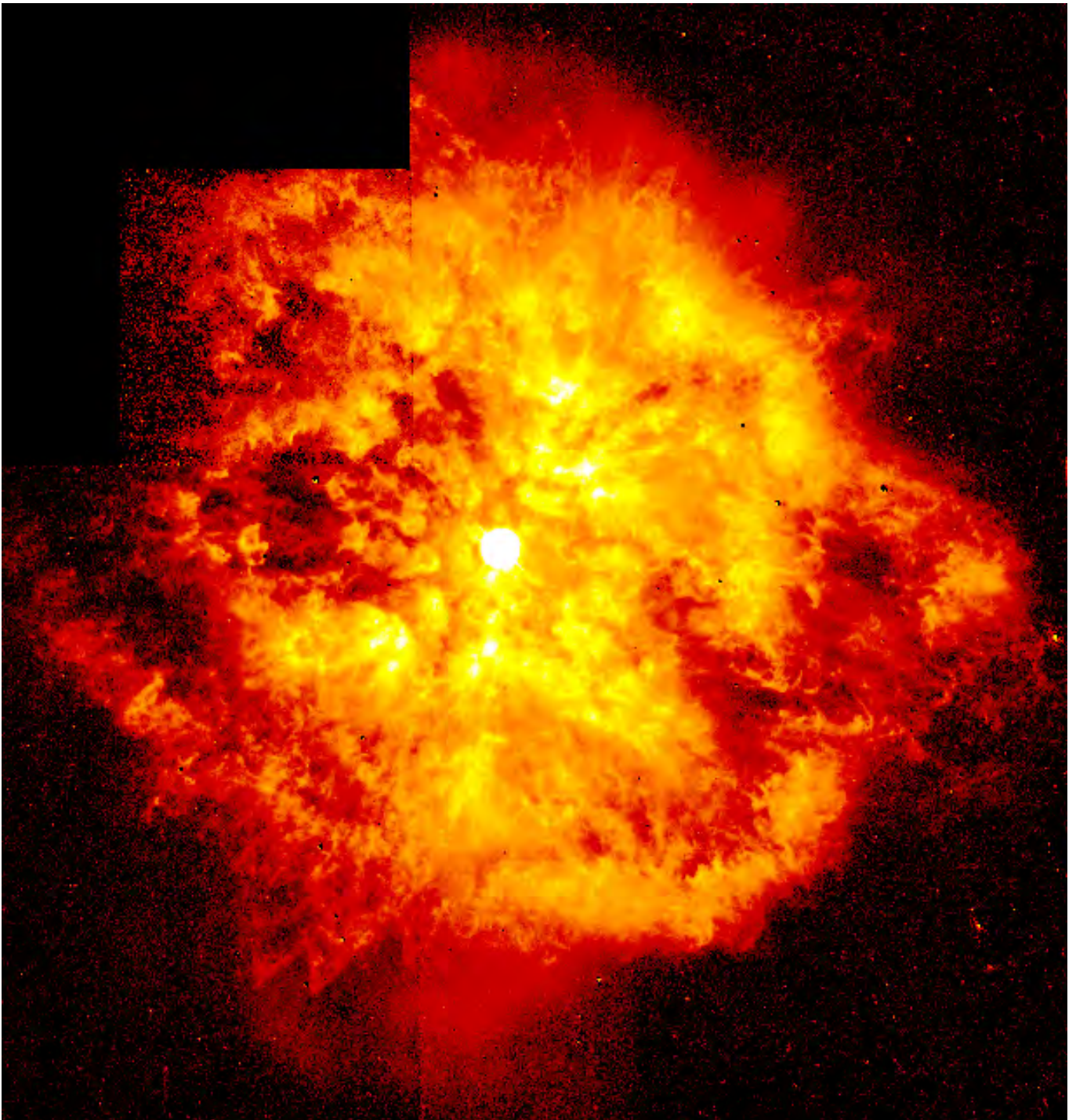
En astronomie, une (étoile) variable lumineuse bleue (en anglais, *Luminous blue variable (star)* : LBV), appelée également (étoile) variable de type S Doradus ou variable de Hubble-Sandage, est une étoile variable hypergéante bleue et très lumineuse. Ces étoiles présentent de lents changements de luminosité, ponctués par des expulsions occasionnelles et importantes de matière (de l'ordre de  $10^{-5}$  masse solaire par an). Extrêmement rares, elles ont été observées dans la galaxie d'Andromède et furent cataloguées pour la première fois par Edwin Hubble et Allan Sandage en 1953. C'est la raison pour laquelle elles furent longtemps appelées « variables de Hubble-Sandage » avant de prendre leur dénomination actuelle. Ces étoiles peuvent briller des millions de fois plus que le Soleil et, avec des masses allant jusqu'à 150 fois celle du Soleil, et ainsi approcher la limite théorique supérieure des masses stellaires. Si elles étaient encore plus massives, la gravité serait insuffisante pour contrebalancer la pression de radiation et elles se disloqueraient. Elles maintiennent difficilement l'équilibre hydrostatique car leur vent stellaire éjecte constamment de la matière, faisant décroître la masse de l'étoile. Pour cette raison, elles sont habituellement entourées de nébuleuses, créées par ces explosions; Eta Carinae est l'exemple le plus proche et le mieux étudié. À cause de leur masse élevée et de leur très grande luminosité, leur durée de vie est relativement très courte : quelques millions d'années. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, les théories estiment que les LBV correspondent à un stade d'évolution des étoiles très massives nécessaire pour évacuer l'excès de masse. Elles peuvent évoluer en étoiles Wolf-Rayet avant de finir en supernova. Si l'étoile ne perd pas assez de masse, elle peut produire une supernova particulièrement violente créée par instabilité de paires.

### Les étoiles WR (ou W)

Une étoile Wolf-Rayet (souvent abrégé en étoile WR) est une étoile chaude, massive et évoluée présentant un taux de perte de masse très élevé. Elles furent découvertes en 1867 par Charles Wolf et Georges Rayet, de l'Observatoire de Paris. Wolf et Rayet avaient observé, dans 3 étoiles de la constellation du Cygne, d'étranges raies en émission d'origine alors inconnue. On pense aujourd'hui que les étoiles Wolf-Rayet sont les *descendantes* des étoiles de type spectral O ou B, c'est-à-dire les étoiles les plus massives des populations stellaires (qui ont une masse comprise entre 9 et 80-150 masses solaires)<sup>2</sup>. On parle d'une « étoile Wolf-Rayet » pour dire une étoile « de type Wolf-Rayet », plutôt qu'une « étoile *de* Wolf-Rayet » (comme on parle de l'« étoile de Barnard »). Les étoiles Wolf-Rayet ne sont, en grande majorité, plus sur la séquence principale, c'est-à-dire que la combustion en leur cœur n'est plus celle de l'hydrogène, mais celle d'autres éléments, à savoir, par étapes, l'hélium, puis le carbone, l'oxygène etc. On parle donc parfois du stade (évolutif) Wolf-Rayet ou d'une étoile montrant des caractéristiques Wolf-Rayet. Une autre caractéristique de ces étoiles est leur vent stellaire si important qu'il en devient optiquement épais, ne laissant plus percevoir le spectre de l'étoile elle-même. On ne peut alors pas non plus parler de surface (hydrostatique), comme c'est le cas des étoiles « normales », de plus faible masse, comme le Soleil.

### Découverte

MM. Wolf et Rayet décrivent ainsi leur découverte : « Parmi les nombreuses étoiles dont la lumière a été étudiée à l'aide d'un prisme, on n'en connaît qu'une seule, Gamma de Cassiopée, dont le spectre offre constamment des lignes brillantes. Nous avons l'honneur de signaler à l'Académie l'existence de semblables lignes dans trois étoiles de la constellation du Cygne... Leur spectre se compose d'un fond éclairé dont les couleurs sont à peine visibles. Tous trois présentent une série de lignes brillantes. L'identification des lignes lumineuses de ces étoiles avec celles des spectres des gaz incandescents nous a été impossible... ». La présence de ces raies en émission est longtemps restée mystérieuse, d'autant que l'on découvrit au début du XX<sup>e</sup> siècle leur largeur énorme. Dans les années 1960, les étoiles WR ont tour à tour été identifiées à des étoiles en formation (dites de pré-séquence principale), à des étoiles instables, au résultat d'interactions dans les binaires, et à des étoiles évoluées ayant perdu une masse conséquente. Cette dernière hypothèse est celle qui a rassemblé le plus de suffrages, le scénario d'évolution étant alors surnommé « scénario de Conti » d'après les travaux de Peter Conti et de ses collègues, bien qu'il ne soit pas le premier à l'avoir proposé.



*Image du télescope spatial Hubble de la nébuleuse MI-67 autour de l'étoile Wolf-Rayet WR124*

### **Caractéristiques principales**

Les étoiles WR éjectent beaucoup de matière, par le biais d'un vent stellaire. Celui-ci est beaucoup plus fort que le vent solaire : la perte de masse atteint en effet un taux de  $10^{-5}$  masses solaires par an pour les WR contre  $10^{-14}$  pour le Soleil; la vitesse du vent est également bien plus grande, avec environ 2000 km/s pour les WR. C'est dans ce vent que naissent les raies larges en émission : le spectre stellaire ne dévoile pas la surface de l'étoile, comme c'est le cas pour le Soleil, mais les couches du nuage entourant celle-ci. La perte de masse ayant amené en surface des zones enrichies en éléments lourds par les réactions nucléaires internes, le spectre est clairement enrichi en métaux (Métallicité élevée). Si les raies dominantes proviennent de l'azote, on parle d'étoile WN; pour le carbone d'étoiles WC et pour l'oxygène d'étoiles WO. Ces étoiles WR sont assez rares : on en connaît actuellement 298 dans notre Galaxie et une centaine dans les Nuages de Magellan.

### **La fréquence de binaires dans les Nuages de Magellan**

Les Nuages de Magellan sont deux galaxies irrégulières naines au voisinage de notre propre Voie lactée. Elles ont la particularité d'avoir une métallicité moindre que celle dans le voisinage solaire (laquelle sert de valeur de référence et est notée  $Z_{\odot}$ ). La métallicité a un effet direct sur le taux de perte de masse, et donc la capacité des étoiles massives à devenir des étoiles Wolf-Rayet. Dans les années 1990, des études de populations des étoiles Wolf-Rayet ont montré qu'il était nécessaire dans les modèles de doubler de manière artificielle le taux de perte de masse pour expliquer le nombre d'étoiles Wolf-Rayet dans les



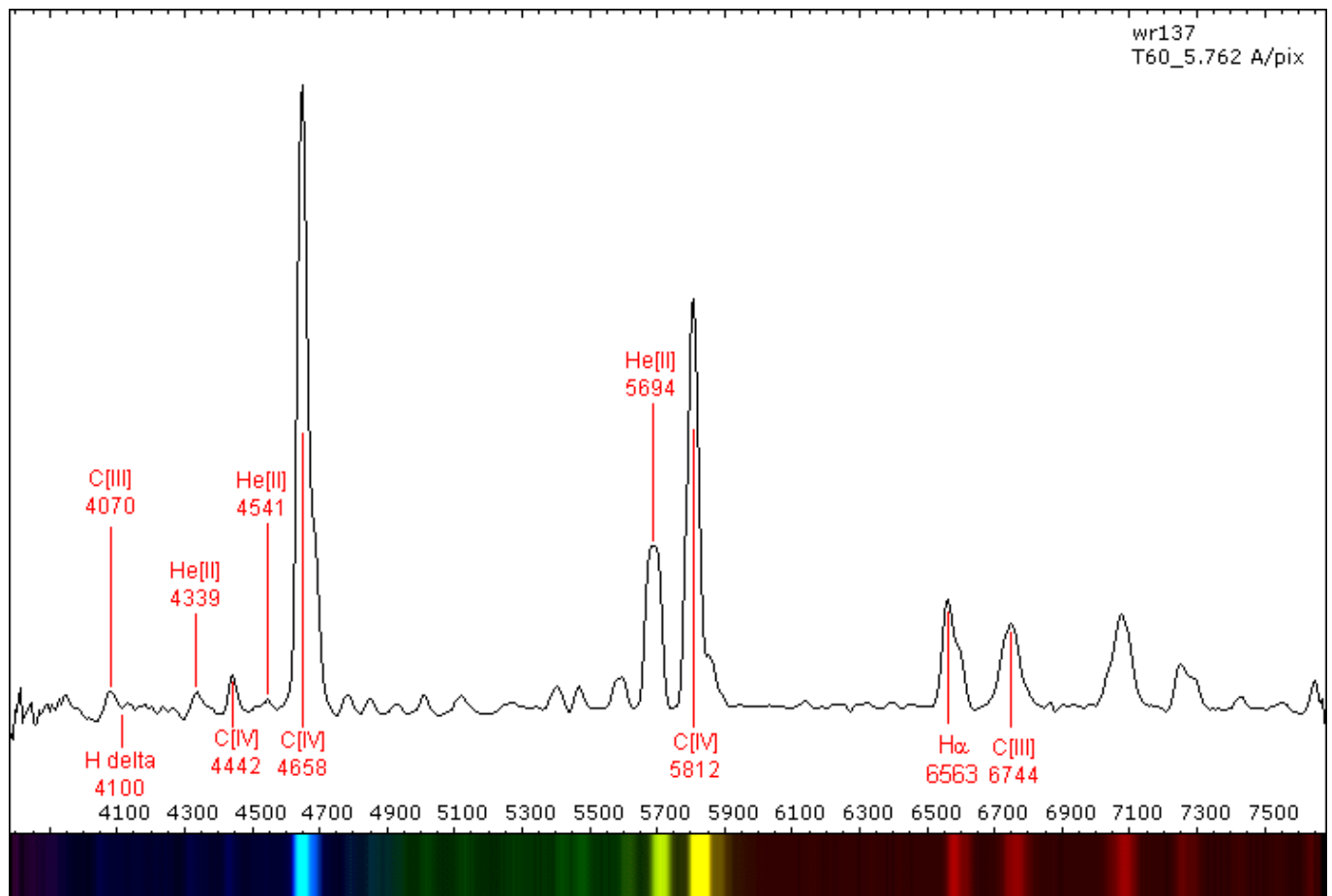
Nuages de Magellan. Bien conscients que la solution de doubler le taux de perte de masse était *ad hoc*, il a été proposé que la fréquence d'étoiles Wolf-Rayet binaires de courte période soit plus grande à faible métallicité. Dans ce cas, l'étoile massive voyait son potentiel gravitationnel diminué par la présence d'un compagnon proche, ce qui devait lui permettre de perdre plus de matière que lors de l'évolution d'une étoile simple. Cependant, des études ultérieures sur la quasi-totalité des 12 étoiles Wolf-Rayet du Petit Nuage de Magellan et des 134 du Grand Nuage de Magellan ont montré que seulement 30 à 40 % des étoiles étaient effectivement des binaires à courte période, comme les autres étoiles et comme dans notre propre galaxie. En d'autres termes, il fallait trouver une autre explication. L'explication donnée aujourd'hui n'est pas encore complète, mais repose sur deux ingrédients : une vitesse de rotation plus élevée à faible métallicité, et un vent structuré (*clumpy*, ou "poreux").

### Classification spectrale

Une étoile est dite Wolf-Rayet si elle montre certaines caractéristiques spectrales précises dont la plus importante est la présence de raies d'émission larges principalement d'hélium, mais aussi d'azote, et parfois de carbone et d'oxygène. La force relative et la présence ou absence de certaines raies permet de classer l'étoile Wolf-Rayet. La classification des étoiles Wolf-Rayet est un point toujours délicat puisque les caractéristiques spectrales observables sont le reflet de l'état du vent stellaire, et non directement de la « surface » de l'étoile ou de son cœur, inaccessible. On distingue deux grandes classes d'étoiles Wolf-Rayet : les étoiles riches en azote, notées WN et celles riches en carbone, notées WC. De plus, on distingue encore les étoiles WN en deux sous-classes : les étoiles WNL (pour WN *late* en anglais, c'est-à-dire tardive), et les étoiles WNE (pour *early* en anglais, c'est-à-dire précoce). Cette distinction est aussi valable pour les étoiles WC mais très peu utilisée. Pour être complet, précisons que la classification précise des étoiles Wolf-Rayet se décompose entre 10 sous-types WN, de WN11 à WN2, et 7 sous-types WC, de WC9 à WC2 (mais les étoiles WC sont principalement WC9 ou WC4). La classification précise dépend de la mesure précise des forces relatives de certaines raies, comme définie dans le système de classification de Smith, Shara et Moffat (1996, MNRAS, 281, 163). Enfin, les étoiles WN11 à WN6 sont considérées comme des WNL, et les étoiles WN5 à WN2 sont considérées comme des WNE. Ceci peut paraître inutilement compliqué, mais est en fait la conséquence, comme souvent en astronomie, de raisons « historiques ». La plupart du temps, les astronomes classent avant de comprendre. On peut utiliser cette classification pour parler de chemins évolutifs. Globalement, le chemin évolutif d'une étoile massive s'écrit ainsi :



où O désigne une étoile de type O, RSG (*Red Supergiant*) désigne une étoile supergéante rouge, LBV (*Luminous Blue Variable*) désigne une étoile de type LBV, et SN désigne une supernova. Toutes les étoiles massives ne traversent pas toutes les phases. Cela dépend de trois paramètres initiaux : la masse, la métallicité et la vitesse de rotation.



Spectre de l'étoile Wolf-Rayet WR137, de type spectral WC7

## Évolution

Les étoiles Wolf-Rayet ont comme progéniteurs les étoiles initialement les plus massives, les étoiles O. Des étoiles moins massives ne forment pas d'étoiles Wolf-Rayet puisqu'elles ne peuvent pas atteindre le stade de la combustion de l'hélium dans le cœur. Bien que la masse initiale minimum pour former une étoile Wolf-Rayet soit connue (environ 15–25 masses solaires — cela dépend de la métallicité ambiante), on ne sait pas du tout jusqu'à quelle limite supérieure la masse initiale peut aller, s'il y en a une. Une fois que la combustion de l'hydrogène est terminée (fin de la séquence principale), le cœur se contracte, l'enveloppe se dilate et l'étoile passe par un stade intermédiaire qui peut soit être stable (RSG — supergéante rouge) soit instable (LBV). Il se peut que la combustion en couche de l'hydrogène se fasse pendant ce stade. Ensuite, si l'étoile est suffisamment massive, la combustion de l'hélium dans le cœur démarre. Puisque cette combustion est largement plus puissante que celle de l'hydrogène, elle dégage beaucoup plus d'énergie, et est à l'origine d'un vent opaque et dense. Puisque le vent est opaque (ou optiquement épais) il n'est plus possible de distinguer la surface, et l'étoile est une Wolf-Rayet. Le vent d'une Wolf-Rayet est si fort (jusqu'à  $10^{-5}$  masses solaires par an) qu'il enlève petit à petit toutes les couches supérieures (riches en hydrogène) de l'étoile. Tant que l'étoile possède encore de l'hydrogène dans le vent, elle apparaît comme une WNL. Une fois que l'hydrogène a disparu, elle devient une WNE. Les produits de la combustion de l'hélium sont principalement le carbone et l'oxygène. Puisque les couches supérieures de l'étoile disparaissent, le carbone devient visible, et l'étoile devient une WC. Une fois que la combustion de l'hélium dans le cœur est terminée, c'est la combustion du carbone qui commence, dont le produit est principalement l'oxygène. Puis il s'ensuit la combustion de l'oxygène en silicium, et ainsi de suite, jusqu'au fer. La stabilité du fer est telle qu'une fois le cœur de fer atteint, la température dans le noyau de l'étoile n'est pas suffisante pour entamer la combustion de cet élément. L'étoile s'effondre donc sur elle-même et explose en supernova.

### Les étoiles les plus massives ?

C'est parmi les étoiles Wolf-Rayet que l'on trouve les étoiles les plus massives de l'univers. Cela peut sembler paradoxal car, s'il s'agit d'étoiles évoluées ayant perdu pas mal de masse, elles devraient avoir des masses assez faibles. Toutefois, il faut savoir qu'une étoile est classée WR uniquement sur base de l'aspect de son spectre : toute étoile présentant des raies larges en émission est donc classée WR. Parmi ces objets, des "fausses" WR viennent se glisser, des étoiles très lumineuses mais toujours sur la séquence principale - il ne s'agit donc pas d'étoiles évoluées. C'est le cas des records WR 20a, dans l'amas stellaire Westerlund 2, ainsi que NGC 3603 A1, dans l'amas NGC 3603.

### Microquasars, Gamma-Ray Bursts et compagnie

Les étoiles Wolf-Rayet peuvent donner naissance à une multitude d'objets astrophysiques très intéressants. Cela rend leur étude d'autant plus importante. On peut distinguer principalement deux grandes catégories : les résultats de l'évolution d'une étoile simple, et ceux de l'évolution d'une étoile binaire. Une étoile Wolf-Rayet qui explose en supernova peut donner naissance à une étoile à neutrons ou un trou noir. L'apparition de l'un ou de l'autre dépend de la quantité de matière qui n'est pas éjectée par l'explosion. Si la masse de l'objet central après l'explosion est plus grande que 1,4 masse solaire, le résultat sera une étoile à neutrons. Si elle est plus grande que 3 masses solaires, le résultat sera un trou noir. Il est aussi possible que l'explosion détruise complètement l'étoile, et que toute la matière soit éjectée dans le milieu interstellaire. Bien que la question de savoir s'il faut ou non une étoile binaire ne soit pas encore résolue, les étoiles Wolf-Rayet sont considérées comme les progéniteurs des fameux sursauts de rayons gamma ((en) «*Gamma-Ray Burst*»). Le modèle le plus accepté pour l'instant est le modèle du «*collapsar*» (du verbe *collapse*, s'effondrer en anglais, à ne pas confondre avec le saut collapsar). Il décrit comment l'effondrement de l'étoile en trou noir durant la supernova crée un jet à très haute énergie, et produit des rayons gamma.

Les résultats de l'évolution d'une étoile binaire Wolf-Rayet, c'est-à-dire qu'au moins l'une des deux étoiles est une Wolf-Rayet, sont peut-être encore plus intéressants puisqu'encore plus variés. Lorsque l'étoile Wolf-Rayet explose en supernova, il y a deux possibilités pour le système binaire. Soit il se détache, soit il reste attaché. Quand le système se détache, il produit alors une étoile à neutrons ou un trou noir à haute vitesse, qui part se balader dans l'espace interstellaire. La seconde étoile part dans la direction opposée. Des études récentes ont réussi à reconstruire le parcours d'une étoile à neutrons à haute vitesse, et celui d'une étoile massive. Ils ont montré que les deux objets avaient la même origine spatiale, et qu'ils avaient été formés très certainement dans l'amas d'étoiles qui se trouvait entre les deux. Cela a été fait aussi pour un trou noir, bien que cela soit largement plus difficile d'étudier un trou noir isolé dans l'espace. Si le système reste lié, il acquiert certainement une grande vitesse spatiale due à l'explosion. Cependant, on se retrouve avec un système à courte période contenant une étoile à neutrons ou un trou noir, avec une étoile secondaire. Si l'étoile secondaire est une étoile de faible masse (quelques masses solaires), sa matière est aspirée en direction du trou noir ou de l'étoile à neutrons. Cela crée un disque d'accrétion qui spirale autour de l'objet compact, et produit beaucoup de rayons X. Lorsque l'objet compact est une étoile à neutrons, on parle de binaire X de grande masse ((en) «*High-Mass X-ray binary*» ou HMXB). Lorsque l'objet compact est un trou noir, on parle d'un microquasar. Les microquasars sont l'équivalent à l'échelle stellaire des quasars dans les galaxies actives. Dans ces dernières, un tore de poussières et de gaz enveloppe un trou noir de plusieurs millions de masses solaires.

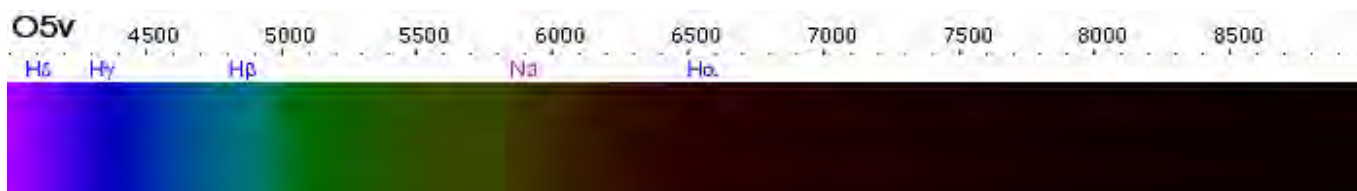
Encore plus étrange : lorsque l'étoile secondaire est une étoile relativement massive, elle évolue naturellement vers le stade d'étoile géante rouge. Son rayon croît alors de manière incroyable (plus d'un facteur 100), et peut alors absorber l'étoile à neutrons. C'est la phase d'évolution avec une enveloppe commune. L'étoile à neutrons spirale alors à l'intérieur de l'étoile géante rouge. En fonction du gradient de densité de l'enveloppe de la géante rouge, les modèles prédisent qu'il est possible que l'étoile à neutrons reste prisonnière à l'intérieur. Le résultat serait que l'étoile à neutrons prenne la place du cœur de l'étoile. On parle alors d'objets de Thorne-Zytkow, des noms des deux premiers qui ont théorisé l'existence de tels objets : Kip Thorne et Ana Zytkow. Bien que d'autres modèles montrent que ce genre d'objet n'est pas stable à cause d'une perte d'énergie par neutrinos (ce qui provoquerait l'effondrement complet de l'objet en un trou noir), des programmes d'observations ont été lancés

pour savoir si les objets de Thorne-Zytkow existaient bel et bien. Il a été proposé dans la littérature que les étoiles Wolf-Rayet de type WN8 soient justement des objets de Thorne-Zytkow. En effet, les WN8 sont caractérisées par le fait qu'aucune d'elle ne soit apparemment une étoile binaire, qu'elles sont souvent en dehors des amas ou des associations, qu'elles possèdent une grande vitesse spatiale, et qu'elles montrent systématiquement un très grand taux de variabilité stochastique aussi bien en photométrie qu'en polarimétrie ou en spectroscopie. À ce jour, aucune preuve observationnelle n'a permis de savoir si les objets de Thorne-Zytkow existaient, et s'il fallait les trouver parmi les étoiles Wolf-Rayet de type WN8.

## La classification spectrale des étoiles

### 1) Type O

Les étoiles de type **O** sont très chaudes (température de surface : 35 000 K pour delta Orionis) et très lumineuses et de couleur bleue. Par exemple, Naos, dans la constellation de la Poupe, brille près d'un million de fois plus fort que le Soleil. Ces étoiles possèdent des raies d'hélium intenses et des raies d'hydrogène assez faibles, elles émettent principalement dans l'ultraviolet. Ces étoiles sont si énergétiques qu'elles développent un fort vent stellaire et donc perdent de la matière qui forme alors des enveloppes donnant des raies en émission (type Oe pour les émissions dans l'hydrogène, type Of pour les émissions dans l'hélium II et l'azote III).

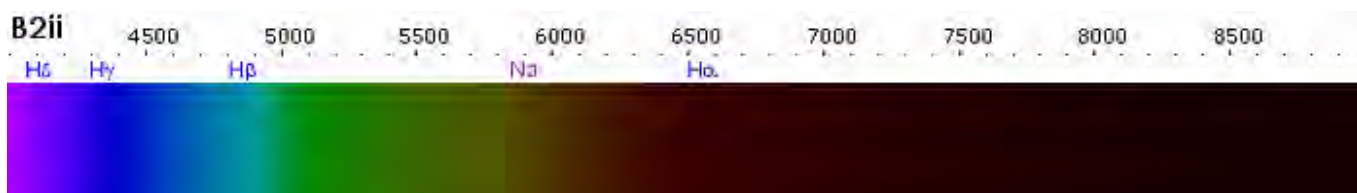


Spectre d'une étoile de type O5v

Une **géante bleue** est une étoile très chaude, très brillante et très massive (plus de 18 masses solaires), de couleur bleue et de type spectral **O** ou **B**. Dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, les géantes bleues se trouvent dans le coin supérieur gauche à cause de leur luminosité et de leur couleur. Ce sont, généralement des étoiles de la séquence principale qui brûlent leur hydrogène. Cependant leur masse est suffisante pour leur permettre d'entamer la combustion de l'hélium une fois celle de l'hydrogène achevée. Très rapidement, l'étoile passera à la combustion du carbone, puis à celle de l'oxygène. Elle aura alors constitué un noyau de fer, élément trop stable pour que sa combustion soit possible, quelle que soit la masse de l'étoile. L'équilibre maintenu dans l'étoile par les réactions thermonucléaires étant subitement rompu, elle explosera en une gigantesque supernova. Les géantes bleues sont extrêmement lumineuses, de magnitude absolue -5, -6 ou même moins. Leur température de 20 000 K ou plus est suffisamment élevée pour qu'une partie non négligeable de l'énergie qu'elles émettent soit dans le domaine de l'ultraviolet, donc invisible à nos yeux. La majorité des étoiles de ce type se trouvent dans les associations O-B, des grands groupes d'étoiles jeunes. Du fait de leur masse élevée, leur durée de vie est très courte, de l'ordre de 10 à 100 millions d'années. Les théories actuelles prédisent que la plupart d'entre elles finiront en supernova. Certaines des étoiles les plus brillantes visibles dans le ciel sont des géantes bleues; par exemple Beta Orionis (Rigel) et Alpha Cygni (Deneb), mais dans l'ensemble, à cause de leur courte durée de vie, les géantes bleues sont assez rares.

### 2) Type B

Les étoiles de type **B** sont aussi très lumineuses et chaudes (température de surface : 13 000 K); Rigel, dans la constellation d'Orion, est une supergéante bleue de classe **B**. Leur spectre possède des raies d'hélium neutre et les raies d'hydrogène sont assez faibles (elles sont appelées *raies de Balmer*). Les étoiles de type **O** et **B** sont si puissantes qu'elles ne vivent que fort peu de temps. Elles ne s'écartent donc que peu de l'endroit où elles se sont formées. Ainsi, elles ont tendance à s'assembler en ce qu'on appelle des *associations OB1* qui regroupent ces étoiles au sein d'un immense nuage moléculaire. L'association OB1 d'Orion forme un bras entier de la Voie lactée et contient toute la constellation d'Orion. C'est la présence d'étoiles très brillantes et non leur nombre qui fait que les bras des galaxies paraissent plus brillants. On peut rajouter que parmi les cent étoiles les plus brillantes, un tiers sont des étoiles de type B. Certaines étoiles B montrent des raies en émission dans leur spectre. Selon que les raies soient des raies interdites ou des raies normales, on parle d'étoiles « B[e] » ou « Be » (le « e » pour émission).

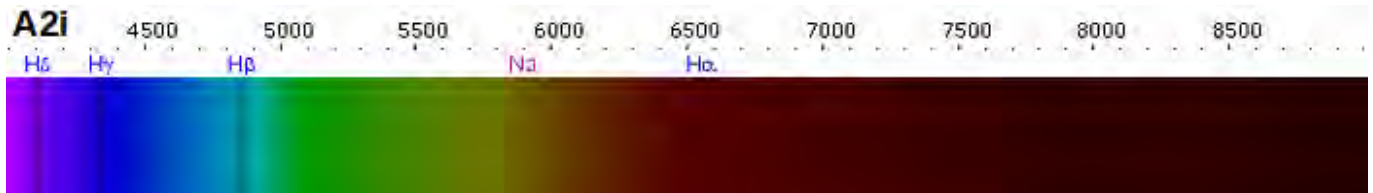


Spectre d'une étoile de type B2ii

### 3) Type A

Les étoiles de type **A** (appelées étoiles blanches de la séquence principale) sont parmi les plus communes visibles à l'œil nu. Deneb, dans la constellation du Cygne, et Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel dans le visible, sont deux étoiles de classe **A**. Comme toutes celles de ce type, elles sont blanches, leur spectre possède des raies d'hydrogène assez intenses (raies de Balmer) et montre plus faiblement la présence de métaux ionisés (raie K du calcium ionisé). Certaines d'entre elles présentent des caractéristiques remarquable notées Am ou Ap. Elles font partie des étoiles à fort champ magnétique (taches) ou présentant

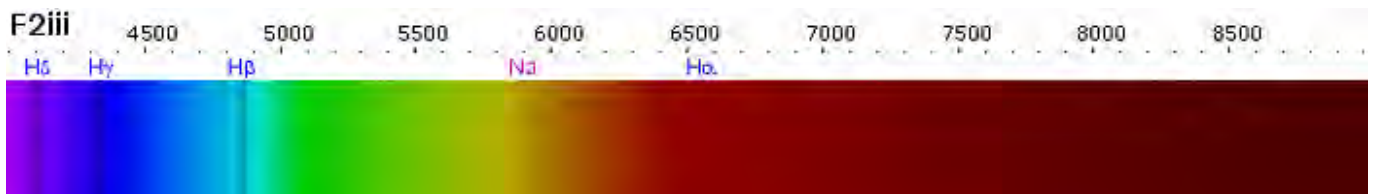
de fortes concentrations de certains métaux (par lévitation due aux forces radiatives) renforçant les raies spectrales de ces éléments chimiques.



*Spectre d'une étoile de type A2i.*

#### 4) Type F

Les étoiles de classe **F** sont encore très lumineuses (température de surface : 7 200 K à 6 000 K), et sont en général des étoiles de la séquence principale, comme upsilon Andromedae A dans la constellation d'Andromède, Canopus, l'Étoile polaire, ou encore Procyon A. Leur spectre est caractérisé par des raies d'hydrogène plus faibles que dans les étoiles A et la présence de raies des métaux neutres et ionisés (Fe I, Fe II, Ti II, Ca I, Ca II, Mg I, etc.).



*Spectre d'une étoile de type F2iii.*

En astronomie, la séquence principale est une bande continue et bien distincte d'étoiles qui apparaissent sur des diagrammes où l'abscisse est l'indice de couleur *B-V* et l'ordonnée la luminosité ou, en sens inverse, la magnitude absolue des étoiles. Ces diagrammes couleur/luminosité sont connus sous le nom de diagramme de Hertzsprung-Russell, d'après leurs co-inventeurs Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russell. Les étoiles figurant dans cette bande sont connues sous le nom d'*étoiles de la série principale*, ou « étoiles naines ». Ainsi, environ 90 % des étoiles observées au-dessus de 0,5  $M_{\odot}$  sont sur la séquence principale. La *séquence principale* désigne aussi le stade principal de l'évolution d'une étoile : c'est pendant cette période que ses caractéristiques correspondent à celles de la séquence principale du diagramme HR et qu'elle s'y trouve effectivement représentée.

#### Histoire

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, on commence à avoir des informations plus fiables sur les types et les distances des étoiles : elles montraient des spectres (à l'époque, leur partie visible) de structures différentes. Annie Jump Cannon et Edward Charles Pickering, au *Harvard College Observatory* (Observatoire de l'université de Harvard) en déduisent alors une méthode de classification, connue sous le nom de Schéma de classification de Harvard, publiée dans les *Annales de Harvard* en 1901. À Potsdam, en 1906, l'astronome danois Ejnar Hertzsprung remarque que les étoiles les plus rouges, classées K et M dans le schéma de Harvard, peuvent être subdivisées en deux groupes bien séparés :

- celles qui sont beaucoup plus brillantes que le Soleil, qu'il nomme « géantes ».
- et celles qui le sont beaucoup moins, les « naines ».

L'année suivante, il commence à étudier des amas stellaires; c'est-à-dire de grands échantillons d'étoiles qui sont toutes à peu près à la même distance. Il publie les premiers diagrammes de luminosité en fonction de la couleur pour ces étoiles. Ces diagrammes présentent une suite claire et continue d'étoiles, qu'il nomme « séquence principale ». À l'université de Princeton, Henry Norris Russell poursuit ses recherches dans la même direction. Il étudie la relation entre classification spectrale et luminosité absolue, la magnitude absolue. À cette fin, il utilise un échantillon d'étoiles de parallaxes fiables, dont beaucoup ont été classifiées à Harvard. Quand il classe les types spectraux de ces étoiles en fonction de leur magnitude absolue, il trouve que les étoiles naines suivent une relation bien définie. Ceci lui permet de prédire la magnitude absolue d'une étoile avec une relative précision. Parmi les étoiles rouges observées par Hertzsprung, les naines suivent aussi la relation couleur-luminosité découverte par Russell. Mais comme les géantes sont bien plus brillantes que les naines, elles ne suivent pas la même relation. Russell propose que les « les étoiles géantes doivent avoir une faible densité, ou une grande luminosité de surface, et inversement pour les étoiles naines ». Le même diagramme montre aussi qu'il y a quelques rares étoiles blanches très peu lumineuses. C'est en 1933 que Bengt Strömberg introduit l'expression « diagramme de Hertzsprung-Russell » pour désigner un diagramme montrant la luminosité en fonction de la classe spectrale. Ce nom renvoie à la mise au point de cette technique, en parallèle par Hertzsprung et Russell, au début du siècle.

#### Séquence principale

Le théorème de Vogt-Russell, mis au point dans les années 1930, établit une relation entre la masse de l'étoile d'une part, le rayon et la luminosité de cette étoile de l'autre. Le diagramme HR utilisant ces mêmes valeurs, on peut déduire sa masse et son rayon à partir de sa position (Cependant, il a été découvert plus tard que le théorème est quelque peu mis en échec si la composition de l'étoile n'est pas uniforme). Un schéma amélioré pour la classification stellaire « MK » a été publié en 1943 par W. W. Morgan et P. C. Keenan. La classification MK donne à chaque étoile un type spectral basé sur la classification de Harvard – et une classe de luminosité. La classification de Harvard avait été mise au point en attribuant les lettres aux types

d'étoiles en fonction de l'importance des diverses raies du spectre de l'hydrogène, avant que la relation entre spectre et température ne soit connue. Si on les range par températures, et en éliminant les doublons, on obtient les types spectraux en fonction des températures décroissantes, avec des couleurs allant du bleu au rouge : la séquence devient O, B, A, F, G, K et M. Les classes de luminosité vont de I à V, en ordre de luminosité décroissante. Les étoiles de luminosité V forment la séquence principale.

### Les étoiles de la séquence principale

Quand une proto-étoile se forme dans l'effondrement d'un nuage moléculaire géant de gaz et de poussière dans le milieu interstellaire local, elle est initialement homogène et se compose d'environ 70 % d'hydrogène et 28 % d'hélium, plus des traces des autres éléments. La masse initiale de l'étoile dépend des conditions locales dans le nuage. Pendant cet effondrement initial, l'étoile naissante dite *précurseur de la séquence principale* engendre de l'énergie par contraction gravitationnelle. Quand elle arrive à une densité convenable, le processus de fusion nucléaire commence à transformer l'hydrogène en hélium dans le cœur, et à produire de l'énergie. Le phénomène de contraction gravitationnelle se dissipant, la densité de l'étoile se stabilise et la fusion nucléaire de l'hydrogène devient le processus dominant de production d'énergie.

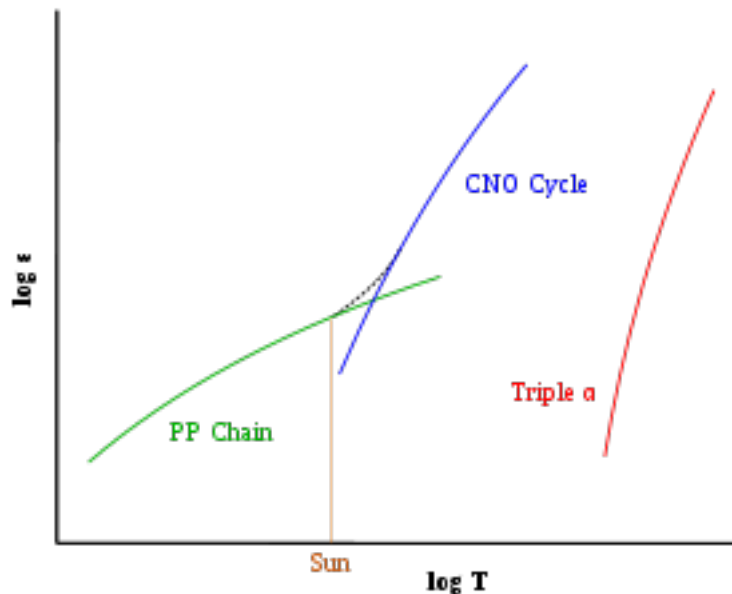
### Équilibre

Une fois qu'une étoile s'est formée, elle crée de l'énergie dans son cœur chaud et dense, par fusion nucléaire des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. Pendant cette période de la vie de l'étoile, elle se trouve sur la séquence principale du diagramme HR, à un point défini principalement par sa masse, avec quelques corrections dues à sa composition chimique et autres. La distribution des masses des étoiles nouvellement formées est décrite empiriquement par la fonction de masse initiale. Toutes les étoiles de la séquence principale ont une région de cœur où l'énergie est produite par fusion nucléaire. La température et la densité de ce cœur sont à des niveaux suffisants pour entretenir la production d'énergie capable de soutenir le poids du reste de l'étoile. Une réduction de la production d'énergie produirait une compression par ce poids, ce qui rétablirait la production d'énergie à son niveau convenable, en raison de l'élévation de la pression et de la température. Inversement, un accroissement trop prononcé de la production d'énergie ferait gonfler l'étoile, diminuant ainsi la pression et la température du cœur. L'étoile forme donc un système auto-régulé en équilibre hydrostatique, stable tout au long de son séjour sur la séquence principale. Toutes les étoiles de la séquence principale sont dans cet état stable, avec la pression thermique du cœur chaud qui équilibre la pression gravitationnelle des couches supérieures, et la plupart de leurs caractéristiques résultent de cet équilibre.

### Répartition initiale

Les caractéristiques de l'étoile déterminent sa place dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, sur une courbe qui s'appelle la *séquence principale standard*. Les astronomes se réfèrent parfois à ce stade comme la séquence principale d'âge zéro (ZAMS, acronyme anglais pour *Zero Age Main Sequence*). La courbe ZAMS peut être calculée en utilisant des modèles informatiques des propriétés stellaires au moment où l'étoile commence la fusion. À partir de ce point, la luminosité et la température de surface des étoiles augmentent en général avec l'âge. La majorité des étoiles sur un diagramme HR typique se trouvent sur la séquence principale. Cette ligne est accentuée parce que le type spectral et la luminosité ne dépendent que de la masse de l'étoile, au moins en première approximation, tant que l'étoile accomplit la fusion de l'hydrogène dans son cœur – et c'est ce que font presque toutes les étoiles pendant la majorité de leur vie *active*. La variation d'intensité lumineuse entre les étoiles les moins chaudes, est assez importante pour différencier les naines (rouges, oranges ou jaunes) des plus grosses. Cependant, pour les étoiles plus chaudes (blanches et bleues), la variation de taille et de luminosité n'est pas directement observable entre les étoiles. Pour cette raison, la nomenclature différencie les étoiles *naines* des *géantes* en se référant à la différence entre les spectres, dont les raies indiquent si l'étoile est sur la séquence principale ou en-dehors. Néanmoins, des étoiles sur la séquence principale, même très chaudes et massives peuvent être appelées parfois naines. D'autres facteurs contribuent à étaler la séquence principale sur le diagramme HR : incertitude sur la distance des étoiles, et présence d'étoiles binaires non résolues qui peuvent modifier les paramètres stellaires observés. Mais même une observation parfaite montrerait une séquence principale élargie, car la masse n'est pas le seul paramètre qui affecte la couleur et/ou la luminosité d'une étoile. Outre les variations en composition chimique (tant par l'abondance initiale que par l'évolution de l'étoile) l'interaction avec un compagnon rapproché, une rotation rapide, ou un champ magnétique peut aussi changer la position d'une étoile légèrement sur le diagramme HR, pour citer quelques facteurs. Par exemple, il y a des étoiles très pauvres en éléments de numéro atomique supérieur à celui de l'hélium (ce sont les étoiles à faible métallicité) qui se trouvent juste en dessous de la séquence principale. Nommées sous-naines, ces étoiles effectuent la fusion de l'hydrogène dans leur cœur, et marquent la limite basse de la séquence principale, en ce qui concerne la composition chimique. Une région presque verticale du diagramme HR, connue sous le nom de bande d'instabilité, est occupée par des étoiles variables pulsantes, notamment les céphéides. Ces étoiles varient en magnitude à intervalles réguliers, leur donnant une apparence pulsante. La bande coupe la partie supérieure de la séquence principale dans la région des classes A et F, entre 1 et 2 masses solaires. Les étoiles variables dans la partie de la zone d'instabilité qui coupe la partie supérieure de la séquence principale sont appelées variables de type Delta Scuti. Les étoiles de la séquence principale de cette région ne subissent que des changements de faible amplitude en magnitude, et cette variation est donc difficile à détecter. D'autres classes d'étoiles de la séquence principale instables, comme les variables de type beta Cephei, à ne pas confondre avec les céphéides, ne sont pas reliées à cette bande d'instabilité.

## Réactions nucléaires



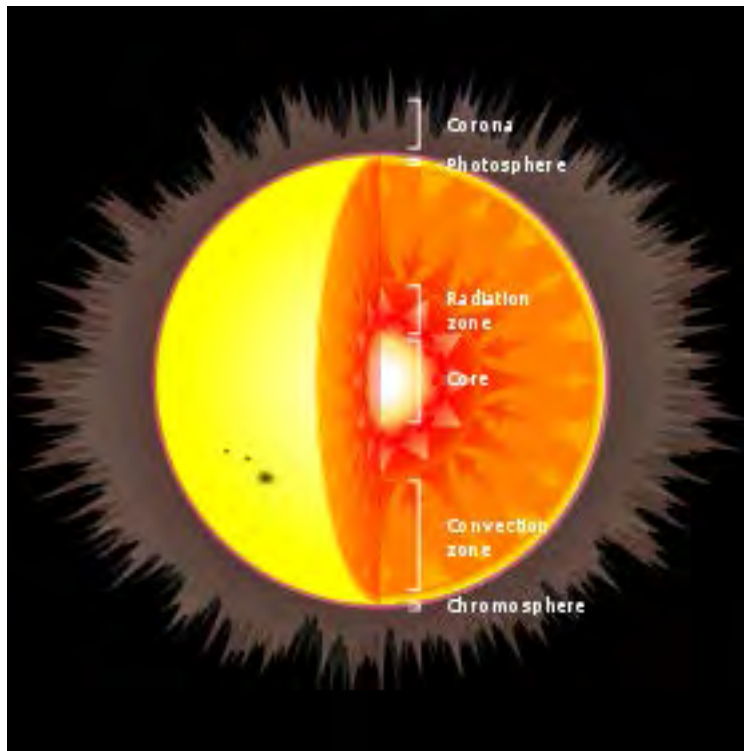
Ce graphique montre la quantité d'énergie ( $\epsilon$ ) produite dans le cœur des étoiles par les processus de fusion en fonction de la température ( $T$ ). La ligne pointillée représente la production combinée par la chaîne pp et le cycle CNO

La chaîne PP et le cycle CNO interviennent quand les étoiles se trouvent sur la séquence principale tandis que la réaction triple  $\alpha$  s'établit après qu'elles en soient sorties et si leurs caractéristiques leur permettent de devenir des étoiles géantes. À la température actuelle du cœur du Soleil, la chaîne pp domine encore. Les étoiles de la séquence principale produisent leur énergie par deux processus de fusion de l'hydrogène, et le taux de production d'énergie par chacun dépend de la température au cœur. Les astronomes divisent alors la séquence principale en parties supérieure et inférieure, en fonction du mécanisme exact de la réaction de fusion nucléaire qui domine : Les étoiles au-dessous de 1,5 masse du Soleil fusionnent surtout les noyaux d'hydrogène par fusion directe et désintégration  $\beta$  des isotopes de l'hydrogène : deutérium et tritium (chaîne pp). L'inférieure est celle où domine la chaîne pp où les isotopes de l'hydrogène proton, deutérium et tritium fusionnent directement, le tritium subissant la désintégration  $\beta$  qui transforme lentement les protons en neutrons pour former les  $\alpha$ . C'est à une température de 18 millions de kelvins que le cycle CNO dépasse en productivité la chaîne pp. Ceci correspond à une étoile d'environ 1,5 masse solaire. Ainsi en gros, les étoiles F ou moins chaudes utilisent la chaîne pp, tandis que les A ou plus chaudes utilisent le cycle CNO. La transition d'un mode de production à l'autre s'effectue sur un intervalle de moins de 1 masse solaire : dans le Soleil, seulement 1,5 % de l'énergie est produite par le cycle CNO. Inversement, les étoiles de plus de 1,8 masse solaire tirent presque toute leur énergie du cycle CNO. Au-dessus de cette masse, la température centrale devient suffisante pour permettre la fusion de protons avec des noyaux de carbone (C), azote (N) et oxygène (O), et une chaîne utilisant ces noyaux comme intermédiaires, restitués après la production d'un noyau d'hélium se met en route. C'est le cycle CNO, qui dépasse rapidement en importance la chaîne proton-proton. La supérieure est celle où domine le cycle CNO, où les protons fusionnent avec des noyaux plus lourds, carbone, azote et oxygène, qui subissent la désintégration  $\beta$  et finalement éjectent un  $\alpha$  pour recommencer le cycle. La limite supérieure observée pour les étoiles de la séquence principale est de 120 à 200 masses solaires. L'explication théorique pour cette limite est que les étoiles qui la dépassent ne peuvent pas rayonner l'énergie assez vite pour rester stables, si bien que toute masse additionnelle sera éjectée par une série de pulsations, jusqu'à ce que l'étoile atteigne une limite stable. La limite inférieure pour une fusion nucléaire entretenue par la chaîne pp est d'environ 0,08 masse solaire. En dessous de cette masse, on trouve des objets sous-stellaires qui n'entretiennent pas la fusion de l'hydrogène, et que l'on appelle naines brunes.

### Rôle de la structure interne

Comme il y a une différence de température entre le cœur et la surface, ou photosphère, l'énergie se propage vers l'extérieur. Les deux modes de transport de l'énergie sont la conduction et la convection. Dans la conduction, l'énergie est principalement transmise par rayonnement à ces températures. Une zone conductive est une zone stable par rapport à la convection, et il y a très peu de mélange de matière. Par contre, dans une zone convective, l'énergie est transportée par le plasma en mouvement : la matière est alternativement chauffée par le cœur et transportée vers l'extérieur, puis refroidie en surface et transportée vers l'intérieur. La convection est un mode plus efficace que la conduction pour le transport de l'énergie, mais elle n'aura lieu que dans des conditions qui créent un fort gradient de température, c'est-à-dire où la température varie rapidement avec la distance au centre, par exemple une valeur élevée de l'opacité thermique qui limiterait la conduction. Dans les étoiles massives (au-dessus de 10 masses solaires), le taux de production d'énergie par le cycle CNO est très sensible à la température, si bien que la fusion est fortement concentrée dans le cœur. Donc il existe un fort gradient de température dans cette région, ce qui résulte en une zone convective assurant un meilleur transport de l'énergie. Ce mélange de matière autour du cœur élimine l'hélium produit de la région fusionnant de l'hydrogène. Ceci permet à une fraction plus importante de l'hydrogène d'être consommée pendant le séjour sur la séquence principale. Par contre, les régions périphériques d'une étoile massive transportent l'énergie par conduction, avec pas ou peu de convection. Pour les étoiles de masse plus faible, ce cœur convectif devient progressivement plus petit, et disparaît pour environ 2 masses solaires. C'est le cas pour des étoiles de masse intermédiaire, comme Sirius, qui transportent l'énergie majoritairement par conduction, avec une petite zone convective près du cœur. En

dessous, les étoiles comme le Soleil sont conductives près du cœur, mais convectives près de la surface : le cœur stable envers la convection s'enrichit en hélium et s'entoure de couches riches en hydrogène mélangées par la convection. En faisant encore décroître la masse, on arrive à des étoiles dont la convection (initiée dans les couches externes) occupe l'ensemble de la masse : les étoiles de très petite masse, peu chaudes (en dessous de 0,4 masse solaire) sont convectives dans leur ensemble. Ainsi l'hélium produit au cœur est réparti dans l'ensemble de l'étoile, produisant une atmosphère relativement uniforme, et une vie proportionnellement plus longue sur la séquence principale.



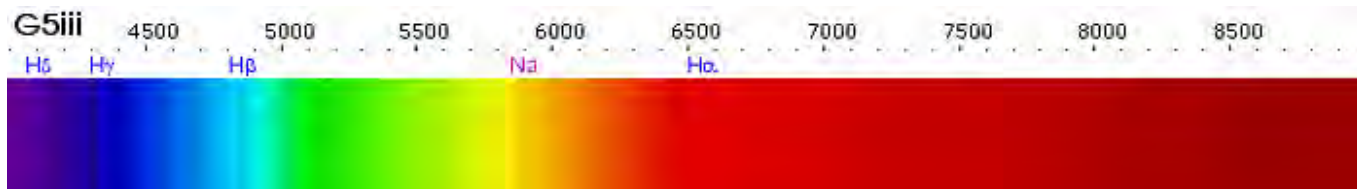
Cette figure montre la coupe d'une étoile analogue au Soleil, montrant sa structure interne

### Luminosité

La relation masse-luminosité exacte dépend de l'efficacité du transport de l'énergie du cœur vers la surface. Une opacité plus élevée a un effet isolant, qui retient plus d'énergie près du cœur, si bien que l'étoile n'a pas besoin de produire autant d'énergie pour maintenir l'équilibre hydrostatique. Inversement, une opacité plus faible entraîne que l'énergie s'échappe plus facilement, et l'étoile doit consommer plus de matière fusible pour maintenir l'équilibre. Il faut remarquer cependant qu'une opacité suffisamment élevée peut déclencher le transport de l'énergie par convection, ce qui change les conditions nécessaires pour maintenir l'équilibre. Dans les étoiles de haute masse sur la séquence principale, l'opacité est dominée par la diffusion par les électrons, qui ne dépend pratiquement pas de la température. Donc la luminosité n'augmente plus que comme le cube de la masse de l'étoile. Pour les étoiles en dessous de 10 masses solaires, l'opacité devient dépendante de la température, ce qui conduit à une variation de la luminosité approchant la 4<sup>e</sup> puissance de la masse de l'étoile. Pour les étoiles de très petite masse, les molécules dans l'atmosphère contribuent aussi à l'opacité. En dessous d'environ 0,5 masse solaire, la luminosité de l'étoile varie comme la masse à la puissance 2,3, ce qui produit une diminution de la pente du graphique de la luminosité en fonction de la masse. Même ces raffinements ne sont cependant qu'une approximation, et la relation masse-luminosité peut dépendre de la composition de l'étoile.

### 5) Type G

Les étoiles de classe **G** (ou naine jaune) sont les mieux connues, pour la seule raison que le Soleil appartient à cette classe. Elles possèdent des raies d'hydrogène encore plus faibles que celles de classe **F** et des raies de métaux ionisés ou neutres. Les raies du Ca II H et K sont très prononcées. La classe G est l'une des dernières (outre K et M, ci-dessous) où l'on distingue (étant donné la température de surface de 5 000 à 6 000 K) des raies moléculaires encore assez fortes (CH, CN, C<sub>2</sub>, OH). Elles doivent d'ailleurs leur nom « G » à la molécule CH qui présente une forte absorption vers 430 nm identifiée par Fraunhofer par la lettre G. Alpha Centauri A est une étoile de classe G.



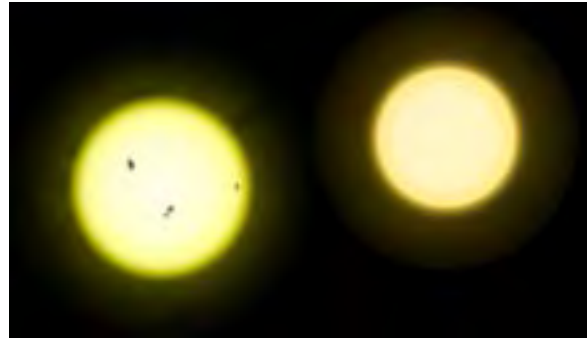
Spectre d'une étoile de type G5iii

Une **étoile jaune de la séquence principale**, appelée communément **naine jaune**, est une **étoile de type G V** (lire « G cinq »), c'est-à-dire une étoile appartenant à la séquence principale (classe de luminosité V) de type spectral G (étoile jaune). Sa masse est comprise entre 0,8 et 1,2 masse solaire. Ce type d'étoile représente environ 10 % des étoiles de la Voie lactée et le Soleil en est un exemple typique.

### Caractéristiques

Les naines jaunes transforment dans leur cœur de l'hydrogène en hélium, par un processus de fusion nucléaire. Le mot « naine » utilisé pour désigner ces étoiles fait référence à leur classe de luminosité V. Leur température de surface est comprise entre 5 000 et 6 000 °C environ, et leur couleur jaune vif, presque blanc. La durée de vie d'une telle étoile est d'environ 10 milliards d'années. À la fin de leur vie, ces étoiles se mettent à grossir démesurément, pour devenir des géantes rouges (comme c'est le cas de Alpha Tauri par exemple). Lorsque ceci arrivera au Soleil, il s'étendra jusqu'à engloutir entièrement Mercure, Vénus et la Terre. Plus tard il s'effondrera à nouveau sur lui-même, laissant derrière lui une bonne partie des gaz le composant, pour former une naine blanche entourée d'une nébuleuse planétaire.

### Naines jaunes remarquables

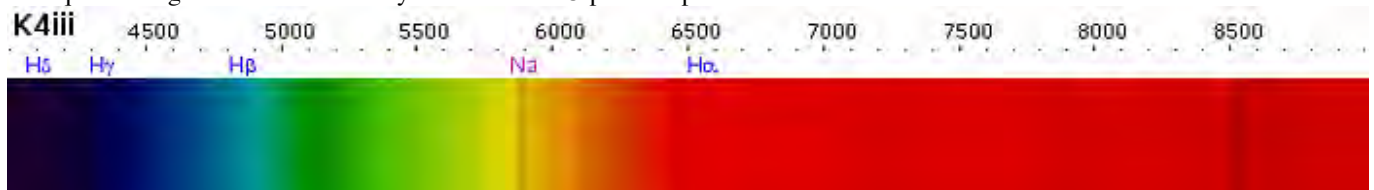


*Le Soleil (à gauche) comparé à Tau Ceti (à droite)*

Le Soleil est l'exemple le plus connu de naine jaune. Kepler-22 abrite Kepler-22b, la première exoplanète découverte orbitant dans la zone habitable de son étoile. Environ 10 % des étoiles de la Voie lactée sont des naines jaunes. Parmi les plus notables d'entre elles, on peut citer Alpha Centauri A, Tau Ceti, et 51 Pegasi.

### 6) Type K

Les étoiles de classe **K** (ou naine orange) sont des étoiles de couleur orange, légèrement moins chaudes que le Soleil (température de surface : 4 000 K). Certaines, comme Antarès, sont des géantes rouges alors que d'autres, telle que alpha Centauri B, sont des étoiles de la séquence principale. Elles possèdent des raies d'hydrogène très faibles, voire inexistantes, et surtout des raies de métaux neutres. Quelques composés moléculaires y sont visibles : CH, CN, monoxyde de carbone CO, ainsi que les larges bandes de monoxyde de titane TiO pour les plus froides.



*Spectre d'une étoile de type K4iii.*

En astronomie, une **étoile orange de la séquence principale**, appelée communément **naine orange**, est une **étoile de type K V** (lire « K cinq »), c'est-à-dire une étoile appartenant à la séquence principale (classe de luminosité V) de type spectral K (étoile orange). Elles se situent entre les naines jaunes (analogues au Soleil) et les naines rouges. Elles ont des masses de l'ordre de 0,5 à 0,8 fois celle du Soleil et des températures de surface comprises entre 3900 et 5 200 K.

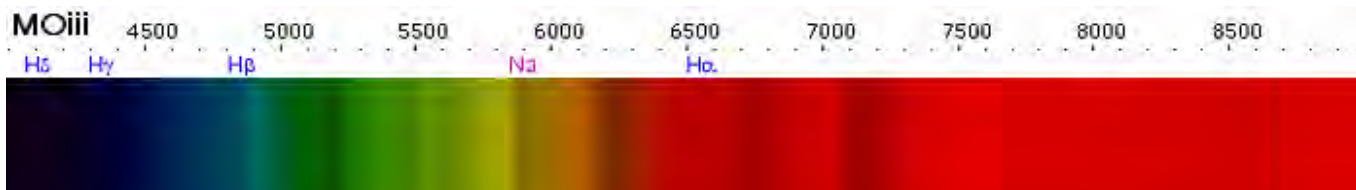
### Naines orange remarquables

- 36 Ophiuchi : Étoile double composée de deux naines orange
- 61 Cygni
- 70 Ophiuchi : Étoile double composée d'une naine jaune et d'une naine orange
- Alpha Centauri B
- Epsilon Eridani
- Epsilon Indi
- Eta Cassiopeiae
- Gliese 667
- HD 69830
- Sigma Draconis
- Sigma Ursae Majoris

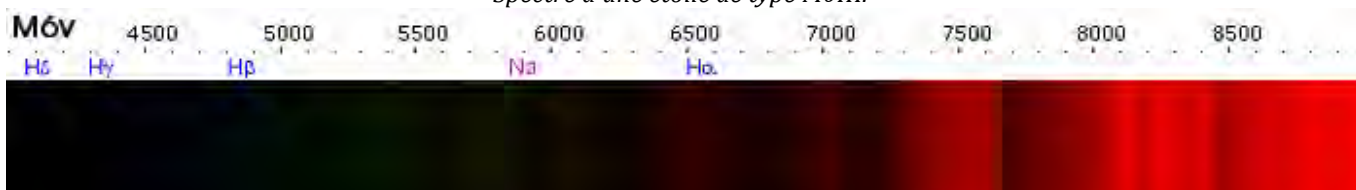


## 7) Type M

Les étoiles de classe M sont les plus nombreuses et possèdent une température de surface de 2 500 à 3 900 K. Toutes les naines rouges, soit 80 % des étoiles existantes, sont de ce type, comme par exemple Proxima Centauri. Bételgeuse (géante rouge), de même que les étoiles variables de type Mira sont également de ce type. Leur spectre montre des raies correspondant à des molécules (CN, CH, CO, TiO, VO, MgH, H<sub>2</sub>, etc.) et des métaux neutres, les raies du monoxyde de titane TiO peuvent être très intenses et les raies de l'hydrogène en sont généralement absentes.



Spectre d'une étoile de type M0III.



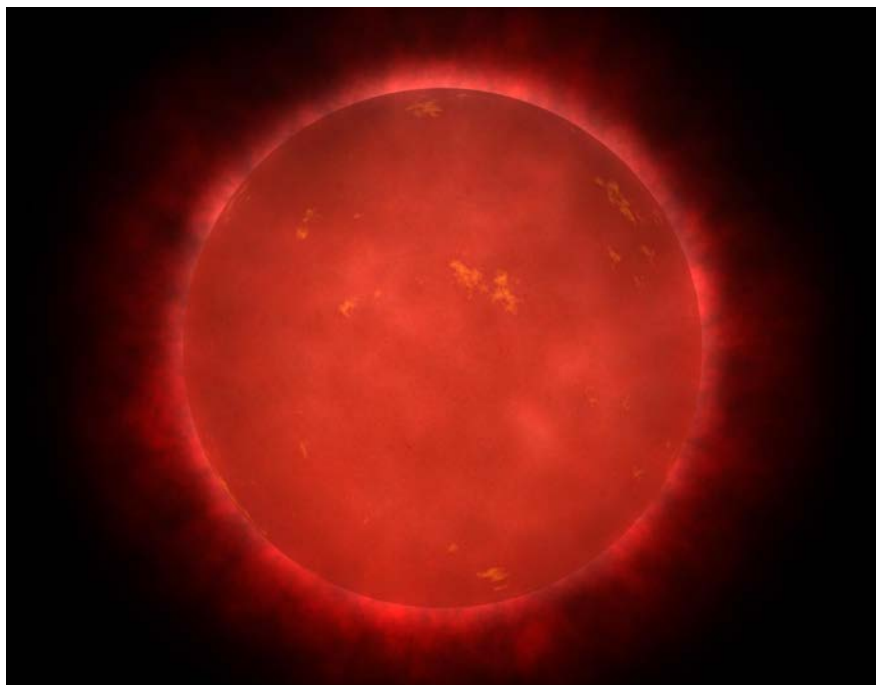
Spectre d'une étoile de type M6V.

Classes	O	B	A	F	G	K	M
<b>Etoiles</b>	Alnitak A Suhail al Muhlif Naos	Rigel Achernar Hadar Spica, l'Epi Mimosa Régulus Acrux 1 Adhara Shaula Bellatrix Elnath Alnilam Al Na'ir Kaus Australis Alkaïd Alpha Pavonis Murzim Saïph Nunki Alpheratz Acrux B Algol Epsilon Centauri Alpha Lupi Dschubba Eta Centauri Girtab Gamma Cassiopea Aludra Kappa Velorum	Sirius Véga Altaïr Fomalhaut Deneb Miaplacidus Alioth Alhena Castor A Delta Velorum A Ras Alhague Denebola Alphecca A Aspidiske Mizar A Merak Phecda Alderamin	Canopus Procyon Mirfak Wezen Sargas Polaris Sadir Caph	Le Soleil Alpha Centauri Capella A Capella B	Arcturus Aldébaran Pollux Alpha Centauri B Dubhe A Atria Alphard Hamal Deneb Kaitos Menkent Kochab Lambda Velorum Eltanin Schedar Almach A Algieba A Wei Ankaa Enif Avior A Gienah	Bételgeuse Antarès Gacrux Mirach Beta Gruis Scheat
<b>Types</b>	<b>O</b>	(> 25,000 K) de couleur bleue					
	<b>B</b>	(25,000 à 10,000 K) de couleur bleue-blanche					
	<b>A</b>	(10,000 à 7,500 K) blanches					
	<b>F</b>	(6,000 à 7,500 K) jaunes-blanches					
	<b>G</b>	(6,000 à 5,000 K) jaunes					
	<b>K</b>	(5,000 à 3,500 K) jaunes-orange					
	<b>M</b>	(< 3,500 K) rouges					

Liste des 90 étoiles les plus brillantes (magnitude apparente) visibles depuis la terre à l'œil nu, selon leurs couleurs

**Pour voir cette même liste des étoiles les plus brillantes visibles depuis la terre et classée par ordre de magnitudes apparentes décroissantes, voir en Annexe II.**

## Naines rouges



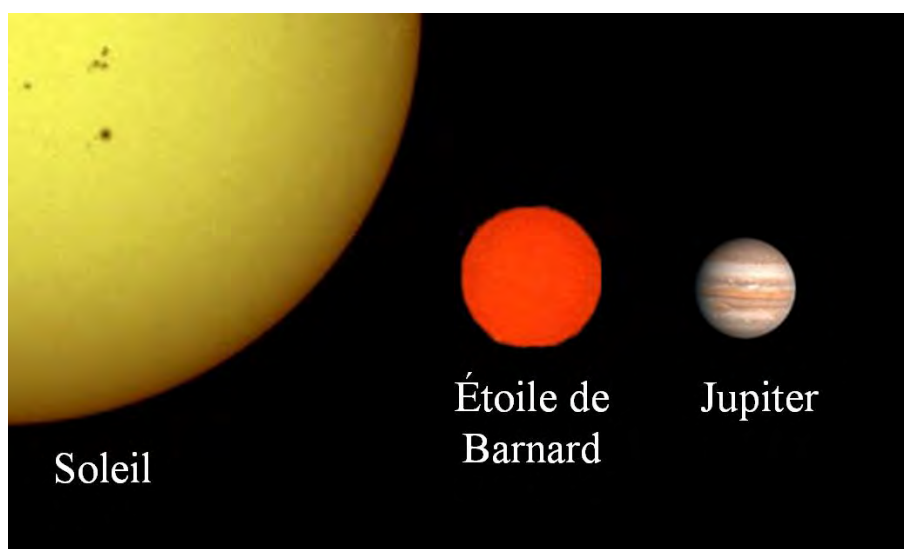
*Représentation d'une naine rouge*

En astronomie, une étoile rouge de la séquence principale, appelée communément naine rouge, est une étoile de type spectral M V (lire « M cinq »), c'est-à-dire une étoile appartenant à la séquence principale (classe de luminosité V) de type spectral M (étoile rouge). Les étoiles K dites tardives (naines oranges les plus froides) sont parfois incluses parmi les naines rouges. Ces étoiles sont peu massives et de température peu élevée. Ayant une masse comprise entre 0,075 et 0,4 masse solaire et une température inférieure à 4 000 K en surface, ce sont des étoiles peu lumineuses, les plus grosses d'entre elles émettant de l'ordre de 10 % de la luminosité solaire. En dessous de 0,075 masse solaire, on a affaire à un objet substellaire, naine brune ou géante gazeuse. La limite entre étoile naine rouge et naine brune de type spectral M est généralement au niveau du type M 6.5. Les naines rouges seraient de loin les étoiles les plus nombreuses de l'Univers. Les modèles stellaires actuels les décrivent comme entièrement convectives, c'est-à-dire que l'hydrogène est constamment brassé par convection dans l'ensemble de l'étoile de sorte que l'hélium issu de la réaction proton-proton au cœur de l'astre ne peut s'y accumuler. Les naines rouges pourraient ainsi briller de façon relativement constante pendant des centaines de milliards d'années, c'est-à-dire plusieurs dizaines de fois l'âge de l'Univers, ce qui signifie que toutes les naines rouges actuelles n'en seraient qu'au début de leur existence.

### Découverte

Les premières naines rouges ont été découvertes au XX<sup>e</sup> siècle, respectivement en 1915 pour Proxima du Centaure et en 1916 pour l'étoile de Barnard par l'astronome américain Edward Emerson Barnard.

### Caractéristiques



*L'étoile de Barnard comparée au Soleil et à Jupiter*

## Masse et rayonnement

Elles sont de type spectral « K » ou « M ». Elles ont une masse comprise entre 8 et 40 % celle du Soleil (voire 60 % au maximum), et une température de surface plus basse que 3 500 K. Leur luminosité peut être très variable mais est grandement inférieure à celle du Soleil. Celle-ci peut aller de moins de 0,001 % de celle du Soleil jusqu'à 3 ou 4 % au maximum pour les plus volumineuses. Ce sont des étoiles entrées dans la séquence principale, très peu massives, voire à la limite entre un objet substellaire (naine brune) et une étoile. En raison de leur faible masse, leur température centrale n'est pas très élevée. Il faut faire la différence avec un autre type d'étoiles qui pourraient être appelées aussi *naines rouges* : des cadavres stellaires d'étoiles peu massives, des naines blanches dont la lumière a décliné au fil des milliards d'années. Il semblerait que les naines blanches ne se soient pas refroidies suffisamment pour rayonner dans le rouge, et ainsi devenir des « naines rouges » et a fortiori des « naines noires ».

## Cycle de vie

Elle ne permet que des réactions de fusion nucléaire du type chaîne proton-proton et la conversion de l'hydrogène en hélium s'y effectue à un rythme très lent. Par conséquent, leurs réserves en hydrogène s'épuisent lentement. Ces étoiles possèdent donc une durée de vie bien plus longue que le Soleil, estimée entre quelques dizaines et 1 000 milliards d'années. L'énergie produite au centre des naines rouges est transportée vers la surface uniquement par convection en raison de l'opacité de leur milieu intérieur. À la différence du Soleil et d'autres étoiles plus massives, l'hélium ne s'accumule donc pas au centre de l'étoile, mais circule à l'intérieur de celle-ci. Elles peuvent donc consommer une plus grande proportion d'hydrogène. À cause de leur faible température (du fait également de leur petite masse), les naines rouges n'arrivent jamais au stade où les autres étoiles commencent la fusion de l'hélium et ne deviennent donc jamais des géantes rouges. Elles se contractent et s'échauffent lentement jusqu'à ce que tout leur hydrogène soit consommé. Dans tous les cas, il ne s'est pas encore passé suffisamment de temps depuis le Big Bang pour que quiconque ait pu observer la séquence terminale d'une naine rouge. Un mystère encore non résolu à ce jour est l'absence de naines rouges dépourvues de métaux (en astronomie un métal est un élément plus lourd que l'hydrogène et l'hélium). En effet la théorie du Big Bang prédit que les étoiles de la première génération ne devraient contenir en leur sein que de l'hydrogène, de l'hélium ainsi que du lithium à l'état de trace. Si cette première génération d'étoiles comportait des naines rouges, on devrait en observer aujourd'hui, mais ce n'est pas le cas. L'explication privilégiée actuellement est que seules des étoiles très massives et appartenant à la population III ont pu se former en l'absence d'éléments lourds dans l'univers. Ces étoiles, d'une durée de vie très brève, ont relâché dans le milieu interstellaire des éléments lourds qui ont permis par la suite la formation de naines rouges.

## Présence dans la Voie lactée

Les naines rouges sont probablement les étoiles les plus nombreuses de l'Univers. Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous, ou l'étoile de Barnard (2<sup>e</sup> système à moins de 6 années-lumière, solitaire comme le Soleil) sont des naines rouges, de même que vingt autres parmi les trente étoiles les plus proches, comme l'étoile Wolf 359 par exemple, ou encore la composante principale de WISE 0720-0846 (dite l'étoile de Scholz) découvert en 2013. Elles représenteraient 80 à 85 % des étoiles de notre galaxie, ce qui correspondrait environ à « 160 milliards sur les 200 milliards d'étoiles dans la Voie lactée ».

## Naines brunes



Vue d'artiste d'une naine brune de type « L ».

Vue d'artiste d'une naine brune de type « T ».

Vue d'artiste d'une naine brune de type « Y ».

## Classe L

Les astres de la nouvelle classe L sont de couleur rouge très foncé et illuminent surtout dans l'infrarouge. Leurs gaz sont assez froids pour que les hydrures de métaux et les métaux alcalins prédominent dans leur spectre. Une naine L est un astre de type spectral L, de masse substellaire (naine brune ou de masse planétaire). Elle est plus froide qu'une naine rouge (type spectral M) et plus chaude qu'une naine T, et possède une température effective allant de 1300 à 2000 K environ. La classification spectrale repose principalement sur le spectre rouge à proche infrarouge (0,65 à 1  $\mu\text{m}$ ), avec la disparition des bandes spectrales des oxydes métalliques (de titane et de vanadium) typique des naines M au profit de d'hydrures de métaux (fer et chrome), l'élargissement du doublet du potassium à 766 et 770 nm, et l'apparition de raies spectrales de métaux alcalins

(principalement rubidium et césium). Contrairement au type spectral T, les bandes de l'ammoniac ne sont pas prédominantes dans le spectre infrarouge proche (1 à 2,5  $\mu\text{m}$ ). Cette extension à classification de Morgan et Keenan a été proposée à la fin des années 1990.

### Classe T

Les astres de classe T sont soit des étoiles à peine assez massives pour pouvoir effectuer des réactions de fusion nucléaire, soit des naines brunes (quasi-étoiles dépourvues de fusion nucléaire). Elles émettent peu ou pas de lumière visible, mais seulement des infrarouges. Leur température de surface peut être aussi basse que 600 °C, ce qui permet la formation de molécules complexes, comme le confirme l'observation de raies de méthane  $\text{CH}_4$  dans le spectre de certaines de ces étoiles. Une naine brune est, d'après la définition provisoire adoptée, en 2003, par l'Union astronomique internationale, un objet substellaire dont la vraie masse est inférieure à la masse minimale nécessaire à la fusion thermonucléaire de l'hydrogène mais supérieure à celle nécessaire à la fusion thermonucléaire du deutérium<sup>1</sup>, correspondant à une masse située entre 13 et 75 masses joviennes (masse de Jupiter). En d'autres termes, il s'agit d'un objet insuffisamment massif pour être considéré comme une étoile mais plus massif qu'une planète géante. Il y a un accord sur la limite supérieure en deçà de laquelle une naine brune ne peut entretenir la réaction de fusion nucléaire de l'hydrogène : moins de 0,07 masse solaire pour une composition chimique solaire. La limite inférieure quant à elle ne fait pas unanimité; un critère couramment retenu est la capacité à fusionner le deutérium, soit environ 13 masses  $M_J$ . La classification spectrale des naines brunes a motivé une extension de celle des étoiles : elles ont pour type spectral M, L, T voire Y pour les plus froides. L'énergie lumineuse d'une naine brune est quasi-exclusivement tirée de l'énergie potentielle gravitationnelle, transformée en énergie interne par contraction, contrairement à une étoile de la séquence principale qui tire son énergie des réactions nucléaires. La contraction s'achève lorsque se produit la dégénérescence de la matière, la naine brune a alors un diamètre de l'ordre de celui de la planète Jupiter. En l'absence d'autre source d'énergie, une naine brune se refroidit au cours de son existence, et parcourt les types spectraux M, L et T; ceci diffère d'une étoile de la séquence principale dont la température effective et le type spectral restent sensiblement constants. Bien que leur existence fût postulée dès les années 1960, c'est seulement depuis le milieu des années 1990 qu'on a pu établir leur existence.

### Histoire

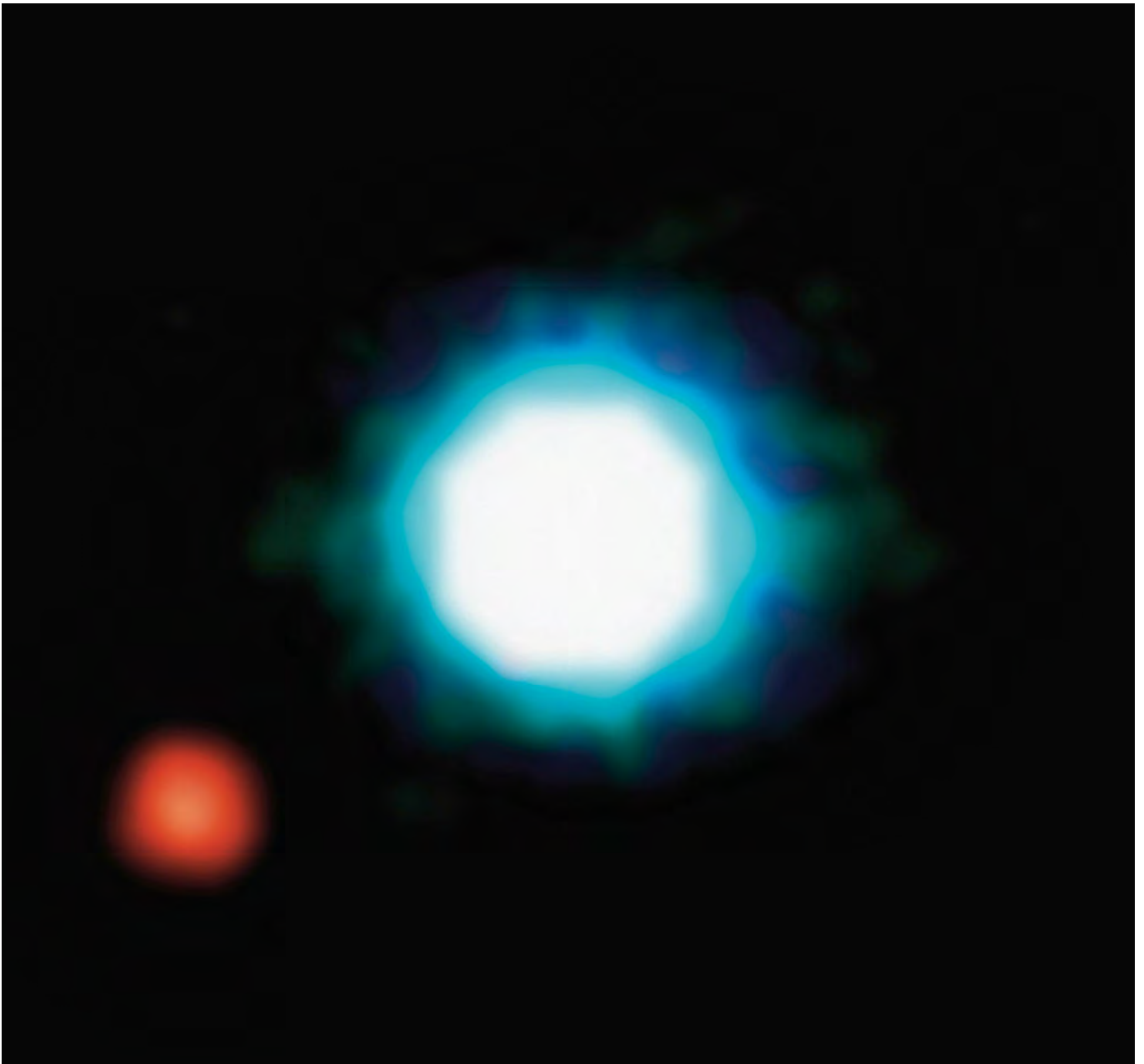
Dès les années 1960, on postule l'existence de corps de masse trop faible pour entretenir la combustion stable de l'hydrogène (Kumar 1963). Puisque les naines brunes n'émettent qu'un faible rayonnement, principalement dans l'infrarouge (un domaine de longueur d'onde pour lequel les détecteurs sont restés longtemps très peu sensibles), elles n'ont pas été détectées avant de nombreuses années. C'est en 1995 qu'on a observé pour la première fois des naines brunes. D'abord, Teide 1, un objet de 40-60 fois la masse de Jupiter a été découvert dans les Pléiades. Quelques mois plus tard, la découverte de Gliese 229B, une naine brune de 20-50 fois la masse de Jupiter, est annoncée. Cette dernière se trouve en orbite autour d'une étoile de faible masse, Gliese 229.

### Caractéristiques

Les naines brunes ont une masse qui se situe entre les planètes les plus massives et les étoiles les moins massives. En raison de cette masse trop faible, la température et la pression du cœur ne sont pas suffisantes pour maintenir les réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène. Une naine brune peut, à une certaine époque, avoir réussi à démarrer des réactions de fusion, mais n'avoir jamais atteint un état stable et avoir fini par « s'éteindre ». C'est en quelque sorte une étoile avortée. Une fois la courte phase de réactions nucléaires terminée, la chaleur émise par une naine brune provient uniquement de sa contraction gravitationnelle *via* le mécanisme de Kelvin-Helmholtz. En général, on considère qu'une naine brune doit avoir une masse supérieure à 13 fois celle de Jupiter, ce qui est la masse inférieure à laquelle un astre peut fusionner du deutérium, et inférieure à 0,07 masse solaire, masse au-dessus de laquelle les réactions de fusion (de l'hydrogène) peuvent s'enclencher durablement. Alternativement, il a été proposé qu'une naine brune se distingue d'une planète géante gazeuse par son mode de formation. En effet, la plupart des naines brunes flottent seules dans l'espace. Cela confirme qu'elles se forment comme des étoiles, c'est-à-dire de la fragmentation d'un nuage moléculaire, et non comme des planètes, qui naissent plutôt dans l'effondrement local d'un disque présent autour d'une étoile. La découverte d'une naine brune entourée d'un disque protoplanétaire laisse à supposer que la formation des planètes, sous-produits naturels de la formation stellaire, est possible aussi autour des naines brunes. On qualifie une naine brune de *froide* à 1 000°C, et de *chaude* à partir de 2 000°C. La chaleur émise par une naine brune étant le résidu de sa formation, une jeune naine brune sera plutôt chaude, puis se refroidira lentement au cours de son existence. D'ailleurs, les jeunes naines brunes ont des températures de surface semblables à celles des étoiles peu massives et plus âgées et en sont presque indifférenciables. Ce n'est qu'après quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années (dépendant de la masse de la naine brune) que celles-ci atteignent les températures des étoiles les plus froides (environ 1 800 K). Quand les naines brunes atteignent des âges de plusieurs milliards d'années, elles ont des températures de surface allant de 400 K à 1 000 K, les rendant peu différentes à ce niveau de certaines géantes gazeuses supermassives.

### Exoplanète

En 2004, il est découvert la première exoplanète orbitant autour d'une naine brune à environ 170 années-lumière. Il s'agit de la planète 2M1207b orbitant autour de 2M1207. La masse de ce corps est estimée entre 3 et 10 masses de Jupiter.



*Image composite montrant une exoplanète (la zone rouge en bas à gauche), en rotation autour de 2M1207, une naine brune (au centre). 2M1207b est la première exoplanète directement photographiée, et la première découverte près d'une naine brune. La photo a été prise pour la première fois en 2004. Son caractère de planète et ses caractéristiques ont été confirmés en 2005 après une année d'observation. 2M1207b est une géante gazeuse cinq fois plus grosse que Jupiter. Elle est deux fois plus éloignée de son étoile que Neptune l'est du soleil. Ce système est à une distance de 230 années-lumière de la terre dans la constellation de l'Hydre. Photo basée sur trois expositions dans l'infrarouge proche (bandes H, K et L) avec le télescope de 8,2 m « Yepun » de l'observatoire de l'ESO sur le Cerro Paranal.*

### **Les différents types de naines brunes**

Les naines brunes se subdivisent en plusieurs types spectraux :

- Naines M : Type spectral des naines brunes les plus chaudes et des étoiles de très faible masse, les naines rouges.
- Naines L : On connaît quelques centaines de naines L, celles-ci présentent des signatures spectroscopiques de grains de poussière dans leur atmosphère et semblent y avoir un *cycle de la pluie* avec leurs grains de poussière (oxydes métalliques).
- Naines T : Leurs températures de surface sont inférieures à 1 200 K. On connaît environ 60 naines T (novembre 2005) dont la plupart sont dans le voisinage immédiat du Soleil. Les naines T possèdent de fortes signatures spectroscopiques du méthane et du monoxyde de carbone. La plus froide naine T connue a une température de 750 K (~480°C).
- Naines Y : Celles-ci présentent une température (de surface) de l'ordre de 500 K (~230°C) et les signatures spectroscopiques de l'ammoniac. La première naine Y (CFBDS0059) a été observée en 2008 à l'aide du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT). La naine brune Y la plus froide ayant été découverte, WISE 1828+2650, possède une température de surface d'environ 300 K.

### Naines brunes remarquables

- Teide 1, la première naine brune observée en 1995.
- WISE 0855–0714, située à 7,2 années-lumière du Soleil, aurait la température de surface la plus basse connue (entre -48 et -13°C).
- Gliese 229 B, beaucoup moins massive, qui a été découverte peu de temps après, en 1995.
- 2M1207, qui a une planète en orbite.
- Gliese 22 C
- HR 5568 D
- CFBDSIR 1458+10A et CFBDSIR 1458+10B : situées à 75 années-lumière de notre système, découvertes par le travail d'astronomes internationaux sur les télescopes Keck, CFHT et le *Very Large Telescope* (VLT), l'une des deux possède une température très basse : 100 °C.

### Classe Y

Les naines brunes de type spectral Y se trouvent à l'extrémité de l'échelle, elles sont plus froides que celles de la classe spectrale T et ont des spectres qualitativement différents d'eux. Parmi les naines brunes remarquables de cette classe, on peut citer WISE 0855–0714 qui est une des plus froide connue avec une température de surface estimée entre 225 et 260 K (-48 à -13 °C).

### Classe R, N, S et C

Les étoiles de classe **R**, **N**, **S** et **C** sont les étoiles carbonées, des étoiles géantes ayant une forte proportion en carbone. Elles correspondent à une classification en parallèle avec les étoiles de classe **G** à **M** et ont été récemment unifiées en une unique classe **C**. Les étoiles de classe **S** se situent à mi-chemin entre les étoiles carbonées et celles de classe **M** et possèdent dans leur spectre des raies d'oxyde de zinc ZnO plutôt que de monoxyde de titane TiO. Elles ont une abondance en oxygène et carbone presque identique, les deux éléments se trouvant presque exclusivement sous forme de monoxyde de carbone CO. Quand une étoile est assez froide pour que du CO puisse se former, celle-ci consomme un maximum d'oxygène et de carbone et il ne reste plus que l'élément en excès : l'oxygène dans les étoiles de la séquence principale, le carbone dans les étoiles carbonées et à peu près rien dans les étoiles de classe **S**.

Classe	T° max (K)	T° min	couleur	raies d'absorption
R	3 000		rouge	composés carboniques
N	2 000		rouge	composés carboniques
S	3 000	2 000	rouge	oxyde de zirconium

En réalité, il existe une continuité entre les étoiles de la séquence principale et les étoiles carbonées qui demanderait une autre dimension dans la classification pour être correctement traitée.

### Particularité spectrale

Une nomenclature secondaire, en minuscule, est ajoutée au type spectral pour indiquer une particularité du spectre.

Code	Particularité spectrale des étoiles
:	Débordement et/ou incertitude de la valeur spectrale
...	Existence d'une particularité indéfinie
!	Particularité spéciale
comp	Spectre composite
e	Présence de raie d'émission
[e]	Présence de raie d'émission "interdite"
er	Centre de raie d'émission "inversé" plus faible que les bordures
ep	Raie d'émission particulière.
eq	Raie d'émission ayant le profil de P Cygni
ev	Émission spectrale présentant une variabilité
f	Raie d'émission <b>N III</b> et <b>He II</b>
f+	Raie d'émission <b>Si IV</b> additionnelle aux raies <b>He II</b> et <b>N III</b>
f*	Émission <b>N IV</b> plus forte que <b>N III</b>

<b>(f)</b>	Raie d'émission <b>He</b> faible
<b>((f))</b>	Pas d'émission d' <b>He</b>
<b>He wk</b>	Faible raie <b>He</b>
<b>k</b>	Spectre avec des caractéristiques d'absorption interstellaire
<b>m</b>	Présence de raie métallique
<b>n</b>	Absorption large (« diffuse ») causée par une rotation
<b>nn</b>	Absorption très large causée par une rotation très rapide
<b>neb</b>	Mélangé au spectre d'une nébuleuse
<b>p</b>	Particularité du spectre indéfinie, étoile chimiquement particulière
<b>pq</b>	Spectre particulier, semblable au spectre d'une nova
<b>q</b>	Présence d'un décalage vers le rouge ou vers le bleu
<b>s</b>	Raies d'absorption étroites aux contours nets
<b>ss</b>	Raies très étroites
<b>sh</b>	Variable de type Gamma Cassiopeiae (« <i>Shell star</i> »)
<b>v</b>	Spectre variable (noté aussi « var »)
<b>w</b>	Raies ténues (noté aussi « wl » ou « wk »)
<b>d Del</b>	Géante de type A ou F avec de faibles raies H et K du calcium, comme dans le cas de $\delta$ Delphini
<b>d Sct</b>	Étoile de type A ou F avec un spectre semblable à celui de la variable à courte période $\delta$ Scuti
<b>Code</b>	<b>Spectre présentant des caractéristiques métalliques</b>
<b>Ba</b>	Raie du baryum anormalement forte
<b>Ca</b>	Raie du calcium anormalement forte
<b>Cr</b>	Raie du chrome anormalement forte
<b>Eu</b>	Raie de l'euporium anormalement forte
<b>He</b>	Raie de l'hélium anormalement forte
<b>Hg</b>	Raie du mercure anormalement forte
<b>Mn</b>	Raie du manganèse anormalement forte
<b>Si</b>	Raie du silicium anormalement forte
<b>Sr</b>	Raie du strontium anormalement forte
<b>Code</b>	<b>Spectre particulier aux naines blanches</b>
<b>:</b>	Classification incertaine
<b>P</b>	Naine blanche avec une polarisation détectable
<b>E</b>	Présence de raie d'émission
<b>H</b>	Naine blanche magnétique sans polarisation détectable
<b>V</b>	Variable
<b>PEC</b>	Existence de particularité spectrale

Par exemple, epsilon Ursae Majoris a un spectre de type A0pCr, indiquant une classification générale A0 avec un spectre particulier à une forte raie d'émission du chrome. Il existe différentes classes d'étoiles chimiquement particulières, où les raies spectrales de nombreux éléments apparaissent anormalement intenses ou, au contraire, anormalement ténues.

# L'évolution stellaire

L'évolution d'une étoile, ou **évolution stellaire**, désigne l'ensemble des phénomènes allant de la formation à la « mort » d'une étoile. Elle peut être décomposée en plusieurs phases principales dont la formation de l'étoile, son séjour sur la séquence principale et sa phase finale. Durant sa *vie*, une étoile émet des particules et des rayonnements électromagnétiques (dont une partie sous forme de rayonnements visibles) grâce à l'énergie dégagée par les réactions de fusion nucléaire qui se produisent dans les zones internes de l'étoile. La plus grande partie de l'existence de l'étoile se passe sur la séquence principale, où elle brûle de l'hydrogène pour former de l'hélium. Une fois le cœur de l'étoile appauvri en hydrogène, elle quitte la séquence principale pour évoluer vers son stade ultime d'évolution, laissant un objet compact : une naine blanche, une étoile à neutrons ou encore un trou noir.

## La formation

Les étoiles se forment à partir de nuages interstellaires qui se contractent sous l'effet de la gravitation. Lorsque l'étoile en formation est suffisamment dense, la pression qui règne au cœur déclenche les premières réactions de fusion : on parle alors de proto-étoiles. Ces proto-étoiles naissent généralement dans des nuages capables de former des centaines d'étoiles en même temps (voir par exemple la nébuleuse d'Orion). En fonction de leur masse et de leur état évolutif, les étoiles peuvent être classées en familles dans un Diagramme de Hertzsprung-Russell : la séquence principale, les branches des géantes, les étoiles de Wolf-Rayet, la branche des naines blanches, etc.

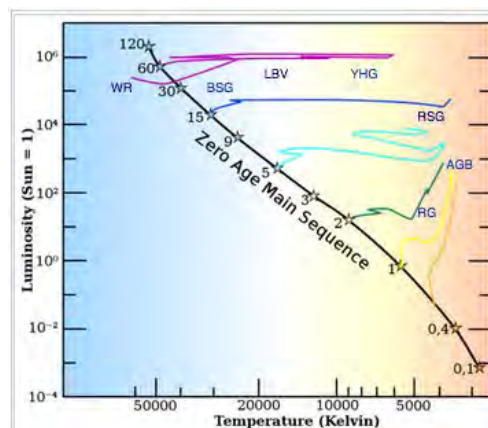
## La séquence principale

Durant la phase de séquence principale, l'étoile est en équilibre hydrostatique, elle subit deux forces qui s'opposent et la maintiennent en équilibre :

- d'une part les réactions thermonucléaires qui ont lieu au cœur de l'étoile, qui exercent une pression radiative qui tend à la faire augmenter de volume, ce qui entraîne une diminution de la température de l'étoile;
- d'autre part les forces de gravité, qui ont tendance à la faire se contracter et donc à réaugmenter la température de l'étoile.

Ces deux forces en équilibre, maintiennent les réactions nucléaires au centre de l'étoile et préviennent tout emballement du cœur de l'étoile. Lorsque le cœur de l'étoile atteint une température de l'ordre d'un million de degrés, il devient le siège de réactions thermonucléaires (fusion du deutérium, du lithium et du béryllium). Vers 7 à 8 millions de degrés, la température est assez élevée pour que les noyaux d'hydrogène du plasma, les plus communs, commencent à fusionner pour donner essentiellement de l'hélium  $^4\text{He}$ , suivant une réaction de fusion nucléaire appelée cycle proton-proton, de rendement global égal à  $64\,000\text{ GJ.kg}^{-1}$  (par kg d'hydrogène). Si la température dépasse 18 millions de degrés, une autre chaîne de réactions devient prédominante : le cycle carbone-azote-oxygène, ou cycle CNO, dont l'efficacité est beaucoup plus dépendante de la température que le cycle proton-proton. Dans le Soleil, 2,5 % de l'énergie sont générés par ce cycle. Mais dans les étoiles plus massives, la prédominance du cycle CNO a des conséquences majeures sur leur structure. Parce que les conditions de température et de pression qui permettent la fusion de l'hydrogène ne se rencontrent que dans le cœur des étoiles, et parce qu'il n'y a pas de convection entre ce cœur et l'enveloppe de l'étoile (pour apporter du combustible neuf au cœur), il se produit un enrichissement du cœur en produits de fusion (l'hélium), qui va ralentir les réactions de fusions. Ces produits de fusion ne sont pas des déchets car ils serviront de combustible nucléaire ultérieurement. En fait, dans le cas du Soleil, environ 10 % de sa masse d'hydrogène seulement fusionne en hélium au cours de la séquence principale. Sachant que la luminosité du Soleil est de  $3,9 \times 10^{26}\text{ W}$  et que sa masse est de  $1,99 \times 10^{30}\text{ kg}$ , on peut en déduire que la durée de vie d'une étoile comme le Soleil est d'environ 10 milliards d'années sur la séquence principale. Cette durée de vie dépend toutefois fortement des réactions nucléaires qui se déroulent au sein de l'étoile : les étoiles massives, qui contiennent beaucoup plus d'hydrogène que le Soleil, ont paradoxalement une durée de vie sur la séquence principale beaucoup plus courte. Au fur et à mesure de sa vie sur la séquence principale, l'étoile doit légèrement se contracter pour contrer l'effet de l'enrichissement de son cœur en produits de fusion (le nombre de noyaux diminuant). Ceci conduit à une légère augmentation au cours du temps de sa luminosité.

## Évolution finale



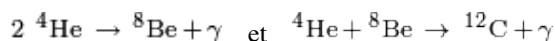
Parcours évolutifs de différents types d'étoiles. Les parcours débutent sur la séquence principale et se terminent lorsqu'il n'y a plus de fusion nucléaire. Le parcours du Soleil est présenté en jaune



La masse d'une étoile est l'élément déterminant de son évolution. Plus une étoile est massive, plus elle consomme rapidement l'hydrogène qu'elle contient car la température y est plus élevée de par la compression plus forte de la gravité. Dans le cas des étoiles de quelques masses solaires, lorsque le cœur de l'étoile ne contient plus suffisamment d'hydrogène, elle devient géante rouge. À partir de ce moment-là, l'étoile est vouée à former une nébuleuse planétaire, alors que le noyau devient une naine blanche. Les étoiles les plus massives évoluent vers les branches des géantes et des supergéantes et finiront en supernovas.

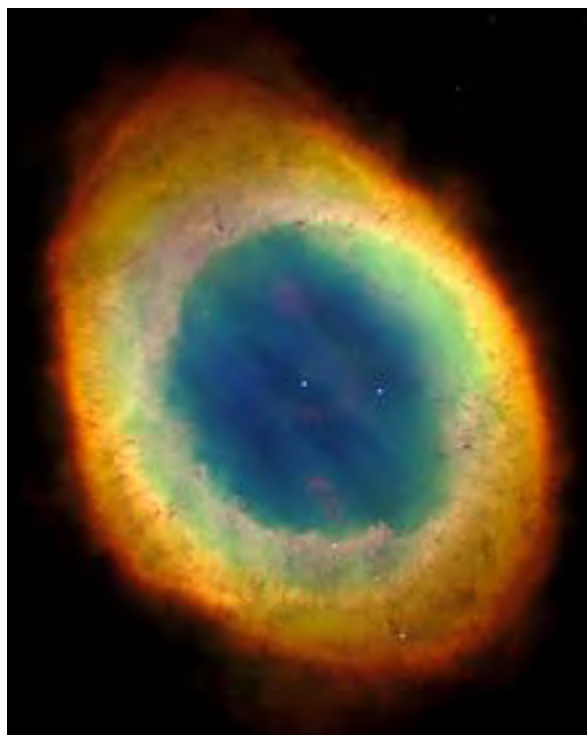
### Les géantes rouges

Dans la séquence principale, seul l'hydrogène contenu dans le cœur de l'étoile est consommé, ce qui correspond environ à 10 % de la masse. Lorsque la concentration en hélium atteint un certain seuil, la pression radiative diminue et l'étoile se contracte. Ce phénomène entraîne une augmentation de la température et de la pression des couches intermédiaires, qui contiennent encore de l'hydrogène, et où se déclenchent alors des réactions de fusion. La pression radiative augmente à nouveau mais, provenant des couches externes, elle s'exerce tant vers l'extérieur que sur le noyau qui se contracte et augmente encore de température. Quand la température du cœur atteint  $100 \times 10^6$  K, de nouvelles réactions ont lieu dans le noyau, qui conduisent à la transmutation de l'hélium en carbone par la réaction *triple alpha* :



La géante rouge s'anime d'un nouvel équilibre hydrostatique. Les couches externes de l'étoile se dilatent ce qui a pour conséquence de diminuer la température de la chromosphère de 5 500 K à 3 700 K. L'étoile gonfle et prend une teinte rouge. D'où la phase de géante rouge. Le diamètre de l'étoile étant supérieur à celui de l'étoile d'origine et pour une masse inférieure, la gravité superficielle de la géante rouge est plus faible ce qui entraîne des pertes considérables de matière qui peuvent atteindre  $10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{an}^{-1}$ , où  $M_{\odot}$  est la masse du Soleil.

### Les nébuleuses planétaires

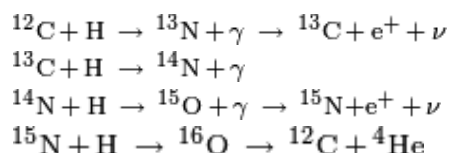


La nébuleuse planétaire de la Lyre

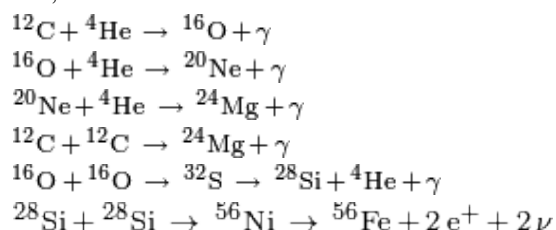
Lorsque la géante rouge arrive en fin de vie, ayant brûlé ses réserves d'hélium et d'hydrogène son noyau se contracte tandis que les couches périphériques sont expulsées et forment une nébuleuse planétaire (NP). Le modèle de « *vent stellaire* » est communément adopté pour décrire la formation des nébuleuses planétaires : la géante rouge perd ses couches périphériques sous la forme d'un vent stellaire relativement lent, de l'ordre de  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Puis lorsque le noyau est *mis à nu*, le vent stellaire s'accélère pour atteindre  $1\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les couches externes éjectées par l'étoile ne peuvent pas entretenir de réaction nucléaire : elles ne produisent plus de lumière visible. C'est le rayonnement ultraviolet émis par le noyau résiduel qui est responsable de la luminosité de la nébuleuse planétaire par le phénomène de photoionisation (puis recombinaison électronique). Le noyau résiduel, pour sa part, est composé des *déchets* de fusion et ne peut pas non plus maintenir de réactions nucléaires : son rayonnement est lié à son refroidissement, suivant une loi de corps noir. Ce noyau résiduel est un corps compact qu'on appelle naine blanche.

### Le cas des étoiles massives

Les étoiles de plus de 6 masses solaires sortent de la séquence principale en quelques centaines de millions d'années seulement. La fusion de l'hydrogène est accélérée par un phénomène de catalyse, qui n'a lieu que dans les conditions de pression et de température que l'on retrouve dans le cœur des étoiles les plus massives. Il s'agit du cycle catalytique du carbone (ou cycle CNO) :



L'atome de carbone subit des transmutations successives au cours desquelles il capture plusieurs noyaux d'hydrogène, subit deux désintégrations  $\beta^+$ , ce qui donne deux neutrons, puis en fin de cycle, la fusion d'un quatrième noyau d'hydrogène provoque la formation d'un atome d'oxygène instable qui se scinde en carbone et en hélium. Le carbone  $^{12}\text{C}$ , que l'on retrouve en fin de cycle, joue donc simplement le rôle de catalyseur. Ces étoiles sont suffisamment massives pour qu'à de plus hautes températures, de nouvelles réactions de fusion se mettent en place :



Chaque réaction demande des conditions de température et de pression plus importantes que la réaction précédente, l'étoile alterne donc les phases de fusion, d'arrêt des réactions et de contraction du cœur de l'étoile. Il se forme une structure en oignon avec du centre vers l'extérieur des zones de réaction du silicium, de l'oxygène, du carbone, de l'hélium et de l'hydrogène. Lorsque l'étoile en arrive au stade ultime et produit du fer, il n'est plus possible de produire de l'énergie par fusion (le fer est l'élément le plus stable). À ce moment-là les réactions de fusion dans le cœur s'arrêtent définitivement, et l'étoile s'effondre sur elle-même. Il se produit une supernova, qui va conduire à la création d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Il s'agit d'un événement très rare et qui libère une quantité d'énergie phénoménale en un temps très bref, de quelques heures à quelques jours au plus. Dans certains cas d'étoiles de très grandes masses, il se produit non pas une supernova, mais un sursaut gamma, événement connu le plus énergétique dans l'Univers.

#### Le cas des étoiles binaires

Certaines étoiles binaires sont suffisamment proches pour interagir et s'échanger de la matière, soit sous forme de vent stellaire, soit par débordement du lobe de Roche (l'étoile devient plus grande que son lobe de Roche, et va transvaser son surplus de matière sur l'astre compagnon. Dans certains cas, si cet astre compagnon est une naine blanche, cela va avoir tendance à réactiver les réactions nucléaires à la surface de la naine blanche, voire à créer une supernova de type Ia (explosion de naine blanche). Il est également possible que deux étoiles se percutent. Ceci produit une nouvelle étoile plus massive. Toutefois, la convection interne qui résulte de cet événement peut *nettoyer* le cœur de l'étoile de ses déchets, augmentant la durée de vie de l'étoile résultante.

### F) Particularités de « notre » système solaire

Selon l'hypothèse la plus couramment acceptée, le Système solaire s'est formé à partir de la nébuleuse solaire, théorie proposée pour la première fois en 1755 par Emmanuel Kant et formulée indépendamment par Pierre-Simon de Laplace. Selon cette théorie, le Système solaire s'est formé il y a 4,6 milliards d'années par effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire géant. Ce nuage était large de plusieurs années-lumière et a probablement donné naissance à plusieurs étoiles. Les études de météorites révèlent des traces d'éléments qui ne sont produits qu'au cœur d'explosions d'étoiles très grandes, indiquant que le Soleil s'est formé à l'intérieur d'un amas d'étoiles et à proximité d'un certain nombre de supernovas. L'onde de choc de ces supernovas a peut-être provoqué la formation du Soleil en créant des régions de surdensité dans la nébuleuse environnante, permettant à la gravité de prendre le dessus sur la pression interne du gaz et d'initier l'effondrement. La présence d'une supernova à proximité d'un disque protoplanétaire étant fortement improbable (l'explosion chasse le gaz autour d'elle), une autre modélisation de l'environnement stellaire du Soleil primitif est proposée en 2012, à partir d'observations astronomiques d'étoiles jeunes, pour expliquer la présence d'isotopes radioactifs de l'aluminium  $^{26}\text{Al}$  et du fer  $^{60}\text{Fe}$  dans des inclusions météoritiques au tout début du Système solaire. En moins de 20 millions d'années, trois générations d'étoiles, formées par la compression du gaz à la suite d'ondes de choc produites par le vent solaire de supernovae selon le scénario du Little Bang, se seraient succédé dans un nuage moléculaire géant pour former le Système solaire. La région qui deviendra par la suite le Système solaire, connue sous le nom de nébuleuse pré-solaire, avait un diamètre entre 7000 et 20 000 UA et une masse très légèrement supérieure à celle du Soleil (en excès de 0,001 à 0,1 masse solaire). Au fur et à mesure de son effondrement, la conservation du moment angulaire de la nébuleuse la fit tourner plus rapidement. Tandis que la matière s'y condensait, les atomes y rentrèrent en collision de plus en plus fréquemment. Le centre, où la plupart de la masse s'était accumulé, devint progressivement plus chaud que le disque qui l'entourait. L'action de la gravité, de la pression gazeuse, des champs magnétiques et de la rotation aplatirent la nébuleuse en un disque protoplanétaire en rotation d'un diamètre d'environ 200 UA entourant une proto-étoile dense et chaude. Des études d'étoiles du type T Tauri (des masses stellaires jeunes n'ayant pas démarré les opérations de fusion nucléaire et dont on pense qu'elles sont similaires au Soleil à ce stade de son évolution) montrent qu'elles sont souvent accompagnées de disques pré-planétaires. Ces disques s'étendent sur plusieurs centaines d'UA et n'atteignent qu'au plus un millier de kelvins.

## a) Nébuleuse et étoile(s)

Le disque de gaz donnant naissance à une étoile peut parfois donner naissance à plusieurs étoiles. Les étoiles multiples ne sont pas rares dans l'univers, à commencer par notre Galaxie. Les étoiles doubles sont assez communes et il y a même des systèmes plus complexes d'étoiles triples, quadruples (doubles-doubles dans certains cas), et ainsi de suite. Néanmoins, plus le nombre d'étoiles augmente, moins cette éventualité est fréquente. Il faut évidemment, notamment quand on fait de l'observation astronomique, distinguer les vraies doubles (ou les vraies multiples) étoiles qui, elles, sont visuellement doubles mais pas réellement. En effet, comme nous observons le ciel en deux dimensions, nous pouvons voir deux étoiles très proches l'une de l'autre (latéralement), mais qui en fait sont très éloignées (en profondeur, en distance par rapport à nous). La première peut être à 50 années-lumière et sa voisine être à 300 années-lumière. On appelle ça des doubles optiques. On dispose d'éléments d'analyse qui nous permettent de les situer avec plus de précision, mais cette capacité l'œil ne l'a pas. En ce qui concerne la création de notre système solaire, il n'y a qu'une seule étoile, ce qui est quand même le cas le plus fréquent. Les étoiles peuvent être de compositions gazeuses différentes. Elles peuvent vivre très longtemps si elles sont petites (plusieurs centaines de milliards d'années) ou quelques dizaines ou centaines de millions d'années seulement si elles sont massives. Notre étoile, le soleil, n'est âgée que 4,7 milliards d'années seulement et elle est à environ à un peu moins que la moitié de sa durée de vie probable. Elle est donc née environ 9 milliards d'années après le « Big Bang ». De plus, grâce à des études approfondies de spectrométrie (ou l'on analyse la composition des gaz des étoiles par leur couleur) on sait que le soleil est composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium comme toutes les étoiles, mais qu'il contient aussi des éléments plus lourds et notamment du fer. Or ni l'âge du soleil ni sa taille ne permettent qu'il produise du fer dans ses réactions thermonucléaires. Ceci n'intervient qu'à l'extrême fin de vie d'une très grosse étoile. Donc, s'il y a du fer c'est que cette matière était pré-existante lors de la formation du soleil. Par conséquent, notre soleil a été créé dans une nébuleuse gazeuse contenant du fer, ce qui veut dire que la nébuleuse en question venait de l'explosion et du rejet de matière d'une étoile morte sous la forme d'une supernova. On appelle ces étoiles, des étoiles de 2<sup>me</sup> ou de 3<sup>me</sup> génération.

Après 100 millions d'années, la pression et la densité de l'hydrogène au centre de la nébuleuse devinrent suffisamment élevées pour que la proto-étoile initie la fusion nucléaire, accroissant sa taille jusqu'à ce qu'un équilibre hydrostatique soit atteint, l'énergie thermique contrebalançant la contraction gravitationnelle. À ce niveau, le Soleil devint une véritable étoile. Les autres corps du Système solaire se formèrent du reste du nuage de gaz et de poussière. Les modèles actuels les font se former par accrétion : initialement des grains de poussière en orbite autour de la proto-étoile centrale, puis des amas de quelques mètres de diamètre formés par contact direct, lesquels rentrèrent en collision pour constituer des planétésimaux d'environ cinq kilomètres de diamètre. À partir de là, leur taille augmenta par collisions successives au rythme moyen de 15 cm par an au cours des millions d'années suivants. Le Système solaire interne était trop chaud pour que les molécules volatiles telles que l'eau ou le méthane se condensent : les planétésimaux qui s'y sont formés étaient relativement petits (environ 0,6 % de la masse du disque) et principalement formés de composés à point de fusion élevé, tels les silicates et les métaux. Ces corps rocheux devinrent à terme les planètes telluriques. Plus loin, les effets gravitationnels de Jupiter empêchèrent l'accrétion des planétésimaux, formant la ceinture d'astéroïdes. Encore plus loin, là où les composés glacés volatiles pouvaient rester solides, Jupiter et Saturne devinrent des géantes gazeuses. Uranus et Neptune capturèrent moins de matière et on pense que leur noyau est principalement formé de glaces. Dès que le Soleil produisit de l'énergie, le vent solaire souffla le gaz et les poussières du disque protoplanétaire, stoppant la croissance des planètes. Les étoiles de type T Tauri possèdent des vents stellaires nettement plus intenses que les étoiles plus anciennes et plus stables.

### Évolution

La chaleur dégagée par le Soleil augmente au fil du temps. On peut extrapoler qu'à très long terme (plusieurs centaines de millions d'années) elle atteindra un niveau tel que la vie sera impossible sur Terre. Dans plus de cinq milliards d'années, le Soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, qui se seront transformées en hélium, et changera de structure. Son noyau se contractera mais l'étoile entière deviendra beaucoup plus volumineuse. Il devrait se transformer en géante rouge, 100 fois plus grande qu'à l'heure actuelle. Les planètes les plus proches, Mercure et Vénus, devraient être détruites. Il entamera alors un nouveau cycle de fusion avec l'hélium fusionnant en carbone (et oxygène) dans son cœur, et l'hydrogène fusionnant en hélium dans une couche périphérique du cœur. Dans cette configuration, il aura « soufflé » son enveloppe externe, devenant une sous-géante, environ 10 fois plus grande qu'actuellement. Il va ensuite brûler son hélium assez rapidement, à la fin de ce cycle il regonflera de manière encore plus importante, grillant complètement la Terre au passage. Une fois ses réserves d'énergie nucléaire complètement consommées, le Soleil va s'effondrer sur lui-même et se transformer en naine blanche très dense et peu lumineuse. Il refroidira petit à petit et finira par ne plus rayonner ni lumière ni chaleur, il sera alors parvenu au stade de naine noire. Le Système solaire fait le tour de la Galaxie en 250 millions d'années. En même temps, il oscille de part et d'autre du plan galactique avec une période de 2 x 33 millions d'années. Il traverse donc ce plan toutes les 33 millions d'années ce qui constitue également la durée moyenne des étages géologiques. Ces étages sont définis d'après d'importants changements dans la faune et la flore, parfois dus à des cataclysmes comme au passage Permien-Trias ou au passage Crétacé-Tertiaire. On peut penser que ces changements sont dus à des glaciations résultant de la rencontre de la Terre avec des nuages d'électrons du plan galactique. Les dernières glaciations, celles du Quaternaire, se sont produites alors que le Système solaire traversait le plan de la Galaxie en allant du Sud vers le Nord. C'est une explication qui peut indiquer pourquoi les glaciations étaient beaucoup plus prononcées dans l'hémisphère nord lequel recevait directement les électrons des nuages du plan galactique.

## b) Disque protoplanétaire et planètes



*Vision d'artiste d'un disque protoplanétaire*



*Image de disques protoplanétaires dans la nébuleuse d'Orion prise par le télescope spatial Hubble. Cette « pépinière d'étoile » est probablement similaire à la nébuleuse primordiale à partir de laquelle s'est formé le Soleil*

En ce qui concerne la création d'autres corps autour de l'étoile nouvellement née, les choses peuvent aussi différer, d'un système à l'autre. Une fois l'étoile créée il peut (ou non) rester de la matière en rotation autour de l'étoile. Il dépend de la nature de la matière restante, de sa quantité et de nombreux autres paramètres pour que puisse se former (ou non) un disque protoplanétaire suffisamment dense pour que les conditions soient réunies pour produire une réaction de création de planètes autour de l'étoile. Même si les progrès de la science au cours de ces 15 dernières années nous ont permis de découvrir de nombreuses « exoplanètes » (planètes tournant autour d'une étoile autre que notre soleil), nous en comptons aujourd'hui près de 2 000, nous savons aussi qu'un grand nombre d'étoiles n'ont aucune planète en orbite autour d'elles. Donc, la création de planètes n'est pas obligatoire. Il est difficile, voire impossible de dire quelle est la chance mathématique qu'une étoile ait des planètes. Donc notre système solaire, lui, est doté de 8 planètes, elles-mêmes dotées (ou non) de satellites naturels.

## c) Les satellites des planètes

La présence de satellites autour des planètes peut avoir des causes multiples. En ce qui nous concerne, Mercure et Vénus n'en ont pas. Les 6 autres planètes en ont, mais leur apparition peut résulter de conditions très différentes. Par exemple, la Lune, notre satellite a probablement été formée suite à un très violent choc entre la très jeune terre, il y a plusieurs milliards d'années, et un corps que l'on suppose avoir été de la taille de Mars. Ce choc aurait arraché de la matière à la terre en formation pour créer la Lune qui orbite autour de nous. En ce qui concerne Mars, qui est la voisine de la ceinture d'astéroïdes, ses deux très petits satellites irréguliers (Phobos et Deimos) sont vraisemblablement des astéroïdes capturés par la gravité de la planète rouge. Pour les quatre géantes gazeuses, certains satellites sont massifs et ont pu être créés lors de la constitution des planètes, d'autres satellites sont très probablement des objets « captés » par la forte gravité de ces géantes. D'autres satellites encore se sont formés (c'est le cas pour Saturne) par accrétion de matière éjectée provenant des anneaux (et inversement où certains satellites peuvent « nourrir » les anneaux avec leur matière).

## d) Les autres corps

Enfin, notre système solaire est doté d'autres objets :

**La ceinture d'astéroïdes** située entre Mars et Jupiter peut résulter de matériaux épars n'ayant pas réussi à se réunir pour former une planète par accrétion (ce n'est qu'une hypothèse).

**Les planètes naines**, nouvelle catégorie définie par L'Union Astronomique Internationale en 2006 peuvent avoir plusieurs origines. Cérès est dans la ceinture d'astéroïdes, d'autres corps comme Pluton, Makémaké, Hauméa ou Eris sont très lointains, dans la **ceinture de Kuiper**.

**Les comètes** : La plupart viennent de très loin, du **nuage d'Oort**, avec des orbites très excentrées, et nous ne les voyons essentiellement que lorsqu'elles s'approchent du soleil. D'autres circulent entre le soleil et Jupiter et peuvent, au fil des passages (plus fréquents que les comètes d'origine lointaine) avoir des orbites perturbées par la proximité des planètes (surtout Jupiter) et du soleil; ce fut le cas de la comète Schumaker-Levy 9.

**Les objets épars** : Encore plus difficiles à voir et présents en quantités innombrables dans la **ceinture d'astéroïdes**, la **ceinture de Kuiper** ou le **nuage d'Oort**, ce sont tous les corps ne répondant pas aux critères des catégories précédentes.

**Centaures** : Les centaures, qui s'étendent entre 9 et 30 UA, sont des corps glacés analogues aux comètes orbitant entre Jupiter et Neptune. Le plus grand centaure connu, Chariklo, mesure entre 200 et 250 km de diamètre. Le premier centaure découvert, Chiron, fut considéré comme une comète puisqu'il développait une queue cométaire. Certains astronomes classent les centaures comme des objets de la ceinture de Kuiper internes épars, des équivalents des objets épars externes.

**Astéroïdes troyens** : Les astéroïdes troyens sont deux groupes d'astéroïdes situés aux points de Lagrange L<sub>4</sub> ou L<sub>5</sub> de Jupiter (des zones gravitationnellement stables en avant et en arrière de son orbite). Neptune et Mars sont également accompagnés par quelques astéroïdes troyens.

## Région transneptunienne

La zone au-delà de Neptune, souvent appelée région transneptunienne, est toujours largement inexploree. Il semble qu'elle consiste essentiellement en de petits corps (le plus grand ayant le cinquième du diamètre de la Terre et une masse bien inférieure à celle de la Lune) composés de roche et de glace.

**Tous ces autres corps du système solaire sont de mieux en mieux connus des astronomes et des astrophysiciens, mais ils sont trop petits pour que l'on puisse en déceler de pareils dans un autre système planétaire que le nôtre (même proche). Donc, savoir si ces objets ont des équivalents autour d'autres étoiles n'est que pure hypothèse, encore que ce soit assez probable dans la mesure où les systèmes stellaires ont souvent des similitudes et que leur création obéit généralement aux mêmes lois physiques.**

## Contexte galactique



*Schéma indiquant la structure générale de la Voie lactée, ses bras principaux et la localisation du Système solaire*

Le Système solaire est situé dans la Voie lactée, une galaxie spirale barrée d'un diamètre d'environ 100 000 années-lumière contenant environ plus de 200 milliards d'étoiles. Le Soleil réside dans l'un des bras spiraux externes de la galaxie, le bras d'Orion, à entre 25 000 et 28 000 années-lumière du centre galactique. Il y évolue à environ 220 km/s et effectue une révolution en 225 à 250 millions d'années, une année galactique. La situation du Système solaire dans la galaxie est probablement un facteur de l'évolution de la vie sur Terre. Son orbite est quasiment circulaire et est parcourue à peu près à la même vitesse que la rotation des bras spiraux, ce qui signifie qu'il ne les traverse que rarement. Les bras spiraux hébergeant nettement plus de supernovas potentiellement dangereuses, cette disposition a permis à la Terre de connaître de longues périodes de stabilité interstellaire. Le Système solaire réside également en dehors des zones riches en étoiles autour du centre galactique. Près du centre, l'influence gravitationnelle des étoiles proches perturberait plus souvent le nuage d'Oort et propulserait plus de comètes vers le Système solaire interne, produisant des collisions aux conséquences potentiellement catastrophiques. Le rayonnement du centre galactique interférerait avec le développement de formes de vie complexes. Même à l'endroit actuel du Système solaire, certains scientifiques ont émis l'hypothèse que des supernovas récentes ont affecté la vie dans les derniers 35 000 ans en émettant des morceaux de cœur stellaire vers le Soleil sous forme de poussières radioactives ou de corps ressemblant à des comètes. Actuellement, le Soleil se déplace en direction de l'étoile Véga.

## Voisinage

Le voisinage immédiat du Système solaire est connu sous le nom de nuage interstellaire local, une zone relativement dense à l'intérieur d'une région qui l'est moins, la Bulle locale. Cette bulle est une cavité du milieu interstellaire, en forme de sablier d'environ 300 années-lumière de large. La bulle contient du plasma à haute température de façon très diluée, ce qui suggère qu'elle est le produit de plusieurs supernovae récentes.

On compte relativement peu d'étoiles distantes de moins de 10 années-lumière du Soleil. Le système le plus proche est celui d'Alpha Centauri, un système triple distant de 4,4 années-lumière. Alpha Centauri A et B sont deux étoiles proches ressemblant au Soleil (B abritant d'ailleurs une planète), Alpha Centauri C (ou Proxima Centauri) est une naine rouge orbitant la paire à 0,2 année-lumière d'elle. On trouve ensuite les naines rouges de l'étoile de Barnard (6 années-lumière), Wolf 359 (7,8 années-lumière) et Lalande 21185 (8,3 années-lumière). La plus grande étoile à moins de 10 années-lumière est Sirius, une étoile brillante deux fois plus massive que le Soleil autour de laquelle orbite une naine blanche nommée Sirius B; elle est distante de 8,6 années-lumière. Les autres systèmes dans ces 10 années-lumière sont le système binaire de naines rouges Luyten 726-8 (8,7 années-lumière) et la naine rouge solitaire Ross 154 (9,7 années-lumière). La plus proche étoile simple analogue au Soleil est Tau Ceti, distante de 11,9 années-lumière; elle possède 80 % de la masse du Soleil, mais seulement 60 % de sa luminosité. La plus proche exoplanète ressemblant à la Terre que l'on connaît, Gliese 581 c, est située à 20,4 années-lumière.

## II – Description du système solaire et de ses composants

### A) Généralités

Le **Système solaire** (avec majuscule initiale), ou **système solaire** (sans majuscule), est un système planétaire composé d'une étoile, le Soleil, et des objets célestes définis gravitant autour de lui (autrement dit, *notre* système planétaire) : les huit planètes et leurs 175 satellites naturels connus (appelés usuellement des « lunes »), les cinq planètes naines, et les milliards de petits corps (astéroïdes, objets glacés, comètes, poussière interplanétaire, etc.).

De façon schématique, le Système solaire est composé du Soleil, de quatre planètes telluriques internes, d'une ceinture d'astéroïdes composée de petits corps rocheux, quatre planètes géantes (deux géantes gazeuses et deux planètes géantes de glaces) externes et une seconde ceinture appelée ceinture de Kuiper, composée d'objets glacés. Ensuite vient l'héliopause, limite magnétique du Système solaire définie par l'arrêt des vents solaires (ils deviennent plus faibles que le vent galactique). Bien au-delà se trouve une sphère d'objets épars, nommée suivant la théorie avancée par Jan Oort, le nuage d'Oort. La limite gravitationnelle du Système solaire, elle, se situe bien plus loin, jusqu'à 1 ou 2 années-lumière du Soleil. De la plus proche à la plus éloignée (du Soleil), les planètes du système se nomment Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Toutes ces planètes hormis les deux plus proches du Soleil possèdent des satellites en orbite et chacune des quatre planètes externes est entourée d'un anneau planétaire de poussière et d'autres particules. Toutes les planètes, y compris la Terre, portent des noms de dieux et déesses de la mythologie romaine.

Les cinq planètes naines, portant des noms de divinités diverses, sont Cérès, le plus grand objet et premier découvert de la ceinture d'astéroïdes, Pluton, le plus ancien objet connu de la ceinture de Kuiper, Éris, la plus grosse des planètes naines qui se trouve dans le disque des objets épars, et Makémaké et Hauméa, objets de la ceinture de Kuiper. Les planètes naines orbitant au-delà de Neptune, ce qui est le cas de quatre d'entre elles, sont classifiées comme plutoïdes.

### Le système solaire



*Planètes et planètes naines déclarées du Système solaire. Les dimensions des objets sont à l'échelle. Les distances au Soleil, elles, ne sont pas à l'échelle.*

#### Caractéristiques générales

Âge	4,568 Ga (4.568.000.000 ans)
Localisation	Nuage interstellaire local, Bulle locale, Bras d'Orion, Voie lactée
Masse du système	$1,9919 \times 10^{30}$ kg (1,0014 $M_{\odot}$ )
Étoile la plus proche	Proxima Centauri (4,22 al), système Alpha Centauri (4,37 al)
Système planétaire le plus proche	Système Alpha Centauri (4,37 al)

#### Système

Demi-grand axe de la planète la plus extérieure (Neptune)	$4,503 \times 10^9$ km (30,10 ua)
---	-----------------------------------

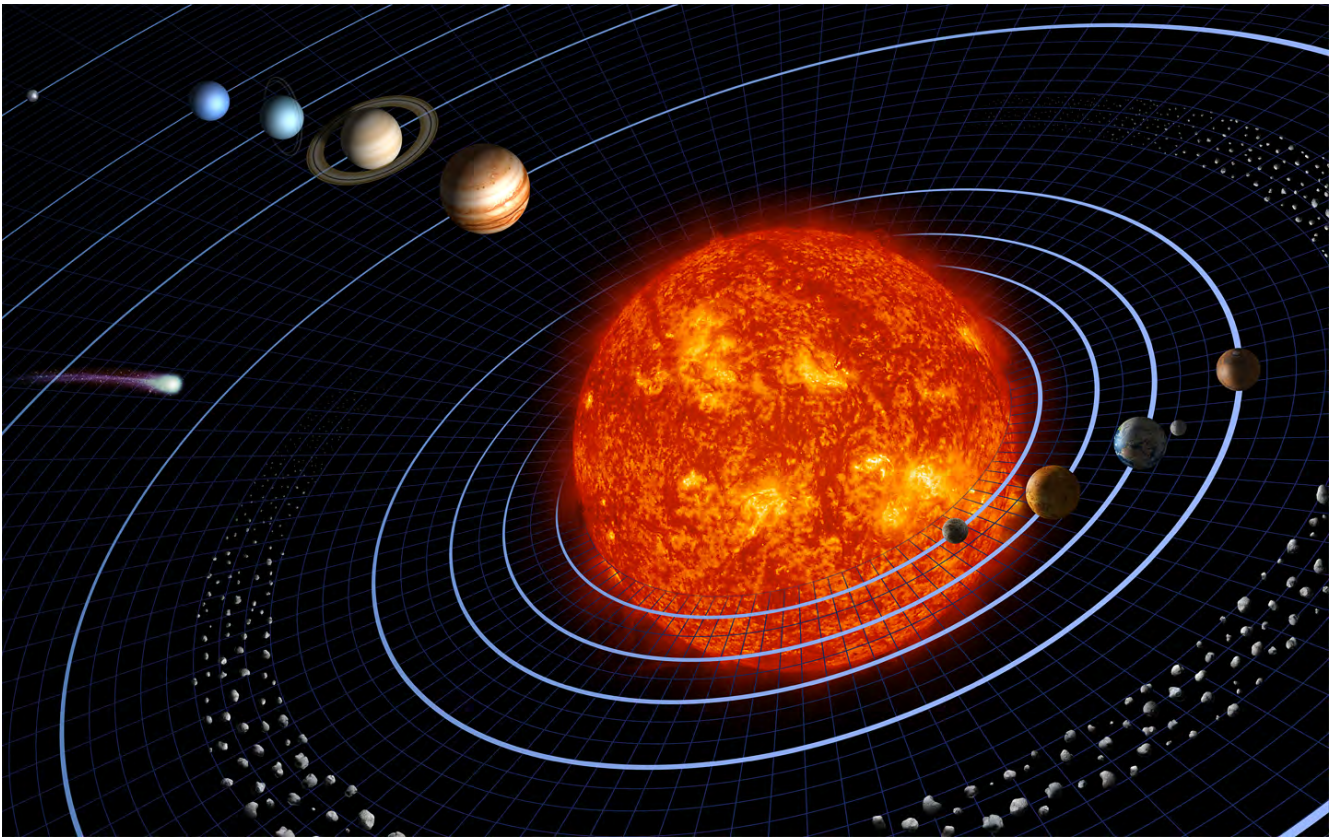
<b>Étoiles</b>	1 : le Soleil
<b>Planètes</b>	8 : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune
<b>Planètes naines</b>	5 : Cérès, Pluton, Hauméa, Makémaké et Éris; + des centaines de candidates
<b>Nb. de satellites naturels connus</b>	près de 600 dont au moins 220 confirmés (173 de planètes [+ > 150 lunes mineures non confirmées], 8 de planètes naines et 247 de petits corps [dont au moins une quarantaine nommés et/ou avec désignation provisoire])
<b>Nb. de petits corps répertoriés</b>	636 352 (au 12 février 2014)
<b>• dont astéroïdes et assimilés</b>	632 567 (au 12 février 2014) dont 385 184 numérotés
<b>• dont comètes</b>	3 785 (au 12 février 2014) dont 364 numérotés
<b>Nb. de satellites ronds identifiés</b>	19
<b>Orbite autour du centre galactique</b>	
<b>Inclinaison du plan invariable par rapport au plan galactique</b>	60,19° (écliptique)
<b>Distance du centre galactique</b>	(27 000 ± 1 000) al
<b>Vitesse orbitale</b>	220 km/s
<b>Période orbitale</b>	225–250 Ma
<b>Propriétés liées à l'étoile (le Soleil)</b>	
<b>Type spectral</b>	G2V
<b>Distance de la ligne des glaces</b>	≈ 5 ua
<b>Distance de la falaise de Kuiper</b>	≈ 50 ua
<b>Distance du choc terminal</b>	≈ 75 ua
<b>Distance de l'héliopause</b>	≈ 120 ua
<b>Rayon de la sphère de Hill</b>	≈ 1–2 al

**Depuis la décision prise le 24 août 2006 par l'Union astronomique internationale, les objets ou corps orbitant directement autour du Soleil sont officiellement divisés en trois classes : planètes, planètes naines et petits corps.**

- Une planète est un corps en orbite autour du Soleil, suffisamment massif pour avoir une forme sphérique et avoir nettoyé son voisinage immédiat de tous les objets plus petits. On connaît huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- Une planète naine est un corps en orbite autour du Soleil qui, bien que suffisamment massif pour avoir une forme sphérique, n'a pas fait place nette dans son voisinage. En septembre 2008, cinq corps étaient officiellement désignés de la sorte : Cérès, Pluton, Éris, Makémaké et Hauméa. D'autres corps pourraient l'être dans le futur, tels que Sedna, Orcus ou encore Quaoar.
- Tous les autres objets en orbite directe autour du Soleil sont classés comme petits corps du Système solaire.

Les satellites naturels, aussi appelés lunes, sont les objets en orbite autour des planètes, des planètes naines et des petits corps du Système solaire plutôt qu'autour du Soleil. Les statuts de Charon et de la Lune sont, en se basant sur ces définitions, ambigus, et ne sont d'ailleurs pas encore définitivement tranchés, bien que ces corps soient toujours classés respectivement comme satellites de la Terre et Pluton.

Toutefois, cette décision de l'Union astronomique internationale est loin de faire l'unanimité. À la suite du vote, une pétition ayant réuni en cinq jours les signatures de plus de 300 planétologues et astronomes majoritairement américains (Pluton ayant été la première planète découverte par un Américain) a été lancée pour contester la validité scientifique de la nouvelle définition de planète qui déclassait Pluton ainsi que son mode d'adoption et inviter à la réflexion sur une autre définition plus appropriée. Catherine Cesarsky, présidente de l'UAI, clôt le débat en décidant que l'assemblée de l'UAI d'août 2009 ne reviendrait pas sur la définition de planète.



Montage présentant les composants principaux du Système solaire (échelle non respectée), de gauche à droite : Pluton, Neptune, Uranus, Saturne, Jupiter, la ceinture d'astéroïdes, le Soleil, Mercure, Vénus, la Terre et la Lune, et Mars. Une comète est également représentée sur la gauche

## Structure



*L'écliptique vu par la mission Clementine, alors que le Soleil était partiellement masqué par la Lune. Trois planètes sont visibles dans la partie gauche de l'image. De gauche à droite : Mercure, Mars et Saturne*

Le principal corps céleste du Système solaire est le Soleil, une étoile naine jaune de la séquence principale de type G2 qui contient 99,86 % de toute la masse connue du Système solaire et le domine gravitationnellement. Jupiter et Saturne, les deux objets les plus massifs orbitant autour du Soleil, regroupent à eux deux plus de 90 % de la masse restante.

La plupart des grands objets en orbite autour du Soleil le sont dans un plan proche de celui de l'orbite terrestre, nommé écliptique. Typiquement, le plan d'orbite des planètes est très proche de celui de l'écliptique tandis que les comètes et les objets de la ceinture de Kuiper ont pour la plupart une orbite qui forme un angle significativement plus grand par rapport à lui. Toutes les planètes et la plupart des autres objets orbitent dans le même sens que la rotation du Soleil, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre du point de vue d'un observateur situé au-dessus du pôle nord solaire. Certains objets orbitent dans un sens rétrograde, comme la comète de Halley.

Les trajectoires des objets gravitant autour du Soleil suivent les lois de Kepler. Ce sont approximativement des ellipses dont l'un des foyers est le Soleil. Les orbites des planètes sont quasiment circulaires. Celles des corps plus petits présentent des excentricités diverses et peuvent être fortement elliptiques. C'est notamment le cas des comètes et de certains autres petits corps, de certaines planètes naines et plus généralement des objets transneptuniens y compris ceux de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort.

La distance d'un corps au Soleil varie au cours de sa rotation autour du Soleil. On appelle le point le plus proche du Soleil de l'orbite d'un corps sa périhélie, le plus éloigné étant son aphélie.



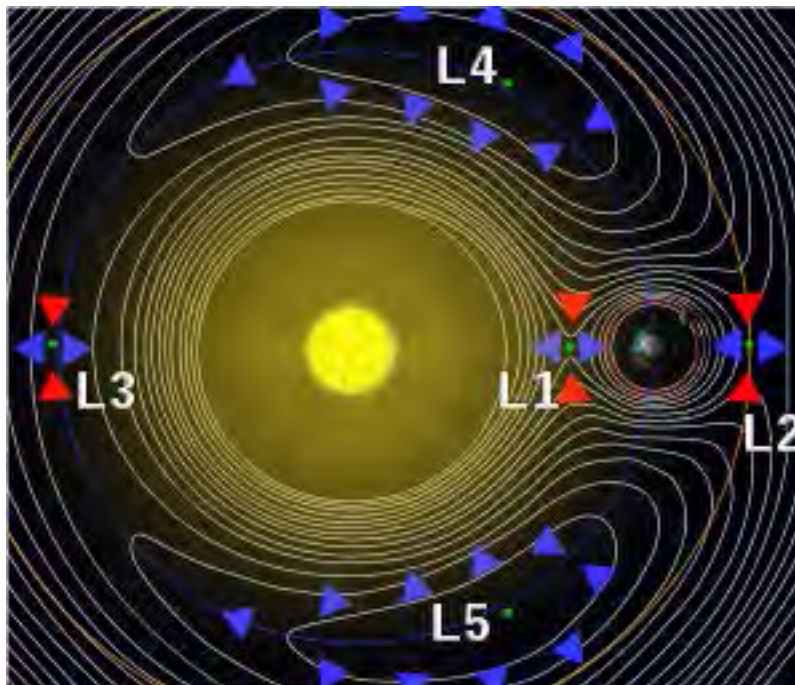
De façon informelle, le Système solaire est souvent divisé en zones distinctes. Le Système solaire interne inclut les quatre planètes telluriques et la ceinture d'astéroïdes. Le reste du système peut être considéré simplement comme Système solaire externe; d'autres séparent la région au-delà de Neptune des quatre géantes gazeuses.

La majorité des planètes du Système solaire possèdent leur propre système secondaire. Les corps planétaires en rotation autour d'une planète sont appelés satellites naturels ou lunes. La plupart des plus grands satellites naturels évoluent sur une orbite synchrone, présentant toujours la même face à la planète autour de laquelle ils gravitent. Les quatre plus grandes planètes ont également un anneau planétaire.

## B) Influence gravitationnelle dans le système solaire

### Sphère de Hill ou Sphère de Roche (*ne pas confondre la Sphère de Hill avec le Nuage de Hills*)

En astronomie, la « sphère de Hill » d'un corps A en orbite autour d'un autre B, plus massif, est une approximation de la zone d'influence gravitationnelle de ce premier corps A, c'est-à-dire du volume d'espace où la satellisation d'un troisième corps C de masse négligeable devant les 2 premiers, est possible autour du premier corps A, lui-même en orbite, sans être capturé par le deuxième B. Le concept a été défini par l'astronome américain George William Hill, sur la base de travaux antérieurs de l'astronome français Édouard Roche; il est également connu comme « sphère de Roche ».



Tracé de courbes d'un système à deux corps considérant la gravité et l'inertie à un instant. Les sphères Hill sont les régions circulaires autour des deux grandes masses. Pour la Terre la sphère de Hill s'étend entre les points L1 et L2 (Les rayons de la Terre et du Soleil ne sont pas à l'échelle)

### Explication simplifiée

Dans le cas de la planète Jupiter, en orbite autour du Soleil, il est possible de calculer en tout point de l'espace la somme des trois forces suivantes :

- la force de gravitation causée par Jupiter;
- la force de gravitation causée par le Soleil;
- la force centrifuge expérimentée par une particule située en ce point et se déplaçant à la même vitesse angulaire que Jupiter autour du Soleil.

La sphère de Hill de Jupiter est la plus grande sphère, centrée sur Jupiter, à l'intérieur de laquelle la somme de ces trois forces est toujours dirigée vers la planète. En d'autres termes, la résultante de ces trois forces est une force centripète et la sphère de Hill décrit la limite qu'un objet plus petit comme une lune ou un satellite artificiel peut occuper pour tourner autour de Jupiter. Mathématiquement parlant, la sphère de Hill est le lieu où le gradient des champs gravitationnels de Jupiter et du Soleil s'équilibrent. Il est également possible d'exprimer ceci comme le lieu où les forces de marée des deux objets sont égales. Au-delà de cette sphère, un troisième objet en orbite autour de Jupiter serait petit à petit dévié par les forces de marée du Soleil et finirait par orbiter autour de ce dernier.

### Rayon

Si un objet de masse  $m$  orbite un objet plus lourd de masse  $M$  avec un demi-grand axe  $a$  et une excentricité  $e$ , alors le rayon  $r$  de sa sphère de Hill est, approximativement :

$$r \approx a(1 - e) \sqrt[3]{\frac{m}{3M}}$$

Si l'excentricité est négligeable, cette valeur devient :

$$r \approx a \sqrt[3]{\frac{m}{3M}}$$

Le diamètre de la sphère de Hill est grosso-modo égal à la distance séparant les points de Lagrange  $L_1$  et  $L_2$  de l'objet  $m$ .

### Relation remarquable à propos de la période

En négligeant l'excentricité de l'orbite, la période de révolution  $T_{Hill}$  d'un objet orbitant au rayon de Hill  $r$  du corps de masse  $m$  est toujours proportionnelle à la période de révolution  $T$  de ce corps de masse  $m \ll M$  orbitant autour du corps de masse  $M$  au demi-grand axe  $a$ , d'un facteur tel que :

$$T \approx \sqrt{3} T_{Hill}$$

et ce, quelles que soient la masse des objets considérés et leur distance relative, pourvu que l'approximation de Hill s'applique.

**Démonstration :** Véritable région de stabilité - La sphère de Hill n'est qu'une approximation car d'autres forces entrent en jeu (comme la pression de radiation ou l'effet Yarkovsky) qui peuvent également perturber l'orbite de l'objet. En outre, le troisième objet doit être de masse suffisamment petite par rapport aux deux autres pour ne pas compliquer le résultat.

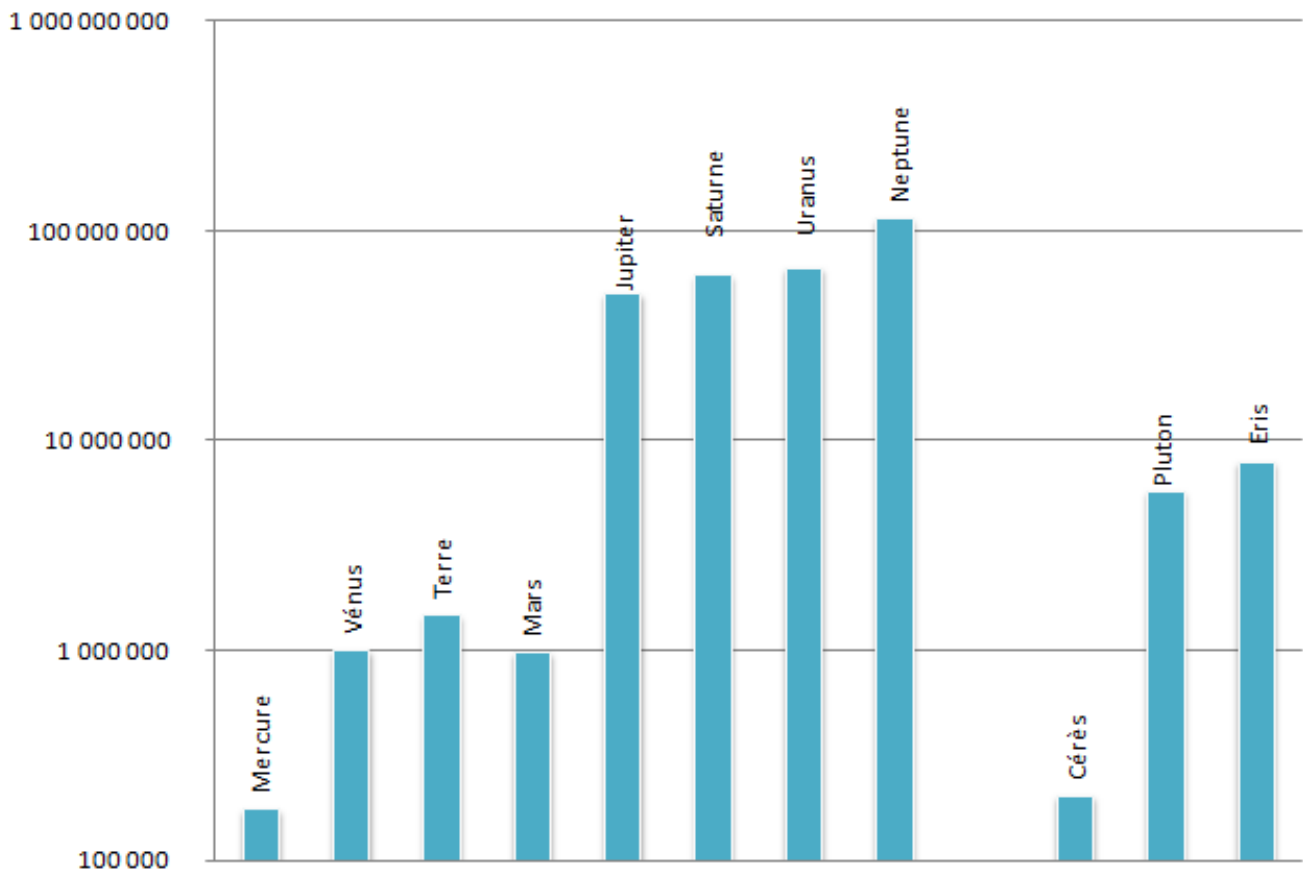
### Exemples

Dans le système solaire, la planète qui a la plus grande sphère de Hill est Neptune, avec un rayon de 116 millions de kilomètres, soit 0,775 ua : sa grande distance au Soleil compense sa masse par rapport à Jupiter, dont la sphère de Hill mesure 53 millions de kilomètres de rayon. Pour la Terre, le rayon atteint 1,5 million de kilomètres, soit 0,01 ua. La Lune orbite à la distance de 370 000 km et est donc située bien à l'intérieur de la sphère de Hill terrestre. Dans la ceinture d'astéroïdes, le rayon de la sphère de Hill de Cérès mesure 220 000 km; cette valeur décroît rapidement avec la masse des astéroïdes situés dans la même région. Dans le cas de (66391) 1999 KW<sub>4</sub>, un astéroïde herméocroiseur doté d'une lune (S/2001 (66391) 1), le rayon de la sphère de Hill varie entre 120 et 22 km selon que l'astéroïde est à son aphélie ou son périhélie. Par exemple la sonde Phobos-Grunt, qui devait explorer Phobos, la lune de Mars (mais ne put mener à bien sa mission), n'aurait pas pu se placer en orbite autour de Phobos car le rapport de masse entre Phobos et Mars (rapport de 0,000 000 001 6) et le demi-grand axe de l'orbite de Phobos autour de Mars (9 377 km) fixent la limite de l'influence gravitationnelle de Phobos à 16 km. Compte tenu de l'irrégularité de la forme de Phobos, cette orbite n'aurait pas pu être viable. Dans le cas de la navette spatiale, en orbite terrestre basse vers 300 km d'altitude et d'une masse de 104 tonnes, le rayon de la sphère de Hill atteint environ 1,20 m, plus petit que la navette elle-même : un astronaute serait incapable d'orbiter autour. En orbite terrestre basse, un satellite sphérique devrait être 800 fois plus dense que le plomb pour être contenu à l'intérieur de sa sphère de Hill.

Rayons de Hill des planètes et de certaines planètes naines							
	Nom	Masse <sup>[a]</sup>	Masse (kg)	Demi-grand axe (UA)	Excentricité de l'orbite	Rayon de Hill (km)	Rayon de Hill (UA)
Planètes internes	Mercure	0.055	0.33×10 <sup>24</sup>	0.387	0.206	180 000	0.001
	Vénus	0.815	4.86×10 <sup>24</sup>	0.723	0.007	1 000 000	0.007
	Terre	1	5.97×10 <sup>24</sup>	1	0.0167	1 500 000	0.010
	Mars	0.107	0.64×10 <sup>24</sup>	1.523	0.093	1 000 000	0.007
Géantes gazeuses	Jupiter	317.7	1898.6×10 <sup>24</sup>	5.203	0.048	50 600 000	0.338
	Saturne	95.2	568.46×10 <sup>24</sup>	9.537	0.054	61 600 000	0.412
	Uranus	14.5	86.81×10 <sup>24</sup>	19.229	0.044	67 100 000	0.448
	Neptune	17.1	102.43×10 <sup>24</sup>	30.104	0.009	115 000 000	0.769
Planètes naines	Cérès	0.000 15	0.0009×10 <sup>24</sup>	2.77	0.080	200 000	0.001
	Pluton	0.002 2	0.013×10 <sup>24</sup>	39.48	0.250	5 800 000	0.039
	Éris	0.002 8	0.016×10 <sup>24</sup>	67.67	0.442	8 000 000	0.053

<sup>a</sup> par rapport à la Terre.

## Corps du système solaire



Rayons de Hill des planètes et de certaines planètes naines (échelle logarithmique) selon le tableau de la page précédente

## C) Le soleil

### a) Caractéristiques du soleil

Le Soleil est une étoile, de type naine jaune, âgée de 4,5682 milliards d'années, soit un peu moins de la moitié de son chemin sur la séquence principale. L'hypothèse des années 1970 qu'une supernova serait à l'origine de l'effondrement de la nébuleuse qui a donné naissance au Soleil n'est plus crédible. Une modélisation récente (2012) propose un scénario en trois étapes pour expliquer la formation du Soleil et l'abondance de magnésium-26 et de nickel-60 dans les météorites. Ces éléments sont les produits de la décomposition de deux isotopes radioactifs (à la vie très courte) nés dans les étoiles : l'aluminium-26 (demi-vie de 717 000 ans) et le fer-60 (demi-vie de 2,6 Ma). Pour comprendre la présence de ces éléments dans la chimie du Soleil, il fallait imaginer une étape pour le fer-60 et une autre pour l'aluminium-26. Scénario : Il y a 4,6 Ga, une nébuleuse s'effondre et une première génération d'étoiles ( $\pm 5 000$ ) naît. Après 5 Ma, les plus massives meurent en supernovae et dispersent leurs éléments dont l'isotope fer-60. Après 2 Ma, un nuage riche en fer-60 s'effondre et de nouvelles étoiles se forment. Cette seconde génération comprend des étoiles très massives (plus de 30 masses solaires) qui éjectent des vents chargés en aluminium-26. Après 100 000 ans, le vent d'une de ces étoiles très massives comprime la matière qui l'entoure. Il se forme une coquille de gaz et de poussières riches en fer-60 et en aluminium-26 qui finit par s'effondrer et donner naissance, il y a 4,5682 Ga, à une troisième génération d'étoiles : le Soleil et une centaine d'étoiles jumelles. Quelques millions d'années plus tard, l'étoile très massive à l'origine du processus meurt en supernova. On l'appelle Coatlicue qui signifie "mère du Soleil" dans la cosmogonie aztèque. Les sœurs du Soleil (à la composition chimique identique) se dispersent dans la Voie lactée. Le Soleil reste seul; les astéroïdes qui l'entourent gardent la trace de sa généalogie sous la forme des dérivés du fer-60 et de l'aluminium-26 : le nickel-60 et le magnésium-26. Actuellement, dans le cœur du Soleil, chaque seconde, environ 627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent pour produire  $\pm 622,7$  millions de tonnes d'hélium. La différence de masse de 4,3 millions de tonnes d'hydrogène (une masse de l'ordre de celle de la pyramide de Gizeh) équivaut à l'énergie lumineuse produite ( $4 \cdot 10^{26}$  joules). Cette énergie lumineuse migre lentement par rayonnement et par convection vers la surface solaire et est émise dans l'espace sous forme de rayonnements électromagnétiques (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire). Durant les 7,6 milliards d'années à venir, le Soleil épuisera petit à petit ses réserves d'hydrogène; sa brillance augmentera d'environ 7 % par milliard d'années, à la suite de l'augmentation du rythme des réactions de fusion par la lente contraction du cœur. Lorsqu'il sera âgé de 10,5 milliards d'années, l'équilibre hydrostatique sera rompu. Le Soleil aura converti tout l'hydrogène de son cœur en hélium. Le noyau d'hélium se contractera et s'échauffera fortement tandis que les couches superficielles, dilatées par le flux thermique croissant et ainsi partiellement libérées de l'effet gravitationnel, seront progressivement repoussées : le Soleil se dilatera et se transformera en géante rouge. Au terme de ce processus, le diamètre du Soleil sera environ 100 fois supérieur à l'actuel; il dépassera alors l'orbite de Mercure et de Vénus. La Terre, si elle subsiste encore, ne sera plus qu'un désert calciné.

## Soleil



### Données observées

<b>Demi-grand axe de l'orbite de la Terre (1 ua)</b>	149 597 870 km
<b>Magnitude apparente</b>	-26,74
<b>Magnitude absolue</b>	4,83

### Caractéristiques orbitales

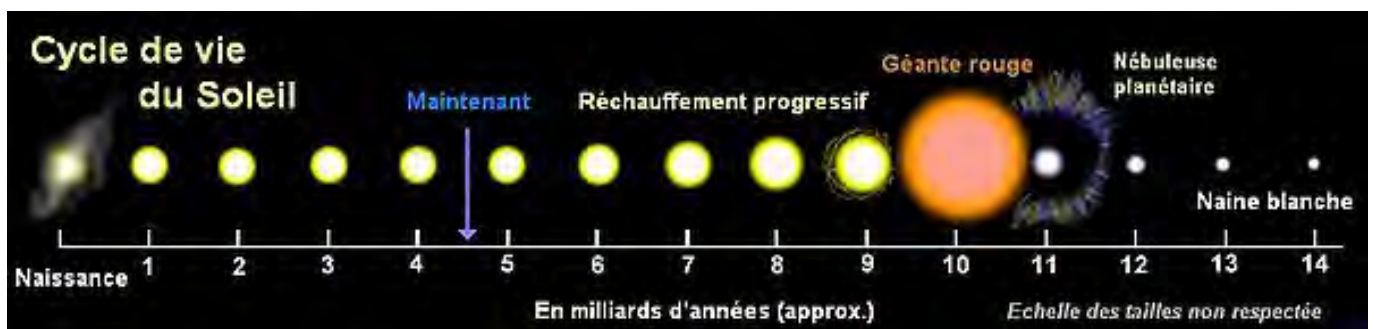
<b>Distance du centre de la Voie lactée</b>	$2,50 \times 10^{17}$ km (8 700 pc)
<b>Période galactique</b>	$2,26 \times 10^8$ années
<b>Vitesse</b>	217 km/s

### Caractéristiques physiques

<b>Diamètre moyen</b>	1 392 684 km	
<b>Rayon équatorial</b>	696 342 km	
<b>Circonférence équatoriale</b>	$4,379 \times 10^6$ km	
<b>Aplatissement aux pôles</b>	$9 \times 10^{-6}$	
<b>Surface</b>	$6,0877 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>	
<b>Volume</b>	$1,412 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup>	
<b>Masse (<math>M_{\odot}</math>)</b>	$1,9891 \times 10^{30}$ kg	
<b>Masse volumique</b>	moyenne	$1\,408$ kg·m <sup>-3</sup>
	au centre	$150\,000$ kg·m <sup>-3</sup>
<b>Gravité à la surface</b>	$273,95$ m·s <sup>-2</sup>	
<b>Vitesse de libération</b>	617,54 km/s	
<b>Température</b>	au centre	15,1 MK
	à la surface	5 750 K
	couronne	5 MK

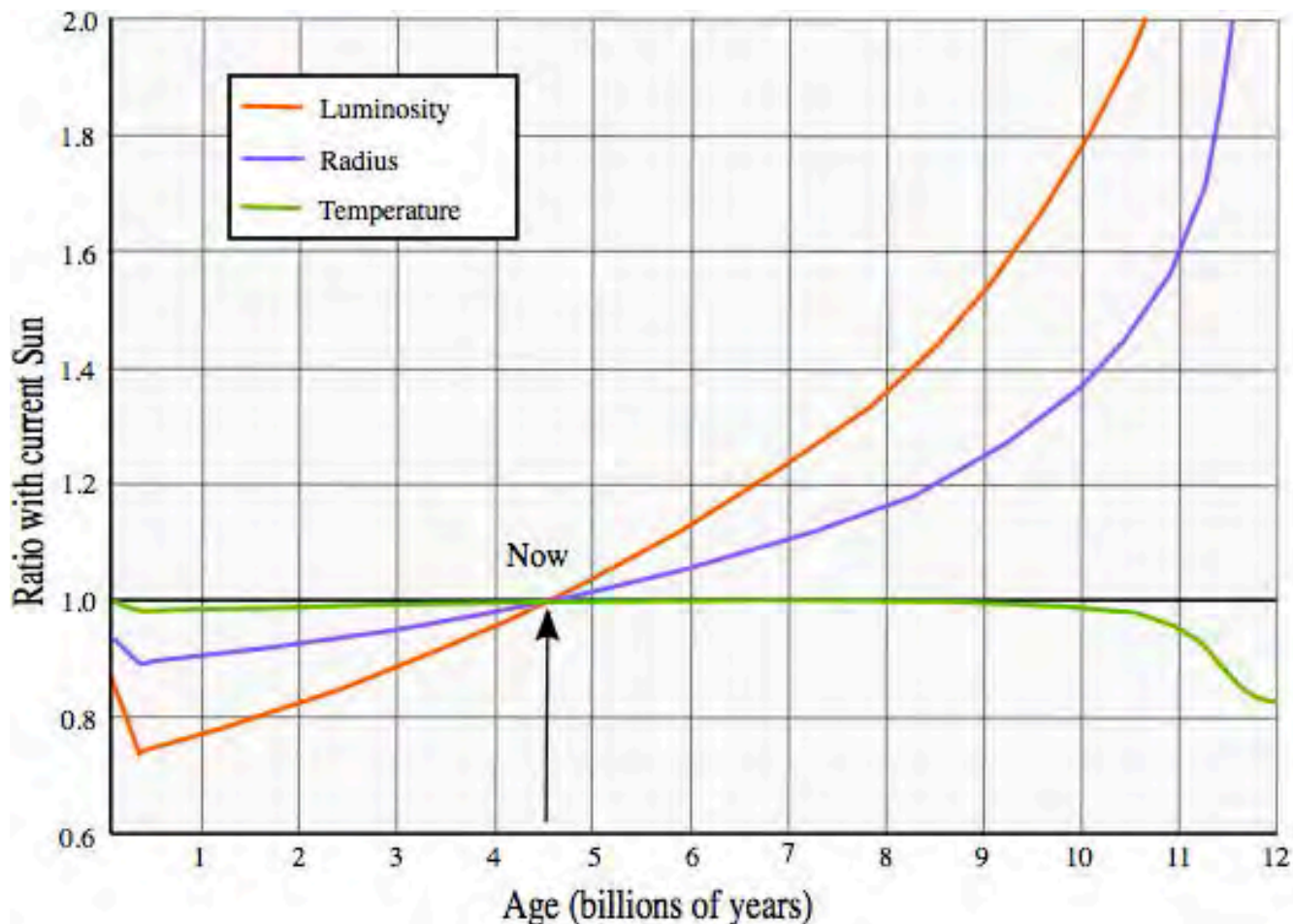
<b>Flux énergétique</b>	3,826×10 <sup>26</sup> W	
<b>Type spectral</b>	G2-V <sup>2</sup>	
<b>Métallicité</b>	Z = 0.0122	
<b>Rotation</b>		
<b>Inclinaison de l'axe</b>	/écliptique	7,25°
	/plan Galaxie	67,23°
<b>Ascension droite du pôle nord</b>	286,13°	
<b>Déclinaison du pôle nord</b>	63,87°	
<b>Vitesse, latitude 0</b>	7 008,17 km·h <sup>-1</sup>	
<b>Période de rotation</b>		
	latitude 0 °	24 j
	latitude 30 °	28 j
	latitude 60 °	30,5 j
	latitude 75 °	31,5 j
	moyenne	27,28 j
<b>Composition photosphérique (en masse)</b>		
<b>Hydrogène</b>	73,46 %	
<b>Hélium</b>	24,85 %	
<b>Oxygène</b>	0,77 %	
<b>Carbone</b>	0,29 %	
<b>Fer</b>	0,16 %	
<b>Néon</b>	0,12 %	
<b>Azote</b>	0,09 %	
<b>Silicium</b>	0,07 %	
<b>Magnésium</b>	0,05 %	
<b>Soufre</b>	0,04 %	

C'est durant cette phase de gonflement que son cœur en contraction arrivera aux environs de 100 millions de kelvins, initiant les réactions de fusion de l'hélium pour donner du carbone ainsi que de l'oxygène, tandis qu'une couronne externe du cœur fusionnera l'hydrogène en hélium. La période de fusion de l'hélium sera rapide : pendant 50 millions d'années, les noyaux d'hélium se combineront trois par trois pour former des noyaux de carbone qui peupleront le cœur de la géante rouge. Le Soleil n'est pas assez massif pour comprimer son cœur de carbone et atteindre la température de 600 millions de K nécessaire à la fusion du carbone produisant de l'oxygène. Cette phase se terminera par le flash de l'hélium, suivi d'un réarrangement des couches du Soleil faisant diminuer son diamètre jusqu'à ce qu'il se stabilise à une taille de plusieurs fois (jusqu'à 10 fois) sa taille actuelle, soit d'environ 10 millions de kilomètres de diamètre. Il sera devenu une sous-géante.



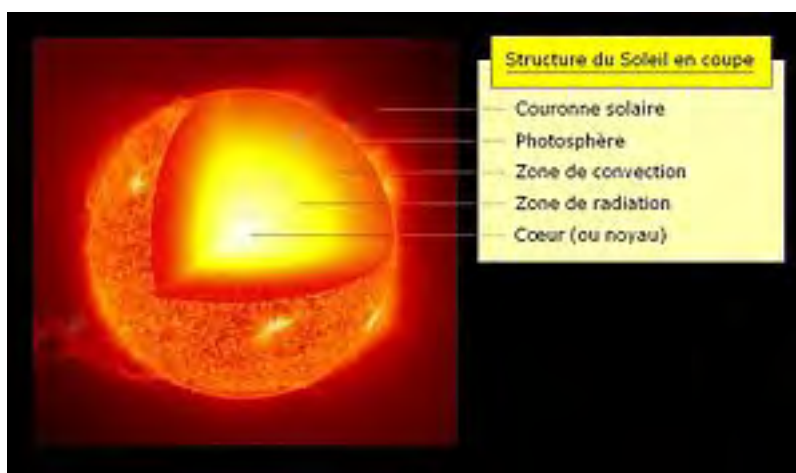
Cycle de vie du Soleil, il est similaire à celui d'une naine jaune

Enfin, les couches externes seront arrachées par les vents stellaires causés par les contractions du cœur de carbone sous l'effet de la gravité. La matière sera répandue dans l'espace et donnera naissance à une nébuleuse planétaire. La nébuleuse planétaire sera un nuage de gaz très chaud (plus de 10 000 K) composé essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium non consommés dans les fusions et d'un peu de carbone. Elle servira de berceau à de nouvelles étoiles. Le cœur de carbone, n'ayant plus de carburant pour fournir l'énergie nécessaire pour contrecarrer la gravité, va s'effondrer sur lui-même et former une naine blanche d'une taille comparable à la Terre. La densité y sera si élevée que le cœur abritera de la *matière électronique dégénérée*. La température en surface de la naine blanche atteindra 50 000 K (chaleur emmagasinée lors de l'effondrement du cœur). Cette chaleur émet un rayonnement de couleur blanche. La surface radiative étant extrêmement faible, la naine blanche mettra plusieurs milliards d'années à se refroidir. Quand la température sera assez basse, le rayonnement thermique sera si faible que la naine blanche sera invisible. Elle terminera sa vie en naine noire, un cadavre céleste si froid qu'il n'émet plus aucune lumière. Ce scénario est caractéristique des étoiles de faible à moyenne masse; de  $\sim 0,5$  à  $\sim 4$  masses solaires.

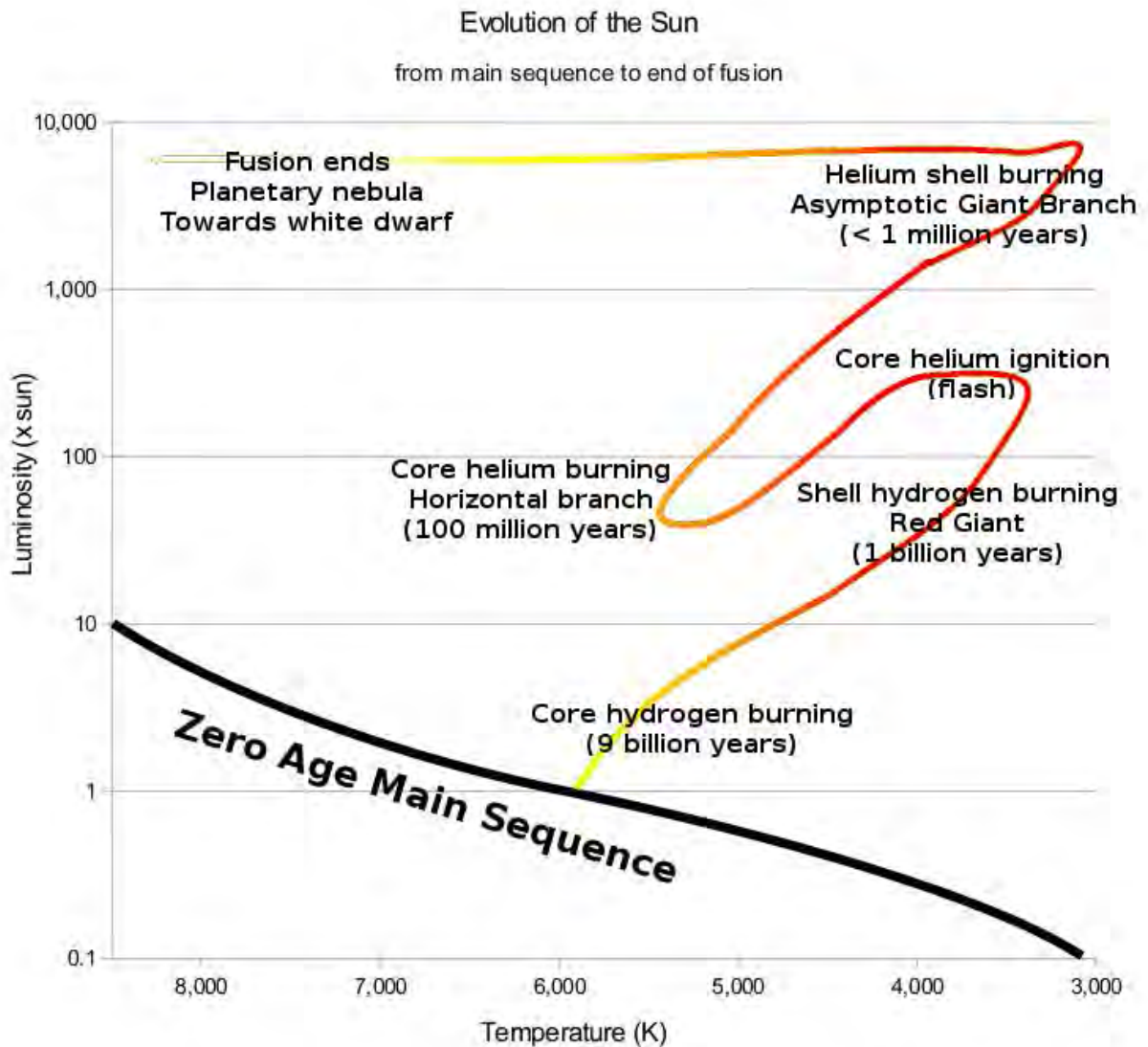


Évolution de la luminosité, du rayon et de la température solaires, comparés aux valeurs actuelles du Soleil

### Structure et fonctionnement



Structure du Soleil en coupe



*Évolution d'une étoile de type solaire. Le parcours d'une étoile d'une masse solaire sur le diagramme Hertzsprung-Russell est indiqué depuis la séquence principale jusqu'au delà du stade de la branche asymptotique des géantes*

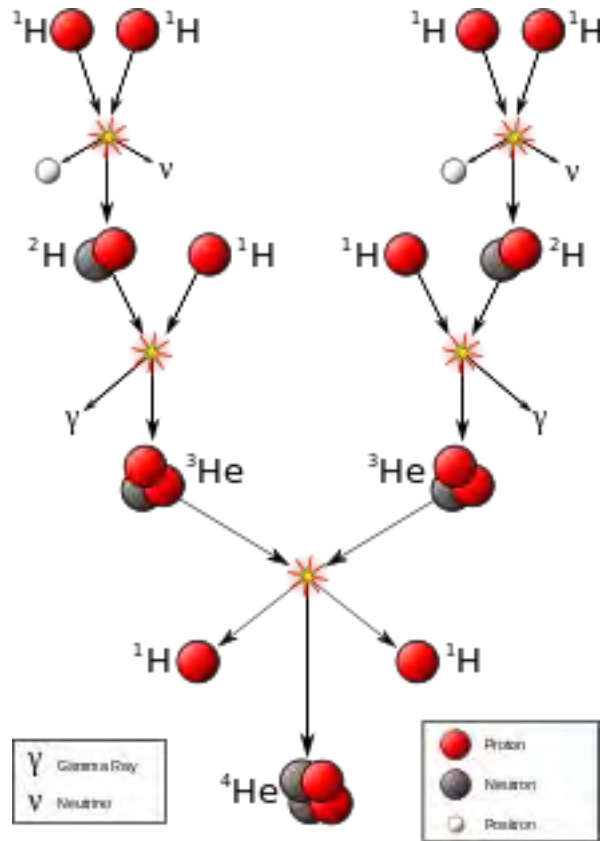
Bien que le Soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul environ 99,86 % de la masse du Système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf milliardièmes, ce qui signifie que son diamètre polaire est plus petit que son diamètre équatorial de seulement dix kilomètres.

Contrairement aux objets telluriques, le Soleil n'a pas de limite extérieure bien définie. La densité de ses gaz chute de manière à peu près exponentielle à mesure que l'on s'éloigne de son centre. Par contre, sa structure interne est bien définie. Le rayon du Soleil est mesuré de son centre jusqu'à la photosphère. La photosphère est la couche en dessous de laquelle les gaz sont assez condensés pour être opaques et au-delà de laquelle ils deviennent transparents. La photosphère est ainsi la couche la plus visible à l'œil nu.

La majeure partie de la masse solaire se concentre à 0,7 rayon du centre. La structure interne du Soleil n'est pas observable directement. De la même façon que la sismologie permet, par l'étude des ondes produites par les tremblements de terre, de déterminer la structure interne de la Terre, on utilise l'héliosismologie pour mesurer et visualiser indirectement la structure interne du Soleil. La simulation informatique est également utilisée comme outil théorique pour sonder les couches les plus profondes.

### **Le cœur ou noyau**

On considère que le cœur du Soleil s'étend du centre à environ 0,25 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à  $150\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (150 fois la densité de l'eau sur Terre) et sa température approche les 15 millions de kelvins (ce qui contraste nettement avec la température de surface du Soleil, qui avoisine les 5 800 kelvins). C'est dans le cœur que se produisent les réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment, dans le cas du Soleil, l'hydrogène en hélium.



*Le Soleil tire son énergie des réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son noyau, l'hydrogène en hélium*

Environ  $3,4 \times 10^{38}$  protons (noyaux d'hydrogène), soit 619 millions de tonnes d'hydrogène, sont convertis en 614 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, libérant une énergie correspondant à l'annihilation de 4,26 millions de tonnes de matière par seconde, produisant 383 yottajoules ( $383 \times 10^{24}$  joules) par seconde, soit l'équivalent de l'explosion de  $91,5 \times 10^{15}$  tonnes de TNT. Le taux de fusion nucléaire est proportionnel à la densité du noyau, aussi la fusion nucléaire au sein du cœur est un processus auto-régulé : toute légère augmentation du taux de fusion provoque un réchauffement et une dilatation du cœur qui réduit en retour le taux de fusion. Inversement, toute diminution légère du taux de fusion refroidit et densifie le cœur, ce qui fait revenir le niveau de fusion à son point de départ. Le cœur est la seule partie du Soleil qui produise une quantité notable de chaleur par fusion : le reste de l'étoile tire sa chaleur uniquement de l'énergie qui en provient. La totalité de l'énergie qui y est produite doit traverser de nombreuses couches successives jusqu'à la photosphère, avant de s'échapper dans l'espace sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules.

L'énergie des photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion met un temps considérable pour traverser les zones de radiation et de convection avant d'atteindre la surface du Soleil. On estime que le temps de transit du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans. Après avoir traversé la couche de convection et atteint la photosphère, les photons s'échappent dans l'espace, en grande partie sous forme de lumière. Chaque rayon gamma produit au centre du Soleil est finalement transformé en plusieurs millions de photons lumineux qui s'échappent dans l'espace. Des neutrinos sont également libérés par les réactions de fusion, mais contrairement aux photons ils interagissent peu avec la matière et sont donc libérés immédiatement. Pendant des années, le nombre de neutrinos produits par le Soleil était mesuré plus faible d'un tiers que la valeur théorique : c'était le *problème des neutrinos solaires*, qui a été résolu en 1998 grâce à une meilleure compréhension du phénomène d'oscillation du neutrino.

### La zone de radiation

La zone de radiation ou zone radiative se situe approximativement entre 0,25 et 0,7 rayon solaire. La matière solaire y est si chaude et si dense que le transfert de la chaleur du centre vers les couches les plus extérieures se fait par la seule radiation thermique. L'hydrogène et l'hélium ionisés émettent des photons qui voyagent sur une courte distance avant d'être réabsorbés par d'autres ions. Les photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion mettent un temps considérable pour atteindre la surface du Soleil, ralentis par l'interaction avec la matière et par le phénomène permanent d'absorption et de réémission à plus basse énergie dans le manteau solaire. On estime que le temps de transit de l'énergie d'un photon du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans. Dans cette zone, il n'y a pas de convection thermique car bien que la matière se refroidisse en s'éloignant du cœur, le gradient thermique reste inférieur au gradient thermique adiabatique. La température y diminue à 2 millions de kelvins.

### La zone de convection

La zone de convection ou zone convective s'étend de 0,8 rayon solaire du centre à la surface visible du Soleil. Elle est séparée de la zone de radiation par une couche épaisse d'environ 3 000 kilomètres, la tachocline, qui d'après les études récentes pourrait être le siège de puissants champs magnétiques et jouerait un rôle important dans la dynamo solaire. Dans la zone de



convection la matière n'est plus ni assez dense ni assez chaude pour évacuer la chaleur par radiation : c'est donc par convection, selon un mouvement vertical, que la chaleur est conduite vers la photosphère. La température y passe de 2 millions à ~5 800 kelvins. La matière parvenue en surface, refroidie, plonge à nouveau jusqu'à la base de la zone de convection pour recevoir la chaleur de la partie supérieure de la zone de radiation, etc. Les gigantesques cellules de convection ainsi formées sont responsables des granulations solaires observables à la surface de l'astre. Les turbulences survenant dans cette zone produisent un effet dynamo responsable de la polarité magnétique nord-sud à la surface du Soleil.

### La photosphère



*La photosphère vue à travers un filtre*

La photosphère est une partie externe de l'étoile qui produit entre autres la lumière visible. Elle est plus ou moins étendue : de moins de 0,1 % du rayon pour les étoiles naines, soit quelques centaines de kilomètres; à quelques dizaines de pourcent du rayon de l'étoile pour les géantes, ce qui leur donnerait un contour *flou* contrairement au Soleil aux bords nets.

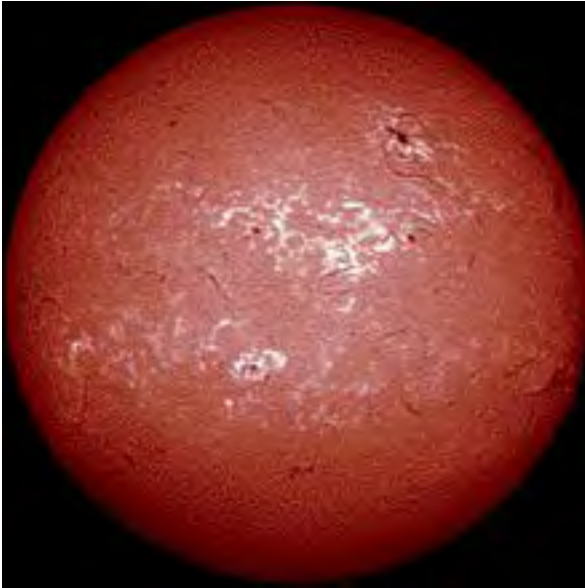
La lumière qui y est produite contient toutes les informations sur la température, la gravité de surface et la composition chimique de l'étoile. Pour le Soleil, la photosphère a une épaisseur d'environ 400 kilomètres. Sa température moyenne est de 6 000 K. Elle permet de définir la température effective qui pour le Soleil est de 5 781 K. Sur l'image de la photosphère solaire on peut voir l'assombrissement centre-bord qui est une des caractéristiques de la photosphère. L'analyse du spectre de la photosphère solaire est très riche en information en particulier sur la composition chimique du Soleil. La photosphère est maculée d'une granulation qui lui donne l'aspect d'une peau d'orange. Ce sont des sphères d'environ 1 000 km de diamètre, composées de gaz chaud remontant vers la surface à près de 500 mètres par seconde, qui lui donnent cet aspect. La surface atteinte, elles irradient leur énergie et, une fois refroidies, replongent dans l'étoile. Chaque sphère de granulation dure huit minutes en moyenne.

### L'atmosphère solaire

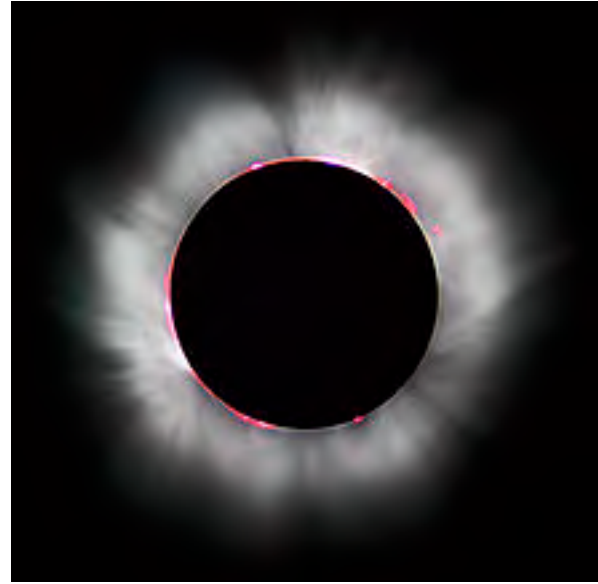
La structure du Soleil au-delà de la photosphère est généralement connue sous le nom d'*Atmosphère solaire*. Elle comprend trois zones principales : la chromosphère, la couronne et l'héliosphère. La chromosphère est séparée de la photosphère par la *zone de température minimum* et de la couronne par une *zone de transition*. L'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du Système solaire où elle est limitée par l'héliopause. Pour une raison encore mal élucidée, la chromosphère et la couronne sont plus chaudes que la surface du Soleil. Bien qu'elle puisse être étudiée en détail par les télescopes spectroscopiques, l'atmosphère solaire n'est jamais aussi accessible que lors des éclipses totales de Soleil.

### La chromosphère

La *zone de température minimum* qui sépare la photosphère de la chromosphère offre une température suffisamment basse (~4 000 kelvins) pour qu'on y trouve des molécules simples (monoxyde de carbone, eau), détectables par leur spectre d'absorption. La chromosphère proprement dite est épaisse d'environ 2 000 kilomètres. Sa température augmente graduellement avec l'altitude, pour atteindre un maximum de 100 000 kelvins à son sommet. Son spectre est dominé par des bandes d'émission et d'absorption. Son nom, qui vient de la racine grecque *chroma* (couleur), lui a été donné en raison du flash rose soutenu qu'elle laisse entrevoir lors des éclipses totales de Soleil.



La chromosphère vue en analyse spectrale  $H\alpha$



Les éclipses totales de Soleil (ici celle du 11 août 1999) sont la seule occasion de visualiser directement la couronne (en blanc) et la chromosphère (en rose)

### La couronne

La zone de transition entre la chromosphère et la couronne est le siège d'une élévation rapide de température, qui peut approcher 1 million de kelvins. Cette élévation est liée à une transition de phase au cours de laquelle l'hélium devient totalement ionisé sous l'effet des très hautes températures. La zone de transition n'a pas une altitude clairement définie. Grossièrement, elle forme un halo surplombant la chromosphère sous l'apparence de spicules et de filaments. Elle est le siège d'un mouvement chaotique et permanent. Difficile à percevoir depuis la Terre malgré l'utilisation de coronographes, elle est plus aisément analysée par les instruments spatiaux sensibles aux rayonnements ultraviolets extrêmes du spectre.

La couronne solaire est composée à 73 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Les températures sont de l'ordre du million de degrés. Bien plus vaste que le Soleil lui-même, la couronne solaire elle-même s'étend à partir de la zone de transition et s'évanouit progressivement dans l'espace, mêlée à l'héliosphère par les vents solaires. La couronne inférieure, la plus proche de la surface du Soleil, a une densité particulière comprise entre  $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  et  $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ , soit moins d'un milliardième de la densité particulière de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer. Sa température, qui peut atteindre les 5 millions de kelvins, contraste nettement avec la température de la photosphère. Bien qu'aucune théorie n'explique encore complètement cette différence, une partie de cette chaleur pourrait provenir d'un processus de reconnexion magnétique.

### L'héliosphère

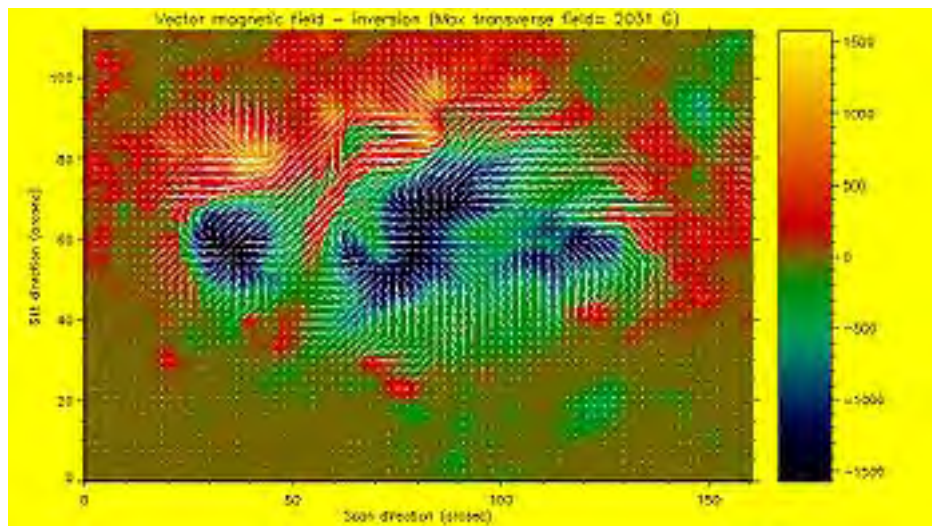
Débutant à environ 20 rayons solaires (0,1 ua) du centre du Soleil, l'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du Système solaire. On admet qu'elle débute lorsque le flux de vent solaire devient plus rapide que les ondes d'Alfvén (le flux est alors dit *superalfvénique*) : les turbulences et forces dynamiques survenant au-delà de cette frontière n'ont pas d'influence sur la structure de la couronne solaire, car l'information ne peut se déplacer qu'à la vitesse des ondes d'Alfvén. Le vent solaire se déplace ensuite en continu à travers l'héliosphère, donnant au champ magnétique solaire la forme d'une spirale de Parker jusqu'à sa rencontre avec l'héliopause, à plus de 50 ua du Soleil. En décembre 2004, Voyager 1 est devenue la première sonde à franchir l'héliopause. Chacune des deux sondes Voyager a détecté d'importants niveaux énergétiques à l'approche de cette frontière.

### Les taches solaires

Bien que tous les détails sur la genèse des taches solaires ne soient pas encore élucidés, il a été démontré (par l'observation de l'effet Zeeman) qu'elles sont la résultante d'une intense activité magnétique au sein de la zone de convection. Le champ magnétique, qui en est issu, freine la convection et limite l'apport thermique en surface à la photosphère, le plasma de la surface se refroidit et se contracte. Les taches solaires sont des dépressions à la surface solaire. Elles sont ainsi moins chaudes de 1 500 à 2 000 kelvins que les régions voisines, ce qui suffit à expliquer pourquoi elles apparaissent, en contraste, bien plus sombres que le reste de la photosphère. Cependant, si elles étaient isolées du reste de la photosphère, les taches solaires, où règne malgré tout une température proche des 4 000 kelvins, sembleraient 10 fois plus brillantes que la pleine lune. La sonde spatiale SoHO a permis de démontrer que les taches solaires répondent à un mécanisme proche de celui des cyclones sur Terre. On distingue deux parties au sein de la tache solaire : la zone d'ombre centrale (environ 4 000 kelvins) et la zone de pénombre périphérique (environ 4 700 kelvins). Le diamètre des taches solaires les plus petites est habituellement plus de deux fois supérieur à celui de la Terre. En période d'activité, il est parfois possible de les observer à l'œil nu sur le Soleil couchant, avec une protection oculaire adaptée.

La surveillance des taches solaires est un excellent moyen pour mesurer l'activité solaire et prédire ses répercussions terrestres. Une tache solaire a une durée de vie moyenne de deux semaines. Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'astronome allemand Heinrich Schwabe fut le premier à tenir une cartographie méthodique des taches solaires, ce qui lui permit de mettre en évidence une périodicité

temporelle de leurs occurrences. L'ensemble des mesures réalisées indique un cycle principal dont la période varie entre 9 et 13 ans (moyenne statistique 11,2). Dans chaque période apparaît un maximum d'activité (où les taches se multiplient) et un minimum d'activité. Le dernier maximum d'activité a été enregistré en 2001, avec un groupe de taches particulièrement marqué.



*Le champ magnétique au niveau d'un groupe de taches froides de la photosphère solaire (intensité exprimée en Gauss).  
Les niveaux de couleur décrivent la composante du champ magnétique le long de la ligne de visée.  
Les traits blancs illustrent la composante du champ perpendiculaire à la ligne de visée.  
Image obtenue à partir d'observations du télescope solaire THEMIS et traitée par BASS 2000*

### Milieu interplanétaire

En plus de la lumière, le Soleil émet un flux continu de particules chargées (un plasma) appelé vent solaire. Ce flux s'étend à la vitesse approximative de 1,5 million de kilomètres par heure, créant une atmosphère ténue, l'héliosphère, qui baigne le Système solaire jusqu'à environ 100 unités astronomiques (marquant l'héliopause). Le matériau composant l'héliosphère est connu sous le nom de milieu interplanétaire. Le cycle solaire de onze ans et les fréquentes éruptions solaires et éjections de masse coronale perturbent l'héliosphère et créent un climat spatial. La rotation du champ magnétique solaire agit sur le milieu interplanétaire pour créer la couche de courant héliosphérique, la plus grande structure du Système solaire.



*La couche de courant héliosphérique*



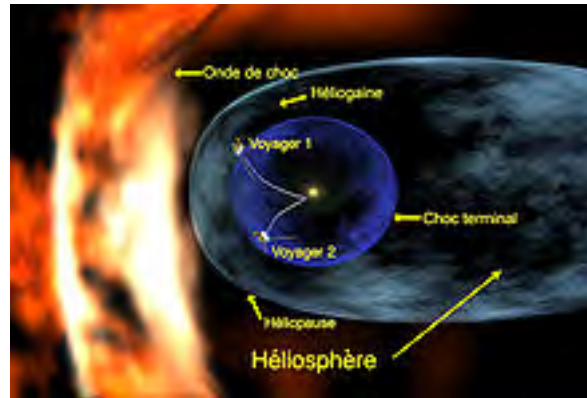
*Une aurore australe vue depuis l'orbite terrestre*

Le champ magnétique terrestre protège l'atmosphère du vent solaire. Vénus et Mars ne possèdent pas de champ magnétique et le vent solaire souffle graduellement leur atmosphère dans l'espace. Sur Terre, l'interaction du vent solaire et du champ magnétique terrestre cause les aurores polaires (boréales ou australes).

L'héliosphère protège en partie le Système solaire des rayons cosmiques, protection augmentée sur les planètes disposant de champ magnétique. La densité de rayons cosmiques dans le milieu interstellaire et l'intensité du champ magnétique solaire changent sur de très longues périodes, donc le niveau de rayonnement cosmique dans le Système solaire varie, mais on ignore de combien. Le milieu interplanétaire héberge au moins deux régions de poussières cosmiques en forme de disque. La première, le nuage de poussière zodiacal, réside dans le Système solaire interne et cause la lumière zodiacale. Il fut probablement formé par des collisions à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes causées par des interactions avec les planètes. La deuxième s'étend de 10 à 40 UA et fut probablement créée lors de collisions similaires dans la ceinture de Kuiper.

## Régions lointaines

### Héliopause, Héliosphère, Héliogaine



La sonde Voyager 1 pénétrant l'héliogaine

L'héliosphère est divisée en deux régions distinctes. Le vent solaire voyage à sa vitesse maximale jusqu'à environ 95 UA, trois fois la distance moyenne entre Pluton et le Soleil. Ensuite, le vent solaire entre en collision avec les vents opposés en provenance du milieu interstellaire. Il ralentit, se condense et subit des turbulences, formant une grande structure ovale appelée l'héliogaine qui ressemble et se comporte de façon assez similaire à la queue d'une comète, s'étendant encore sur 40 UA dans un sens et sur plusieurs fois cette distance dans la direction opposée. La limite externe de l'héliosphère, l'héliopause, est le point où le vent solaire s'éteint et où débute l'espace interstellaire. La forme de l'héliopause est affectée par les interactions avec le milieu interstellaire, ainsi que par les champs magnétiques solaires dominant au sud (l'hémisphère nord s'étend 9 UA plus loin que l'hémisphère sud). Au-delà de l'héliopause, à environ 230 UA du Soleil, s'étend une onde de choc, une zone de plasma laissée par le Soleil au cours de son trajet à travers la Voie lactée. Aucune sonde spatiale n'a dépassé l'héliopause et les conditions dans l'espace interstellaire ne sont pas connues. On sait assez peu à quel point l'héliosphère protège le Système solaire des rayons cosmiques. Une mission spécifique a été suggérée.

#### b) Les rayonnements du soleil et leurs dangers

##### Observation du Soleil et dangers pour l'œil

###### Observation à l'œil nu

Regarder le Soleil à l'œil nu, même brièvement, est douloureux et même dangereux pour les yeux.

Un coup d'œil vers le Soleil entraîne des cécités partielles et temporaires (taches sombres dans la vision). Lors de cette action, environ 4 milliwatts de lumière frappent la rétine, la chauffant un peu, et éventuellement la détériorant. La cornée peut également être atteinte. L'exposition générale à la lumière solaire peut aussi être un danger. En effet, au fil des années, l'exposition aux UV jaunit le cristallin ou réduit sa transparence et peut contribuer à la formation de cataractes.

###### Observation avec un dispositif optique

Regarder le Soleil à travers les dispositifs optiques grossissants — par exemple des jumelles, un téléobjectif, une lunette astronomique ou un télescope — dépourvus de filtre adapté (filtre solaire) est extrêmement dangereux et peut provoquer des dommages irréparables à la rétine, au cristallin et à la cornée. Avec des jumelles, environ 500 fois plus d'énergie frappe la rétine, ce qui peut détruire les cellules rétinales quasiment instantanément et entraîner une cécité permanente.

Une méthode pour regarder sans danger le Soleil est de projeter son image sur un écran en utilisant un télescope avec oculaire amovible (les autres types de télescopes peuvent être détériorés par ce traitement). Les filtres utilisés pour observer le Soleil doivent être spécialement fabriqués pour cet usage. Certains filtres laissent passer les UV ou infrarouges, ce qui peut blesser l'œil. Les filtres doivent être placés sur la lentille de l'objectif ou l'ouverture, mais jamais sur l'oculaire car ses propres filtres peuvent se briser sous l'action de la chaleur. Les films photographiques surexposés — et donc noirs — ne sont pas suffisants pour observer le Soleil en toute sécurité car ils laissent passer trop d'infrarouges. Il est recommandé d'utiliser des lunettes spéciales en Mylar, matière plastique noire qui ne laisse passer qu'une très faible fraction de la lumière.

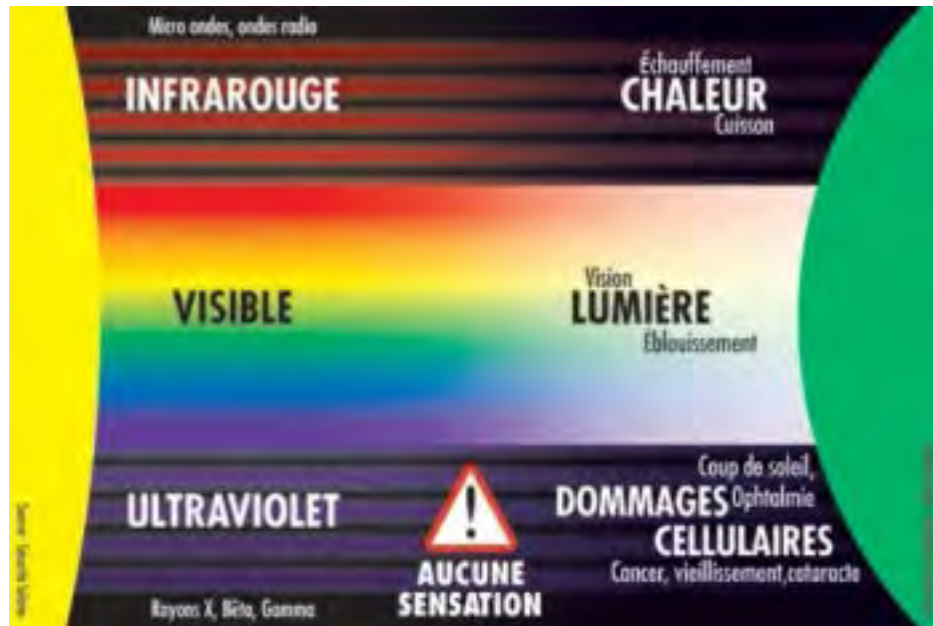
###### Les éclipses

Les éclipses solaires partielles sont particulièrement dangereuses car la pupille se dilate en fonction de la lumière globale du champ de vision et non selon le point le plus brillant présent dans le champ. Durant une éclipse, la majeure partie de la lumière est bloquée par la Lune, mais les parties non cachées de la photosphère sont toujours aussi brillantes. Dans ces conditions, la pupille se dilate pour atteindre 2 à 6 millimètres et chaque cellule exposée au rayonnement solaire reçoit environ 10 fois plus de lumière qu'en regardant le Soleil sans éclipse ! Ceci peut endommager ou même tuer ces cellules, ce qui crée de petits points aveugles dans la vision. Les éclipses sont encore plus dangereuses pour les observateurs inexpérimentés et les enfants car il n'y a pas perception de douleur lors de ces destructions de cellules. Les observateurs peuvent ne pas se rendre compte que leur vision est en train de se faire détruire.

##### Généralités sur les principaux types de rayons

Les rayons qui parviennent essentiellement sont:

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 400 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules
- La Lumière visible, de 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs
- Les Infrarouges (IR), de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.



*Mise en évidence des différents rayons qui parviennent à l'être humain*

### Les ondes électromagnétiques :

Le rayonnement électromagnétique comprend plusieurs catégories de radiations qui peuvent être décomposées en fonction de la longueur d'onde : c'est ce qu'on appelle le spectre électromagnétique. Ce dernier comporte :

- les ondes radio et les micro-ondes dont la longueur d'onde est supérieure à 1 400 nm.
- l'infrarouge dont la longueur d'onde se situe entre 800 à 400 nm, invisible.
- la lumière visible dont la longueur d'onde va de 400 à 800 nm, visible.
- l'ultraviolet dont la longueur d'onde varie de 100 à 400 nm, invisible.
- les rayons X dont la longueur d'onde est inférieure à 100 nanomètres, invisible.
- et les rayons gamma (longueurs d'onde inférieures à 5 nanomètres, invisible).

### Généralités sur le rayonnement visible

La lumière visible, également nommée spectre visible ou spectre optique est la partie du spectre électromagnétique qui est visible par l'œil humain. Le spectre visible n'a pas de limite exacte. En effet, l'œil humain adapté à la lumière possède généralement une sensibilité maximale à la lumière de longueur d'onde proche de 550 nm, ce qui correspond à une couleur jaune, verte. On considère généralement que la réponse de l'œil couvre les longueurs d'ondes de 380 nm à 780 nm bien qu'une gamme de 400 nm à 700 nm soit plus commune. Ces extrêmes correspondent respectivement aux couleurs violet et rouge. Cependant, l'œil peut aussi avoir une certaine réponse visuelle dans des gammes de longueurs d'onde encore plus larges. Les longueurs d'onde dans la gamme visible pour l'œil occupent la majeure partie de la fenêtre optique, une gamme des longueurs d'onde qui sont facilement transmises par l'atmosphère de la Terre.

### Le spectre solaire

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grandes quantités. Il s'agit du rayonnement solaire. Ces flux de photons également appelés radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s, correspondant à la vitesse de la lumière, et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. Les différents types de rayons se distinguent par leur longueur d'onde, c'est à dire le spectre solaire. Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,...), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère. Les rayons de longueur d'ondes très longues (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre.

### Les rayons ultraviolets, des rayons émis par le Soleil.

#### *Les différents types d'UV*

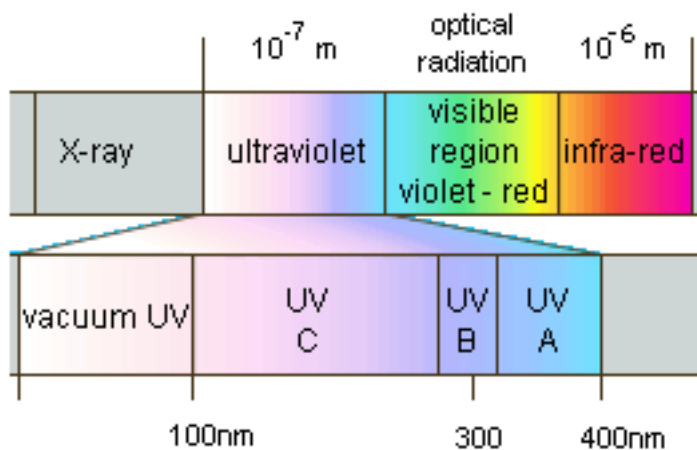
Le rayonnement UV est considéré comme un rayonnement électromagnétique, également présent dans la lumière solaire. Il se situe dans le spectre électromagnétique en les rayons X d'une part et des rayons Infrarouges d'autre part. Le rayonnement UV s'étend sur une gamme de longueur d'ondes comprises entre 100 et 400 nanomètres. L'énergie du rayonnement varie en fonction de la longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'ondes est faible, plus l'énergie du rayonnement sera élevée. Le rayonnement solaire est composé au total de 52% de rayons visibles, de 44% de rayonnements thermiques et enfin de 4% de rayonnement UV. Les rayons ultraviolets font partie du rayonnement solaire invisible. En effet, nos yeux, contrairement à la lumière "visible" les perçoivent sans les voir. Comme l'ensemble des rayons émis par le Soleil, les UV parviennent jusqu'à nos

yeux de trois façons différentes. De manière directe, ils sont émis par le soleil et arrivent directement à notre œil. Par diffusion, après avoir été émis par le soleil, ils sont diffusés dans l'atmosphère afin de parvenir jusqu'à notre œil. Par réflexion, suite à leur émission par le Soleil, il rencontre une surface qui joue l'effet d'un miroir avant d'arriver jusqu'à notre œil.

Surface réfléchissante	Taux de réfléchissement des rayons UV en %
Eau	5 à 10%
Sable	20%
Neige	85%

*Taux de réfléchissement des UV en fonction de la surface réfléchissante*

Comme la lumière, les **ultraviolets** se décomposent en plusieurs types de rayons. On classe les rayons ultraviolets émis par le soleil en trois groupes, selon leur longueur d'ondes. Tout d'abord les rayons UV C, s'étalant de 100 à 280 nm, les rayons UV B de 280 à 320 nm et enfin les rayons UV A de 320 à 400 nm. De plus, on constate la présence d'une autre catégorie d'UV, c'est-à-dire la gamme de longueurs d'ondes comprises entre 10 et 100 nm nommée UV de vide, vacuum UV en anglais. En effet, ces rayons sont entièrement absorbés dans l'air.



*Mise en évidence des longueurs d'ondes des différents types d'UV dans le spectre solaire*

#### **Les rayons UVA**

Les **rayons UVA** constituent les rayons aux longueurs d'ondes les plus longues. Considérés comme les plus dangereux, leur action négative n'est pas toujours immédiatement visible car elle est lente et cumulative. Les **UVA** représentent entre 95 % et 98% des ultraviolets qui arrivent à la surface de la terre.

#### **Les rayons UVB**

Les rayons **UVB**, dont les ondes sont de longueur moyenne, sont très néfastes pour l'organisme, mais ils sont presque totalement absorbés par l'atmosphère, et plus particulièrement par la couche d'ozone. C'est pourquoi, le trou de cette dernière augmente le risque d'exposition aux **UVB**. Ils représentent entre 2% et 5% des UV touchant la surface de la terre.

#### **Les rayons UVC**

Les rayons **UVC** sont les plus courts des rayons ultraviolets. Du fait de leur longueur d'ondes comprise entre 100 et 280 nm, ils possèdent une très haute fréquence et une très grande énergie, les rendant redoutables. Ainsi, considérés comme les plus nocifs, ils n'atteignent heureusement pas la surface de la Terre. En effet, 99% d'entre eux sont absorbés par l'atmosphère. Ces derniers entrent dans la fabrication de la couche d'ozone.

**Variation des rayonnements UV :** L'intensité des UV mesurée au sol varie en fonction de différents facteurs:

- L'altitude et la latitude:

Plus le chemin des UV à travers l'atmosphère est court, et plus leur intensité est forte (par exemple, aux pôles, l'intensité est 1000 fois moins importante qu'à l'équateur). En montagne, le parcours du rayonnement solaire à travers l'atmosphère diminue avec l'altitude. Les UV sont ainsi moins filtrés en altitude et l'intensité augmentant il y a un accroissement du danger de brûlures. L'intensité des UV et par conséquent l'index UV augmente d'environ 10% par 1000 mètres d'élévation.

- La couche atmosphérique et la couche d'ozone:

Celles-ci jouent le rôle d'un bouclier protecteur contre les radiations s'avérant les plus dangereuses émises par le soleil. Non seulement elles stoppent presque la totalité des UV C mais en plus, elles filtrent aussi les UV A et les UV B.

- L'atmosphère:

Plus le soleil se trouve à une altitude basse dans le ciel, plus les rayons UV dont le parcours à travers l'atmosphère est alors rallongé sont absorbés ou diffusés. Par conséquent, l'intensité du rayonnement UV est très faible le matin et le soir (Index UV 1/2). Inversement, lorsque le soleil est haut dans le ciel, le trajet des rayons dans l'atmosphère est plus court et l'index UV est ainsi élevé.

- La concentration d'ozone stratosphérique:

Une diminution de 1% de la couche d'ozone entraîne une augmentation de 2% de l'intensité des UVB au sol. Cependant une augmentation moins forte que prévue du rayonnement UV à la suite de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, a révélé que l'ozone troposphérique (produit par les activités humaines des pays industrialisés) absorbe une bonne quantité des UV en particulier au-dessus des villes. Des mesures prises dans les Alpes à 3500 m d'altitude, ont montré une augmentation de leur intensité d'environ 1% par année depuis 1981, ce que l'on explique par la diminution de la couche d'ozone stratosphérique.

- La couverture nuageuse:

Les rayonnements solaires sont diffusés par des gouttelettes contenues dans les nuages. Il résulte de ce phénomène des variations de l'intensité des UV à la surface de la terre. Cependant, même avec une faible couverture nuageuse, les UV sont encore présents !

- La réflexion:

Celle-ci dépend du revêtement du sol. La neige, l'eau et le sable reflètent fortement les UV. En effet, la neige réfléchit 40 à 90 % du rayonnement UV, l'eau 10 à 30% et le sable 5 à 25%.

- L'heure:

Elle joue un rôle très important. Le maximum d'intensité des UV se situe en été entre 11h00 et 15h00.

- Les aérosols (particules en suspension dans l'air):

Les rayonnements UV sont également diffusés par des particules telles que les polluants atmosphériques, qui en diminuent l'intensité.

### L'indice UV

L'indice UV est une mesure de l'intensité du rayonnement UV. Les valeurs de cet indice débutent par zéro et vont en augmentant. Ainsi, plus il est élevé, plus le potentiel de lésion cutanée et oculaire augmente, et moins il faut de temps pour que l'effet nocif apparaisse. L'indice UV varie en France métropolitaine de 8 à 9 en plaine, de 10 en montagne à 2000 mètres d'altitude. Non loin des tropiques, il passe à 12 pour atteindre un taux de 15 à l'équateur. L'état du ciel est un élément important, pourtant il faut se montrer très vigilant quant à la couche de nuages qui ne filtre qu'une partie des UV.

Indice UV	Catégorie	Temps pour affecter la santé
Supérieur à 9	Extrême	Moins de 15 minutes
7 à 9	Fort	Moins de 20 minutes
4 à 7	Moyen	Environ 30 minutes
0 à 4	Faible	Moins d'une heure

*Classification des différents indices UV, en fonction de l'intensité du rayonnement UV et du temps d'exposition nécessaire aux UV afin d'affecter l'organisme*

L'augmentation de l'incidence des cancers cutanés parmi les populations à la peau claire est significative et étroitement associée à une exposition excessive, soit au rayonnement UV solaire, soit au rayonnement émis par des sources artificielles telles que des cabines à bronzage. Les données actuellement recueillies indiquent que les habitudes personnelles d'exposition solaire constituent un facteur de risque individuel majeur dans les lésions dues au rayonnement UV.

Ainsi, l'indice UV peut se révéler un outil très utile afin de sensibiliser le public face aux risques d'une exposition excessive au rayonnement UV. Cet instrument permet également d'alerter la population d'adopter des mesures de protection, même dans un milieu où l'action du soleil semble moindre. D'une part, l'OMS, programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale a défini l'indice UV, dans le cadre d'un effort international. Ils visent à encourager la population à réduire leur exposition solaire afin de diminuer les effets nocifs sur la santé, tout ceci à des fins économiques en réduisant sensiblement les dépenses de soins de santé. Ce programme encourage également les médias et l'industrie du tourisme à publier des prévisions de l'indice UV ainsi qu'à promouvoir des messages de protection solaire. D'autre part, le programme INTERSUN œuvre afin d'harmoniser l'indice UV et conseille aux pouvoirs publics d'employer l'indice UV comme un outil pédagogique dans leurs programmes de promotion de la santé. L'intensité du rayonnement UV varie considérablement en fonction du moment et de l'endroit. Le risque accru de lésions cutanées ou oculaires dues aux UV au cours d'un séjour dans un endroit ensoleillé est souvent sous-estimé.

### Les éruptions solaires et les effets terrestres de l'activité solaire

Les **effets terrestres de l'activité solaire** sont multiples, le plus spectaculaire étant le phénomène des aurores polaires (également appelée aurore boréale dans l'hémisphère Nord et aurore australe dans l'hémisphère Sud). Une prévision de l'activité solaire est particulièrement importante en vue des missions spatiales. Une méthode reposant sur des relations entre plusieurs périodes consécutives a été établie par Wolfgang Gleißberg. La Terre possède une magnétosphère qui la protège des vents solaires, mais lorsque ceux-ci sont plus intenses, ils déforment la magnétosphère et des particules solaires ionisées la traversent en suivant les lignes de champs. Ces particules ionisent et excitent les particules de la haute atmosphère. Le résultat de ces réactions est la création de nuages ionisés qui reflètent les ondes radios et l'émission de lumière visible par les atomes et molécules excités dans les aurores polaires. Les vents solaires peuvent également perturber les moyens de communication et de navigation utilisant des satellites, en effet, les satellites à basse altitude peuvent être endommagés par l'ionisation de l'ionosphère.



*Une éruption solaire*

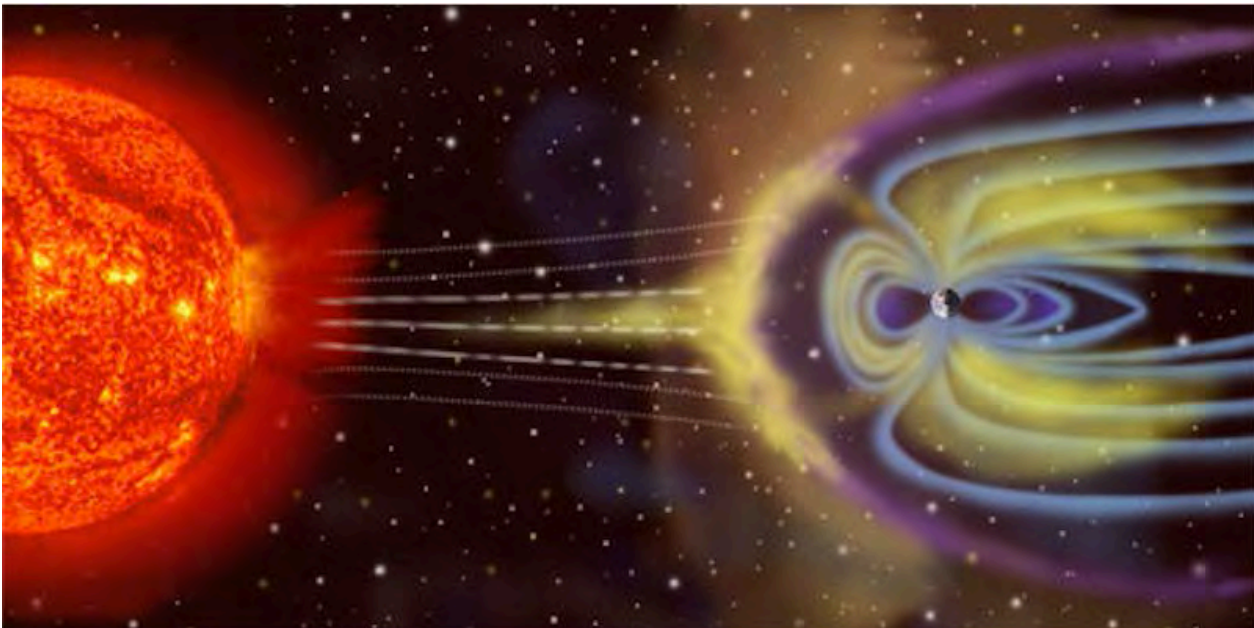


*Les aurores polaires sont une manifestation spectaculaire de l'activité solaire*

## La très forte tempête solaire de 2012, puis celle de 2014, à travers la Presse

*(Journal Le Monde 25/07/2014)*

Dans le détail, les tempêtes solaires naissent à la surface du Soleil : des explosions (ou éjections de masse coronale) projettent du plasma ionisé dans l'espace à de grandes vitesses. Les vents solaires chargés de puissantes radiations qui en résultent peuvent provoquer des orages géomagnétiques lors de leur entrée en contact avec le champ magnétique terrestre. Résultat : les tempêtes solaires ont la capacité de perturber tous les réseaux électriques terrestres, et interrompre les télécommunications, les transports aériens ou tout autre système reposant sur l'électricité. Internet compris.



**En 2012, une tempête solaire d'une puissance jamais vue depuis 1859 est passée tout près de la Terre, sans la frapper. C'est une chance : elle aurait pu perturber tous les circuits électriques de la planète et « renvoyer la civilisation contemporaine au XVIII<sup>e</sup> siècle », selon un communiqué de la NASA diffusé le 23 juillet 2014.**

### À une semaine près

La tempête solaire évoquée par la NASA s'est produite le 23 juillet 2012. Une vidéo de l'agence spatiale américaine précise : « Un nuage de plasma s'est échappé du soleil à la vitesse de 3 000 km/s, quatre fois supérieure à celle observée pour des éruptions solaires classiques. La tempête s'est dirigée vers l'orbite terrestre. Heureusement, la Terre n'était pas sur son



passage [lorsqu'elle l'a traversée] ». « Si l'éruption avait eu lieu une semaine plus tôt, la Terre aurait été en première ligne », souligne Daniel Baker de l'université du Colorado. Ceci alors qu'en 2012, plusieurs tempêtes solaires importantes avaient touché notre planète, notamment en mars. Le satellite de la NASA Stereo-A, qui surveille ce type d'événements, a en revanche pu enregistrer le passage de la tempête de juillet 2012 de manière précise. Selon les informations recueillies, il s'agissait de la plus puissante tempête solaire observée depuis 1859. Aux Etats-Unis, l'académie nationale des Sciences a estimé que l'impact d'une tempête de l'ampleur de celle de 1859, si elle frappait la Terre aujourd'hui, causerait des dégâts d'une ampleur inédite et coûterait à l'économie mondiale 2 000 milliards de dollars.

(Magazine Le Nouvel Observateur 25/07/2014)

Lorsqu'on parle des dangers venus de l'espace, on songe surtout aux astéroïdes géants, comme celui qui a mis fin à l'ère des dinosaures. Mais il y a d'autres phénomènes dangereux, surtout pour une civilisation basée sur l'électronique comme l'est la nôtre. On vient d'apprendre cette semaine que nous l'avions échappé belle un beau jour d'été 2012. Une étude publiée mardi dans le journal Nature Communications vient en effet d'analyser les données recueillies par les satellites d'observation solaires de la Nasa lors d'une super-tempête solaire survenue les 22 et 23 juillet de cette année-là, et qui serait la plus puissante depuis que nous mesurons ces phénomènes. Le résultat est là : la tempête a manqué de nous frapper violemment, à seulement neuf petits jours près. Et on l'a échappé belle.

#### Une tempête solaire, c'est quoi ?

Les tempêtes solaires, tous les fournisseurs de services liés aux satellites les connaissent bien. Tout commence par une éruption à la surface du soleil, phénomène assez courant. Mais ces éruptions solaires donnent aussi parfois naissance à des protubérances, des jets de plasma en fusion qui peuvent éjecter des quantités impressionnantes de plasma en fusion. Lorsque cela se produit, cette matière solaire s'échappe du Soleil et est propulsée dans l'espace. On parle alors d'éjection de masse coronale. Cette masse vient perturber le vent solaire, ce flux de radiations qui provient de l'astre du jour, et c'est alors la tempête. Le hic, c'est que la matière en question est dotée d'un champ magnétique très intense qui peut alors perturber les ondes radioélectriques, et tout ce qui touche à l'électronique. L'éjection de masse coronale est un phénomène très fréquent, il s'en produit entre une fois par semaine et trois fois par jour, en fonction du cycle solaire. La plupart de ces éjections ne sont pas dirigées dans la direction de la Terre, qui n'occupe après tout qu'une toute petite partie de l'espace autour du Soleil. Mais certaines viennent vers nous, à peu près trois jours après que l'éruption se soit produite.

#### Pourquoi ne note-t-on pas au quotidien ces éruptions ?

En fait, vous vous en apercevez peut-être, mais n'en connaissez pas la raison. Les tempêtes solaires perturbent nos téléphones portables, nos téléviseurs, ou encore les diffusions satellite, voire même le fonctionnement de nos ordinateurs. On pourra aussi voir des aurores boréales à des latitudes plus basses que de coutume.

#### Pourquoi l'éjection solaire de 2012 était-elle potentiellement très dangereuse ?

Le phénomène de juillet 2012 est doublement exceptionnel, comme l'expliquait mardi le site Space.com. Deux éjections de masse coronale (EMC) se sont produites à très peu de temps d'intervalle. Cela se passait de l'autre côté du Soleil, et ne concernait pas la Terre, a priori. Seulement voilà, ces deux éjections quasi simultanées suivaient une troisième de très près. Les deux autres auraient fusionné, et se seraient dirigées alors dans la direction de la Terre, en ne se dispersant pratiquement pas, ce qui aurait dû se produire sans l'influence de celle qui les précédait. Les deux éjections combinées se sont alors dirigées vers la Terre beaucoup plus rapidement que de coutume, à près de 8 millions de kilomètres à l'heure.

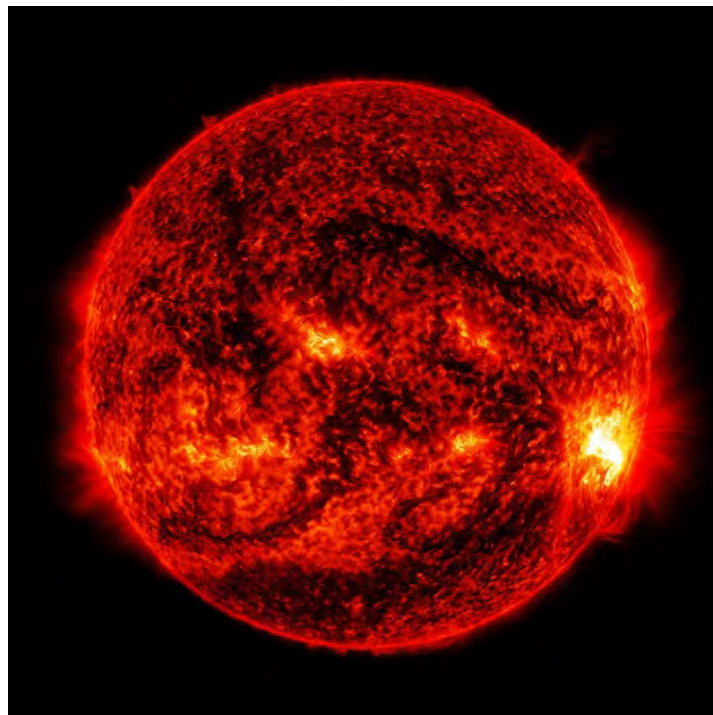


Filament solaire géant photographié le 31 août 2012 à 20h36 UTC. L'éjection de masse coronale résultante a voyagé à environ 1 500 kilomètres par seconde. Le flot de particules expulsé par le phénomène, sans toucher directement la Terre, a créé un champ magnétique très fort qui a interagi avec la magnétosphère terrestre en générant des aurores polaires au cours de la nuit du lundi 3 septembre 2012. La partie du filament photographiée (NASA) fait plusieurs centaines de milliers de km de long.

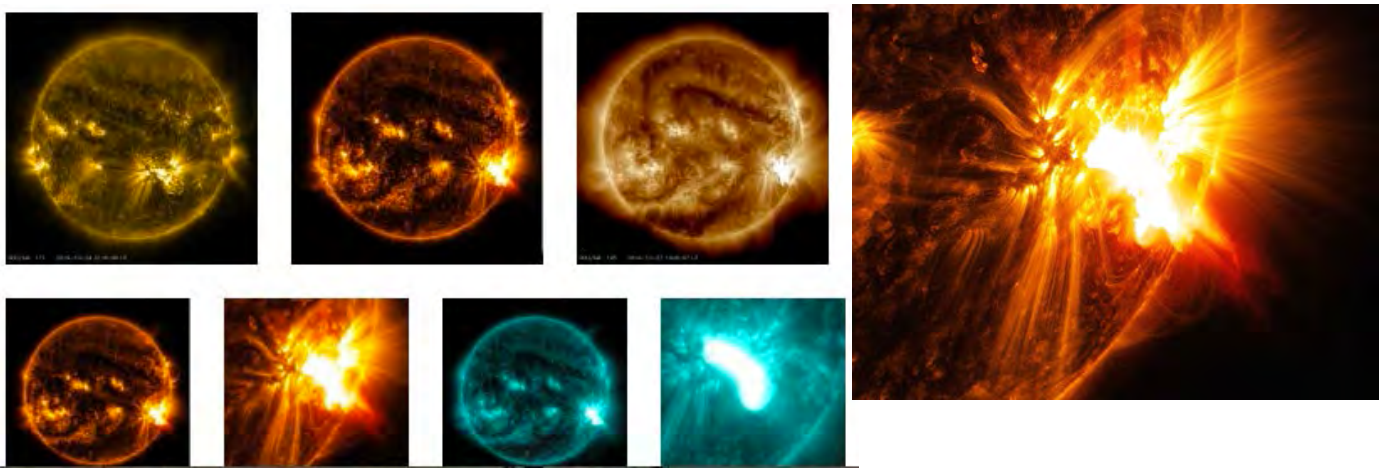
### Que se serait-il passé si ces éruptions avaient touché la Terre ?

Le champ électrique de cette super-tempête aurait interagi avec celui de notre planète, et très fortement au vu de son intensité. A titre d'exemple, la plus forte tempête solaire de l'histoire s'est produite en 1859. Les aurores boréales ont alors été vues aussi bas que Cuba et Hawaï. Des opérateurs du télégraphe ont reçu des **chocs électriques** en provenance de leurs machines, qui s'étaient pourtant déconnectées. En mars 1989 une autre tempête a fait disjoncter l'alimentation électrique au Québec, privant des millions de personnes d'électricité pendant neuf heures... et ce n'était pas, loin de là, une tempête aussi puissante que celle à laquelle nous avons échappé. Fortes perturbations dans les réseaux de distribution électrique, circuits électroniques en surcharge, communications téléphoniques et GPS interrompus, les instruments des avions fortement perturbés, sans compter les dégâts occasionnés aux satellites... Un véritable chaos pour notre civilisation basée sur l'électronique, comme l'explique le Times of India. On pourrait très vite se retrouver avec un scénario de film catastrophe sur les bras. L'étude publiée dans Nature Communications estime que si la tempête de 1859 se produisait aujourd'hui, elle générerait 2600 milliards de dollars de dégâts. La super-tempête de juillet 2012 aurait été de cette magnitude. "Le coût d'une extrême météo spatiale peut atteindre mille milliards de dollars et il faudrait dix ans pour se remettre de ses dommages, avec des conséquences socio-économiques en cascade", déclarait le conseil national de la recherche et des études spatiales, aux USA, cité par Space.com. Heureusement, pour cette fois, on n'a pas eu l'occasion de le vérifier. Mais si la tempête avait eu lieu neuf jours plus tôt, elle serait alors passée par l'endroit où se trouvait alors la Terre.

### Et ça continue en 2014 ! : (Eruption de 2014 : Science et Vie [31/10/2014])



De gigantesques éruptions solaires menacent la Terre depuis quelques jours (Photo du 27 octobre 2014 – crédit NASA/SDO)



Le groupe AR2192 photographié entre le 24 et le 27 octobre 2014 (satellite SDO) sous plusieurs longueurs d'ondes (NASA)

**Selon la NASA, le Soleil est dans une phase anormale d'hyperactivité depuis le 17 octobre** : un groupe de taches solaires faisant face à la Terre, dont l'une est la plus grande observée depuis 24 ans, provoque des éjections de matière et des flashes lumineux (rayons X et UV) qui ont déjà perturbé certaines communications. Pour l'heure, le bouclier magnétique terrestre résiste. Mais le phénomène pourrait perdurer, et le risque de défaillances majeures des systèmes de télécommunications et

informatiques n'est pas encore écarté. C'est une tache solaire qui a mis le feu aux poudres, comme nous l'avons signalé ici-même. Observée par le satellite Solar Dynamics Observatory (SDO) de la NASA, elle est la plus grande depuis 1990, plus large que le diamètre de Jupiter, soit 140 000 km (11 fois le diamètre de la Terre). Elle forme avec d'autres taches plus petites un groupe, nommé AR2192, comme on n'en avait pas connu depuis 2001, visible à l'œil nu (à condition de se munir d'un filtre protecteur pour la rétine). Une situation paradoxale car l'astre était depuis 2008 plutôt léthargique... Mais le paradoxe n'est qu'apparent : les astronomes considèrent que s'étant peu « exprimé », il a emmagasiné un surplus d'énergie qu'il relâche aujourd'hui.

### **Le Soleil nous a mitraillé six fois depuis le 17 octobre**

Or les astronomes savent bien qu'une tache est synonyme de perturbations : la tache est la partie visible d'un tube ou faisceau de lignes magnétiques plongeant au cœur du Soleil et qui freine le mouvement d'ascension du plasma (des noyaux d'hydrogène et d'hélium chargés et des électrons) vers la surface. Cela revient à bloquer l'évacuation de la chaleur, tel un couvercle. L'emmagasinement local de cette chaleur (confinement magnétique) se résout généralement par de violentes radiations X et UV et l'éjection de masse coronale (EMC) à 450 km/s qui constitue le vent solaire : le couvercle saute. Quand ce phénomène fait face à la Terre, celle-ci prend un double coup de Soleil : les radiations parviennent jusqu'à nous en 8 minutes, et la matière en 4 jours et demi. En l'occurrence, la Terre a déjà reçu six bouffées de colère solaire, dont la plus violente date du 24 octobre. Heureusement, le champ magnétique terrestre forme un bouclier naturel invisible qui dévie le vent solaire sur les cotés, et différentes molécules de l'atmosphère dont l'ozone absorbent les radiations lumineuses avant que celles-ci touchent le sol. Mais parfois l'attaque est trop forte pour que le champ magnétique et l'atmosphère fassent rempart : une partie de la matière solaire et de ses radiations peuvent alors faire de gros dégâts, comme cela est peut-être arrivé en l'an 775, et comme cela a failli arriver en juillet 2012 si la Terre avait été légèrement décalée sur son orbite, comme l'a annoncé la NASA en juillet dernier. Le risque : la mise hors d'usage des satellites de télécommunications, des communications radio, des réseaux et systèmes électriques, sans parler des irradiations mortifères touchant les passagers des avions et, finalement, les habitants de la Terre. Un Armageddon technologique et humain, comme l'illustre cette infographie.

### **Pour l'heure les effets ont été limités. Mais le cycle n'est pas fini**

Néanmoins, malgré le classement des six événements dans la catégorie X, la quatrième et plus forte dans l'échelle des éruptions, ces coups déjà reçus par la Terre n'ont eu que peu d'effets car l'éjection de masse coronale (EMC) a été de faible ampleur – cela dépend de l'humeur solaire : selon le jeu des forces magnétiques une très forte éruption peut ne pas engendrer d'EMC importante. Seules les radiations X et UV ont causé quelques problèmes aux communications radio à ondes courtes et aux systèmes GPS. Les astronomes ont prévu que le groupe de taches solaires incriminé cesserait de nous faire face ces jours-ci car la « surface » Solaire (du gaz d'hydrogène et d'hélium chaud) est en rotation, comme la surface terrestre : elles devraient disparaître de notre vue par la droite (du disque solaire)... mais pour réapparaître dans une dizaine de jours par la gauche ! Comme il est encore impossible de prévoir l'amplitude et l'étendue des éruptions solaires, malgré des modélisations encourageantes obtenues récemment par des chercheurs français, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tient des bulletins d'information, et la surveillance demeure.

## **D) Les planètes**

### **a. Les planètes internes ou telluriques**

#### **Système solaire interne**

Le Système solaire interne désigne traditionnellement la région située entre le Soleil et la ceinture d'astéroïdes. Composés principalement de silicates et de métaux, les objets du Système solaire interne orbitent près du Soleil : le rayon de la région tout entière est plus petit que la distance entre Jupiter et Saturne.

#### **Ceinture intra-mercurienne**

Très récemment des nuages de poussières intramercuriens ont été détectés entre le Soleil et Mercure. Des recherches sont toujours menées afin de trouver des corps plus gros : les Vulcanoïdes. Des comètes orbitent aussi dans cette zone : les astéroïdes apoheles.

#### **Planètes internes**



*Les planètes internes. De gauche à droite : Mercure, Vénus, la Terre et Mars (dimensions à l'échelle)*

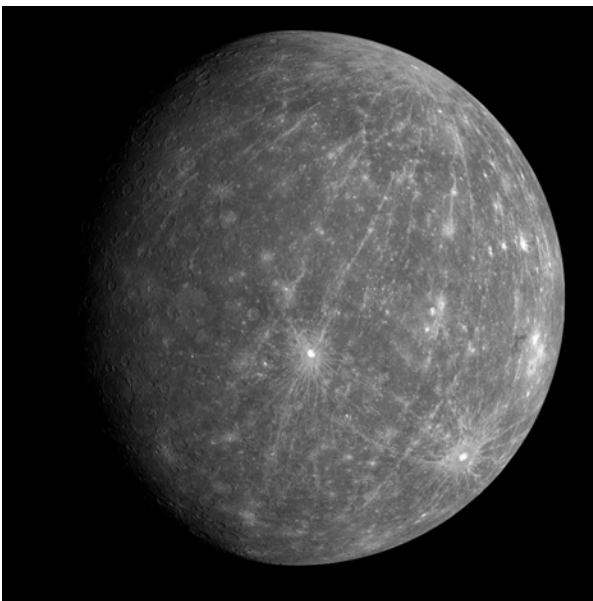
Les quatre planètes internes possèdent une composition dense et rocheuse (d'où leur appellation de planètes « telluriques » car elles sont, entre autres, composées de roches et de métaux), peu ou pas de satellites naturels et aucun système d'anneaux. De taille modeste (la plus grande de ces planètes étant la Terre dont le diamètre est de 12 756 km), elles sont composées en grande partie de minéraux à point de fusion élevé, tels les silicates qui forment leur croûte solide et leur manteau semi-liquide, et de métaux comme le fer et le nickel qui composent leur noyau. Trois des quatre planètes (Vénus, la Terre et Mars) ont une

atmosphère substantielle; toutes présentent des cratères d'impact et des caractéristiques tectoniques de surface comme des rifts et des volcans.

### 1) Mercure

Mercure est la planète la plus proche du Soleil (à 0,38 UA), ainsi que la plus petite (4 900 km de diamètre) et la moins massive, plus du vingtième de la masse terrestre (0,055 masse terrestre). Elle est connue depuis l'Antiquité et doit son nom au dieu Mercure, qui était chez les Romains le messager des dieux, et dieu du commerce et du voyage; cela est dû au fait qu'elle se déplace très vite. Mercure ne possède aucun satellite naturel et ses seules caractéristiques géologiques connues, en dehors des cratères d'impact, sont des dorsa, probablement produites par contraction thermique lors de la solidification interne, plus tôt dans son histoire. L'atmosphère de Mercure, quasiment inexistante, est formée d'atomes arrachés à sa surface par le vent solaire, ou momentanément capturés à ce vent. L'origine de son grand noyau de fer liquide et son fin manteau, composée de différents métaux n'a toujours pas été expliquée de manière adéquate. Parmi les scénarios hypothétiques, il est possible que ses couches externes aient été balayées par un impact géant ou qu'elle ait été stoppée dans son accréition par l'énergie solaire. L'absence d'atmosphère significative et la proximité du Soleil amène les températures de surface à varier de 427 °C (700 K) lorsque le Soleil est au zénith à -183 °C (90 K) la nuit.

Elle est visible à l'œil nu depuis la Terre avec un diamètre apparent de 4,5 à 13 secondes d'arc, et une magnitude apparente de 5,7 à -2,3; son observation est toutefois rendue difficile par son élongation toujours inférieure à 28,3° qui la noie le plus souvent dans l'éclat du Soleil. Mercure a la particularité d'être en résonance 3:2 sur son orbite, sa période de révolution (87,969 jours) valant exactement 1,5 fois sa période de rotation (58,646 jours). 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. Son périhélie connaît une précession autour du Soleil plus rapide que celle prédite par la mécanique newtonienne, une avance de 42,98 secondes d'arc par siècle qui n'a pu être complètement expliquée que dans le cadre de la relativité générale.



*Mercur*e



*Vénus*

### 2) Vénus

Vénus (à 0,72 UA du soleil) est proche de la Terre en taille et en masse (0,815 masse terrestre) et, comme elle, possède un épais manteau de silicate entourant un noyau métallique, une atmosphère significative et une activité géologique interne. Cependant, elle est beaucoup plus sèche et la pression de son atmosphère (au sol) est 90 fois celle de la nôtre. Vénus ne possède aucun satellite. Il s'agit de la planète la plus chaude, avec une température de surface supérieure à 450°C, maintenue essentiellement par l'effet de serre causé par son atmosphère très riche en gaz carbonique. Aucune activité géologique récente n'a été détectée sur Vénus; son absence de champ magnétique ne permettant pas d'empêcher l'appauvrissement de son atmosphère, cela suggère cependant qu'elle est réalimentée régulièrement par des éruptions volcaniques. Sa période de révolution est d'environ 225 jours. Sa période de rotation est de 243 jours. L'un des faits les plus remarquables des paramètres orbitaux de Vénus est sa rotation rétrograde : elle tourne sur elle-même, de façon très lente, dans le sens indirect, alors que les planètes du Système solaire ont le plus souvent un sens direct. Vénus fait donc exception à la règle (on peut citer également le cas d'Uranus). Sa période de rotation n'est connue que depuis 1962, date à laquelle des observations radar ont permis d'observer la surface de la planète au travers de l'épaisse atmosphère. Les causes de la rotation rétrograde de Vénus sont encore mal comprises. L'explication qui a été le plus souvent avancée est une collision gigantesque avec un autre corps de grande taille, pendant la phase de formation des planètes du Système solaire. Une autre explication met en jeu l'atmosphère vénusienne qui, du fait de sa forte densité, a pu influencer la rotation de la planète. Des travaux de Jacques Laskar et Alexandre C. M. Correia prenant en compte les effets de marée thermique atmosphérique montrent le comportement chaotique de l'obliquité et de la période de rotation de Vénus. Vénus aurait donc pu évoluer naturellement vers une rotation rétrograde, qui est un état d'équilibre des différents effets de marée, sans avoir à faire intervenir de collision avec un corps massif. Il n'est cependant pas possible de savoir si l'obliquité de Vénus est passée brusquement de 0° à 180° au cours de son histoire ou si sa

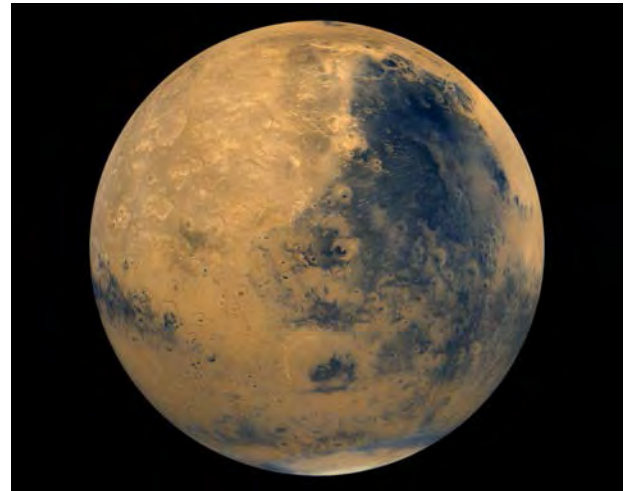
vitesse de rotation s'est ralentie jusqu'à une vitesse nulle pour ensuite devenir négative. Les deux scénarios sont possibles et aboutissent au même état d'équilibre actuel.

### 3) La Terre

La Terre (à 1 UA du soleil) est la plus grande, la plus massive et la plus dense des planètes internes, la seule dont on connaisse une activité géologique récente et qui abrite la vie. Son hydrosphère liquide est unique parmi les planètes telluriques et elle est la seule planète où une activité tectonique a été observée. L'atmosphère terrestre est radicalement différente de celle des autres planètes, ayant été altérée par la présence de formes de vie pour contenir 21 % d'oxygène. La Terre possède un satellite, la Lune, le seul satellite significativement grand des planètes telluriques du Système solaire. L'explication la plus généralement admise pour expliquer l'origine de ce singulier satellite serait la collision latérale de la jeune Terre avec un impacteur géant, de la taille de la planète Mars ce qui expliquerait aussi que la période de rotation soit si courte (~24h). La période de révolution de la Terre, c'est-à-dire la durée de l'année, est d'environ 365,25 jours.



*La Terre*

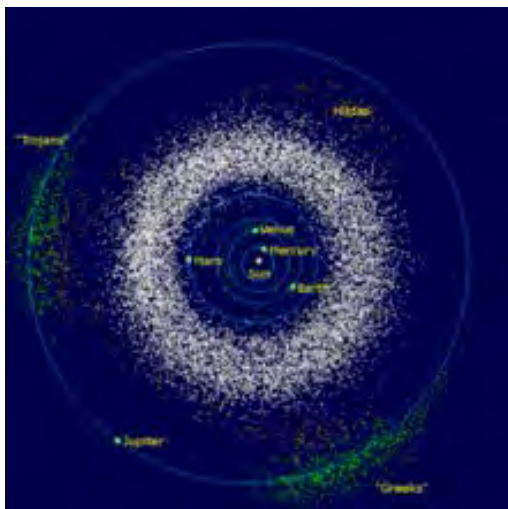


*Mars*

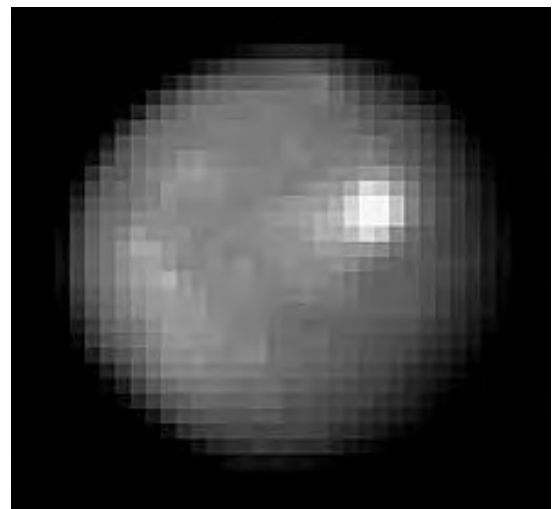
### 4) Mars

Mars (à 1,52 UA du soleil) est deux fois plus petite que la Terre et Vénus, et a seulement le dixième de la masse terrestre (0,107 masse terrestre). Sa période de révolution autour du soleil est d'environ 669 jours et sa journée dure 24 heures et 40 minutes. Elle possède une atmosphère ténue, principalement composée de dioxyde de carbone et une surface désertique avec un climat qui peut être qualifié d'hyper-continental (la température de 20 °C lors d'un bel après-midi d'été peut chuter à -100 °C pendant la nuit. Le terrain martien, parfois très accidenté, est constellé de vastes volcans comme Olympus Mons (le plus massif du Système solaire), de vallées, de rifts comme Valles Marineris. Ces structures géologiques montrent des signes d'une activité géologique voire hydraulique qui a peut-être persisté jusqu'à récemment. Mars possède deux petits satellites naturels (Déimos et Phobos), probablement des astéroïdes capturés.

#### b. La ceinture d'astéroïdes et une planète naine (Cérès)



*Schéma de la ceinture d'astéroïdes et des astéroïdes troyens*



*Cérès vu par le télescope spatial Hubble*

Les astéroïdes sont principalement de petits corps du Système solaire composés de roches et de minéraux métalliques non volatils. La ceinture d'astéroïdes occupe une orbite située entre Mars et Jupiter, à une distance comprise entre 2,3 et 3,3 UA du Soleil. On pense qu'il s'agit de restes du Système solaire en formation qui n'ont pas pu s'accréter en un corps plus gros à cause des interférences gravitationnelles de Jupiter. Les astéroïdes varient en taille, depuis plusieurs centaines de kilomètres à des

poussières microscopiques. Tous les astéroïdes, sauf le plus grand, Cérès, sont considérés comme des petits corps, bien que certains tels Vesta ou Hygie pourraient être reclassés comme planètes naines s'il était démontré qu'ils ont atteint un équilibre hydrostatique. La ceinture d'astéroïdes contient des dizaines de milliers, éventuellement des millions, d'objets de plus d'un kilomètre de diamètre. Malgré ceci, la masse totale de la ceinture ne dépasse probablement pas un millième de celle de la Terre. La ceinture est très peu densément peuplée; les sondes spatiales l'ont traversée régulièrement sans incident. Les astéroïdes d'un diamètre compris entre 10 et  $10^{-4}$  m sont appelés météoroïdes.

### Cérès

Cérès (à 2,77 UA du soleil) est le plus grand corps de la ceinture d'astéroïdes et sa seule planète naine. D'un diamètre légèrement inférieur à 1 000 km, suffisant pour que sa propre gravité lui donne une forme sphérique, Cérès fut considéré comme une planète quand il fut découvert au XIX<sup>e</sup> siècle, puis replacé dans la catégorie des astéroïdes dans les années 1850, lorsque des observations révélèrent leur abondance. Il fut finalement classé comme planète naine depuis 2006 (tout en gardant son statut d'astéroïde défini de façon totalement indépendante). Rotation autour du soleil en 4,6 années.

### Groupes d'astéroïdes

Les astéroïdes de la ceinture principale sont divisés en plusieurs groupes et familles suivant leurs caractéristiques orbitales. Certains astéroïdes comportent des lunes, parfois aussi larges qu'eux-mêmes. La ceinture contient également des comètes d'où pourrait provenir l'eau terrestre. Le Système solaire interne est également constellé d'astéroïdes situés en dehors de la ceinture et dont l'orbite croise éventuellement celle des planètes telluriques.

## c. Les planètes externes et gazeuses

### Système solaire externe

Au-delà de la ceinture d'astéroïdes s'étend une région dominée par les géantes gazeuses. De nombreuses comètes à courte période, y compris les centaures, y résident également. La zone ne possède pas de nom traditionnel correctement défini. Il est fait souvent mention du Système solaire externe, par opposition au Système solaire interne, mais le terme a récemment commencé à être utilisé exclusivement pour la zone située après l'orbite de Neptune. Les objets solides de cette région sont composés d'une plus grande proportion de « glaces » (eau, ammoniac, méthane) que leurs correspondants du Système solaire interne. Les quatre planètes externes sont des géantes gazeuses et regroupent à elles quatre 99 % de la masse qui orbite autour du Soleil. L'atmosphère de Jupiter et Saturne est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium; celle d'Uranus et de Neptune contient un plus grand pourcentage de glaces. Il a été suggéré qu'elles appartiennent à une catégorie distincte, les « géantes glacées ». Les quatre géantes gazeuses possèdent des systèmes d'anneaux, mais seuls ceux de Saturne peuvent être facilement observés depuis la Terre. En outre, le nombre de leurs satellites naturels est élevé voire très élevé (On en a détecté plus de soixante autour de Jupiter et de Saturne).



*Planètes externes*

*Les géantes gazeuses. De haut en bas : Neptune, Uranus, Saturne et Jupiter*

#### 1) Jupiter

Jupiter (à 5,21 UA du soleil), avec 318 masses terrestres, est aussi massive que 2,5 fois toutes les autres planètes réunies. Elle est composée essentiellement d'hydrogène et d'hélium. Sa forte chaleur interne crée un certain nombre de caractéristiques semi-permanentes dans son atmosphère, comme des bandes de nuages ou la Grande tache rouge. Jupiter possède 67 satellites connus; les quatre plus gros, (appelés aussi satellites galiléens car découverts par l'astronome italien Galilée au XVII<sup>e</sup> siècle), Ganymède, Callisto, Io et Europe, présentent des similarités avec les planètes telluriques, comme le volcanisme. Ganymède, le plus gros satellite du Système solaire, est plus grand que Mercure. Sa période de révolution est d'environ 12 ans et sa période de rotation est de 9 h 55 min 27,3 s.

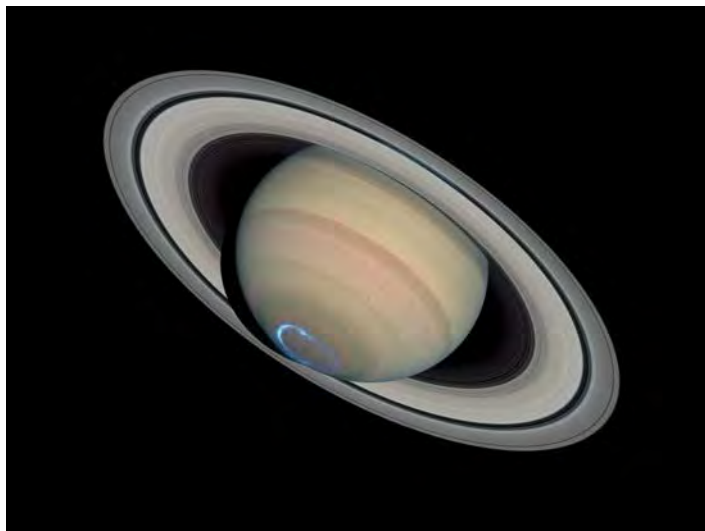
#### 2) Saturne

Saturne (à 9,54 UA du soleil), connue pour son système d'anneaux, possède des caractéristiques similaires à Jupiter, comme sa composition atmosphérique. Elle est moins massive (95 masses terrestres) et possède 62 satellites identifiés plus environ 150 autres potentiels. Deux des gros satellites, Titan et Encelade, présentent des signes d'activité géologique, essentiellement du

cryovolcanisme. Titan est plus grand que Mercure, il est le seul satellite du Système solaire à avoir une atmosphère substantielle. La période de révolution de Saturne est d'environ 29 ans et sa période de rotation est de 10 h 47 min 6 s.



*Jupiter*



*Saturne*

### 3) Uranus

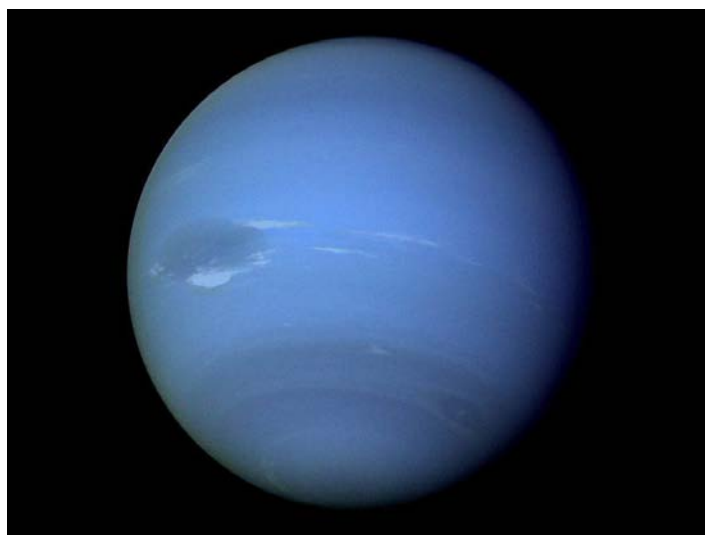
Uranus (à 19,18 UA du soleil), avec 14 masses terrestres, est la moins massive des géantes gazeuses. De façon unique parmi les planètes du Système solaire, elle orbite le Soleil sur son côté, l'axe de sa rotation étant incliné d'un peu plus de 90° par rapport à son orbite. Son noyau est nettement plus froid que celui des autres géantes gazeuses et rayonne très peu de chaleur dans l'espace. Uranus possède 27 satellites connus, les plus grands étant Titania, Obéron, Umbriel, Ariel et Miranda. Sa période de révolution est d'environ 84 ans.

### 4) Neptune

Neptune (à 30,11 UA du soleil), bien que légèrement plus petite qu'Uranus, est un peu plus massive (17 masses terrestres) et par conséquent plus dense. Elle rayonne plus de chaleur interne, mais pas autant que Jupiter ou Saturne. Neptune possède 14 satellites connus. Le plus grand, Triton, est géologiquement actif et présente des geysers d'azote liquide. Triton est le seul grand satellite placé sur une orbite rétrograde. La période de révolution de Neptune est d'environ 164 ans.



*Uranus*



*Neptune*

## d. La ceinture de Kuiper, les planètes naines et les objets épars

La ceinture de Kuiper, la principale structure de la région, est un grand anneau de débris similaire à la ceinture d'astéroïdes, mais composée principalement de glace. La première partie de la ceinture s'étend entre 30 et 50 UA du Soleil et s'arrête à la « falaise de Kuiper », la seconde partie va au-delà (100 UA voire plus). On pense que la région est la source des comètes de courte période. **C'est dans cette ceinture qu'orbitent quatre planètes naines selon la classification de 2005 : Pluton, Eris, Makémaké et Hauméa.** Elle est principalement composée de petits corps, mais plusieurs des plus gros objets, comme Quaoar, Varuna, ou Orcus, pourraient être reclassifiés comme planètes naines. On estime à 100 000 le nombre d'objets de la ceinture de Kuiper d'un diamètre supérieur à 50 km, mais sa masse totale est estimée à un dixième, voire un centième de celle de la Terre. Plusieurs objets de la ceinture possèdent des satellites multiples et la plupart sont situés sur des orbites qui les emmènent en dehors du plan de l'écliptique.

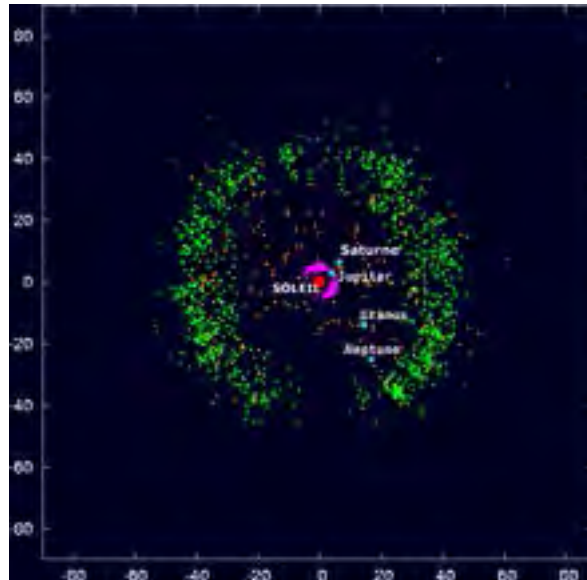


Diagramme indiquant la position de tous les objets connus de la ceinture de Kuiper

La ceinture de Kuiper peut être grossièrement divisée entre les objets « classiques » et ceux en résonance avec Neptune. Comme par exemple les plutinos, qui parcourent deux orbites quand Neptune en parcourt trois, mais il existe d'autres rapports. La ceinture en résonance débute à l'intérieur même de l'orbite de Neptune. La ceinture classique des objets n'ayant aucune résonance avec Neptune s'étend entre 39,4 et 47,7 UA. Les membres de cette ceinture classique sont appelés cubewanos, d'après le premier objet de ce genre à avoir été découvert, (15760) 1992 QB<sub>1</sub>.

### Pluton et Charon

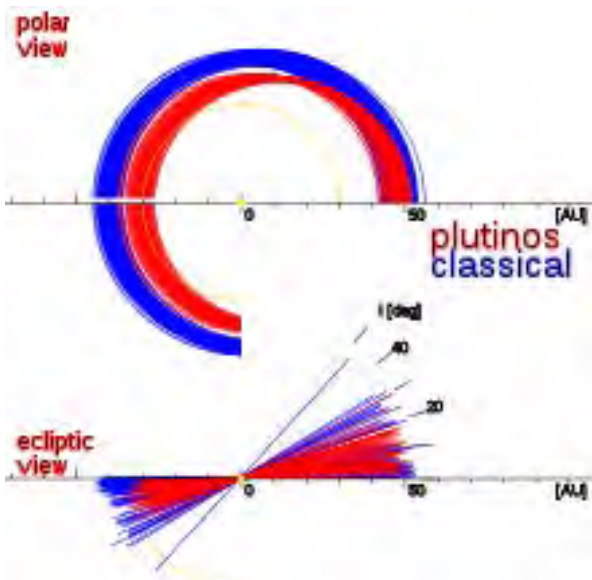
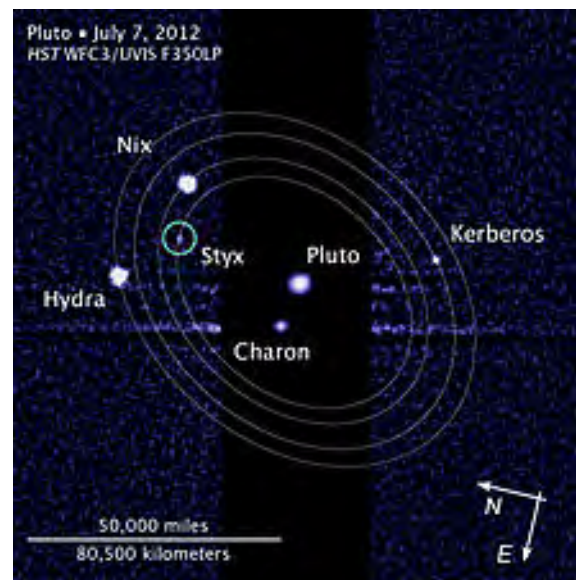


Diagramme montrant les orbites alignées des plutinos et autres objets de la ceinture de Kuiper en résonance avec Neptune (en rouge) et des objets classiques (en bleu)



Pluton et ses cinq lunes connues : Charon, Hydra, Nix, Kerberos et Styx

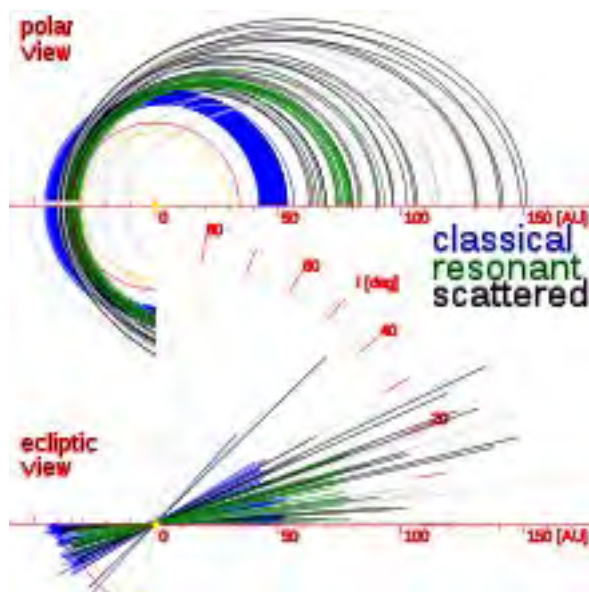
**Pluton** tourne à 39 UA du soleil en moyenne en 240 ans (dont 20 ans à l'intérieur de l'orbite de Neptune à cause de son excentricité). Pluton est une planète naine, le deuxième plus grand objet transneptunien connu de la ceinture de Kuiper (après Eris). Pluton et Charon forment un système binaire. Le système binaire possède quatre satellites naturels : Nix et Hydra (découverts en 2005), Styx (2012) et Kerberos (2013). S'il est d'une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique, il n'a pas du tout fait place nette dans son voisinage. Son orbite, excentrique et inclinée, est dominée par celle de Neptune, avec laquelle il est en résonance 2:3, et de nombreux autres corps, les plutinos, en partagent les caractéristiques. Après sa découverte en 1930 par Clyde Tombaugh, Pluton fut considérée comme une planète pendant 76 ans. La décision de l'UAI en 2006 l'a reclassée comme planète naine. Le statut de Charon reste en attente. Pluton possède une orbite excentrique inclinée de 17° sur le plan de l'écliptique et qui s'étend de 29,7 UA au périhélie à 49,5 UA à l'aphélie.

Le classement de **Charon** est en effet délicat : la définition exclut qu'une planète naine soit une lune d'un autre objet. Le débat est entre ceux qui veulent lui laisser le statut de lune de Pluton, et ceux qui préféreraient requalifier les deux objets réunis de « planète naine double ». Pluton est principalement composée de roche et de glace de méthane, mais aussi de glace d'eau. Son



diamètre est d'environ les deux tiers de celui de la Lune. Le couple que forme Pluton avec son grand satellite, Charon, est généralement considéré comme un système double, puisque la différence de masse entre les deux objets est l'une des plus faibles de tous les couples planétoïdes/satellites du système solaire (rapport 8 pour 1), et surtout parce que le barycentre de leurs orbites ne se situe pas à l'intérieur d'un des deux corps.

### Objets épars

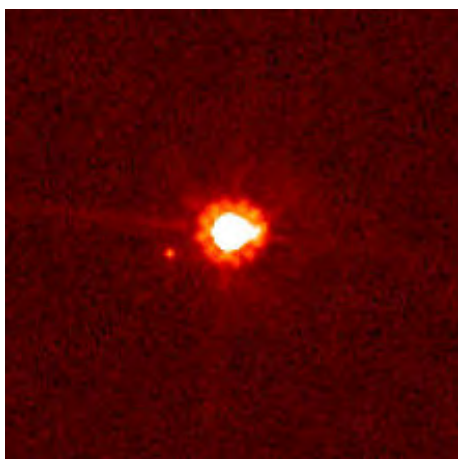


Les objets de la ceinture de Kuiper.

En noir : objets épars; en bleu : objets classiques; en vert : objets en résonance avec Neptune

Les objets épars s'étendent bien au-delà de la ceinture de Kuiper et il y en a des milliers. On pense qu'ils proviennent de cette ceinture mais en ont été éjectés par l'influence gravitationnelle de Neptune lors de sa formation. La plupart des objets épars possèdent un périhélie dans la ceinture de Kuiper et un aphélie pouvant atteindre 150 UA. De façon typique, leur orbite est fortement inclinée, souvent presque perpendiculaire à l'écliptique. Certains astronomes les considèrent comme d'autres éléments de la ceinture de Kuiper et les appellent d'ailleurs des « objets épars de la ceinture de Kuiper ».

### Éris



Éris et sa lune Dysnomie



Éris vue par Hubble

Éris est l'objet transneptunien le plus grand que l'on connaisse et mesure 2.326 (+/-12) km de diamètre. Il est situé sur une orbite très inclinée et excentrique, accompagné d'un satellite naturel, « Dysnomie ». Suffisamment grand pour prendre une forme sphérique, Éris n'est clairement pas l'objet dominant dans son voisinage. Les noms d'Éris, déesse de la Discorde, et Dysnomie, déesse de l'Anarchie, furent choisis car leur découverte conduisit à la déchéance de Pluton du statut de planète, ainsi qu'au débat sur la définition des corps du Système solaire. Éris fut découvert en 2005. Au vu de sa taille, ainsi que de la découverte de nombreux objets transneptuniens, l'Union astronomique internationale a été conduite en 2006 à expliciter pour la première fois ce qu'est une planète, ce qui a conduit à la création du terme de « planète naine ». Éris orbite autour du soleil à une distance moyenne de 68 UA en moyenne sur une durée de 557 ans. Comme Pluton, son orbite est fortement excentrique (périhélie à 38,2 UA, la distance moyenne de Pluton au Soleil, aphélie à 97,6 UA) et fortement inclinée sur l'écliptique, à 44°.

### Makémaké

Makémaké est un objet transneptunien d'une dimension comprise entre 1.200 et 1.900 km, passé au grade de planète naine le 11 juillet 2008. Il fut découvert presque en même temps qu'Éris. Il possède une apparence sphérique, et ne semble pas posséder de satellites. La planète naine doit son nom au dieu créateur dans le panthéon traditionnel de Rapa Nui sur l'Île de Pâques.

Makémaké, officiellement désignée par (136472) Makémaké, est la troisième plus grande planète naine connue. Elle appartient à la ceinture de Kuiper et fut découverte en 2005 par Michael E. Brown, Chadwick Trujillo et David L. Rabinowitz du *California Institute of Technology*. Makémaké n'a aucun satellite connu, ce qui la différencie des autres planètes naines de la ceinture de Kuiper. C'est un plutoïde (ne pas confondre avec plutino) et un cubewano. Son diamètre est d'environ trois quarts celui de Pluton. Son orbite moyenne moyennement excentrique autour du soleil dure 308 ans et se situe à 45,6 UA (de 38,7 à 52,7 UA). Sa température moyenne très faible (environ 30 K, soit -243 °C) signifie que sa surface est recouverte de méthane, d'éthane et, éventuellement, de glace d'azote.

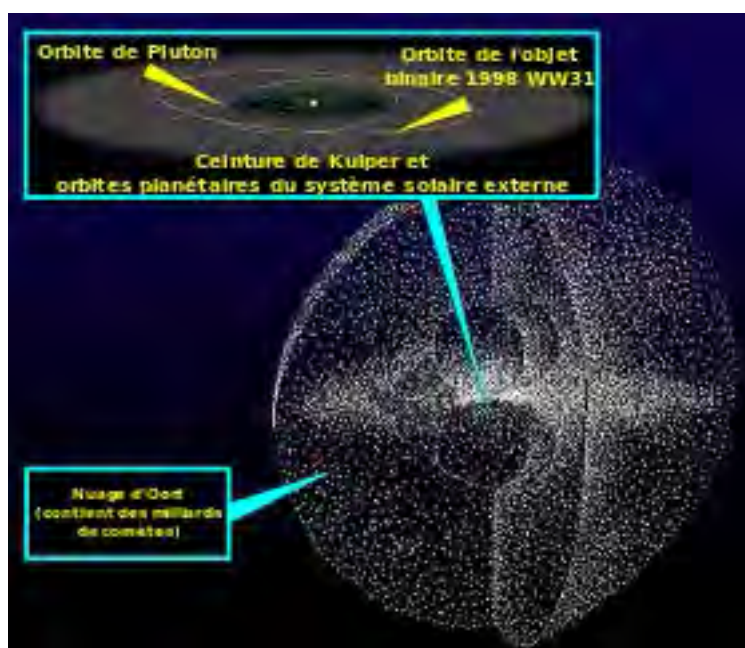
### Hauméa

Hauméa est un objet transneptunien de forme oblongue dont la plus grande dimension est comprise entre 1.960 et 2.500 km, à peine moins que Pluton et deux fois plus que Cérès, la plus petite planète naine reconnue. Sa masse atteindrait un tiers de celle de Pluton. Il fut classé planète naine le 17 septembre 2008. Il possède deux satellites naturels connus, Hi'iaka et Namaka.

Hauméa, déesse hawaïenne de la fertilité et de la naissance et Hi'iaka et Namaka, deux de ses filles. Hauméa a une rotation très rapide (moins de 4 h), une forme ellipsoïdale et un albédo élevé causé par des cristaux de glace d'eau à sa surface, ce qui en fait un membre exceptionnel parmi les cubewanos. On pense qu'il est également le composant principal d'une famille d'objets créés après un impact et qui est responsable de ses caractéristiques inhabituelles. Hauméa est classé comme un objet transneptunien classique, possédant une orbite typique des grands cubewanos : assez excentrique, son périhélie est proche de 35 ua et son aphélie atteint 51 ua (moyenne de 43,3 UA). Il présente également une inclinaison significative (environ 28 °). Hauméa s'est trouvé à son aphélie en 1991. Son prochain passage au périhélie se produira en 2133. L'orbite d'Hauméa a une excentricité légèrement plus grande que les autres membres de sa famille. Sa rotation autour du soleil dure près de 285 ans.

## E) Le nuage de Hills et le nuage d'Oort

Le **nuage de Hills**, également appelé **nuage interne d'Oort**, **nuage interne d'Öpik-Oort**, **nuage interne** ou **nuage d'Oort fossile**, est un vaste ensemble sphérique hypothétique, un corps du nuage d'Oort qui serait situé entre 100 et 3 000 unités astronomiques (frontière interne) et  $2-3 \times 10^4$  unités astronomiques (frontière externe) du Soleil. Cette sphère est donc bien au-delà de l'orbite des planètes et de la ceinture de Kuiper. Le nuage (externe) d'Oort, pour sa part, forme une structure sphéroïdale au-delà du nuage de Hills. Le nuage de Hills est l'une des théories astronomiques les plus vraisemblables, car bon nombre de corps ont été déjà repérés. Il est beaucoup plus épais que le Nuage d'Oort, mais cependant moins vaste. Les interactions gravitationnelles des étoiles proches et les effets de marée galactique ont donné aux comètes du Nuage d'Oort des orbites circulaires, ce qui ne doit pas être le cas pour les comètes du Nuage de Hills.



### Le modèle d'un nuage unique

Entre 1932 et 1981, les astronomes pensaient qu'il n'y avait un seul nuage : le Nuage d'Oort mis en théorie par Ernst Öpik et Jan Oort et qu'avec la ceinture de Kuiper, il représentait la seule réserve cométaire. En 1932, l'astronome estonien Ernst Öpik émit l'hypothèse que les comètes trouvaient leur origine dans un nuage orbitant à la limite externe du Système solaire. En 1950, cette idée fut ravivée de façon indépendante par l'astronome néerlandais Jan Oort afin d'expliquer cette contradiction apparente : les comètes sont détruites après plusieurs passages à travers le Système solaire interne. Ainsi, si toutes avaient existé depuis plusieurs milliards d'années (soit depuis le début du Système solaire), plus aucune ne pourrait être observée de nos jours. Oort sélectionna pour son étude les 46 comètes les mieux observées entre 1850 et 1952. La répartition des inverses des demi-grands axes faisait apparaître un maximum de fréquence qui laissait supposer l'existence d'un réservoir de comètes entre 40 000 et 150 000 ua (soit entre 0,6 et 2,5 années lumière). Celui-ci, situé aux limites de la sphère d'influence

gravitationnelle du Soleil, serait soumis à des perturbations d'origine stellaire, susceptibles d'expulser les comètes du nuage, soit vers l'extérieur, soit vers l'intérieur donnant lieu à l'apparition d'une nouvelle comète.



Jan Oort



Ernst Öpik



Jack Hills à l'origine de l'étude du Nuage éponyme

### Nouveau modèle

Durant les années 1980, des astronomes réalisèrent que le nuage principal pouvait avoir un nuage interne qui commencerait à environ 3 000 ua du Soleil et qui continuerait jusqu'au nuage classique à 20 000 ua. La plupart des évaluations placent la population du Nuage de Hills à environ cinq à dix fois celui du nuage extérieur, environ 20 trillions, bien que le nombre puisse être dix fois plus grand que cela. Le principal modèle du "nuage interne" a été proposé en 1981 par l'astronome J.G Hills, du Laboratoire de Los Alamos, qui lui donnera son nom. Il a mis en évidence ce nuage lorsqu'il calcula que le passage d'une étoile à proximité du Système solaire aurait pu causer des extinctions d'espèces sur la Terre, en déclenchant une « pluie de comètes ». En effet, ses recherches suggéraient que la plus grande partie de la masse totale des comètes du nuage aurait une orbite à un axe semi-majeur de  $10^4$  ua donc beaucoup plus près du Soleil que la distance minimum du Nuage d'Oort. De plus, l'influence des étoiles environnantes ainsi que celle de la « Marée galactique » auraient dû vider le Nuage d'Oort en expulsant les comètes hors ou à l'intérieur du système solaire. Il axa alors ses études sur la possibilité de la présence d'un autre nuage plus petit, plus massif et aussi plus près du Soleil qui réapprovisionnerait le nuage externe en comètes. Les années suivantes d'autres astronomes accréditèrent les recherches de Hills et les étudièrent. C'est le cas de Sidney van den Bergh qui suggéra la même structure en plus du Nuage d'Oort en 1982, puis Mark E. Bailey en 1983. En 1986, Bailey établit que la majorité des comètes du système solaire sont situées non pas dans la zone du Nuage d'Oort, mais plus proches, avec une orbite ayant un semi-axe de 5000ua, et proviendraient selon lui d'un nuage intérieur. Les recherches furent amplifiées par les études de Victor Clube et Bill Napier en 1987 ainsi que celles de R.B Stothers en 1988. Cependant le nuage de Hills ne représente un intérêt majeur que depuis 1991, lorsque les scientifiques reprennent la théorie de Hills (hormis des documents écrits par Martin Duncan, Thomas Quinn et Scott Tremaine en 1987 qui reprennent la théorie de Hills et font des recherches supplémentaires).

### Terminologie

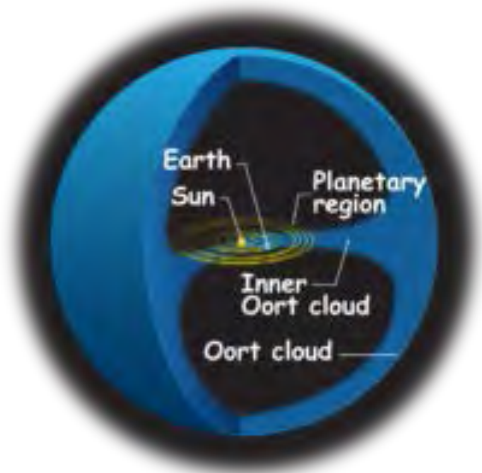
À l'instar de la ceinture de Kuiper, également appelée ceinture d'Edgeworth-Kuiper d'après le nom des scientifiques ayant étudié le phénomène, les nuages cométaires possèdent le nom des astronomes ayant mis en évidence leur existence. Le nuage de Hills porte alors le nom de l'astronome J.G Hills qui, le premier, émit l'hypothèse qu'il s'agissait d'un organe indépendant du nuage principal. Il est alternativement appelé nuage d'Oort interne, du nom de l'astronome néerlandais Jan Oort et nuage interne d'Öpik-Oort, du nom de l'astronome estonien Ernst Öpik.

### Caractéristiques

#### Structure et composition

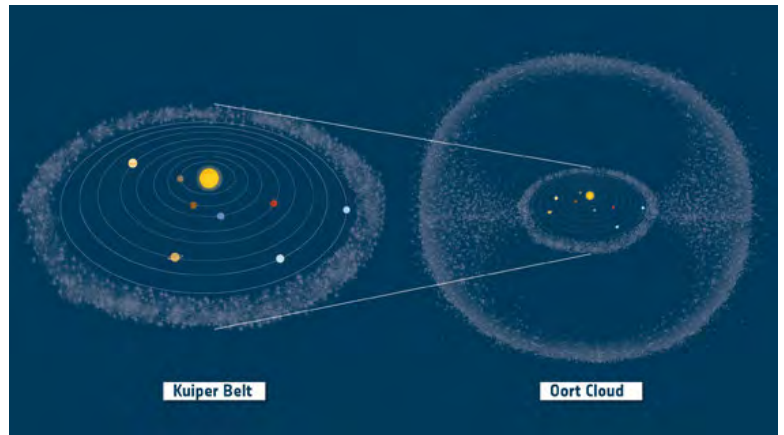
Les comètes du nuage d'Oort sont constamment perturbées par leur environnement. Une partie non négligeable quitte le Système solaire ou va dans le système interne. Ce nuage aurait donc dû s'épuiser depuis longtemps, or il n'en est rien. La théorie du nuage de Hills pourrait fournir une explication. J.G Hills ainsi que d'autres scientifiques ont suggéré qu'il serait une source qui livre des comètes dans un halo externe du nuage d'Oort en le réapprovisionnant lorsque ce halo externe est épuisé. Il est donc fort probable que le nuage de Hills soit la plus grande concentration de comètes de tout le Système solaire.

Le nuage de Hills occuperait une vaste zone d'espace comprise entre la limite externe de la ceinture de Kuiper, vers 50 ua, et 20 000 ua, voire 30 000 ua. La masse du nuage de Hills n'est pas connue. Certains scientifiques pensent qu'il pourrait être cinq fois plus massif que le nuage d'Oort. Selon les estimations de Bailey, la masse du nuage de Hills serait de 13,8 masses terrestres si la majorité des corps sont situés vers 10 000 ua. Si les analyses des comètes sont représentatives de l'ensemble, la grande majorité de objets du Nuage de Hills se compose de diverses glaces, comme l'eau, le méthane, l'éthane, le monoxyde de carbone et le cyanure d'hydrogène. Cependant, la découverte de l'objet 1996 PW, un astéroïde sur une orbite plus typique d'une comète à longue période, suggère que le nuage peut également contenir des objets rocheux. L'analyse du carbone et des rapports isotopiques de l'azote d'une part dans les comètes des familles du Nuage d'Oort et d'autre part dans les corps de la zone de Jupiter montre peu de différence entre les deux, en dépit de leurs régions nettement éloignées. Cela suggère que les deux proviennent de nuage protoplanétaire originaire, une conclusion aussi appuyée par des études de granulométrie des comètes du nuage et par la récente étude d'impact de la comète 9P/Tempel.



Not to scale

Nuage d'Oort interne et externe



Système solaire, Ceinture de Kuiper, Nuage d'Oort

### Formation

Le nuage d'Oort serait un reliquat du disque protoplanétaire originel qui se serait formé autour du Soleil après l'effondrement de la nébuleuse solaire, il y a 4,6 milliards d'années. Pour beaucoup de scientifiques, le Nuage de Hills ne s'est pas formé en même temps que le nuage externe. Il serait né du passage d'une étoile à 800 ua du Soleil, dans les 800 premiers millions d'années du Système solaire ce qui pourrait expliquer l'orbite excentrique de Sedna qui n'aurait pas dû se trouver là, n'ayant pas l'influence de Jupiter ni de Neptune, ni d'un effet de marée. Il est donc envisageable que le nuage de Hills soit plus « jeune » que le nuage d'Oort. Seul Sedna présente ces irrégularités, pour 2000 OO<sub>67</sub> et 2006 SQ<sub>372</sub> cette théorie ne semble pas de mise, car les deux corps orbitent près des géantes gazeuses. Dans 1,4 million d'années, le Nuage de Hills risque d'être de nouveau perturbé par le passage d'une autre étoile : Gliese 710. Ainsi la plupart des comètes, qu'elles soient issues du nuage d'Oort ou du nuage de Hills, vont être perturbées, certaines vont être éjectées et modifier la taille mais aussi l'aspect du Nuage de Hills. Le problème est qu'il risque de dévier des comètes à l'intérieur du Système solaire et de provoquer un hypothétique impact avec la Terre qui rappellerait l'impact qui a détruit les dinosaures il y a 65 millions d'années, entraînant une extinction massive d'éléments vivants.

### Corps remarquables

Objets du Nuage de Hills

Nom	Diamètre (km)	Périhélie (UA)	Aphélie (UA)	Découverte
Sedna	1 180 à 1 800	76,1	935	2003
2000 OO <sub>67</sub>	28 à 87	20,8	1 014,2	2000
2006 SQ <sub>372</sub>	50 à 100	24,17	2 005,38	2006

Les corps du Nuage de Hills sont composés essentiellement de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac. On connaît de nombreuses comètes ayant pour origine le nuage de Hills, comme la comète Hyakutake. Quelques corps très étranges pourraient faire partie du Nuage de Hills. Beaucoup de mystères tournent autour de 2008 KV42, avec son orbite rétrograde : il se pourrait qu'elle provienne du Nuage de Hills, voire du Nuage d'Oort. Il en va de même pour les damocloïdes dont les origines sont douteuses, comme celui qui a donné son nom à cette catégorie: (5335) Damoclès. Dans l'article annonçant la découverte de Sedna, Mike Brown et ses collègues affirmèrent qu'ils observaient le premier corps du nuage d'Oort, le nuage hypothétique de comètes qui se situerait entre environ 2 000 et 50 000 UA du Soleil. Ils observèrent que, à la différence des objets épars comme Éris, le périhélie de Sedna (76 UA) est trop distante pour que l'influence gravitationnelle de Neptune ait joué un rôle durant l'évolution de Sedna. Sedna étant beaucoup plus proche du Soleil que prévu pour les objets du nuage d'Oort et son inclinaison étant proche de celle des planètes et de la ceinture de Kuiper, les auteurs considérèrent que Sedna était un « objet du nuage d'Oort intérieur », situé sur le disque placé entre la ceinture de Kuiper et la partie sphérique du nuage.

### Comètes remarquables



La comète McNaught

Les scientifiques connaissaient plusieurs comètes qui provenaient de la même région que ce nuage cométaire hypothétique avec une aphélie supérieure à 1000 ua, provenant donc d'une zone plus lointaine que la ceinture de Kuiper mais à moins de 10 000 ua, donc trop proches du système interne pour faire partie du Nuage d'Oort. Certaines comètes célèbres atteignent des distances si lointaine qu'elles peuvent être des candidates sérieuses au titre de corps du nuage de Hills. La comète comète Lovejoy découverte dans l'hémisphère sud le 15 mars 2007 par l'astronome australien Terry Lovejoy, par exemple, atteint lors de son plus fort éloignement du Soleil une distance de 2 850 ua. La comète Hyakutake découverte en 1996, par un astronome amateur, Yuji Hyakutake, s'éloigne jusqu'à 3 410 ua du Soleil. La comète Machholz, découverte le 27 août 2004 par l'astronome amateur Donald Edward Machholz, va plus loin encore, jusqu'à 4 787 ua. La Comète McNaught, découverte le 7 août 2006 en Australie par Robert H. McNaught, qui devint l'une des comètes les plus brillantes de ces dernières décennies, possède une orbite allant à 4 100 ua. Enfin l'une de ces comètes célèbres la plus éloignée est la comète West, découverte par l'astronome danois Richard M. West à l'observatoire de La Silla au Chili le 10 août 1975 qui va jusqu'à 13 560 ua.

### Sedna, le premier candidat important

Sedna fut découvert par Michael E. Brown, Chadwick Trujillo et David L. Rabinowitz le 14 novembre 2003. Cependant, il est difficile de déterminer sa forme en raison de sa distance. Des mesures spectroscopiques ont montré que la composition de sa surface est similaire à celle d'autres objets transneptuniens : il est majoritairement composé d'un mélange de glaces d'eau, de méthane et d'azote avec du tholin. Sa surface est l'une des plus rouges du Système solaire. C'est probablement la première détection de l'hypothétique nuage de Hills. La région de ce nuage cométaire a été définie comme se composant d'objets ayant des orbites mesurant en moyenne entre 2 000 et 15 000 ua.

Sedna est cependant beaucoup plus près du système interne que la distance supposée du nuage de Hills. Le planétoïde, découvert à une distance d'environ 13 milliards de kilomètres (90 UA) du Soleil, circule sur une orbite elliptique qui l'amène tous les 12 260 ans à seulement 75 UA du Soleil lors de son passage au plus près (le prochain aura lieu en 2076), et le conduit à plus de 987 UA à son point le plus éloigné. Contrairement aux comètes, ce corps ne fut pas découvert lors d'un passage dans le système interne. D'un diamètre plus grand que celle de la planète naine Cérès, Sedna est aussi plus grand que les comètes habituelles. Mais Sedna ne peut pas être considéré comme un objet de la ceinture de Kuiper, car sa trajectoire ne l'amène pas dans la région de la ceinture de Kuiper. Il fait partie de ces corps n'appartenant à aucun modèle, que l'on nomme Objet détaché. La plupart de ces objets sont par ailleurs en résonance avec Neptune, ce qui n'est pas le cas de Sedna, qui ne s'approche jamais à moins de 75 AU du Soleil et n'est pas en résonance avec la planète gazeuse. De ce fait, considérer Sedna comme un objet du nuage intérieur d'Oort peut être une possibilité. Michael Brown, qui découvrit l'objet en 2003, a déclaré qu'il ne peut pas s'agir d'un objet épars car son périhélie est trop lointain pour avoir été affecté par Neptune. Il considère, avec d'autres astronomes, qu'il s'agit du premier membre connu d'une population nouvelle, qui pourrait inclure l'objet (148209) 2000 CR<sub>105</sub>, qui possède un périhélie de 45 UA, un aphélie de 415 UA et une période orbitale de 3 420 ans. Brown nomme cette population le « nuage d'Oort interne » car il se serait formé selon un procédé similaire, mais à une moins grande distance du Soleil. Sedna est très probablement une planète naine, même si sa forme n'est pas connue avec certitude.



*Vue d'artiste de Sedna*



*Photographie de Sedna*

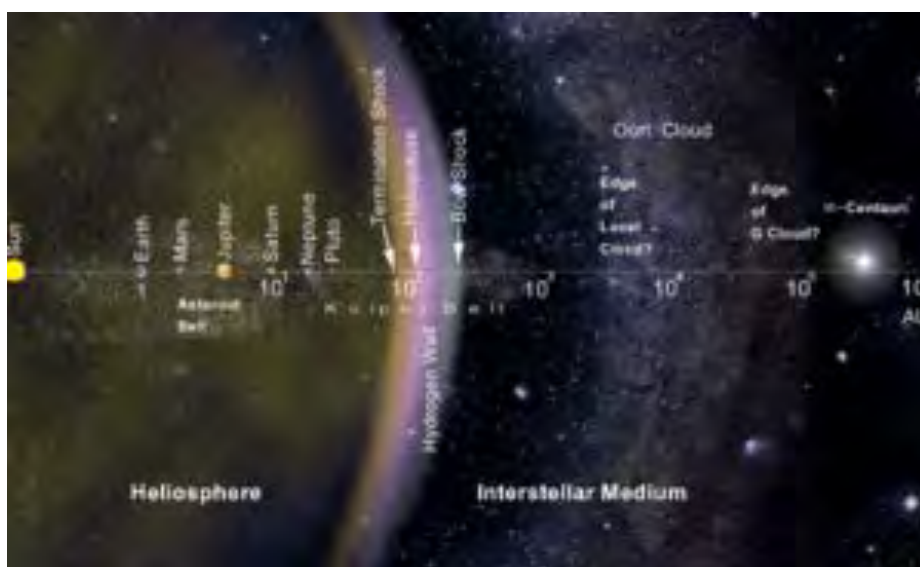
### VP113 : confirmation du nuage

La découverte de l'objet transneptunien 2012 VP113 annoncé le 26 mars 2014 change la vision des objets transneptuniens. Cet astre de 450 km de diamètre, contrairement aux planètes naines, ne fait pas partie de la ceinture de Kuiper. Son orbite bien plus éloignée se trouve entre 80 et 400 ua du Soleil. Il possède des caractéristiques similaires à Sedna. Alessandro Morbidelli, de l'observatoire de Nice et spécialiste de la dynamique des corps du Système Solaire, déclara à la découverte de ce corps, qu'elle « confirme ce que celle de Sedna avait suggéré: il existe un réservoir d'astres à plusieurs centaines d'unités astronomiques, une sorte de Nuage d'Oort fantôme ». Cette découverte permis de trouver trois et non deux réservoirs de comètes: la ceinture de Kuiper, le « nuage d'Oort fossile » et le nuage d'Oort « classique ». Ce nuage d'Oort fossile contiendrait environ un millier de corps d'environ 1 000 km de diamètre. Contrairement à la ceinture de Kuiper soumis à la force de Neptune et le Nuage d'Oort classique « influencé par les forces de marées de la Galaxie », le nuage d'Oort fossile n'est soumis à aucune force et est figé pour toujours.

Le nuage d'Oort est une zone hypothétique regroupant jusqu'à un trillion d'objets glacés et dont on pense qu'il est la source des comètes à longue période. Il entourerait le Système solaire vers 50 000 UA, peut-être même jusqu'à 154 000 UA. On pense qu'il serait composé de comètes qui ont été éjectées du Système solaire interne après des interactions avec les géantes gazeuses. Les objets du nuage d'Oort se déplacent très lentement et peuvent être affectés par des événements peu fréquents comme des collisions, les effets gravitationnels d'une étoile proche ou une marée galactique.

La limite entre le Système solaire et l'espace interstellaire n'est pas précisément définie. On pense que le vent solaire laisse la place au milieu interstellaire à quatre fois la distance entre Neptune et le Soleil. Cependant, la sphère de Hill du Soleil, c'est-à-dire sa zone d'influence gravitationnelle, s'étendrait plus de 1 000 fois plus loin, jusqu'à plus de 2 années-lumière (la moitié de la distance à l'étoile la plus proche); des objets ont été détectés jusqu'à 154 202 ua (2,44 a.l.) avec C/1992 J1 (Spacewatch). Certaines comètes ont une orbite calculée à une distance bien plus grande. C'est le cas de la comète C/2008 C1, qui d'après le site Jet Propulsion Laboratory de la NASA, affichait une distance de 312 174 ua (près de 5 a.l.), ce qui la situerait en-dehors du Système solaire. Cependant, la marge d'erreur des paramètres orbitaux est très importante et sa distance maximale du Soleil est très incertaine. Malgré des découvertes récentes comme celle de Sedna, la zone située entre la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort est globalement inconnue. Par ailleurs, la zone située entre le Soleil et Mercure fait toujours l'objet d'études.

### Limites



*Le Système solaire, du Soleil à Alpha Centauri*

### F) Les comètes



*Vue de la comète Hale-Bopp*

Les comètes sont de petits corps célestes du Système solaire, généralement de quelques kilomètres de diamètre, principalement composés de glaces volatiles. Elles possèdent des orbites hautement excentriques, avec un périhélie souvent situé dans le

Système solaire interne et un aphélie au-delà de Pluton. Lorsqu'une comète entre dans le Système solaire interne, la proximité du Soleil provoque la sublimation et l'ionisation de sa surface, créant une queue : une longue traînée de gaz et de poussière. Les comètes à courte période (comme la comète de Halley) parcourent leur orbite en moins de 200 ans et proviendraient de la ceinture de Kuiper; les comètes à longue période (comme la comète Hale-Bopp) ont une périodicité de plusieurs milliers d'années et tiendraient leur origine du nuage d'Oort. D'autres enfin ont une trajectoire hyperbolique et proviendraient de l'extérieur du Système solaire, mais la détermination de leur orbite est difficile. Les vieilles comètes qui ont perdu la plupart de leurs composés volatils sont souvent considérées comme des astéroïdes.

Une **comète** est, en astronomie, un petit corps constitué d'un noyau de glace et de poussière en orbite (sauf perturbation) autour d'une étoile. Lorsque son orbite, qui a généralement la forme d'une ellipse très allongée, l'amène près de cette étoile (par exemple le Soleil dans le Système solaire), la comète est exposée à diverses forces émanant de cette dernière : vent stellaire, pression de radiation et gravitation. Le noyau s'entoure alors d'une sorte de fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure ou *coma*, souvent prolongée de deux traînées lumineuses composées également de gaz et de poussières, les queues (une de gaz ionisé et une de poussières), qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de millions de kilomètres. Dans le Système solaire, quand elles s'approchent suffisamment de la Terre ou que leur magnitude est importante, les comètes deviennent visibles à l'œil nu (parfois même de jour) et peuvent être spectaculaires; elles sont alors classées comme « grandes comètes ». Les comètes se distinguent des astéroïdes, autres petits corps, par l'activité de leur noyau. Cependant, les observations récentes de plusieurs astéroïdes présentant une activité cométaire, notamment dans la ceinture principale, tendent à rendre de plus en plus floue la distinction entre comète et astéroïdes. Elles proviendraient de deux réservoirs principaux du Système solaire : ceinture de Kuiper et nuage d'Oort, tandis que les comètes interstellaires, ayant une origine extérieure restent hypothétiques.

### Origine du nom

Le mot « comète » vient du grec ancien ὀ κομήτης, *o komêtês*, qui signifie « astre chevelu ». Il est employé en ce sens chez Aristote et chez Aratos de Soles dans son poème sur l'astronomie, *Les Phénomènes*.

### Description

Une comète se compose essentiellement de trois parties : le noyau, la chevelure et les queues. Le noyau et la chevelure constituent la tête de la comète.

Lors du dernier passage de la comète de Halley en 1986, six sondes spatiales (ICE, Vega-1, Vega-2, Sakigake, Suisei et Giotto) ont frôlé la comète et enregistré des données et des images précieuses pour notre connaissance des comètes.

### Le noyau

L'hypothèse de constitution du noyau la plus communément admise et confirmée par les récentes expériences spatiales de spectroscopie, est qu'il serait un corps solide constitué pour environ moitié de glaces (essentiellement d'eau, puis de monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, éthane, acétylène) et environ moitié de matières météoritiques agglomérées (modèle dit de la « boule de neige sale » proposé par Fred Whipple en 1950, « modèle en couche » proposé par Michael J. Belton suite à la mission *Deep Impact*). Ces glaces se subliment (lorsque la comète est à une distance de 1 à 3 unités astronomiques du Soleil) sous l'action du rayonnement solaire et donnent naissance à la chevelure, puis aux queues. Le diamètre du noyau (non sphérique, certaines parties étant lisses, d'autres rugueuses) est estimé entre quelques centaines de mètres et quelques dizaines de kilomètres. La période de rotation va de 5 à 70 heures.



Le noyau de la comète de Halley, photographié par Hubble

Le noyau de la comète de Halley est de forme oblongue, sa plus grande dimension mesure environ 15 kilomètres, pour un volume estimé à 500 kilomètres cubes et une masse de  $10^{14}$  kilogrammes, ce qui correspond à une masse volumique moyenne de 200 kilogrammes par mètre cube (un cinquième de celle de l'eau dans les conditions standards à la surface de la Terre). La présence de molécules organiques dans les comètes est un élément en faveur de la théorie de la panspermie. Un scientifique de la NASA, Richard B. Hoover, prétend ainsi en 2011 avoir trouvé des bactéries fossiles extraterrestres dans des comètes,

mais la NASA a pris ses distances avec ses travaux, leur reprochant un manque d'évaluation par les pairs. Les noyaux cométaires sont parmi les objets les plus sombres du Système solaire avec un albedo compris entre 2 et 7 %.

### La chevelure

La chevelure, ou *coma*, forme un halo à peu près sphérique entourant le noyau et constitué de particules neutres de gaz et de poussières issus de ce noyau. Ces particules sont libérés sous forme de jets lorsque la comète se rapproche du soleil, provoquant la sublimation des glaces du noyau. Cette chevelure est entourée d'un nuage d'hydrogène atomique produit par photodissociation d'un certain nombre d'espèces, principalement  $H_2O$  et  $OH$ .

Son diamètre est généralement compris entre 50 000 et 250 000 kilomètres, avec des limites extrêmes de 15 000 et 1 800 000 kilomètres. La chevelure s'identifie fréquemment avec la tête de la comète, étant donné le faible diamètre relatif du noyau. Les analyses du gaz de la chevelure de la comète de Halley indiquent que celle-ci contient 80 % d'eau, 10 % de monoxyde de carbone, 3 % de dioxyde de carbone, 2 % de méthane, moins de 1,5 % d'ammoniac et 0,1 % d'acide cyanhydrique. Si la comète est suffisamment active, la coma se prolonge par des traînées lumineuses appelées queues.



*Chevelure de la comète 17P/Holmes, prolongée à droite par sa queue ionique*



*Queue bleue d'Hale-Bopp, due essentiellement à l'ion  $CO^+$*

### Les queues

Une comète importante possède en général deux queues visibles :

- Une queue constituée d'un plasma, rectiligne et se maintenant à l'opposé du Soleil (comme une ombre), poussée à haute vitesse (de l'ordre de 500 km/s) par le vent solaire; les changements de polarité du vent solaire produisent des ruptures dans la queue de plasma qui se reconstitue dans les heures qui suivent.
- Une queue plus large constituée de poussières poussées par la pression de radiation solaire, et incurvée dans le plan de l'orbite par la gravité du soleil. Grâce aux travaux de Michael Finson et Ronald Probstein (1968), qui ont mis en œuvre les hypothèses de Fiodor Bredikhine (1885) qui faisaient elles-mêmes suite à celles de Bessel, on peut modéliser la queue de poussières. Les trajectoires (képlériennes) des grains peuvent ainsi être analysées en fonction de la durée d'émission (synchrones) ou en fonction de leur taille (syndynes).
- Une troisième enveloppe, invisible avec des instruments optiques, mais décelée grâce à la radioastronomie, est la queue d'hydrogène qui s'étend sur des dimensions considérables.
- Une anti-queue, constituée de gros grains qui, par effet de perspective lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, semble pointer vers le Soleil.

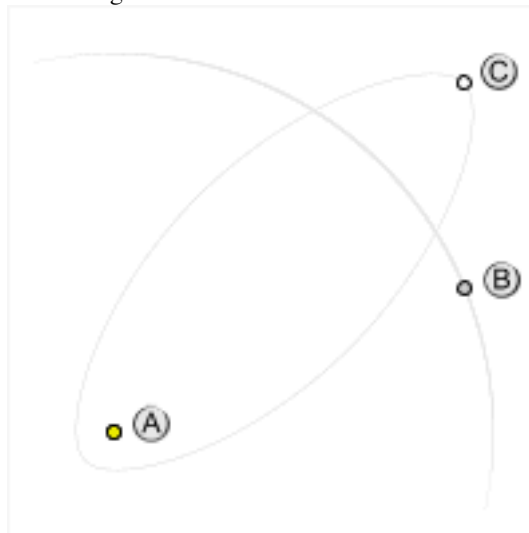
Leurs dimensions sont considérables : des longueurs de 30 à 80 millions de kilomètres sont relativement fréquentes.

### Orbites

Comme toute orbite céleste, celles des comètes sont définies à l'aide de six paramètres (éléments orbitaux) : la période  $P$ , l'argument du périhélie  $\omega$ , la longitude du nœud ascendant  $\Omega$ , l'inclinaison  $i$ , la distance du périhélie  $q$  et l'excentricité  $e$ . Lorsqu'on découvre une nouvelle comète, après au moins trois observations distinctes, on modélise une première orbite en prenant  $e = 1$  : par défaut, l'orbite est supposée parabolique. Lorsque plus d'observations ont pu être effectuées, une meilleure orbite osculatrice est calculée en affinant la valeur de l'excentricité. La majorité des comètes répertoriées ont une orbite elliptique et gravitent autour du Soleil : ce sont les comètes périodiques, leur période pouvant être modifiée par des perturbations gravitationnelles. Les comètes sont dites, par convention, à courte période quand leur période est inférieure à deux cents ans. Celles-ci seraient originaires de la ceinture de Kuiper, passeraient par un stade de centaure avant d'atteindre le Système solaire interne. Les comètes dont la période est supérieure à 200 ans, appelées comètes à longue période, sont supposées provenir du Système solaire externe (objets détachés, objets éjectés dans le nuage de Hills ou le nuage d'Oort par le passage d'étoiles et de nuages moléculaires et réinjectés dans le Système solaire par le même type de perturbation gravitationnelle). Les comètes attachées au Système solaire ont une orbite dont l'excentricité est inférieure à 1 (orbites elliptiques, donc comètes périodiques). Il existe quelques rares cas de comètes dont l'excentricité est supérieure à 1 (orbites hyperboliques, donc comètes non périodiques) : soit il s'agit de comètes provenant de l'extérieur du Système solaire (moins



d'une par siècle), soit il s'agit de comètes dont l'orbite a subi des perturbations gravitationnelles telles que, en l'absence de perturbations supplémentaires modifiant leur orbite en sens inverse, elles vont sortir du Système solaire. Les comètes rasantes se caractérisent par un périhélie extrêmement proche du Soleil, parfois à quelques milliers de kilomètres seulement de la surface de celui-ci. Alors que les petites comètes rasantes peuvent complètement s'évaporer lors d'un tel passage, celles de plus grandes tailles peuvent survivre à plusieurs passages au périhélie. Cependant, l'importante évaporation et les forces de marée entraînent souvent leur fragmentation.



Orbite d'une comète - A : Soleil, B : Pluton, C : Comète

### Modification des éléments orbitaux

Lorsqu'une comète passe à proximité des grosses planètes (essentiellement Jupiter), elle subit des perturbations gravitationnelles qui peuvent modifier certains de ses éléments orbitaux. C'est ainsi que la comète Shoemaker-Levy 9, initialement en orbite autour du Soleil, a été capturée par Jupiter puis a finalement percuté cette dernière en 1994 parce que lors de son précédent passage, cette comète était passée suffisamment près de cette planète pour qu'à la fois son orbite soit modifiée et son noyau décomposé en une multitude d'éléments répartis le long de l'orbite. Les éléments orbitaux d'une comète peuvent aussi être modifiés de manière non prévisible par l'activité du noyau (perturbations non gravitationnelles). Pour ces raisons les éléments orbitaux d'une comète ne sont jamais définitifs et doivent être recalculés lors de chaque passage (dans le cas des comètes à courte période).

### Paramètres de quelques comètes

Voici certains paramètres de quelques comètes connues.

Comète	Période (années)	Paramètres de l'orbite		
		Excentricité	Aphélie (ua)	Périhélie (ua)
1P/Halley	75,31	0,967	35,1	0,586
2P/Encke	3,30	0,847	4,096	0,339
Hale-Bopp (C/1995 O1)	2537	0,994	371,146	0,914
108P/Ciffréo	7,23	0,542	5,774	1,713
13P/Olbers	69,51	0,930	32,635	1,178
West (C/1975 V1-A)	558306	0,999	13560,217	0,196
109P/Swift-Tuttle	133,28	0,963	51,225	0,959
3D/Biela	6,64	0,751	6,190	0,879
Bradfield (C/2004 F4)	3679	0,999	476,543	0,168
Bennett (C/1969 Y1)	1678	0,996	281,892	0,537
Morehouse (C/1908 R1)	∞	1,0007	∞	0,945

### Comètes et étoiles filantes

Les essaims d'étoiles filantes (par exemple : Perséides, Orionides, Géminides) sont associés à des comètes. Les poussières perdues par une comète lors d'un passage se répartissent le long de l'orbite de celle-ci en formant une sorte de vaste nuage. S'il advient que la Terre, dans son mouvement orbital annuel, traverse un tel nuage, on assiste alors à une pluie d'étoiles filantes plus ou moins dense suivant l'activité et la nature de la comète. Ces « étoiles filantes » semblent provenir d'un même point du ciel appelé le radiant, un peu comme lorsqu'on est dans un tunnel rectiligne et que l'on a l'impression que les bords de celui-ci convergent vers un même point. L'essaim est nommé d'après la constellation où est situé le radiant (par exemple : Persée pour les Perséides, les Gémeaux pour les Géminides). Les poussières cométaires, lorsqu'elles pénètrent dans la haute atmosphère de

la Terre, s'échauffent et s'ionisent, produisant la traînée lumineuse que l'on connaît. L'intensité d'un essaim météoritique est variable et dépend notamment du ré-ensemencement en poussières lors de chaque passage des comètes.

### L'eau sur Terre découlerait probablement des comètes, si ce n'est des astéroïdes

Une équipe internationale a pu décrypter, par les données du télescope spatial Herschel, que l'eau de la comète Hartley 2 ressemblait parfaitement, au niveau chimique, à celle des océans de la terre. Jusqu'ici, on croyait que les astéroïdes étaient les sources les plus crédibles d'avoir pu amener de l'eau sur notre planète. Lors de sa formation, la Terre était très chaude et ses petites réserves d'eau se seraient évaporées. L'eau que l'on retrouve aujourd'hui serait présente grâce au bombardement de corps célestes, quelques dizaines de millions d'années après la naissance de la Terre. La plupart des comètes viennent du nuage de Oort autour du Système solaire. Les comètes de ce secteur renferment environ 50 % de glaces d'eau, bien que des analyses avaient démontré que cette eau contenait beaucoup plus de deutérium que celle de nos océans. Les chondrites carbonées, astéroïdes issus de la ceinture située entre Mars et Jupiter, similaire à notre eau, s'avéraient alors être les meilleurs candidats. Dorénavant, les comètes de type Hartley 2 rivalisent avec eux, ne provenant pas du nuage de Oort mais de la ceinture de Kuiper.

### Premières observations

Dans l'Antiquité, les premières traces écrites d'observations de comètes figurent dans des annales chinoises (à l'époque ces chroniques sont essentiellement de la scapulomanie gravée sur carapace de tortues ou omoplates d'animaux) de la dynastie Shang datant de 1059 av. J.-C. (le plus ancien passage attesté de la comète de Halley remontant à l'an 240 avant J.-C. est consigné dans ces archives chinoises), mais aussi à la même époque sur des tablettes en écriture cunéiforme chaldéennes. Le plus ancien dessin date du IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C. : sur un livre de soie découvert en 1974 dans la tombe du marquis de Dai en Chine, sont représentés vingt-neuf types de comètes.

Les premières interprétations sur la nature des comètes viennent de la philosophie naturelle grecque. Aristote, dans son traité *Du ciel*, divise le cosmos en monde céleste, composé d'éléments sphériques parfaits et monde sublunaire avec ses objets imparfaits. Dans son traité *Meteorologia*, Aristote classe les comètes dans le monde sublunaire : elles sont selon lui des phénomènes atmosphériques de la sphère de l'air remontant dans la sphère du feu. Au contraire, les pythagoriciens considèrent qu'il s'agit de planètes rarement observables. Diodore de Sicile y voit des poutres enflammées alimentant le soleil. Chez les Romains, Sénèque reprend la théorie d'Apollonius de Rhodes selon laquelle les comètes sont des astres errants revenant à des périodes trop longues à l'échelle d'une vie humaine. Malgré ces interprétations de savants et de philosophes, la croyance populaire en fait à cette époque (et jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle) des signes annonciateurs, le plus souvent de mauvais augure, plus rarement propitiatoires : ainsi les Chaldéens et les Mésopotamiens leur offrent de l'encens pour infléchir le funeste présage; certaines femmes grecques et romaines en deuil délient leurs cheveux pour manifester leur chagrin; certains astrologues égyptiens pensent que sacrifices et prières ne peuvent conjurer leur pouvoir annonciateur; les astrologues au Moyen Âge les associent à des morts illustres : comète de 451 pour la mort d'Attila, de 632 pour Mahomet, de 1223 pour Philippe-Auguste, comète de Halley pour Henri IV, etc. Outre ces présages funestes, elles sont également associées à des batailles (bon augure pour les Normands, mauvais pour les Anglo-saxons lors de la Bataille d'Hastings).



Comète de Halley dessinée sur la tapisserie de Bayeux, présage guerrier sur la bataille d'Hastings (en 1066)

En 1472, l'astronome Johann Müller observe une comète à Nuremberg. Il fonde la cométographie. Paolo Toscanelli observe les comètes de 1433, 1449, 1456 et calcule leur position. Leur nature véritable comme leur périodicité n'ont été trouvées qu'à partir de la Renaissance. En 1531, Petrus Apianus et Girolamo Fracastoro observent indépendamment que la queue des comètes est orientée à l'opposé du Soleil (des astronomes chinois au VII<sup>e</sup> siècle l'avaient déjà remarqué), mettant ainsi en évidence l'effet des vents solaires. Tycho Brahe montre en 1577, grâce au phénomène de parallaxe, que les comètes ne sont pas un phénomène sublunaire comme on le croyait couramment à son époque. En 1609, Johannes Kepler suppose, dans son

ouvrage *De cometis*, que les comètes naissent par génération spontanée et suivent une trajectoire rectiligne à une vitesse variable. En 1652, il est contredit par Pierre Gassendi qui, dans son *Traité sur les comètes*, leur attribue une vitesse constante et par Seth Ward qui comprend qu'elles suivent des ellipses, d'où le fait qu'elles ne soient visibles que lorsqu'elles sont suffisamment proches de la terre et du soleil. Puis Edmond Halley, grâce à ses travaux effectués depuis 1682 sur le calcul de la trajectoire cométaire par la gravitation, émet en 1705 l'hypothèse que les apparitions cométaires de 1531, 1607 et 1682, ne sont en fait qu'une seule et même comète dont il prédit l'apparition suivante en 1758 (voir comète de Halley), ce qui fit sa célébrité. John Flamsteed propose en 1680 une relation d'attraction-répulsion entre comètes et le Soleil. Après avoir d'abord réfuté cette théorie, Isaac Newton prouve dans son œuvre majeure, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, que les comètes obéissent aux mêmes lois de mécanique céleste que les planètes, et possèdent une masse.

### Connaissances actuelles

Une comète est un objet céleste de forme irrégulière, pouvant atteindre une dizaine de kilomètres de diamètre, constitué de glace et de poussière. Les comètes étaient vues à l'origine comme un halo lumineux qui apparaissait épisodiquement dans le ciel, et qui était interprété, selon son aspect et la période historique, comme un signe de bon ou mauvais augure. En fait, elles ne deviennent visibles que quand elles se rapprochent du Soleil, l'action de ce dernier provoque des émissions de gaz et de poussières qui réfléchissent la lumière solaire.

Les premiers résultats obtenus par la mission Stardust ont considérablement modifié les hypothèses concernant la formation des comètes. En effet les grains prélevés dans la coma de la comète Wild 2 par cette mission et ramenés sur Terre contiennent de l'olivine, matériau qui ne peut être synthétisé qu'à de très hautes températures (1 300 K). On est donc amené à penser que les noyaux de comètes ont été formés à proximité du Soleil et ont par la suite été éjectés vers le Nuage d'Oort. Pourtant les premières interprétations données de l'analyse des grains rapportés par Stardust doivent être prises avec circonspection : on soupçonne des interactions entre le matériau qui les contenait (aérogel) avec l'atmosphère terrestre. Notamment du fait des expériences spatiales, l'étude scientifique des comètes au XX<sup>e</sup> siècle a révélé leur vraie nature. La récupération in situ n'est pas l'unique moyen de récupérer de la matière cométaire. La Terre traverse continuellement divers nuages de poussières stellaires et notamment de la matière cométaire lorsque l'orbite de la Terre coïncide avec le sillage d'une comète. C'est ainsi que depuis 1982, la NASA récupère à l'aide d'avions pouvant voler à haute altitude de la poussière cométaire.

### Les missions spatiales

L'étude des comètes a considérablement progressé avec l'avènement de l'ère spatiale. Dix sondes ont contribué à mieux connaître les noyaux cométaires, les quatre premières s'étant approchées de la comète de Halley en 1986.

- La sonde soviétique Vega 1, lancée le 15 décembre 1984, après avoir détaché un module vers la planète Vénus, s'approche à 8 890 km de de Halley le 6 mars 1986.
- La sonde japonaise Sakigake, lancée le 7 janvier 1985 rencontre Halley le 11 mars 1986.
- La sonde japonaise Suisei, lancée le 19 août 1985 rencontre Halley le 8 mars 1986.
- La sonde européenne Giotto, lancée le 2 juillet 1985 s'approche du noyau de Halley le 13 mars 1986 à moins de 500 km.
- La sonde américaine Deep Space 1, lancée le 24 octobre 1998, après avoir survolé l'astéroïde Braille le 29 juillet 1999, traverse la queue de la comète 19P/Borrelly le 22 septembre 2001.
- La sonde américaine Stardust, lancée le 7 février 1999, passe à moins de 236 km de la comète Wild 2 le 24 janvier 2004, prélève de la poussière en traversant sa queue et la ramène sur Terre le 15 janvier 2006. En 2007, une seconde mission lui est assignée, vers une nouvelle comète : le 15 février 2011 elle passe à 190 km de la comète Tempel 1.
- La sonde américaine Deep Impact, lancée le 12 janvier 2005, creuse un cratère artificiel sur le noyau de la comète Tempel 1 le 4 juillet 2005, par collision d'un impacteur. Puis, après avoir utilisé l'assistance gravitationnelle de la Terre fin 2007, la sonde - rebaptisée EPOXI - passe à environ 700 km de la comète 103P/Hartley le 4 novembre 2010.
- La sonde européenne Rosetta lancée le 2 mars 2004, après avoir survolé les astéroïdes Šteins (5 septembre 2008) et Lutetia (10 juillet 2010), se met en orbite à 100 km autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko dix ans après son lancement, le 6 août 2014, ce qui constitue une première technologique. Les images de haute définition sont transmises, révélant de nombreux détails de l'astre. *Philae*, un petit atterrisseur, s'est posé sur son noyau le 12 novembre 2014.

### À signaler également :

- La sonde européenne SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), lancée le 2 décembre 1995, destinée à étudier le Soleil en continu et qui de ce fait a permis de découvrir des comètes qui finissaient leur vie en « tombant » dans le Soleil, appelées comètes rasantes.
- Les satellites jumeaux de la mission américaine STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory), lancés le 25 octobre 2006 et destinés eux aussi à étudier le Soleil, ont permis, comme SoHO, la découverte de nombreuses comètes rasantes.

### Désignation

Bien avant la publication en 1705 d'Edmond Halley sur la comète portant son nom, ces petits corps du Système solaire étaient considérés comme des phénomènes isolés, uniques et non périodiques, aussi les comètes ne portaient pas de nom.

Mise à part la comète de Halley, ou celle de Encke, le nom d'une comète est attribué officiellement par une commission de l'Union Astronomique Internationale (UAI, IAU en anglais), dont le siège est à Washington, D.C.. Certaines comètes historiques, spectaculaires et aisément visibles à l'œil nu, n'ont aucun nom officiel et sont simplement désignée comme *grande comète*. Par exemple la grande comète de 1811. Traditionnellement, on donne aux comètes le nom de son (ou de ses)

découvreur(s), jusqu'à trois noms maximum. Dans le cas des comètes Halley, Encke ou Lexell, il s'agit du nom des personnes qui ont déterminé la périodicité de ces astres. Quelques comètes sont nommées d'après le lieu de leur découverte (la comète Lulin) et un nombre de plus en plus important reçoit le nom d'un programme de recherche automatique, comme LINEAR ou NEAT, ou bien celui d'un satellite artificiel, comme SOHO.

En plus du nom, les comètes reçoivent une référence officielle dont l'attribution obéit à un nouveau procédé (préfixe selon la période suivie d'une désignation séquentielle suivant l'ordre des découvertes : l'année, puis une lettre majuscule identifiant le demi-mois de la découverte, puis un nombre indiquant l'ordre de la découverte dans ce demi-mois) depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1995.

### Ancien procédé

Avant le 1<sup>er</sup> janvier 1995 les comètes recevaient une désignation provisoire constituée par l'année de la découverte suivie d'une lettre en minuscule correspondant à l'ordre de la découverte. Par exemple, 1965, sixième comète trouvée pendant l'année 1965. Plus tard, le nom définitif lui était attribué selon les critères suivants : l'année du passage au périhélie, suivie d'un numéro noté en chiffres romains indiquant l'ordre chronologique du passage au périhélie (exemple : 1994 IV, quatrième comète passée au périhélie en 1994). Ce procédé comportait de nombreux inconvénients : la multiplication des découvertes épuisait l'alphabet. Quand on découvrait une 27<sup>e</sup> comète dans l'année, il fallait recommencer l'alphabet en faisant suivre la lettre du chiffre 1 (comme 1991a1). Les découvertes de comètes après leur passage au périhélie rendaient difficile une désignation officielle cohérente. Les comètes à courte période multipliaient les désignations, une nouvelle étant attribuée à chacun de leurs retours.

### Nouveau procédé

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1995, une nouvelle nomenclature, inspirée par celle appliquée aux astéroïdes, est attribuée comme ceci :

1. Une lettre servant à identifier le type de comète : C indique une comète à longue période (supérieure à 200 ans) ou non périodique. P indique une comète à courte période (inférieure à 200 ans). C'est utilisé pour les comètes disparues ou éteintes. X pour une comète dont l'orbite n'a pu être calculée.
2. L'année de la découverte.
3. Une lettre majuscule correspondant à la quinzaine du mois de la découverte.
4. Un chiffre précisant l'ordre chronologique de découverte durant cette quinzaine.
5. Le nom du (ou des) découvreur(s).

Ainsi pour C/1995 O1 Hale-Bopp :

- C/ indique qu'il s'agit d'une comète à longue période (éventuellement non périodique).
- 1995 indique que la comète a été découverte en 1995.
- O indique qu'elle a été découverte au cours de la deuxième quinzaine de juillet.
- 1 indique qu'il s'agit de la première comète découverte au cours de cette période.
- Hale-Bop est le nom de ses deux découvreurs, Alan Hale et Thomas Bop.

Lorsqu'il a été vu plusieurs comètes à l'occasion d'une même observation, un numéro d'ordre est ajouté après le nom de l'observateur (comète Hartley 2 par exemple).

Pour les comètes périodiques dont le retour a été observé au moins une fois, la désignation subit une légère modification. Par exemple la comète P/2001 J1 (NEAT) a été retrouvée en 2008, conformément aux calculs de sa période orbitale. Sa périodicité ne faisant aucun doute, elle a reçu l'appellation définitive 207P/NEAT, indiquant qu'il s'agit de la 207<sup>e</sup> comète périodique confirmée.

### Liste de comètes

Le Minor planet Center répertorie à l'heure actuelle 3 800 comètes. L'une des plus célèbres est la comète de Halley, qui réapparaît tous les 75 ou 76 ans.

***Par contre, nonobstant le nombre de comètes répertoriées, les astronomes estiment que le nombre total de comètes orbitant dans la sphère gravitationnelle du soleil pourrait aller jusqu'à 1 milliard !***

Parmi les autres comètes les plus célèbres, on peut citer :

- C/2006 P1 McNaught, très brillante,
- C/1995 O1 (Hale-Bopp), probablement la comète la plus observée, ayant été visible pendant 18 mois,
- C/1996 B2 Hyakutake, également baptisée Grande comète de 1996,
- D/1993 F2 Shoemaker-Levy 9, détruite par collision avec Jupiter en juillet 1994,
- 109P/Swift-Tuttle,
- 55P/Tempel-Tuttle,
- 19P/Borrelly, visitée par la sonde Deep Space 1,
- 9P/Tempel, première comète à être visitée par deux sondes : Deep Impact en 2005, qui lui a envoyé un impacteur, et Stardust en 2011,
- Wild 2, survolée par la sonde Stardust,
- Hartley 2, survolée par la sonde Deep Impact.

Enfin, la comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko, a été définie par l'ESA comme objectif d'une visite par la sonde Rosetta, prévue en août 2014 au terme d'une mission qui aura duré plus d'une dizaine d'années (voir § G, ci-après).

## G) La comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko La mission de la sonde européenne Rosetta (2004 – 2015)

*Rosetta* est une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne (ASE/ESA) dont l'objectif principal est de recueillir des données sur la composition du noyau de la comète 67P Churyumov-Gerasimenko et sur son comportement à l'approche du Soleil. La sonde spatiale, d'une masse de trois tonnes, s'est placée en orbite autour de la comète puis, après une période d'observation de plusieurs mois, a envoyé le 12 novembre 2014 un petit atterrisseur, *Philae*, se poser sur sa surface pour analyser *in situ* la composition de son sol et sa structure. *Rosetta* constitue un projet phare pour l'ESA qui y a investi plus d'un milliard d'euros. Le comité scientifique européen a décidé sa construction en 1993, après l'abandon d'un projet commun avec la NASA, avec l'objectif d'améliorer notre connaissance du processus de formation du Système solaire dont les comètes constituent des vestiges.

*Rosetta* est la sixième sonde spatiale à observer autour d'une comète à faible distance, mais elle est la première à poser un atterrisseur sur son noyau. La mission représente à plusieurs titres un défi technique. La distance entre la Terre et la comète nécessite que la sonde soit autonome durant les phases critiques. L'atterrisseur doit pouvoir réussir à se poser sur un noyau cométaire dont la constitution et le comportement sont inconnus. Enfin, la sonde doit survivre sur les plans thermique et énergétique aux grandes variations d'amplitude de l'éclairage solaire imposées par sa trajectoire.

En 2003, une défaillance du lanceur implique de reporter le départ d'un an et de renoncer à l'objectif initial, la comète 46P/Wirtanen. *Rosetta* est finalement lancée par une fusée Ariane 5 G+ le 2 mars 2004 en direction de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Pour se placer sur une orbite identique à celle de la comète, la sonde spatiale a recours à quatre reprises à l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars. Durant son périple, la sonde spatiale survole les astéroïdes Šteins en 2008 et Lutetia le 10 juillet 2010, dont l'étude constitue un objectif scientifique secondaire de la mission. *Rosetta* est alors mise en sommeil pendant 31 mois afin de réduire la consommation d'énergie durant la phase de sa trajectoire où elle se trouve la plus éloignée du Soleil. La sonde spatiale est réactivée en janvier 2014 puis se place sur une orbite identique à celle de la comète à moins de 100 kilomètres de celle-ci. Le 6 août 2014 la sonde spatiale débute les manœuvres devant la mener à son orbite finale autour de Tchourioumov-Guérassimenko. La fin de sa mission est prévue en décembre 2015.

### Historique des missions spatiales d'étude des comètes

Les scientifiques considèrent que l'étude des comètes peut fournir des indices importants sur le processus de formation et évolution du Système solaire. Les comètes sont étudiées au XX<sup>e</sup> siècle à l'aide de télescopes munis de spectromètres qui fournissent des indices sur leur composition. Mais seule une mission spatiale *in situ* peut permettre de connaître de manière suffisamment précise la nature de ces corps célestes. La première vague de missions spatiales vers les comètes a lieu lors du passage de la comète de Halley en 1986 : alors que la NASA, qui fait face à de graves problèmes financiers, doit renoncer à développer une mission spatiale, l'ESA construit la sonde *Giotto* qui survole Halley mais également la comète 26P/Grigg-Skjellerup (1996). La sonde européenne réalise plusieurs premières techniques dont un passage à faible distance d'un noyau d'une comète. Elle est à l'origine de découvertes scientifiques importantes comme la présence de composés organiques dans le noyau. L'étude des comètes depuis l'espace devient un des rares domaines de l'exploration spatiale où l'Agence spatiale européenne devance son homologue américaine, la NASA. La comète de Halley est également étudiée lors de son passage de 1986 à plus ou moins grande distance par d'autres sondes spatiales dont ce n'est parfois pas la mission principale : les sondes japonaises *Sakigake* et *Suisei* ainsi que les sondes soviétiques *Vega 1* et *Vega 2*.



Vue d'artiste de la sonde Giotto



L'impacteur de la sonde de la NASA Deep Impact percute le noyau de la comète Tempel 1

La NASA réalise au cours des deux décennies suivantes plusieurs missions spatiales dédiées à l'étude des comètes, aux caractéristiques très différentes :

- *Deep Space 1* survole la comète 19P/Borrelly en 2001
- *Stardust*, lancée en 1999, passe à proximité de 81P/Wild (comète Wild 2) en 2004 et capture des particules situées dans la queue de celle-ci. Une capsule contenant les échantillons collectés atterrit sur Terre en 2006. La sonde effectue également en 2011 un survol de la comète Tempel 1 percutée par *Deep Impact* pour étudier son évolution depuis le précédent survol;
- la sonde spatiale *CONTOUR*, lancée en 2002, devait survoler les noyaux des comètes 2P/Encke et 73P/Schwassmann-Wachmann mais est victime d'une défaillance du moteur qui devait l'injecter sur sa trajectoire interplanétaire;
- *Deep Impact*, lancée en 2005, est contemporaine de *Rosetta*. Elle largue en 2005 un impacteur de 350 kilogrammes sur le noyau de 9P/Tempel (comète Tempel 1), soulevant plusieurs milliers de tonnes de poussière et de glace : l'analyse par des instruments embarqués et des télescopes spatiaux permet d'en déterminer la composition.

## **Genèse et développement du projet Rosetta**

### **Sélection comme mission « pierre angulaire » du programme Horizon 2000**

Après le succès de la mission *Giotto*, la communauté scientifique internationale propose en 1991 le lancement d'une mission dédiée aux comètes, dont un des objectifs est de ramener sur Terre un échantillon de noyau cométaire. En janvier 1985 les ministres des pays membres de l'ESA entérinent à Rome le premier plan scientifique à long terme de l'Agence spatiale européenne baptisé Horizon 2000. Celui-ci prévoit notamment le lancement d'ici l'an 2000 de quatre missions ambitieuses, dites « pierres angulaires », dont une mission de retour d'échantillon d'une comète. Mais le coût de cette mission, estimé à 800 millions de dollars, est trop important pour le budget dont dispose l'agence européenne.

### **Le projet conjoint NASA / ESA avorté**

Dans les années 1980 la NASA envisage également un projet analogue baptisé CNSR (*Comet Nucleus Sample Return*) et qui doit être lancé par une fusée Titan IV. Les deux agences décident au cours de réunions de travail, qui ont lieu en juillet 1986, de regrouper leurs moyens pour développer une mission commune qui est baptisée *Rosetta*. Le nom choisi pour la mission fait référence à la pierre de Rosette qui permit à Jean-François Champollion de déchiffrer en 1822 la langue des hiéroglyphes égyptiens. La sonde spatiale doit utiliser la nouvelle génération *Mark II* de la plateforme des sondes spatiales *Mariner* en cours de conception au centre spatial JPL. L'agence américaine fournit également les RTG et le lanceur tandis que l'ESA développe l'atterrisseur, le système de prélèvement d'échantillon du sol de la comète ainsi que la capsule ramenant celui-ci sur Terre. L'objectif est initialement la comète 73P/Schwassmann-Wachmann 3 puis, après la décision de reporter la date de lancement à 2003, la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Le lanceur Titan devait placer *Rosetta* sur une orbite héliocentrique. Grâce à une manœuvre d'assistance gravitationnelle lors d'un survol de la Terre deux ans après le lancement, la sonde spatiale devait réaliser un rendez-vous avec la comète alors que celle-ci se trouvait à son aphélie au niveau de l'orbite de la planète Jupiter. Après une phase d'observation de 100 jours pour évaluer les caractéristiques de la comète et déterminer un site d'atterrissage propice, l'atterrisseur devait se poser en utilisant un radar altimètre et un radar Doppler. L'atterrisseur disposait d'une pelle pour ramasser des échantillons ainsi que d'une foreuse d'une puissance de 100 watts capable de prélever une carotte du sol à 3 mètres de profondeur. Une fois les échantillons placés dans la capsule, un étage développé par la NASA devait placer celle-ci sur une trajectoire de retour vers la Terre.

L'annulation par le Congrès américain en 1992 de la mission CRAF, justification première du développement de la plateforme *Mariner Mark II*, jette un doute sur la volonté de la NASA de poursuivre le projet. De son côté l'Agence spatiale européenne est confrontée à des difficultés financières liées à la réunification de l'Allemagne et au coût annoncé de la navette spatiale *Hermès*. Après avoir étudié sa faisabilité l'ESA décide de développer une mission moins ambitieuse en abandonnant toute idée de partenariat avec la NASA tout en étant compatible avec les capacités financières et techniques de l'agence. Le retour d'échantillon est abandonné mais la phase d'observation in situ de la comète peut être ainsi prolongée permettant d'étudier l'évolution du noyau à une distance du Soleil comprise entre 1 et 3 U.A.

### **Redéfinition de la mission**

L'Agence spatiale européenne, contrairement à son homologue américaine, ne maîtrise pas la filière de production des RTG chargés de fournir l'énergie dans la version initiale de la sonde spatiale. *Rosetta* dans sa nouvelle configuration doit donc avoir recours à des panneaux solaires qui ne produisent plus qu'un vingtième de leur puissance (par rapport à l'orbite terrestre) lorsque la trajectoire de la sonde spatiale se trouve à son point le plus éloigné du Soleil. Heureusement la technologie des cellules solaires, qui a fortement progressé, permet de fournir suffisamment d'énergie pour que la sonde spatiale puisse survivre à cette distance du Soleil. Dans les premières esquisses de la mission refondue les atterrisseurs mis en œuvre sont de conception très simple : entièrement passifs ils exécutent un programme pré-établi et ont une durée de vie limitée par la capacité de leurs batteries. Dans la version finale *Rosetta* doit emporter deux atterrisseurs : *ROLAND (Rosetta Lander)* développé par un consortium européen dirigé par l'Institut Max Planck et l'agence spatiale allemande (DLR) et *Champollion* développé conjointement par l'agence spatiale française, le CNES et la NASA. Plusieurs objectifs potentiels sont sélectionnés, il s'agit de comètes qui peuvent être atteintes au bout de 8 à 9 ans en utilisant l'assistance gravitationnelle de Vénus puis de la Terre ou de Mars. La mission inclut également le survol de deux astéroïdes. La mission est validée dans cette configuration en novembre 1993 par l'Agence spatiale européenne. Son coût est évalué à 770 M€ en incluant le lanceur et les opérations en vol. L'ESA ne finance toutefois pas les atterrisseurs, qui relèvent du budget des agences spatiales nationales.

## Développement

Dix-huit mois après le début des études, la NASA renonce pour des raisons financières et de programmation à sa participation à *Champollion* dont le développement est alors abandonné par l'agence spatiale française. Certains des instruments scientifiques de *Champollion* sont incorporés dans l'atterrisseur ROLAND auquel le CNES s'associe. De son côté le centre JPL de la NASA développe un projet parallèle de retour d'échantillon de comète, baptisé Deep Space 4 qui comporte un atterrisseur embarquant les instruments de Champollion. Mais après 3 ans d'étude, ce projet, jugé trop coûteux, est abandonné à son tour laissant le champ libre à la mission européenne. Le développement de l'orbiteur *Rosetta* est confié à la société allemande Daimler-Chrysler (devenu en 2014 Airbus Defence and Space) qui dirige un regroupement d'industriels européens : le Royaume-Uni fournit la plateforme, les industriels français l'avionique et l'Italie réalise l'assemblage et les tests. Le développement de l'atterrisseur est coordonné par l'Agence spatiale allemande, la DLR, avec des contributions significatives des agences spatiales et des institutions scientifiques de France, Italie, Hongrie, Royaume-Uni, Finlande, Autriche et Irlande. L'ESA décide finalement de financer 50% des coûts de développement de l'atterrisseur évalués à 200 millions €. Celui-ci est rebaptisé *Philae* (qui peut être orthographié *Philæ*) en référence à l'obélisque de Philæ qui fournit les clés permettant de compléter le déchiffrement de Champollion. En effet, les scientifiques espèrent que les informations collectées par la mission seront décisives pour combler les lacunes dans les connaissances de l'histoire du système solaire. La sonde spatiale est construite dans une salle blanche respectant les règles de la COSPAR pour éviter toute contamination de la comète.

## Report du lancement et changement d'objectif

L'objectif initial de la sonde spatiale *Rosetta* est l'étude de la comète Wirtanen tandis que l'observation des astéroïdes (*140 Siwa* et (*4979 Otawara*) qui doivent être survolées durant la traversée de la ceinture des astéroïdes par la sonde spatiale, constituent des objectifs secondaires. Le lancement est prévu en janvier 2003 mais l'échec du vol 157 de la fusée Ariane 5 le 11 décembre 2002, cloue au sol pour plus d'un an ce lanceur qui avait été retenu pour placer en orbite la sonde. La fenêtre de tir permettant d'atteindre la cible est relativement courte. Il est encore possible d'atteindre la comète en janvier 2004 en utilisant le lanceur russe Proton. Mais l'ESA choisit finalement d'utiliser le lanceur Ariane 5 ce qui nécessite de trouver une autre destination pour la sonde spatiale. La seule cible alternative satisfaisant les différentes contraintes de la mission est la comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko, accessible en février 2004 avec un lanceur de type Ariane 5 G+ et en février 2005 avec un lanceur de type Ariane 5 ECA ou Proton. Une étude de faisabilité est réalisée par le CNES, qui doit valider le déroulement de l'atterrissage dans ce nouveau contexte, et par le Laboratoire d'astronomie spatiale du CNRS à l'aide du télescope spatial Hubble : elle permet de déterminer que le noyau de cette comète était 30 fois plus massif que celui de Wirtanen rendant la mission de l'atterrisseur plus complexe mais néanmoins réalisable. Après 3 mois d'investigations, le 14 mai 2003, le comité des programmes scientifiques de l'ESA approuve le nouvel objectif. Le rendez-vous avec la comète, prévu initialement en 2011, est repoussé à 2014, malgré un report du lancement de seulement un an. Cet allongement découle de la trajectoire plus complexe que doit suivre la sonde pour parvenir jusqu'à son nouvel objectif. En attendant le lancement la sonde spatiale est stockée sur la base de lancement de Kourou dans une salle blanche. Le logiciel de vol et certains instruments font l'objet d'une mise à jour tandis que les antennes et les panneaux solaires sont démontés de manière provisoire. Plusieurs modifications sont effectuées pour prendre en compte les changements apportés à la mission. Une nouvelle trajectoire est calculée qui fait passer la sonde spatiale plus près du Soleil nécessitant l'ajout de protections thermiques. La gravité bien supérieure de la nouvelle comète a comme conséquence une vitesse d'atterrissage de *Philae* trois fois supérieure : pour éviter que l'atterrisseur ne bascule au moment de sa prise de contact avec le sol, un dispositif interne destiné à réduire l'inclinaison est ajouté. Le report et les modifications apportées à l'atterrisseur entraînent un surcoût de 100 millions €. Le coût total de la mission, y compris le lancement et les opérations en vol, est évalué à 1,3 milliard d'euros dont 250 millions d'euros financés par la France via sa participation aux projets de l'Agence spatiale européenne versée par l'agence spatiale nationale, le CNES.

## Enjeux de la mission

### Principales caractéristiques d'une comète



On distingue clairement sur cette photo de Hale-Bopp les deux queues qui caractérisent une comète à l'approche du Soleil

Une comète est un corps céleste de petite taille (généralement moins de 10 km de diamètre) composé en grande partie de glace d'eau qui parcourt une orbite elliptique au cours de laquelle il s'approche du Soleil le contourne avant de s'éloigner vers l'extérieur du système solaire. À l'approche du Soleil, la comète se transforme : la glace située à sa surface, portée à plusieurs

centaines de degrés par l'énergie solaire, se sublime à un rythme qui peut être de plusieurs tonnes par seconde : c'est le phénomène du dégazage observé par la sonde *Giotto*. Un nuage de gaz et de poussière d'un diamètre qui atteint plusieurs dizaines de milliers de kilomètres de rayon, la chevelure ou coma, se forme autour du corps de la comète appelé noyau. Les particules solides poussées par la pression de radiation forment une longue traîne blanchâtre légèrement incurvée qui s'oriente à l'opposé du Soleil et peut atteindre une longueur de plusieurs millions de kilomètres. Une deuxième queue de couleur bleutée, encore plus longue, constituée de particules ionisées poussées par le vent solaire s'oriente à l'opposé du Soleil. Pour les comètes les plus actives, ces excroissances, éclairées par le Soleil, deviennent visibles à l'œil nu depuis la Terre. Tous ces phénomènes disparaissent lorsque la comète s'éloigne à nouveau du Soleil.

On distingue deux grandes catégories de comètes. Les premières, en provenance de l'orbite de Jupiter, bouclent en quelques années leur orbite qui est située dans l'écliptique, tout comme les planètes. D'autres ont une période qui peut atteindre plusieurs millions d'années et peuvent circuler sur un autre plan que l'écliptique. Les calculs de leur orbite ont montré que ces dernières provenaient d'une région de l'espace s'étendant de 10000 à 100 ou 200 000 UA (soit à mi-distance de l'étoile la plus proche) qui a été baptisée nuage de Oort.

### **Comprendre la genèse du Système solaire**

Il y a 4,6 milliards d'années, le Système solaire était encore une nébuleuse protosolaire constituée principalement d'hydrogène, d'hélium, de glace et de silicates. La nébuleuse a commencé à se condenser par effondrement gravitationnel déclenché peut-être par l'explosion d'une supernova à proximité. Le cœur de la nébuleuse est devenu de plus en plus dense et les chocs entre particules se sont multipliés, transformant l'énergie cinétique en chaleur. Environ 100 000 ans après le début de ce processus, une proto-étoile chaude, l'amorce du Soleil, s'est formée : au voisinage du Soleil, seuls les éléments les plus lourds et les moins volatils de la nébuleuse ont subsisté formant les planètes telluriques denses telles que la Terre, tandis que les matériaux plus légers comme l'hélium et la glace formèrent à plus grande distance des planètes gazeuses géantes comme Jupiter. Dans cette dernière région, certaines des briques élémentaires ne se sont pas agrégées aux corps plus massifs et ont été repoussées par effet de fronde gravitationnelle par la planète géante Jupiter jusqu'à la frontière du Système solaire. Ces petits corps faits de glace et de roche se sont regroupés dans deux immenses régions : la ceinture de Kuiper située à une distance comprise entre 30 et 100 unités astronomiques du Soleil et le nuage d'Oort qui forme une coquille qui entoure le Système solaire entre 10 000 unités astronomiques et 1 année-lumière du Soleil. Depuis la naissance du Système solaire, la composition de ces objets est restée pratiquement inchangée : l'éloignement du Soleil maintient la température de leur noyau à des valeurs très basses (-270 °C) ce qui leur permet de conserver à l'état solide les molécules les plus volatiles tandis que la gravité très faible de ces objets de petite taille n'entraîne aucune transformation métamorphique. Ces deux régions constituent le réservoir des comètes observées. Celles-ci sont chassées du nuage d'Oort ou de la ceinture de Kuiper par le passage du Système solaire à proximité d'une étoile, d'un nuage galactique ou par la pression du disque galactique. Compte tenu de leur origine, les comètes sont donc des vestiges de la nébuleuse protosolaire pratiquement intacts qui devraient nous permettre de mieux comprendre le processus de formation du Système solaire. Or celui-ci est encore mal connu et les théories en vigueur sont régulièrement remises en question par de nouvelles découvertes comme celle, récente, de systèmes solaires comportant des exoplanètes aux caractéristiques – masse, distance à l'étoile – incompatibles avec tous les mécanismes de formation envisagés jusque-là.

### **À la recherche de l'origine de la vie**

Durant les 500 premiers millions d'années du Système solaire, de nombreux corps célestes venus des régions périphériques et attirés par la gravité du Soleil se sont écrasés sur les planètes telluriques situées sur leur trajectoire. Les collisions entre comètes et planètes apportaient de l'eau mais également sans doute des composés organiques qui ont contribué à l'apparition de l'atmosphère primitive et peut-être même à celle de la vie. Les composés les plus complexes des comètes ne peuvent être détectés à distance car ils sont détruits dès qu'ils sont libérés par la comète. Seule une mission in situ, comme l'a démontré notamment la sonde *Giotto*, permet de les identifier et d'affiner ce scénario d'origine de la vie.

### **Objectifs et profil de la mission Rosetta**

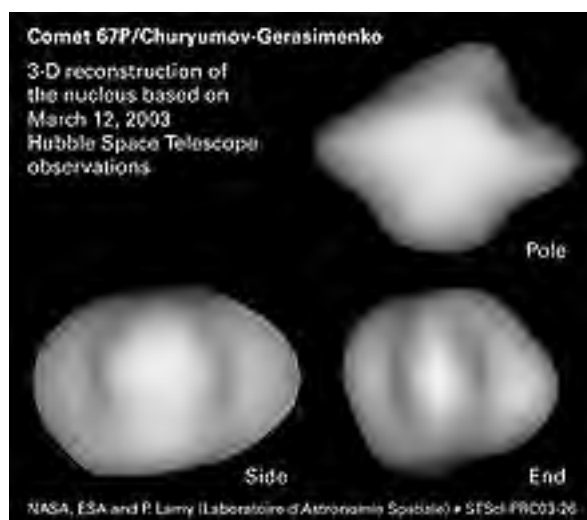
L'objectif principal de *Rosetta* est l'étude de la comète Tchourioumov-Guérassimenko. Toutefois au cours de son périple vers la comète la sonde spatiale traverse à plusieurs reprises la ceinture d'astéroïdes. Les concepteurs de la mission ont calculé la trajectoire de manière à ce que *Rosetta* passe à proximité des astéroïdes (2867) Šteins en 2008 et de (21) Lutetia en 2010. L'étude de ces deux astéroïdes constitue un objectif secondaire de la mission. Il est prévu que les instruments de la sonde recueillent leurs caractéristiques générales dont le comportement dynamique, la morphologie de la surface et sa composition.

### **La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko**

La comète Tchourioumov-Guérassimenko a été choisie comme cible de la mission après le report du lancement d'un an parce que ses caractéristiques (orbite, période, activité) permettaient d'effectuer un rendez-vous et d'atteindre les objectifs scientifiques fixés (il s'agissait en fait d'un retour à la cible initiale puisque la mission de référence initiale qui prévoyait un tir fin 2002 avait déjà 67P pour cible). Tchourioumov-Guérassimenko a été découverte en 1969 par l'astronome Klim Ivanovitch Tchourioumov sur une photo de la comète 32P/Comas Solá prise par Svetlana Ivanovna Guérassimenko. Klim se rendit compte que l'objet photographié correspondait en fait à une nouvelle comète qui était située au moment de la prise de vue à environ 2° de la comète visée. La comète a une histoire assez particulière car son orbite a été fortement modifiée à deux reprises au cours des 200 dernières années : jusqu'en 1840 elle ne s'approchait jamais à moins de 4 unités astronomiques (UA) soit 600 millions de kilomètres du Soleil et restait donc invisible depuis la Terre. Cette année-là, un passage à faible distance de la planète géante Jupiter modifia son orbite et son périhélie (point de son orbite le plus proche du Soleil) chuta à 450 millions de kilomètres. En 1959, un nouveau passage près de Jupiter réduisit encore son périhélie à 1,29 UA. La comète, dont la magnitude varie entre 10 et 24, a été observée à 7 reprises en 1969, 1982, 1989 et 1996, 2002 et 2008. C'est une comète



assez active qui libère, au pic de son activité lorsqu'elle approche le Soleil, environ 60 kg de matière par seconde composée pour deux tiers de gaz et un tiers de matière solide d'après des observations effectuées en 2002 et en 2003. C'est toutefois 40 fois moins que la comète de Halley. Sa densité est faible puisqu'elle était estimée avant les mesures effectuées par Rosetta à 0,37 ce qui implique que sa porosité (la proportion des vacuités à l'intérieur du noyau) est proche de 80 %. La comète parcourt son orbite en 6,57 années. Des photos réalisées avec le télescope spatial *Hubble* en mars 2003 ont permis de préciser les dimensions du noyau. C'est un objet de forme ellipsoïdale qui mesure 5 km sur 3 km et tourne sur lui-même en environ 12 heures.



Reconstruction tridimensionnelle du noyau de Tchourioumov-Guérassimenko grâce à des observations effectuées par le télescope spatial Hubble

Paramètres orbitaux et caractéristiques physiques de la comète et des astéroïdes survolés									
	Caractéristiques physiques				Paramètres orbitaux				
	Type	Dimensions	Masse	Densité	Aphélie	Périhélie	Inclinaison	Période de révolution	Période de rotation
Tchourioumov-Guérassimenko	Comète périodique	3,45 × 4 km	10 <sup>13</sup> kg	0,4	3,46 UA	1,24 UA	7,04°	6,44 ans	12,4 heures
(21) Lutetia	Astéroïde de type indéterminé	~121 × 101 × 75 km	1,7 × 10 <sup>18</sup> kg	3,4	2,83 UA	2,04 UA	3,06°	3,8 ans	8,17 heures
(2867) Šteins	Astéroïde de type E	~6,67 × 5,81 × 4,47 km	-	-	2,71 UA	2,02 UA	9,95°	3,63 ans	~6 heures

### Les astéroïdes (2867) Šteins et (21) Lutetia

La sonde traverse au cours de son périple plusieurs fois la ceinture d'astéroïdes, située entre les orbites de Mars et Jupiter, qui rassemble un grand nombre d'objets de petite taille. À deux reprises *Rosetta* passe suffisamment près d'un de ces petits corps pour permettre d'effectuer des observations détaillées.

#### (2867) Šteins

L'astéroïde (2867) Šteins a un diamètre d'environ 4,6 kilomètres. Il a été découvert le 4 novembre 1969 par Nikolaï Tchernykh, un astronome russe. L'Observatoire européen austral l'a identifié comme étant de type E, c'est-à-dire composé d'enstatite (Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>).

#### (21) Lutetia

L'astéroïde (21) Lutetia a été découvert en 1852 par Hermann Mayer Salomon Goldschmidt, astronome amateur et peintre allemand. Cet astéroïde est de type M c'est-à-dire ayant un albédo faiblement lumineux mais contrairement aux autres astéroïdes de cette classe, il semble qu'il ne contienne pas de composés métalliques. Il appartient à la ceinture d'astéroïdes et mesure près de 96 kilomètres de long et a une masse de 9,2×10<sup>17</sup> kilogrammes.

### Profil de la mission

Contrairement aux missions d'étude des comètes qui l'ont précédé qui n'ont réalisé que des survols, *Rosetta* doit se placer en orbite autour de Tchourioumov-Guérassimenko. Pour y parvenir la sonde spatiale doit synchroniser son vecteur vitesse sur celui de ce corps céleste. Les comètes circulent à des vitesses élevées et cet objectif est difficile à atteindre si on analyse les missions qui ont précédé *Rosetta* : la vitesse relative de la sonde européenne Giotto par rapport à la comète de Halley était de 68 km/s au moment de son rendez-vous tandis que celle de Deep Impact était de 28,6 km/s par rapport à la comète Tempel 1.

Aussi, même le recours aux lanceurs les plus puissants ne permet pas un rendez-vous direct entre la sonde et la comète : *Rosetta* doit utiliser à quatre reprises l'assistance gravitationnelle des planètes pour parvenir à faire coïncider sa trajectoire et sa vitesse avec celles de la comète et sacrifier près de la moitié de sa masse constituée de carburant pour donner un dernier coup de frein durant l'approche finale.

Après avoir étudié les caractéristiques du noyau, *Rosetta* doit se placer en orbite autour de celui-ci. Puis la sonde posera un atterrisseur sur le sol de la comète chargé de compléter les informations collectées à distance. Les responsables de la mission ont soigneusement choisi le moment du rendez-vous entre la sonde et la comète qui se situe à plus de 3 Unités Astronomiques du Soleil : le Soleil est suffisamment proche pour que les panneaux solaires fournissent l'énergie nécessaire aux équipements de la sonde spatiale tandis que la comète est alors suffisamment éloignée du Soleil pour que le dégazage soit faible ou nul et ne rende pas l'approche et l'atterrissage difficile. Au cours de l'année qui va suivre le rendez-vous, la comète va se rapprocher puis passer près du Soleil : *Rosetta* pourra ainsi assister au réveil de la comète au fur et à mesure de l'échauffement de sa surface et analyser grâce à ses instruments le processus et les matériaux éjectés. Le plan de vol nominal prévoit que la mission s'achève lorsque la comète commencera à s'éloigner à nouveau du Soleil.

La mission de *Rosetta* est d'étudier, à l'aide des 21 instruments scientifiques embarqués sur l'atterrisseur et l'orbiteur, le lien qui existe entre les comètes et la matière interstellaire et le rôle joué par les comètes dans la formation du Système solaire. Les mesures effectuées par la sonde lorsqu'elle aura atteint la comète portent sur :

- les principales caractéristiques du noyau, son comportement dynamique, la composition et la morphologie de sa surface;
- la composition chimique, minéralogique et isotopique des matériaux volatils et solides du noyau;
- les caractéristiques physiques et les interactions entre les matériaux volatils et solides du noyau;
- le déroulement de l'activité de la comète (dégazage) et les processus à la surface et dans la chevelure (interactions entre la poussière et les gaz).

### Caractéristiques techniques de la sonde spatiale Rosetta

La sonde *Rosetta* est constituée de deux parties : un orbiteur, qui doit se placer en orbite autour de la comète après avoir effectué une longue navigation et qui est chargé d'étudier et de cartographier celle-ci, de recueillir des données sur les astéroïdes qu'il rencontrera au cours de son parcours et de transmettre les résultats à la Terre et le petit atterrisseur de 100 kg *Philae*, monté sur un des côtés de la sonde, qui doit se poser sur le sol de la comète.

### L'orbiteur

L'orbiteur a la forme d'un parallélépipède de 2,8 mètres par 2,1 mètres par 2 mètres (environ 10 mètres cubes) pour une masse totale de 2 970 kilogrammes (1 300 kg sans le carburant). Son envergure, une fois les panneaux solaires déployés en orbite, atteint 32 mètres.



Modèle d'ingénierie et de qualification de l'orbiteur à l'ESOC (Darmstadt)

### Système de commande d'altitude et d'orbite

La propulsion de *Rosetta* est assurée par 24 petits moteurs-fusées à ergols liquides fournissant chacun 10 newtons de poussée qui disposent de 1 670 kg de carburant (monométhylhydrazine/péroxyde d'azote) pour effectuer les corrections orbitales au cours du long périple de la sonde puis placer celle-ci en orbite autour de la comète. Les ergols sont stockés dans deux réservoirs de 1 106 litres, le premier contenant 660 kg de monométhylhydrazine, le second 1 060 kg de peroxyde d'azote. *Rosetta*, lorsque la sonde spatiale n'est pas en hibernation, est stabilisée sur 3 axes c'est-à-dire que son orientation reste fixe; son système de navigation utilise deux viseurs d'étoile pour déterminer l'orientation de la sonde afin de pointer avec exactitude ses antennes de télécommunications, panneaux solaires et instruments scientifiques. Ce capteur doit fonctionner dans des conditions particulières durant l'approche de la comète. Celle-ci est entourée d'un nuage diffus de poussière qui peut rendre difficile l'identification d'une étoile. Un logiciel a été développé pour permettre à l'instrument de fonctionner dans ces

conditions. Les changements d'orientation sont réalisées à l'aide de 4 roues de réaction. Le système de contrôle d'attitude comprend également des senseurs solaires et une centrale à inertie utilisant trois gyrolasers. Une caméra de navigation NavCam (*Navigation Camera*) ayant un champ optique de 5° et dotée d'une résolution de 1024 × 1024 pixels est utilisée pour les manœuvres d'approche des astéroïdes et de la comète. À la suite d'un choix de ses concepteurs qui décident de diffuser sous licence libre les images de la comète réalisées à l'aide de cette caméra, elle est la principale source des photos diffusées par l'Agence spatiale européenne.



*Les panneaux solaires qui portent l'envergure de Rosetta à 32 mètres constituent la caractéristique externe la plus marquante de la sonde spatiale*

### **Système de télécommunications**

Le système de télécommunications de *Rosetta* utilise une antenne parabolique grand gain orientable de 2,2 mètres de diamètre. La sonde spatiale dispose également d'une antenne moyen gain de 0,8 mètre de diamètre et de deux antennes omnidirectionnelles à faible gain toutes fixes. Les liaisons sont assurées en bande X et S. Le débit est compris entre 5 et 20 kilobits par seconde. La station de New Norcia, construite en Australie par l'Agence spatiale européenne pour communiquer notamment avec *Rosetta*, n'est visible que 12 heures par jour par la sonde du fait de la rotation de la Terre; d'autre part, celle-ci sera, à certains moments, masquée par le Soleil. Durant les périodes où le signal ne peut être reçu, *Rosetta* stocke les données recueillies dans une mémoire de masse de 25 Go puis les retransmet lorsque la fenêtre de communication le permet.

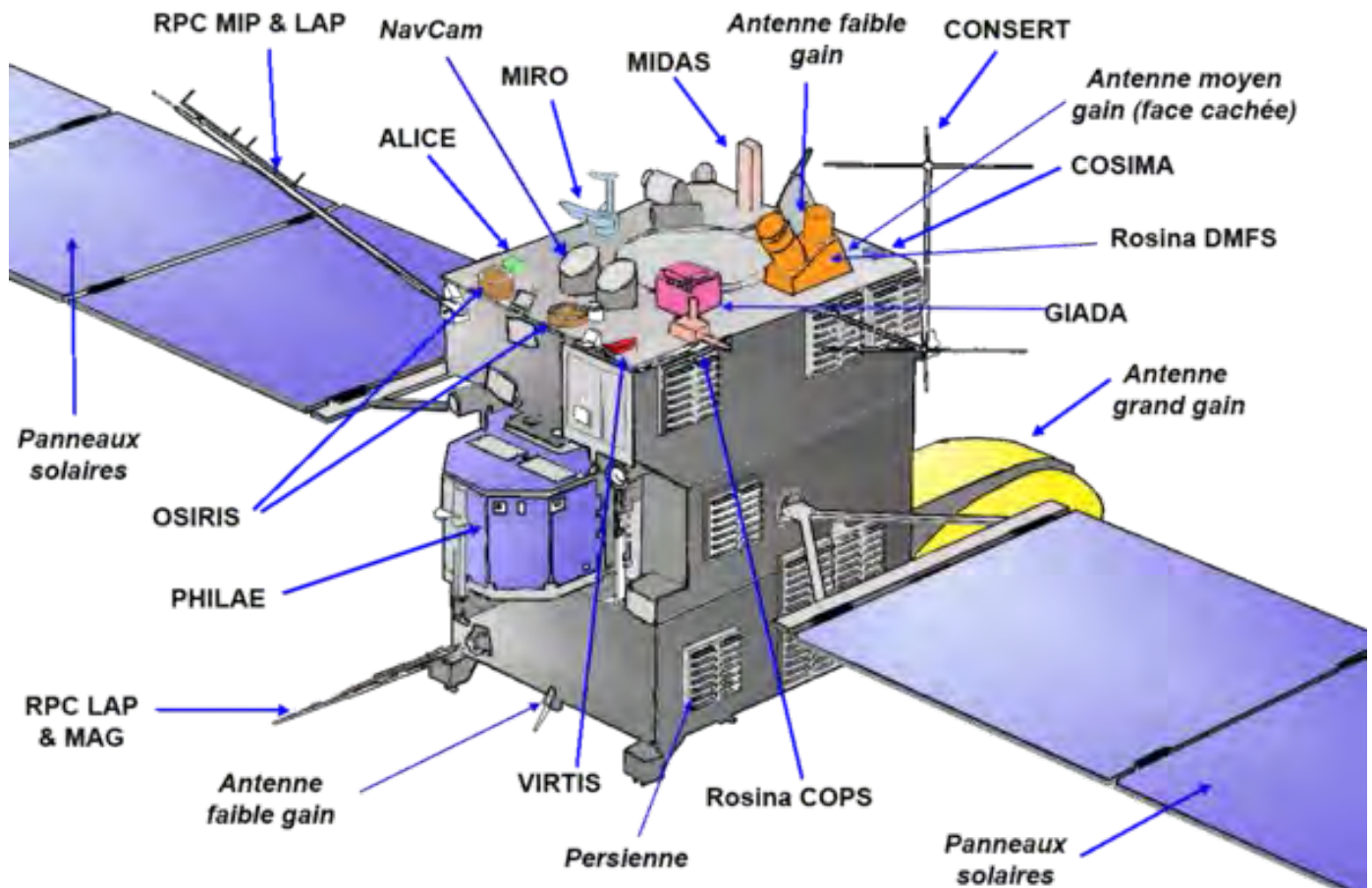
### **L'alimentation électrique**

L'alimentation en énergie de *Rosetta* est assurée par deux panneaux solaires comportant chacun cinq éléments qui peuvent pivoter de plus ou moins 180° pour capter le maximum de l'énergie solaire photovoltaïque. Chaque panneau est long de 15 mètres et la surface totale est de 64 m<sup>2</sup>. Les panneaux fournissent entre 8 700 watts et 450 watts de puissance suivant la position de la sonde par rapport au Soleil. La sonde a besoin de 390 watts pour être maintenue en état de marche avec le minimum d'équipements actifs.

La taille importante des panneaux solaires s'explique par la grande distance entre le Soleil et la sonde sur une partie de sa trajectoire. Jusque là les sondes lancées à une telle distance du Soleil, comme *Voyager 1* et *Voyager 2*, embarquent des générateurs thermoélectriques à radioisotopes qui produisent de l'énergie électrique grâce à la chaleur émise par la désintégration radioactive. Cette technologie n'étant pas disponible en Europe, cette source d'énergie a été remplacée par des panneaux solaires de grande taille conçus pour fonctionner à des températures très basses tout en optimisant la production d'énergie. *Rosetta* est la première sonde alimentée par l'énergie solaire à voyager au-delà de la ceinture d'astéroïdes. L'énergie électrique est stockée dans quatre accumulateurs nickel-cadmium de dix Ah qui alimentent un circuit de distribution sous une tension de 28 Volts.

### **Système de régulation thermique**

Le système de régulation thermique de *Rosetta* doit maintenir l'intérieur de la sonde spatiale à une température d'environ 20 °C. *Rosetta*, qui voyagera dans le Système solaire, rencontrera des températures variées : à 800 millions de kilomètres du Soleil, l'intensité du rayonnement solaire n'est plus suffisante pour chauffer la sonde, il est donc nécessaire d'employer des dispositifs de chauffage; au contraire, au plus près du Soleil, afin d'éviter une surchauffe, des radiateurs sont installés pour dissiper l'énergie thermique. *Rosetta* est également munie d'un système de 14 lamelles réparties sur 2,5 m<sup>2</sup>, des persiennes qui s'ouvrent au Soleil pour laisser échapper la chaleur, mais qui se referment à l'ombre, à l'image des stores vénitiens. Ce système, testé avec succès au Centre européen de technologie spatiale (ESTEC), permet de réguler la température sans consommation électrique.



Structure de Rosetta et implantation des instruments scientifiques

### Instruments scientifiques

La charge utile de l'orbiteur comporte onze instruments scientifiques qui représentent une masse de 165 kg :

1. ALICE (*Ultraviolet Imaging Spectrometer*) est un spectromètre imageur ultraviolet similaire à celui embarqué sur la sonde *New Horizons* destiné à analyser la composition de la coma, de la queue et la production d'eau ainsi que de monoxyde et dioxyde de carbone par le noyau. D'un poids de 3,1 kg, cet instrument consomme 2,9 W et a été fabriqué aux Etats-Unis.
2. CONSERT (*Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission*) est un sondeur radiofréquence conçu pour l'étude de la structure interne du noyau. Lorsque *Philae* est posé sur le noyau et *Rosetta* orbite autour, *Consert* mesure la propagation des ondes électromagnétiques métriques (90 MHz) à travers le noyau lorsque celui-ci s'interpose entre *Rosetta* et *Philae*. L'étude du signal mesuré (délai, puissance, chemins multiples) permet d'obtenir des informations sur la structure interne et la composition du noyau : densité, hétérogénéité, présence de vides ou de zones plus denses et doit ainsi contribuer à une meilleure compréhension des processus de formation de la comète<sup>46</sup>. *Consert* est un instrument conçu et réalisé par l'IPAG (CNRS/UJF, Grenoble, France), le LATMOS (CNRS/UVSQ, Paris, France) et le MPS (Lindau, Allemagne) sous financement CNES et DLR.
3. COSIMA (*Cometary Secondary Ion Mass Analyser*) est un spectromètre à temps de vol qui doit analyser la composition des grains de poussière éjectés par la comète afin de déterminer s'ils sont organiques.
4. GIADA (*Grain Impact Analyser and Dust Accumulator*) mesure le nombre, la masse, la distribution des vecteurs de dispersion (vitesse, direction) des grains de poussière émis par la comète et réfléchis par la pression de radiation.
5. MIDAS (*Micro-Imaging Dust Analysis System*) mesure la taille, la forme et le volume des particules autour de la comète.
6. MIRO (*Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter*) est un radiotélescope fonctionnant dans la bande millimétrique et sub-millimétrique chargé essentiellement de déterminer la température de la surface et d'identifier les parties de la surface couvertes de poussières et de glace : ces informations sont primordiales pour déterminer les sites d'atterrissage propices.
7. OSIRIS (*Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System*) comporte deux caméras optiques à haute résolution (4 mégapixels) fonctionnant dans un spectre lumineux allant de l'ultraviolet au proche infrarouge qui peuvent être couplées pour obtenir des images stéréoscopiques. Elles doivent permettre d'effectuer un relevé topographique du noyau avec une résolution d'un mètre, déterminer la rotation du noyau et observer le dégazage, suivre les poussières et les jets de gaz et enfin photographier les astéroïdes : Osiris comprend une caméra à petit champ (2,5° x 2,5°) NAC (Narrow Angle Camera) et une caméra grand champ (12° x 12°) WAC (Wide Angle Camera). Les données sont enregistrées sur une mémoire de 1 gigaoctet.

8. ROSINA (*Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis*) est un spectromètre des gaz nobles et ionisés qui doit déterminer la composition de l'atmosphère et de l'ionosphère de la comète, les réactions chimiques qui y ont lieu ainsi que la vitesse des particules gazeuses ionisées.
9. RPC (*Rosetta Plasma Consortium*) est constitué de cinq analyseurs de plasma et de deux sondes de Langmuir; il est chargé d'étudier la structure de la coma interne et l'interaction de la comète avec le vent solaire, doit surveiller l'activité cométaire et mesurer les propriétés physiques du noyau.
10. RSI (*Radio Science Investigation*) mesure la masse, la densité et la gravité du noyau. Il est également utilisé pour préciser l'orbite de la comète et étudier sa coma.
11. VIRTIS (*Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer*) est un spectromètre-imageur travaillant en lumière visible et dans l'infrarouge. Il est chargé d'établir une carte de la nature des solides et la température à la surface. Cet instrument est également utilisé afin de localiser les sites d'atterrissage.

## L'atterrisseur *Philae*

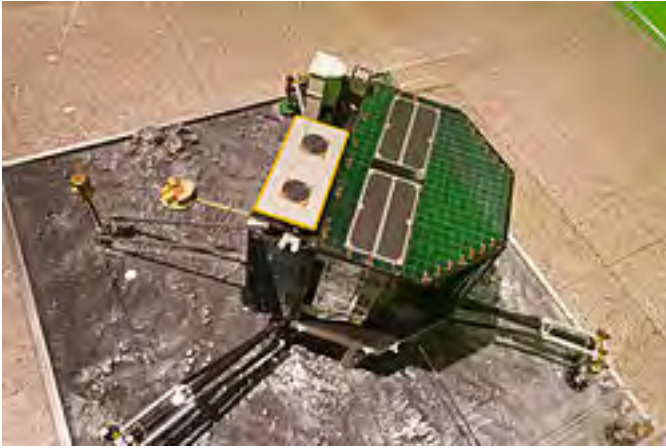
### Caractéristiques techniques



Maquette de l'atterrisseur *Philae*

L'atterrisseur *Philae* s'est posé le 12 novembre 2014 sur le noyau de la comète pour étudier in situ les caractéristiques de celui-ci à l'aide des 10 instruments scientifiques dont il dispose. Il se présente sous la forme d'un cylindre polygonal d'un mètre de diamètre pour 80 cm de haut et d'une masse totale de 97,9 kg dont 26,7 kg d'instrumentation scientifique. La structure est réalisée en fibre de carbone avec des panneaux en nids d'abeille d'aluminium. Il comprend une partie chaude isolée de l'extérieur et une partie froide située à l'arrière dans laquelle se trouvent le système de fixation à l'orbiteur et les instruments déployés une fois *Philae* au sol : SD2, ROMAP, APXS et MUPUS. L'atterrisseur est fixé à l'orbiteur par un mécanisme qui permet une séparation à une vitesse pré-ajustable entre 0,05 et 0,52 m/s. *Philae* dispose d'un train d'atterrissage tripode conçu pour amortir sa vitesse d'arrivée. Le corps de *Philae* peut pivoter et s'incliner (via une suspension à cardan) sur son train d'atterrissage. Ce mécanisme permet de compenser l'inclinaison du terrain, optimiser l'incidence des rayons lumineux sur les panneaux solaires et effectuer des prélèvements d'échantillon du sol à différents emplacements. L'atterrisseur dispose d'une roue de réaction qui est mise en rotation à 9 600 tours par seconde, fournissant un moment cinétique de 6,2 N·m·s. Celle-ci est utilisée pour stabiliser l'orientation de *Philae* durant sa descente vers le sol. L'atterrisseur ne dispose d'aucun système de propulsion pour corriger sa trajectoire ou son orientation. Son trajet jusqu'au sol de la comète dépend uniquement du point où se produit la séparation avec l'orbiteur ainsi que de la vitesse et de l'orientation acquises à ce moment là. En raison du manque d'informations sur la consistance de la surface au lancement de la sonde, trois dispositifs d'atterrissage complémentaires sont prévus. Les pieds du train d'atterrissage sont munis de surfaces de contact suffisamment larges pour éviter à la sonde de s'enfoncer dans un sol mou. Pour éviter un rebond *Philae* est muni d'un système propulsif à gaz froid (azote) qui plaque au sol l'engin immédiatement après le contact avec la surface de la comète. Enfin deux harpons tirés depuis la partie inférieure de l'atterrisseur et des vis situées au niveau des pieds doivent lui permettre de se fixer solidement au sol. Pour éviter que l'atterrisseur ne rebondisse, les trois pieds du train d'atterrissage sont équipés d'absorbeurs de chocs. Le contrôle thermique constitue un des aspects les plus complexes de l'atterrisseur : celui-ci doit pouvoir fonctionner lorsque la comète se situe entre 2 et 3 Unités Astronomiques (U.A.). Par ailleurs, à la conception, il y a de nombreuses incertitudes sur l'ensoleillement de la zone d'atterrissage (lié à la rotation). *Philae* ne dispose pas de suffisamment d'énergie pour utiliser des résistances chauffantes. Les couches d'isolant sont donc conçues de manière à ce que l'atterrisseur survive à la période la plus froide (à 3 U.A.), avec un système de stockage et de récupération de chaleur durant les moments d'ensoleillement. Lorsque le Soleil se rapproche à moins de 2 U.A., la température, devenue trop importante pour l'électronique, entraîne la fin des opérations. L'énergie électrique est fournie par des batteries primaire et secondaire ainsi que des panneaux solaires. La batterie primaire non rechargeable a pour rôle de fournir de l'énergie durant les 5 premiers jours d'opération, de manière à garantir que les principales mesures scientifiques seront réalisées quel que soit l'ensoleillement du site d'atterrissage. Cet accumulateur au lithium comprend 32 cellules utilisant le couple lithium-chlorure de thionyle (Li-SOCl<sub>2</sub>) qui doivent fournir, au moment du déploiement de *Philae*, 1 000 watts-heures (1 200 Wh au lancement). La batterie secondaire rechargeable, de type lithium-ion et d'une capacité de 130 watts-heures (150 Wh au lancement), permet de poursuivre la mission une fois la batterie primaire épuisée. Elle est alimentée par des panneaux solaires qui recouvrent une grande partie de l'atterrisseur et qui fournissent 10 W de puissance (à 3 U.A.). Les données acquises sont stockées dans une mémoire de masse d'une capacité de 12 mégabits et transmises à l'orbiteur lorsque celui-ci est visible à l'aide d'un émetteur radio bande S d'une puissance de un Watt permettant un débit d'environ

10 kilobits par seconde. L'orbiteur transmet à son tour les données vers la Terre lorsque celle-ci est située dans l'axe de son antenne orientable et que les antennes de réception sont disponibles.



*Vue du dessus de l'atterrisseur*



*Deux harpons destinés à fixer l'atterrisseur sur le sol de la comète sont installés sous l'atterrisseur*



*Détail du harpon*

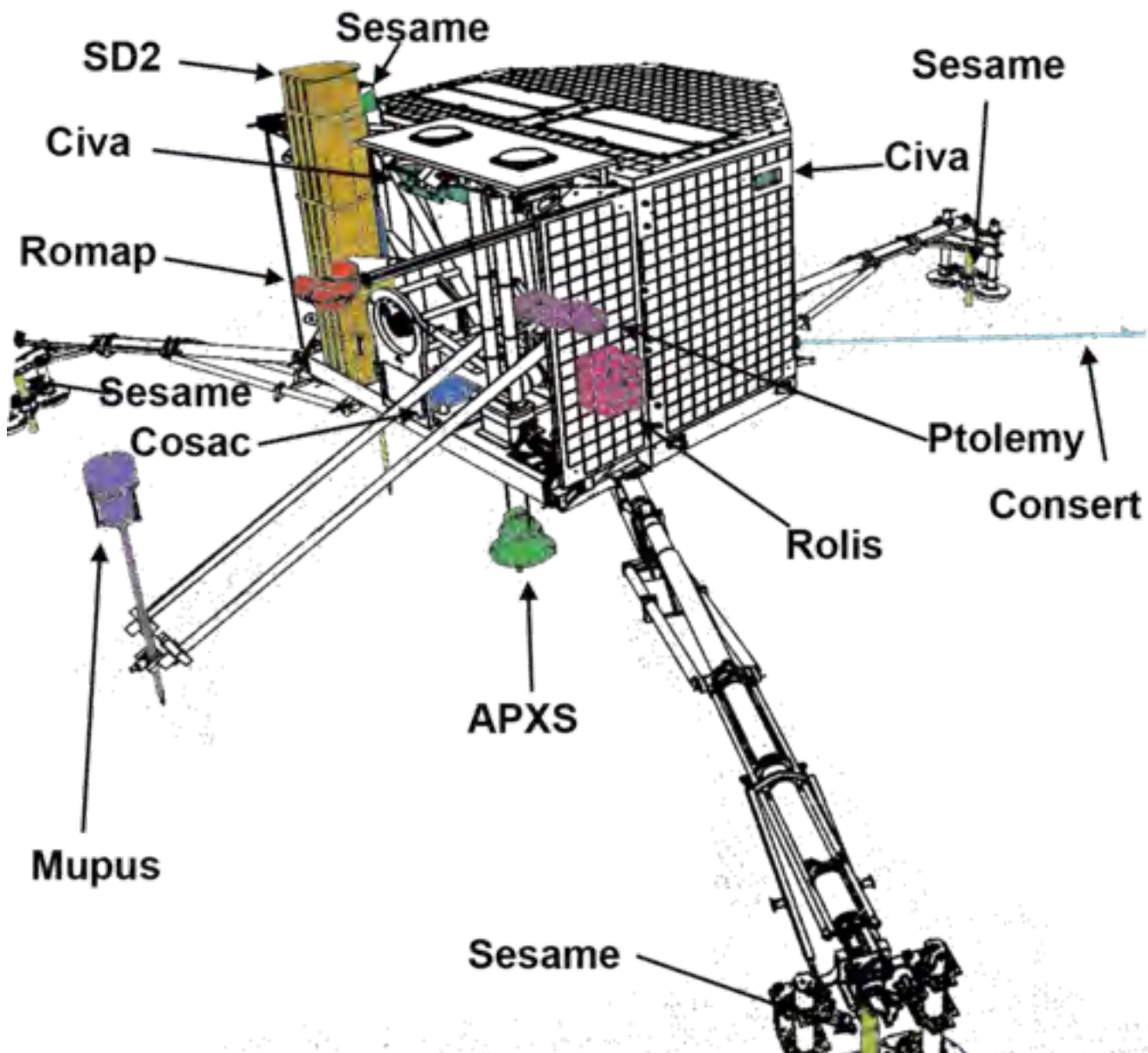


*Les instruments CIVA, SD2, ROMAP, MUPUS ainsi que le système de largage sont visibles sur cette maquette de Philae*

### Instruments scientifiques

La charge utile de l'atterrisseur *Philae* est composée de dix instruments scientifiques qui représentent une masse de 26,7 kg :

1. APXS (*Alpha X-ray Spectrometer (en)*) est un spectromètre à rayons X, alpha et protons chargé de déterminer la composition du noyau de la comète.
2. CIVA (*Comet Infrared & Visible Analyser*), d'origine franco-suisse, comprend cinq caméras panoramiques, un couple de caméras stéréoscopiques fournissant des images en relief, un spectromètre infrarouge ainsi qu'un microscope optique analysant des échantillons avec une résolution de 7 µm. Chaque caméra pèse 100 g et a une résolution d'un mégapixel. Les composants peuvent résister à des températures comprises entre -100 °C et 50 °C.
3. CONSERT (*Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission*) est un sondeur radar qui sera utilisé en parallèle avec le même équipement embarqué sur l'orbiteur.
4. COSAC (*Cometary Sampling and Composition experiment*) est un pyrolyseur et analyseur (spectromètre de masse et chromatographe) qui doit analyser les gaz et les molécules organiques complexes prélevés dans le sol par SD2. Des échantillons prélevés sur le sol et dans le sous-sol seront portés à 800 °C dans le pyrolyseur puis analysés.
5. PTOLEMY mesure la composition isotopique des éléments légers (Hydrogène, carbone, azote et oxygène) dans les échantillons de sol prélevés par SD2.
6. MUPUS (*Multi-Purpose Sensors for Surface and Subsurface Science*) est un ensemble de détecteurs mesurant la densité, les propriétés thermiques et mécaniques de la surface.
7. ROLIS (*Rosetta Lander Imaging System*) est une caméra CCD à haute définition située sous l'atterrisseur qui enregistrera des images de la zone d'atterrissage avant que *Philae* se pose puis des images de la structure du sol après cet événement.
8. ROMAP (*Rosetta Lander Magnetometer and Plasma Monitor*) est un magnétomètre qui doit mesurer l'intensité du champ magnétique de la comète et les interactions avec le vent solaire.
9. SD2 (*Sample and Distribution Device*) comprend un instrument de forage capable d'atteindre une profondeur de 25 cm de profondeur et de préparer un échantillon qui est ensuite transmis aux mini-laboratoires PTOLEMY et COSAC.
10. SESAME (*Surface Electrical, Seismic and Acoustic Monitoring Experiments*) est composé de trois instruments qui étudient la propagation des ondes sonores à travers la surface, les propriétés électriques et les poussières retombant à la surface.



*Structure de Philae et implantation des instruments scientifiques ou de leurs capteurs*

### Le contrôle au sol



*La salle de contrôle de Rosetta à l'ESOC durant la dernière assistance gravitationnelle de la Terre (ESB3)*

Le contrôle de la mission est assuré par le Centre européen d'opérations spatiales (ESOC) à Darmstadt, en Allemagne. La salle de contrôle, dédiée aux missions européennes à destination des autres planètes du Système solaire, est partagée avec les missions Mars Express et Vénus Express. L'équipe de contrôle au sol de Rosetta est assistée par une équipe chargée du calcul de la trajectoire, et utilise le logiciel SCOS-2000. Le Centre des opérations scientifiques de Rosetta (*Rosetta Science Operations Centre*), chargé de la collecte et de la diffusion des données scientifiques, est implanté à l'ESOC, mais également

au Centre européen de technologie spatiale (ESTEC) aux Pays-Bas. L'atterrisseur est contrôlé par l'Agence spatiale allemande (DLR) depuis Cologne; les données collectées par *Philae* sont traitées par le Centre national d'études spatiales (CNES), à Toulouse. La complexité de la mission a nécessité la mise au point de plusieurs innovations. La sonde est notamment mise en hibernation durant plusieurs années pour économiser l'énergie qui se raréfie lorsque la sonde se dirige vers Jupiter et ménager les équipements du bord. Pendant les phases de routine, un seul contact est établi par semaine avec le centre de contrôle. Pour les communications avec *Rosetta*, l'agence spatiale européenne utilise la station de New Norcia qu'elle a fait édifier près de Perth en Australie. Celle-ci est entrée en service en 2003 peu de temps avant le lancement de *Rosetta* et est télécommandée depuis le Centre européen d'opérations spatiales. La station de Cebrosos, en Espagne, également détenue par l'agence spatiale, est utilisée en appoint; toutes deux sont équipées d'antennes paraboliques de 35 mètres de diamètre et sont conçues pour pouvoir communiquer avec les sondes les plus éloignées. Si *Rosetta* n'est pas en vue de ces deux stations, les antennes de Madrid, de Goldstone et de Canberra du réseau de communications en espace profond de la NASA peuvent être utilisées. Deux canaux du réseau de communications avec l'espace lointain sont attribués à la sonde spatiale *Rosetta* afin de pouvoir communiquer avec la Terre : 8 421,790123 MHz et 8 423,148147 MHz. Ces deux fréquences sont celles de l'émetteur à bord de la sonde et ne tiennent donc pas compte de l'effet Doppler.

## Chronologie



→ Un lanceur Ariane 5 G+ est utilisé pour le lancement de *Rosetta*

Pour réaliser son rendez-vous avec 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, *Rosetta* décrit en dix ans quatre orbites autour du Soleil. Elle utilise l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars pour relever progressivement son apogée et modifier son inclinaison jusqu'à la faire coïncider avec celle de la comète. Durant son périple elle traverse à deux reprises la ceinture d'astéroïdes ce qui lui permet d'effectuer des survols à faible distance de Šteins et Lutetia.

### Lancement (2004)

Le lancement de la sonde *Rosetta* a eu lieu le 2 mars 2004 à 7 h 17 min 44 s TC (7 h 17, heure locale) après deux reports dus à un problème technique et à des conditions météorologiques défavorables, depuis le centre spatial de Kourou, en Guyane française. Il s'agit du premier vol de la version G+ d'Ariane 5 et du 158<sup>e</sup> vol du lanceur Ariane. Les étages d'accélération à poudre et l'étage principal cryotechnique fonctionnent de manière nominale. Ce dernier est largué alors que le lanceur a atteint une altitude de 173,4 km. La suite du vol d'Ariane est très différente de ce qui est pratiqué pour les lancements commerciaux qui constituent le fonds de commerce du lanceur. Avant d'allumer le second étage, le lanceur suit une trajectoire balistique qui lui fait parcourir une partie d'une orbite elliptique très allongée dont l'apogée et le périégée sont respectivement de 4 000 km et 45 km. Une heure, 45 minutes et 47

secondes après le décollage, le deuxième étage de type EPS, à propergols stockables, est allumé pendant 17 minutes, imprimant à *Rosetta* suffisamment de vitesse pour échapper à la gravité terrestre. La sonde est larguée par le dernier étage du lanceur 2 heures, 13 minutes et 30 secondes après le décollage. La précision de l'injection de *Rosetta* sur sa trajectoire est suffisante pour que l'ESA puisse confirmer, le 15 mars 2004, que la sonde survolera comme prévu les astéroïdes (2867) Šteins et (21) Lutetia. Une semaine après le début de la mission les instruments sont mis en marche les uns après les autres pour vérifier leur fonctionnement et les calibrer. Au cours de la première année de vol plusieurs corrections sont apportées à la trajectoire dont une manœuvre impliquant un changement de vitesse de 152,8 m/s le 10 mai. En avril et mai 2004 les comètes C/2002T7 LINEAR et Giacobini-Zinner sont étudiées à distance avec le magnétomètre de la sonde spatiale. Les caméras embarquées réalisent également plusieurs photos de la sonde spatiale dont une relativement spectaculaire montrant les panneaux solaires.

### Première assistance gravitationnelle de la Terre (2005)

Afin de gagner en vitesse et adapter sa trajectoire, *Rosetta* utilise l'assistance gravitationnelle. Celle-ci permet, en utilisant l'attraction d'un corps céleste massif, planète ou lune, de modifier la vitesse et la trajectoire d'une sonde. L'effet est d'autant plus important que l'engin spatial frôle de près le corps céleste. La déviation et l'accélération obtenues dépendent également de l'angle d'approche et de la vitesse relative des deux protagonistes. Seul le recours à l'assistance gravitationnelle, qui permet d'économiser de grandes quantités de carburant, permet le lancement des missions comme *Rosetta* car aucun lanceur n'est suffisamment puissant pour placer une sonde directement sur la trajectoire avec ce type d'objectif. Lorsque la sonde a été mise en orbite par le lanceur Ariane, sa vitesse par rapport au Soleil, dite vitesse héliocentrique, est égale à celle de la Terre soit 30 km/s. La sonde va frôler par la suite à trois reprises la Terre pour accélérer : sa vitesse héliocentrique va passer successivement à 33,8 km/s, 35,1 km/s et 38,7 km/s au dernier passage. L'assistance gravitationnelle de Mars, qui est mise en œuvre après le premier passage proche de la Terre, sert uniquement à modifier la trajectoire de *Rosetta* de manière à la faire longer à nouveau la Terre pour la deuxième assistance gravitationnelle.



Le 4 mars 2005, *Rosetta* frôle la Terre (en anglais *Earth Swing-By*, abrégé ESB) passant à environ 1 954 km au-dessus de l'Océan Pacifique à l'ouest de Mexico. Les stations au sol calculent que la sonde a accéléré de 3,797 km/s avec une erreur de 1,8 millimètre par seconde, chiffre confirmé par la NASA. Les sondes NEAR Shoemaker et Galileo, qui avaient également utilisé comme *Rosetta* la Terre pour réaliser une manœuvre d'assistance gravitationnelle respectivement en 1998 et 1990 avaient également observé un écart de 4 et 13 mm/s par rapport aux prévisions. Plusieurs instruments sont utilisés et des photos du sol sont prises sur plusieurs longueurs d'ondes en lumière visible et en infrarouge. Des photos panoramiques de la Terre sont prises par les caméras de *Philae* et le magnétomètre est calibré à l'aide du champ magnétique terrestre dont les caractéristiques sont bien connues. Lors du survol de la Lune qui a lieu 16 heures plus tard, le logiciel chargé de gérer le pointage des caméras lors des survols est testé. Il est prévu que la sonde spatiale soit mise en semi-hibernation après ce survol mais cette mise en sommeil est repoussé de quelques mois à la demande de la NASA qui souhaite que les instruments de *Rosetta* observent la comète Tempel 1 au moment de la collision de l'impacteur de la sonde américaine Deep Impact. Le 4 juillet 2005 bien que située à 80 millions de km de la comète au moment de l'impact, les instruments de *Rosetta* permirent d'estimer que l'impact avait libéré 4 600 tonnes d'eau.

### Deuxième assistance gravitationnelle de la Terre et survol de Mars (2007)



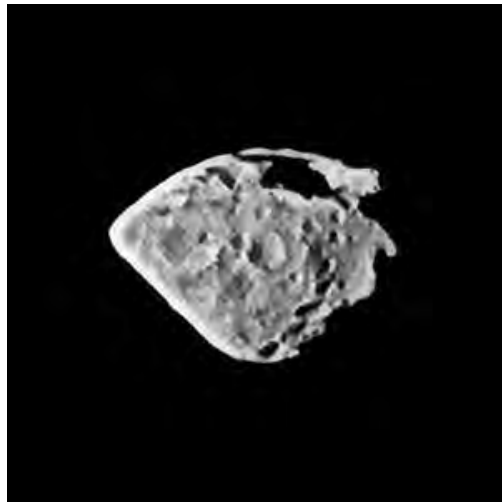
Autoportrait de la sonde spatiale lors du survol de Mars

Le 25 février 2007 la sonde réalise sa deuxième manœuvre d'assistance gravitationnelle en frôlant Mars. La veille, *Rosetta* est orientée afin que ses instruments puissent étudier la planète; OSIRIS, ALICE, VIRTIS, CIVA, ROMAP, RSI, sont mis en marche quelques heures avant le survol : celui-ci comporte un certain risque car pendant 15 minutes, la sonde se situe dans l'ombre de Mars où ses panneaux solaires ne reçoivent aucune énergie du Soleil et qui bloque toute communication avec la Terre. Peu avant le début de l'éclipse, la sonde est basculée en mode de veille (stand-by mode) afin de minimiser la consommation électrique; seul *Philae*, disposant de son propre système d'alimentation, est allumé et effectue des mesures. *Rosetta* passe dans l'ombre de la planète rouge à 1 h 52 TU. Deux minutes après, elle est à 250 km d'altitude. Le contact reprend à 2 h 06. Cependant, *Rosetta* reste dans le noir jusqu'à 2 h 19.

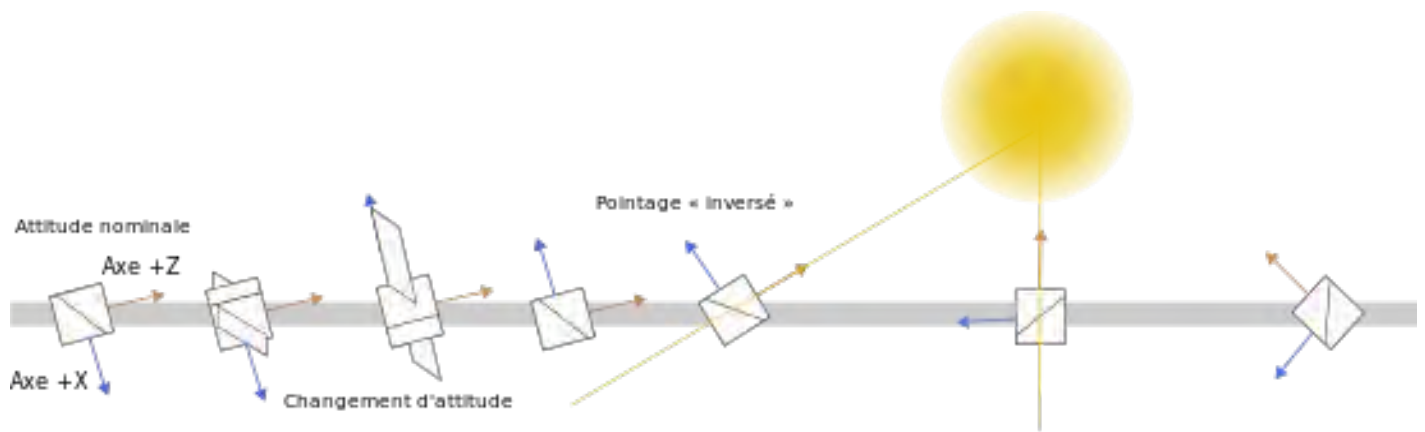
Le 13 novembre 2007, *Rosetta* effectue son second survol de la Terre (ESB2). Son orbite s'allonge et sa période est désormais d'exactement deux ans. L'accélération obtenue est conforme aux prévisions. Au cours de son passage à proximité de la Terre, *Rosetta*, prise par erreur pour un astéroïde et brièvement dénommée 2007 VN<sub>84</sub>, déclenche une fausse alerte de collision potentielle d'un corps céleste avec la Terre.

### Survol de l'astéroïde (2867) Šteins (2008)

Le 1<sup>er</sup> septembre 2008, les instruments scientifiques sont activés pour permettre l'observation de l'astéroïde (2867) Šteins. La sonde le survole à 800 km, le 5 septembre 2008 à 17 h 45 UTC, avec une vitesse relative de 8,6 kilomètres par seconde. Malgré une panne quelques minutes avant le rendez-vous de la caméra à petit champ NAC capable de fournir des photographies à haute définition, les données récupérées à l'aide des autres instruments ont permis de confirmer le bon fonctionnement de ceux-ci et ont fourni une image relativement détaillée de la surface de l'astéroïde qui présente la forme d'un diamant. L'exposition de certaines faces de *Rosetta* au Soleil est « défendue » par l'architecture de la sonde. En effet, les équipements dissipant une grande quantité de chaleur ont été placés sur les côtés d'ombre, munis de persiennes. Or, pendant la phase d'approche finale, l'attitude de *Rosetta* était telle que ces faces pointaient dans la direction du Soleil, exposant des parties sensibles. Afin d'éviter d'abîmer des instruments, une manœuvre de rotation de 180° autour de l'axe +Z a donc été menée pendant 20 minutes, 40 minutes avant l'approche finale, limitant ainsi l'exposition au Soleil.



*L'astéroïde Šteins*



*Le plan de vol de Rosetta pour le survol de (2867) Šteins*

### **Dernière assistance gravitationnelle de la Terre (2009)**



*Durant le transit jusqu'à la comète, Philae est fixé sur une des faces de la sonde spatiale Rosetta*

Une manœuvre de correction de trajectoire, permettant de passer à la distance prévue de la Terre, est effectuée le 22 octobre, trois semaines avant le survol. À 13 h 51 UTC, les quatre moteurs axiaux de la sonde de 10 newtons sont allumés durant 1 minute et 27 secondes et fournissent un delta-V de 8,8 cm/s. Le 13 novembre 2009, la sonde utilise l'attraction de la Terre pour sa dernière assistance gravitationnelle : à 7 h 45 et 40 s UTC, *Rosetta* passe à 2 481 km au-dessus de l'île de Java, en Indonésie, avec une vitesse relative de 13,34 km/s. Cette manœuvre permet de gagner 3,6 km/s. Aucune anomalie n'a été constatée au niveau de la vitesse.

Grâce à cette dernière manœuvre la sonde navigue à une vitesse de 38,7 km/s contre 30 km/s à son lancement. *Rosetta* est désormais sur une orbite très allongée dont l'apogée, située à 5,33 unités astronomiques (800 millions de kilomètres) l'amène à

proximité de l'orbite de la planète Jupiter. Tout en s'éloignant de la Terre la trajectoire de la sonde va converger progressivement avec celle de la comète, qu'elle doit rejoindre après avoir commencé à parcourir la partie de son orbite qui la ramène vers les planètes internes. Mi-juillet 2010, *Rosetta* est devenue la première sonde spatiale équipée de panneaux solaires à s'être autant éloignée du Soleil. Pour réduire la consommation d'une énergie qui va se faire rare, mais également pour limiter les coûts opérationnels et la fatigue de l'électronique, la sonde doit être placée en sommeil à compter de 2011 jusqu'en 2014. En décembre 2009, une répétition de ce mode est réalisée sur le modèle de tests (Electrical Qualification Model, abrégé EQM) au Centre européen d'opérations spatiales avant un essai sur la sonde elle-même en janvier 2010.

### Survol de l'astéroïde (21) Lutetia et mise en sommeil (2010)



*Photo de Lutetia prise lors de son survol par Rosetta*

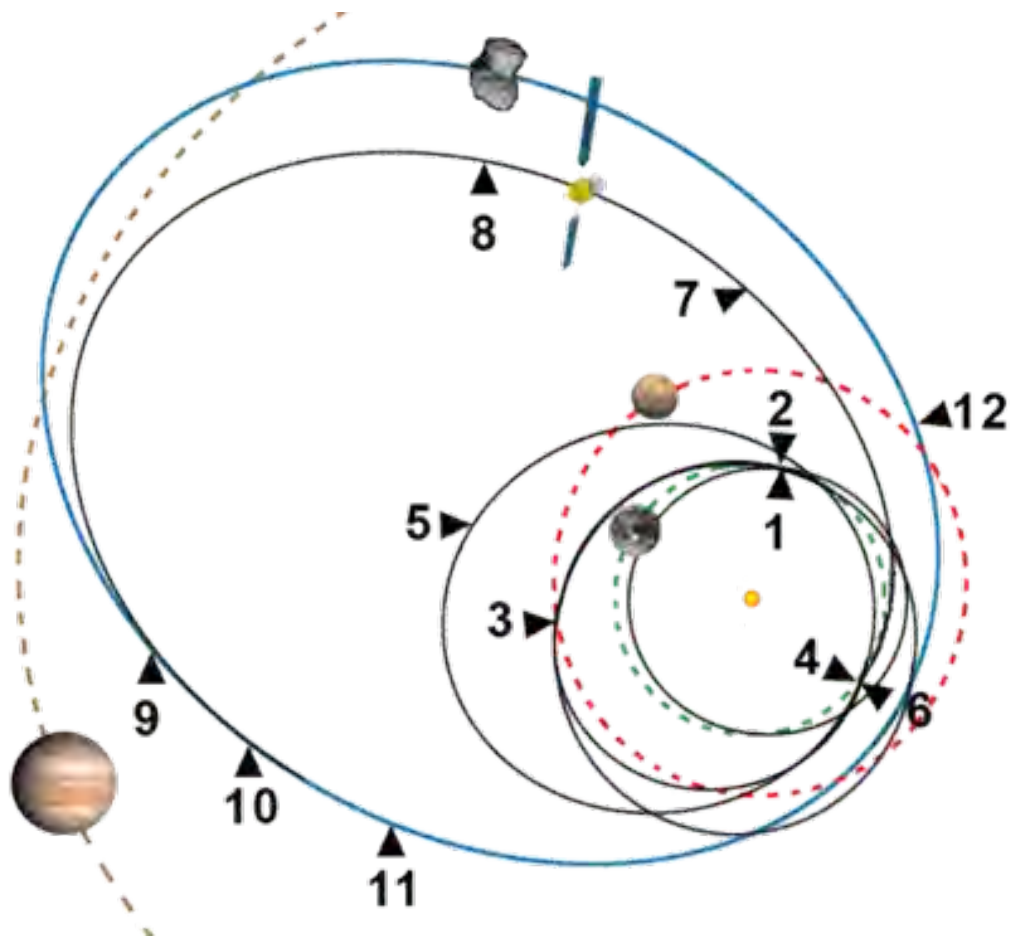
Alors que la sonde entame sa dernière orbite qui doit l'amener presque jusqu'à l'orbite de Jupiter, elle traverse la ceinture d'astéroïdes. Le 16 mars 2010, la caméra OSIRIS est utilisée conjointement avec le télescope spatial Hubble afin d'étudier l'objet P/2010 A2 et de lever l'ambiguïté sur sa nature de comète ou d'astéroïde; l'analyse des images montrera qu'il s'agit d'un astéroïde traînant un nuage de poussières consécutif à une collision.

*Rosetta* survole le 10 juillet l'astéroïde (21) Lutetia. Pour préparer ce survol, une manœuvre de correction de trajectoire d'une durée de 188 secondes a été conduite le 18 juin à 8 h 24 CEST, pour que *Rosetta* passe à 3 162 km de Lutetia et dispose d'un angle de vue adapté pour ses instruments. Les instruments scientifiques ont été activés quelques jours avant le survol qui a eu lieu à une vitesse relative de 15 km/s. Tous les instruments de l'orbiteur et deux spectromètres et le magnétomètre de l'atterrisseur *Philae* étaient en marche durant cette rencontre.

Près de 400 photographies sont prises dont certaines avec une définition qui atteint 1 pixel pour 60 m; elles montrent un astéroïde de forme très allongée (longueur 130 km), couvert de cratères qui traduisent l'ancienneté de ce petit corps céleste, sans doute vieux de 4,5 milliards d'années. Les photos montrent également des blocs sombres et des stries en surface rappelant celles de Phobos. Enfin, un cratère d'impact est partiellement comblé d'éboulis marbrés de vergetures qui pourraient avoir été produits par des tremblements de terre consécutifs à des collisions avec d'autres corps célestes.

Le 8 juin 2011, alors que la sonde spatiale s'éloigne toujours plus du Soleil, la sonde est volontairement mise en sommeil pour 31 mois car ses panneaux solaires ne lui fournissent plus assez d'énergie. Durant son hibernation les communications avec la Terre sont coupées mais la sonde n'est pas complètement inactive durant cette phase : un logiciel particulièrement complexe ausculte régulièrement les équipements et les instruments scientifiques et s'assure que les composants de la sonde restent dans la plage de températures prévue en utilisant si nécessaire des résistances thermiques.

Durant cette période la trajectoire de *Rosetta* atteint son point le plus éloigné du Soleil et l'énergie solaire disponible ne représente plus que 4 % de ce dont disposait la sonde près de la Terre. La surface des panneaux solaires a été dimensionnée pour pouvoir maintenir dans ces conditions défavorables la sonde en état de fonctionnement : celle-ci a besoin de 390 Watts durant sa mise en sommeil (résistances chauffantes, exécution des programmes de contrôle de l'état de la sonde).



**Trajectoire de la sonde spatiale *Rosetta***

Pour réaliser son rendez-vous avec la comète (trajectoire bleue), *Rosetta* (trajectoire noire) décrit quatre orbites autour du Soleil en **utilisant l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars** pour relever progressivement son apogée.

**Principaux événements :**

- 1 - 2 mars 2004 : lancement de *Rosetta*,
- 2 - 4 mars 2005 : 1<sup>re</sup> assistance gravitationnelle de la Terre,
- 3 - 25 février 2007 : assistance gravitationnelle de Mars,
- 4 - 13 novembre 2007 : deuxième assistance gravitationnelle de la Terre,
- 5 - 1<sup>er</sup> septembre 2008 : survol de l'astéroïde Šteins,
- 6 - 13 novembre 2009 : 3<sup>e</sup> et dernière assistance gravitationnelle de la Terre,
- 7 - 10 juillet 2010 : rendez-vous avec l'astéroïde (21) Lutetia,
- 8 - 8 juin 2011 : mise en sommeil de la sonde,
- 9 - 20 janvier 2014 : réactivation de la sonde,
- 10 - 6 août 2014 : mise en orbite autour de la comète,
- 11 - 12 novembre 2014 : atterrissage de *Philae* à la surface de la comète,
- 12 - 31 décembre 2015 : fin de la mission.

Trajectoire de  
*Rosetta*

**Rendez-vous avec la comète (2014)  
Réveil de la sonde spatiale (janvier-février)**



*Joie de l'équipe européenne recevant le signal du réveil de la sonde spatiale Rosetta dans la salle de contrôle de l'ESOC à Darmstadt, le 20 janvier 2014*

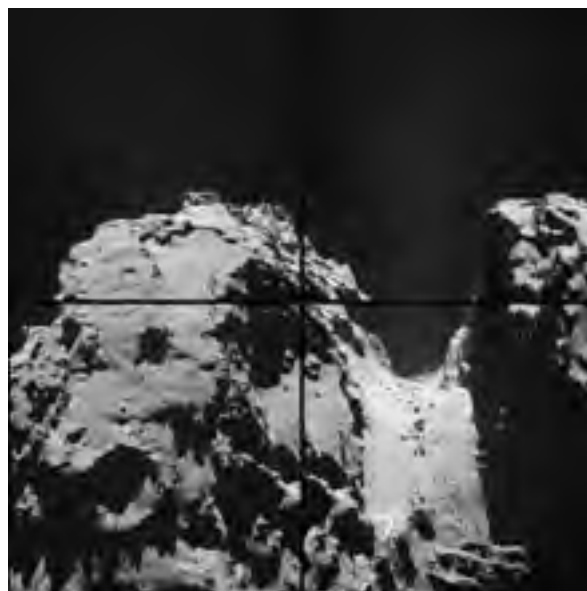
Le 20 janvier 2014, la trajectoire de la sonde la rapproche de nouveau du Soleil : après s'en être éloignée de 800 millions de kilomètres, *Rosetta* se trouve désormais à 673 millions de km de celui-ci et à 9 millions de km de la comète. Après 31 mois d'hibernation, le rayonnement solaire est alors de nouveau suffisamment important pour que les panneaux solaires fournissent l'énergie nécessaire aux principaux systèmes, autorisant ainsi la réactivation de la sonde spatiale. Le rendez-vous avec la comète doit avoir lieu environ 7 mois plus tard, mais plusieurs manœuvres délicates doivent être réalisées auparavant. Le réveil de la sonde est un moment de tension pour les responsables du projet : pour économiser le peu d'énergie disponible durant les 31 mois écoulés aucune information sur l'état de la sonde ou les événements qui auraient pu survenir à bord n'a été transmise aux opérateurs au sol. Après avoir réchauffé ses instruments de navigation puis, grâce à ses propulseurs, stoppé sa rotation et positionné ses panneaux solaires face au Soleil, *Rosetta* pointe son antenne grand gain vers la Terre. Le premier signal témoignant du réveil de la sonde est reçu avec un léger retard mais dans la fenêtre temporelle prévue par les stations de Goldstone, en Californie et de Canberra, en Australie. Les instruments de *Rosetta* sont activés les uns après les autres puis testés. Le 21 mars, la caméra à haute définition NAC d'*Osiris* fournit une première image dans laquelle on peut distinguer la comète que poursuit la sonde spatiale sous la forme d'un simple point lumineux. Le 28 mars, l'atterrisseur *Philae* est réactivé à son tour et ses instruments commencent une séquence de tests. Progressivement la comète grossit sur les images prises périodiquement par la caméra. À compter de fin avril, on commence à distinguer un nuage diffus de gaz et de poussière autour de la comète : celle-ci en se rapprochant du Soleil commence à se réchauffer et des gaz s'évaporent de la surface formant une queue caractéristique dont la longueur est évaluée à cette date à 1 300 km. Ce phénomène était prévu mais à une distance plus faible du Soleil : 3 unités astronomiques alors que la comète se trouve encore à 4 UA. Selon Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au CNES, les gaz qui s'échappent sont sans doute à ce stade du CO ou du CO<sub>2</sub> plus volatile que la vapeur d'eau.

### Manœuvres de rendez-vous (mai-juillet)

Avant son arrivée à proximité de la comète *Rosetta* effectue huit manœuvres entre mai et juillet consistant à faire fonctionner sa propulsion, parfois durant plusieurs heures d'affilée, dans le but de faire passer le différentiel de vitesse de la sonde par rapport à la comète de 750 m/s à moins de 1 mètre par seconde tout en plaçant l'engin spatial à proximité immédiate de la comète (environ 200 km). Les moteurs-fusées utilisés ont chacun une poussée de 10 newtons. Du fait d'une légère fuite dans le système de propulsion détectée en 2006, les moteurs sont utilisés à une pression inférieure à celle prévue ce qui dégrade légèrement leurs performances (la poussée obtenue à partir d'une quantité donnée de carburant). La sonde se rapproche progressivement de la comète en suivant une trajectoire corrigée en permanence par le contrôle au sol de manière à éviter la poussière laissée dans son sillage par Tchourioumov-Guérassimenko tout en bénéficiant de bonnes conditions d'éclairage.

### Premiers aperçus de la comète (juin/juillet)

Déroulement des opérations en orbite	
Date	Description
6 août 2014	Insertion sur une pseudo orbite (100 km)
10 septembre 2014	Insertion en orbite (30 km)
1 <sup>er</sup> octobre	Orbite de 19 km
15 octobre	Orbite de 10 km
31 octobre	L'orbiteur relève son orbite à 30 km
12 novembre	Largage de <i>Philae</i> et atterrissage sur la comète
13 août 2015	La comète passe au plus près du Soleil Pic d'activité de la comète
31 décembre 2015	Fin prévue de mission



*Un étranglement sépare de manière spectaculaire les deux lobes de la comète*

Alors qu'en avril, la comète Tchourioumov-Guérassimenko était accompagnée d'une coma indiquant un dégazage en cours, celle-ci disparaît par la suite. Le 27 juin *Rosetta* n'est plus qu'à environ 86 000 km et la caméra OSIRIS réalise les premières photos qui permettent de distinguer les contours du corps céleste. Celui-ci effectue une rotation sur lui-même toutes les 12,4 heures. Le 11 juillet, les photos plus détaillées montrent que la comète de forme très irrégulière est constituée d'un noyau double dont les deux parties sont reliées par un étranglement. Plusieurs hypothèses sont émises au moment de cette découverte : la plus probable est que cette forme a été obtenue par l'agglomération de deux corps distincts au moment de la formation du système solaire. Selon d'autres théories cette forme pourrait résulter de la perte de matière associée au dégazage ou découler des forces de gravité exercées par le Soleil ou Jupiter. Le 25 juillet, la caméra grand angle en utilisant une pose longue parvient à montrer que la comète est entourée d'une chevelure de gaz, mais que celle-ci est encore extrêmement ténue.

## L'insertion en orbite (août/septembre)

Les deux dernières manœuvres exécutées les 3 et 6 août (cf tableau ci-dessus) placent *Rosetta* sur une trajectoire qui la maintient à proximité de la comète. La comète a une forme très irrégulière qui impose de longues investigations avant de permettre la mise en orbite. En effet compte tenu de la faiblesse de l'attraction gravitationnelle de la comète, *Rosetta* doit circuler à environ 30 km du sol pour se trouver en orbite et le maintien sur une orbite aussi basse peut entraîner rapidement une collision de la sonde et de la comète. Avant de placer *Rosetta* sur cette orbite, les contrôleurs au sol doivent d'abord connaître avec précision les caractéristiques du champ de gravité de la comète, la position de son centre de masse et sa forme précise ainsi que disposer de points de repères au sol pour pouvoir reconstituer à tout moment la position de la sonde. Pour recueillir ces informations la sonde spatiale va tourner autour de la comète à environ 100 km de sa surface. À cette distance, le champ gravitationnel est trop faible pour que la sonde spatiale se maintienne en orbite et les contrôleurs utilisent la propulsion de *Rosetta* pour lui faire parcourir une pseudo orbite de forme triangulaire comportant trois segments de droite longs de 100 km qui sont parcourus chacun en trois à quatre jours. À chaque fois que la sonde spatiale manœuvre pour entamer un nouveau segment ses moteurs consomment quelques centaines de grammes d'ergols. Au cours des deux mois suivants, la sonde spatiale va se rapprocher par palier, à 50 puis 30 kilomètres. À cette dernière altitude, la force d'attraction gravitationnelle de la comète devient suffisamment importante pour maintenir la sonde spatiale sur une orbite elliptique. La gravité est si faible que la sonde tourne autour de la comète à 10 cm/s (À titre de comparaison la vitesse d'un satellite artificiel en orbite basse autour de la Terre est de 7,5 km/s). Le 17 août l'altitude est progressivement abaissée à 80 km puis 50 km. À cette altitude une deuxième pseudo orbite triangulaire est parcourue entre le 24 août et le 2 septembre. Entre le 3 et 10 septembre des observations scientifiques sont réalisées avant l'insertion sur une orbite « naturelle » à 30 km d'altitude qui a lieu le 10 septembre. Le plan orbital fait un angle de 60° par rapport à la direction du Soleil et la sonde spatiale parcourt son orbite en 14 jours. La vitesse de la sonde autour de la comète aux formes très irrégulières doit être ajustée en permanence pour éviter que *Rosetta* ne s'écrase ou qu'elle s'échappe à l'attraction de Tchourioumov-Guérassimenko. Le 8 octobre la propulsion est utilisée pour placer *Rosetta* sur une orbite elliptique de 20 x 10 km puis le 15 octobre sur une orbite circulaire de 10 x 10 km.

## Sélection du site d'atterrissage

L'orbiteur cartographie le noyau de manière détaillée afin de permettre la sélection de 5 sites d'atterrissage potentiels. Ces sites sont des ellipses d'environ 1 km<sup>2</sup> car il est impossible d'être plus précis étant données les incertitudes liées au déroulement de l'atterrissage. Le site retenu doit remplir plusieurs conditions :

- l'horizon doit être suffisamment dégagé pour permettre d'établir des communications régulières entre *Philae* et *Rosetta*,
- le site doit bénéficier d'au moins 6 heures d'éclairage par rotation de la comète pour permettre la recharge des batteries de l'atterrisseur par ses panneaux solaires (tout en n'étant pas trop éclairé car cela pourrait causer une surchauffe)
- il doit bénéficier d'une période nocturne pour que les instruments puissent mesurer l'amplitude thermique jour-nuit
- il doit être relativement plat (déclivité faible). L'inclinaison maximale de *Philae* par rapport à l'horizontale doit être d'environ 30°
- il ne doit pas comporter de gros rochers ni crevasses ou pentes raides.
- 

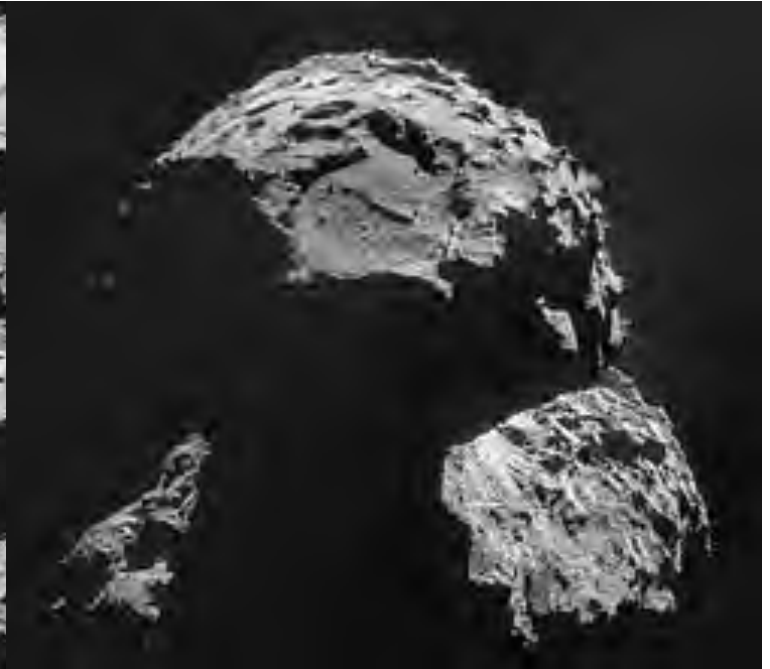
Le 25 août, après analyse des données acquises à 100 km de distance par *Rosetta* (images à haute définition, mesures de la température de surface de la comète, pression et densité du gaz autour du noyau, orientation de la comète vis-à-vis du Soleil, rotation, masse, gravité de surface), cinq sites d'atterrissage potentiels (A, B, C, I et J) sont retenus par le Landing Site Selection Group. Le 29 septembre, l'ESA annonce que le site J qui est situé sur le petit lobe et forme une ellipse de 900 mètres de long sur 600 mètres de large, est choisi comme site d'atterrissage principal. Un deuxième site situé sur le grand lobe est également retenu au cas où les investigations détaillées sur le premier site ne seraient pas satisfaisantes. Le site d'atterrissage, baptisé *Algikia* à la suite d'un concours lancé par les agences allemande, française et italienne, présente des pentes généralement de moins de 30 degrés ce qui limite le risque de renversement de *Philae* et peut être atteint au prix d'une descente au sol relativement courte (7 heures) qui n'entame pas trop les réserves de la batterie primaire de l'atterrisseur.



*Réchauffée par le Soleil qui se rapproche, la comète éjecte des jets de gaz qui fusent entre les deux lobes*



*Photo prise depuis une altitude de 10 km*



*Algikia, le site prévu pour l'atterrissage de Philae se situe à l'extrémité du petit lobe au milieu d'une région assez plate (sur la photo, en haut au centre)*

### Atterrissage et fin de mission (2014-2015)



*Philae descend vers le sol de la comète (vue d'artiste)*



*Chaque pied de Philae est muni de longues vis qui doivent s'enfoncer dans le sol pour empêcher l'atterrisseur de repartir dans l'espace*

L'atterrisseur *Philae* est éjecté à la vitesse adéquate par son vaisseau le 12 novembre à 10 h 05 et tombe 7 heures et 2 minutes plus tard sur le sol de la comète où il arrive avec une vitesse d'environ 1 m/s. L'atterrissage est réussi bien que non conforme aux prévisions. Il ne devait pas rebondir mais s'ancrer grâce à différents mécanismes. Une série d'observations préprogrammées est alors exécutée par ses instruments scientifiques au cours des 56 premières heures d'autonomie garanties par sa batterie principale. S'il survit, et en fonction des premiers résultats, d'autres observations définies par les opérateurs à Terre doivent être réalisées (analyses des propriétés du sol, du noyau de la comète, de son atmosphère) et si possible au-delà (observations à l'approche du Soleil : jets...). L'orbiteur de son côté joue un rôle de relais de télécommunications entre *Philae* et la Terre et réalise les observations avec ses propres instruments en accompagnant la comète dans sa course autour du Soleil. Celles-ci se poursuivent alors que la comète atteint le point de son orbite le plus proche du Soleil (13 août 2015), qui devrait se traduire par un pic de dégazage, et s'achèvent le 31 décembre de la même année.

### Descente de *Philae* vers le sol de la comète

La propulsion de *Rosetta* est utilisée à deux reprises les 27 et 31 octobre 2014 pour relever l'orbite de 10 à 30 km, afin de se placer en position de larguer *Philae*. Le 12 novembre à 8 h 03 (heure de Paris soit UTC+1), deux heures avant la séparation de *Philae*, les moteurs de la sonde spatiale sont mis à contribution pour placer celle-ci sur une orbite hyperbolique qui la fait plonger vers la comète, en la faisant passer 5 km en avant de son centre, dans le but de lancer l'atterrisseur dépourvu de propulsion dans le bon axe. Si cette manœuvre avait été effectuée à moins de 30 km, il y aurait eu un risque de collision de *Rosetta* avec la comète, tandis qu'un largage à une plus grande distance augmentait le cercle d'incertitude de la zone d'atterrissage. Les instruments de *Philae* sont activés les uns après les autres. L'ordinateur de *Philae*, qui rencontre des

problèmes, est relancé et les capteurs indiquent que le système propulsif à gaz froid n'est pas opérationnel, mais les responsables de la mission décident de s'en tenir au plan initial. À 9 h 35, l'atterrisseur se détache de son vaisseau mère avec une vitesse relative de 0,187 m/s (0,67 km/h) et entame sa descente d'une durée de 7 heures vers le sol de la comète sur sa seule inertie. La descente de l'atterrisseur *Philae* vers le sol de la comète se fait de manière complètement automatique compte tenu du délai des communications, 28 minutes et 20 secondes; la confirmation de la séparation n'arrive ainsi sur Terre qu'à 10 h 03. L'atterrisseur ne dispose d'aucun système de propulsion lui permettant de corriger sa trajectoire. La précision de l'atterrissage dépend donc de la bonne connaissance de la position et du déplacement de *Rosetta* au moment du largage ainsi que de la précision de l'orientation de la poussée exercée au moment de la séparation. L'écart, aussi négligeable soit il, par rapport à la trajectoire idéale que devrait suivre *Philae*, s'amplifie avec la distance parcourue par l'atterrisseur jusqu'au sol. La roue de réaction de *Philae* est utilisée pour mettre l'engin spatial en rotation et ainsi stabiliser son orientation et combattre l'effet d'éventuels jets de gaz. Dix minutes après la séparation, l'atterrisseur déploie son train d'atterrissage tripode et ses antennes. Trente minutes plus tard, le vaisseau-mère *Rosetta*, qui ne se trouve plus qu'à environ 20 km de la comète, effectue une manœuvre pour éviter la collision et se replacer sur une orbite qui doit lui permettre d'avoir en visibilité le site d'atterrissage au moment où *Philae* doit s'y poser. Durant la descente de l'atterrisseur, ses instruments ROMAP, CONSERT et SESAME effectuent des mesures respectivement du magnétisme, de la distance entre le sol et l'atterrisseur et des vibrations. Quarante minutes avant l'atterrissage la caméra ROLIS réalise des prises de vue rapprochées du site d'atterrissage.

#### Atterrissage (12 novembre 2014)

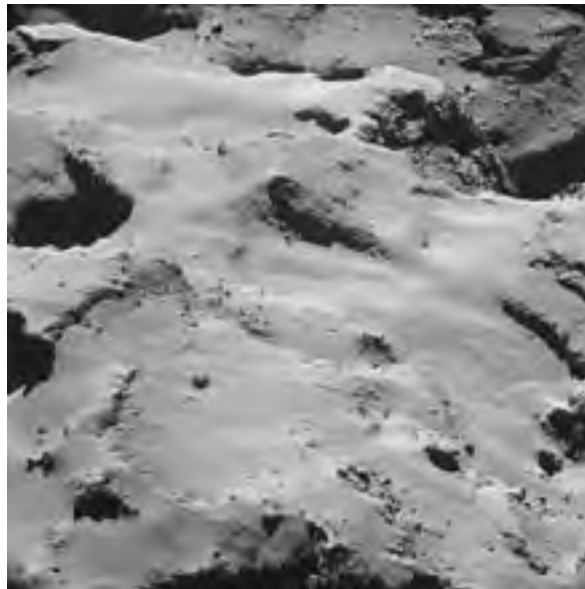
Au moment de l'atterrissage de *Philae*, la comète se situe à près de 650 millions de kilomètres de la Terre et navigue à plus de 135 000 km/h. Le dégazage déclenché par la proximité du Soleil, qui pourrait compromettre les opérations au sol, devrait être encore réduit à cette distance du Soleil (environ 400 millions km). Le 12 novembre vers 16 h 34 ( $\pm 40$  min) heure française (UTC + 1), soit sept heures après la séparation, *Philae* se pose à la surface de la comète à une vitesse d'environ 0,95 m/s (environ 3 km/h); la confirmation de l'atterrissage devait arriver sur Terre 28 minutes plus tard, à 17 h 02 ( $\pm 40$  min). La confirmation a finalement lieu à 17 h 04. Le choc est absorbé par le train d'atterrissage et un système d'amortisseur interne. Ceux-ci sont conçus pour faire face à tout type de terrain : sol incliné, roche ou sol de faible densité. À la surface de la comète, l'atterrisseur, d'une masse de 100 kg, ne pèse que l'équivalent d'1 gramme à la surface de la Terre, aussi plusieurs dispositifs sont utilisés pour empêcher *Philae* de rebondir et de repartir dans l'espace. Dès que l'atterrisseur est posé, le propulseur à gaz froid (dont la tuyère débouche au sommet de *Philae*) devait être déclenché pour plaquer *Philae* contre le sol, mais il ne fonctionne pas. Deux harpons placés sous le corps de l'atterrisseur devaient être tirés pour assurer son ancrage, mais leur déclenchement n'a pas non plus eu lieu; les experts cherchent l'origine de cette faille technique. De longues vis logées au niveau des trois pieds de *Philae* tournent et s'enfoncent dans le sol en quelques minutes. Ces deux derniers dispositifs sont également nécessaires pour permettre de réaliser les forages ultérieurs. La probabilité de succès de l'atterrissage avait été évaluée à 75 % par les responsables de la mission, quelques jours auparavant. L'atterrissage a lieu avec une très bonne précision évaluée à quelques dizaines de mètres mais les harpons qui devaient ancrer *Philae* au sol ne fonctionnent pas. Du fait de la faible gravité, l'atterrisseur rebondit jusqu'à une altitude évaluée à 1 km et effectue un premier vol plané d'une durée de 2 heures avant de toucher le sol et de rebondir une seconde fois pour une durée de quelques minutes. Le second rebond s'achève contre une paroi. D'après les images fournies par les caméras Civa, l'atterrisseur est dans une position inclinée (un des trois pieds se trouve au-dessus du sol) et une partie des panneaux solaires ne peut pas être éclairée par le Soleil. Le site de l'atterrissage final se trouve sans doute à plus d'un kilomètre du lieu visé.



Atterrissage (vue d'artiste)



## Opérations au sol (12 au 15 novembre)



Gros plan pris à une altitude de 10 km

Une séquence d'observations préprogrammées devait être exécutée par les instruments scientifiques de *Philae* durant les 54 premières heures du séjour sur le sol. L'objectif de cette phase est de recueillir les données permettant de remplir les principaux objectifs assignés à la mission avant l'épuisement de la batterie primaire. Mais sa réalisation est en partie compromise par les circonstances de l'atterrissage. Les contrôleurs au sol décident après celui-ci de reporter dans l'immédiat les observations impliquant des déplacements mécaniques qui pourraient modifier la position peut-être précaire de *Philae*. Les caméras miniatures CIVA réalisent un panoramique à 360° du site d'atterrissage qui révèle que l'atterrisseur se trouve sur une paroi qui masque la plupart du temps le Soleil. Les panneaux solaires de *Philae* ne disposent que de 1,5 heure d'ensoleillement à chaque rotation de la comète sur elle-même (durée 12,4 h). De plus l'atterrisseur n'est pas à plat et ses panneaux solaires mal orientés fournissent peu d'énergie lorsqu'ils sont éclairés. Les photos montrent un sol qui semble dur et rocheux très différent de ce qui était attendu. Les différents instruments passifs recueillent dans les heures suivantes leurs données. SESAME réalise un sondage électrique et acoustique du sol et mesure l'impact des poussières générées par l'activité de la comète. ROMAP étudie l'environnement magnétique et le plasma local ainsi que l'influence du vent solaire. Enfin CONSERT émet et reçoit des ondes radio qui traversent le noyau avant d'être émises ou reçues par un instrument analogue à bord de l'orbiteur, permettant de déterminer la structure et la composition du cœur de la comète. La caméra ROLIS effectue une photo du sol sous l'atterrisseur, dans 4 bandes spectrales, pour permettre l'étude de sa structure. Les données recueillies sont transmises à l'orbiteur à l'aide du petit émetteur radio de l'atterrisseur (1 W) lorsque *Philae* est survolé par celui-ci, puis sont relayées jusqu'au centre de contrôle à Terre en assurant éventuellement un stockage provisoire pour attendre les moments favorables à une liaison radio. Dans la nuit du 13 au 14 novembre les instruments MUPUS (mesure des propriétés thermiques et physiques de la couche superficielle du sol) et APXS (analyse des éléments présents en surface) qui comportent des parties mobiles sont activés. Le 14 novembre *Philae* ne dispose plus que d'une journée d'énergie mais a rempli, selon les scientifiques, environ 80 % de ses objectifs. L'instrument de forage SD2 est alors activé et prélève une carotte du sol de la comète (quelques mm<sup>3</sup>) qui est analysée par le mini-laboratoire COSAC qui détermine la composition isotopique et moléculaire ainsi que la chiralité des échantillons de sol. Les opérateurs décident de ne pas faire fonctionner PTOLEMY qui consomme trop d'énergie. Dans la nuit du 14 au 15 novembre l'orbiteur reprend contact avec *Philae* qu'il survole à nouveau. L'atterrisseur parvient à transmettre les données scientifiques recueillies par les instruments ROLIS, COSAC, Ptolemy (qui a été activé dans un mode rapide) et CONSERT. Le corps de *Philae* est réorienté de 35° et relevé de 4 cm de manière à accroître la quantité d'énergie reçue. Après une heure de communications la charge de la batterie primaire non rechargeable est épuisée et l'atterrisseur entre en hibernation. Sa localisation à la surface de la comète reste à ce moment toujours inconnue et les recherches se poursuivent en s'aidant des photos prises par la caméra Osiris embarquée à bord de l'orbiteur. Les premiers résultats sont fournis dans les jours qui suivent l'atterrissage. L'instrument MUPUS indique que la température à 1,5 mètre de la surface est de -170 °C. La résistance rencontrée par la sonde de cet instrument qui devait être enfoncée dans le sol permet d'en déduire que sa dureté est comparable à celle de la glace alors que les scientifiques s'attendaient à un sol mou. Les mesures des accéléromètres de SESAME prises au moment des impacts confirment cette indication. Les premiers résultats de COSAC semblent indiquer que la comète dégaze des composés organiques.

### Survie de *Philae*

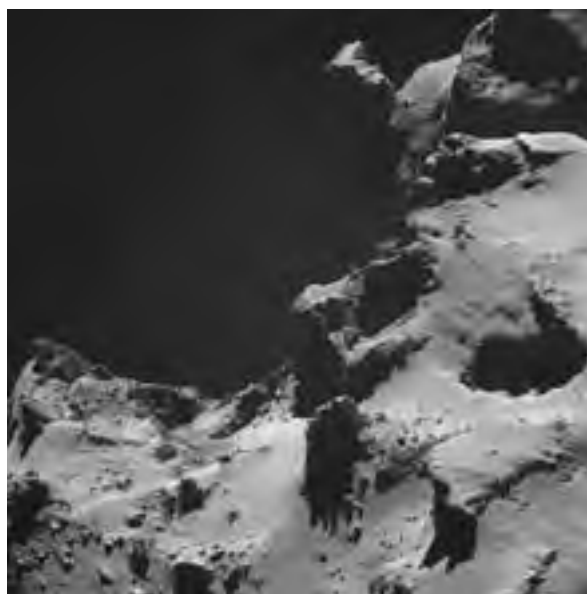
Compte tenu de la position de *Philae* sur le sol de la comète ses panneaux solaires qui peuvent fournir au maximum (9 watts) risquent de ne pas fournir suffisamment d'énergie pour permettre la phase d'étude au sol longue de plusieurs mois prévue initialement. Il existe un espoir que grâce au rapprochement progressif du Soleil l'atterrisseur puisse être réactivé malgré la faible durée durant laquelle ses panneaux solaires sont éclairés. Toutefois les mesures de production d'énergie par les panneaux solaires réalisées avant la réorientation de *Philae* n'incitent pas à l'optimisme : Sur une orbite de 12,4 heures les panneaux produiraient environ 3 à 4 Watts-heures durant les 90 minutes d'ensoleillement : moins de 1 Watt en moyenne durant cette

période sauf durant 20 minutes au cours desquelles il y aurait un pic de production de 3 à 4 Watts. Or il faut 5,1 Watts pour que le système informatique de *Philae* démarre, donc cette puissance est insuffisante dans la configuration ci-dessus. Il faut par ailleurs disposer de 50 à 60 Wh sur une journée pour porter la température à 0 °C et commencer à accumuler un peu d'énergie dans la batterie. La reprise d'activité de *Philae* dans les mois à venir ne pourra être que limitée même en tenant compte de l'augmentation de l'efficacité des panneaux solaires liés à la réorientation de *Philae* et d'un Soleil de plus en plus proche. Les mesures qui devaient être réalisées par les instruments de *Philae* après la première phase devaient être choisies par l'équipe scientifique en fonction des premiers résultats et du contexte. Il s'agissait d'étudier l'évolution des émissions des jets de gaz et de poussière et des phénomènes induits liée au cycle jour/nuit, d'analyser des échantillons du sol prélevés sur d'autres emplacements (le corps de l'atterrisseur peut pivoter) et la poursuite des sondages du noyau à l'aide de CONSERT. La comète se rapproche progressivement du Soleil modifiant le flux thermique que subit l'atterrisseur. La température interne pourraient atteindre des valeurs trop élevées pour que l'électronique de *Philae* puisse continuer à fonctionner.

#### **Suite de la mission (novembre 2014 - décembre 2015)**

L'orbiteur, de son côté, poursuit ses observations alors que la comète s'approche du Soleil et devient de plus en plus active : *Rosetta* peut ainsi étudier le processus d'intensification du phénomène de dégazage qui caractérise cette période particulière de la vie d'une comète. Le périhélie est atteint le 13 août 2015 alors que la comète se situe à 189,5 millions de km du Soleil et correspond au pic de l'activité cométaire. La distance de la Terre après s'être accrue jusqu'au 31 décembre 2014 à 527 millions de km, décroît par la suite pour atteindre 270 millions de km le 13 août. Après 18 mois passés en orbite autour de la comète, il est prévu que la mission de *Rosetta* s'achève en décembre 2015 alors que la comète s'éloigne de nouveau du Soleil. Une prolongation est possible si l'état de la sonde lui permet encore de fonctionner. *Rosetta* et *Philae* vont par la suite accompagner la comète jusqu'à sa désintégration ou sa collision avec un autre corps céleste, à une date qui se situe sans doute très loin dans le futur. Aussi, à la manière de la plaque des sondes Pioneer, un disque en nickel inaltérable a été fixé à l'extérieur de l'orbiteur sur lequel sont micro-gravés des textes rédigés dans un millier de langues : ce disque fait partie du projet *Rosetta* de la fondation américaine *Long Now Foundation* dont l'objectif est de préserver la connaissance des langues menacées en créant des « pierres de Rosette » destinées à nos lointains descendants.

#### **Résultats scientifiques**



*Le relief est particulièrement tourmenté*

À compter de la mise en orbite autour de la comète Tchourioumov-Guérassimenko, les instruments de la sonde spatiale ont permis d'accumuler les informations. La précision de certaines des mesures effectuées (densité, volume) est toutefois affectée par le fait que 30 % du corps céleste est situé en permanence dans l'ombre.

#### **Structure et composition du noyau**

Le noyau de la comète Tchourioumov-Guérassimenko est composé de deux lobes reliés par une région plus étroite baptisée cou. Le plus grand lobe mesure 4,1 x 3,2 x 1,3 km, tandis que l'autre mesure 2,5 x 2,5 x 2,0 km. La masse de l'ensemble est de  $10^{13}$  kg soit 10 milliards de tonnes et le volume est de  $25 \text{ km}^3$ . La densité est comprise entre 0,4 et 0,5. La température de la surface de la comète mesurée en juillet par l'instrument VIRTIS-H était évaluée à -70 °C. En octobre, elle était évaluée à -183 °C contre environ 100 °C de plus à 1 km au-dessus de la surface de la comète. Cette chute de la température est due à l'expulsion des gaz qui se traduit par un refroidissement adiabatique. Comme presque toutes les comètes, Tchourioumov-Guérassimenko est de couleur sombre avec un albédo (proportion de lumière réfléchi) très faible compris entre 4 et 6 %, analogue à celui du charbon. Pour pouvoir malgré tout photographier la comète alors que le Soleil ne fournit en date d'octobre 2014 que 10 % de l'éclairage disponible au niveau de l'orbite terrestre, le temps d'exposition est allongé jusqu'à la limite de la saturation des couleurs.

### Caractéristiques de la queue de la comète

Le volume d'eau éjecté par Tchourioumov-Guérassimenko était évalué à 0,3 litre par seconde en juin 2014 puis entre 1 et 5 litres par seconde en juillet-août. En octobre 2014, l'activité de la comète est devenue suffisamment importante pour permettre la mesure de la composition des gaz éjectés par l'instrument VIRTIS-H. Les gaz émis sont principalement de la vapeur d'eau. Le dioxyde de carbone représente 4 % de la quantité de vapeur d'eau. Ce chiffre est bien inférieur aux 20 % mesurés pour la comète 103P/Hartley par la mission EPOXI en novembre 2010 bien que les deux comètes fassent partie de la même famille. L'instrument ROSINA a permis d'identifier de l'ammoniac, du méthane et du méthanol. Des traces de formol (CH<sub>2</sub>O), de sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), d'acide cyanhydrique (HCN), de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et de sulfure de carbone (CS<sub>2</sub>) ont été également détectées par le même instrument. Les grains de poussière éjectés mesurent de quelques dizaines de micromètres jusqu'à 2 cm de diamètre.

### L'origine de l'eau des océans terrestres

L'une des hypothèses dominantes concernant les débuts de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années, est que celle-ci a perdu à cette époque toute son eau, qui s'est évaporée à cause de la température très élevée engendrée par le processus de formation. Les océans qui recouvrent les deux tiers de notre planète ont donc dû se former par la suite, après que la planète se soit refroidie, grâce à des apports externes. Pour déterminer l'origine de l'eau de la Terre on compare le ratio deutérium/hydrogène présent dans le liquide de celle-ci avec celui de l'eau transportée par les autres types de corps célestes qui auraient pu contribuer à former les océans. Les comètes, constituées en grande partie de glace d'eau sont de bons candidats. Mais les mesures du ratio effectuées sur onze comètes ont fourni des résultats qui ne confirment pas cette théorie. Une seule de ces comètes, 103P/Hartley 2, présente une valeur proche de celle de la Terre. Le ratio de l'eau de 67P/Churyumov-Gerasimenko a été mesuré un mois après l'arrivée de Rosetta à proximité de la comète à l'aide de l'instrument ROSINA. La valeur obtenue est trois fois supérieure au ratio des océans terrestres. Ce résultat renforce la théorie selon laquelle les astéroïdes, dont le ratio est proche de celui de la Terre, seraient à l'origine de l'eau terrestre bien que l'eau ne soit qu'un composant mineur de ces corps. La diversité des ratios mesurés sur les différentes comètes suggère par ailleurs que leur processus de formation est moins homogène que ce qui était théorisé jusque là.

### Retombées techniques

Plusieurs composants, développés pour *Rosetta*, ont été embarqués sur la sonde spatiale *Mars Express*, lancée en juin 2003 vers Mars. C'est le cas de l'ordinateur de bord, des transpondeurs, de l'antenne faible gain, des gyroscopes lasers, des accéléromètres des centrales de navigation inertielle et de l'articulation des panneaux solaires. Ces éléments représentent 80 % de la sonde. Afin de réduire le coût de 4 autres missions, la plate-forme de *Rosetta* a été également réutilisée sur *Venus Express*, lancée vers Vénus en avril 2006, sur *Mars Express*, sur *BepiColombo*, qui devrait être lancée en août 2015 à destination de Mercure, et sur *Solar Orbiter*, sonde destinée à l'étude du Soleil.

## H) L'exploration du système solaire

### Découverte et exploration

#### Observations pré-télescopiques

Le concept de Système solaire n'existait pas de façon répandue avant une époque récente. En règle générale, la Terre était perçue comme stationnaire au centre de l'Univers et souvent de nature intrinsèquement différente à celui-ci. Un cosmos héliocentrique fut cependant postulé à plusieurs reprises, par exemple par le philosophe grec Aristarque de Samos, le mathématicien et astronome indien Aryabhata ou l'astronome polonais Nicolas Copernic.

Néanmoins, les avancées conceptuelles du XVII<sup>e</sup> siècle, conduites par Galileo Galilei, Johannes Kepler et Isaac Newton, popularisèrent l'idée que la Terre se déplaçait non seulement autour du Soleil, mais que les mêmes lois physiques s'appliquaient aux autres planètes. Les cinq planètes les plus proches de la Terre (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) sont parmi les objets plus brillants du ciel et étaient nommées *πλανήτης* (*planētēs*, signifiant « errant ») par les astronomes grecs dans l'Antiquité. Hormis le Soleil et la Lune, il s'agit des seuls membres du Système solaire connus avant les observations instrumentales.



Réplique du télescope d'Isaac Newton

## Observations instrumentales

Les premières observations du Système solaire en tant que tel furent réalisées à partir de la mise au point de la lunette astronomique puis du télescope par les astronomes. Galilée fut parmi les premiers à découvrir des détails physiques sur d'autres corps : il observa que la Lune était couverte de cratères, que le Soleil possédait des taches et que quatre satellites orbitaient Jupiter. Christian Huygens poursuivit les découvertes de Galilée en découvrant Titan, le satellite de Saturne, et la forme des anneaux de cette planète. Jean-Dominique Cassini découvrit ensuite quatre autres lunes de Saturne, la division de Cassini dans ses anneaux et la grande tache rouge sur Jupiter.

Edmond Halley réalisa en 1705 que les apparitions répétées d'une comète concernaient le même objet, revenant régulièrement tous les 75 à 76 ans. Ce fut la première preuve qu'autre chose que les planètes orbitait autour du Soleil.

En 1781, William Herschel observa ce qu'il pensa être une nouvelle comète, mais dont l'orbite révéla qu'il s'agissait d'une nouvelle planète, Uranus.

Giuseppe Piazzi découvrit Cérès en 1801, un petit corps situé entre Mars et Jupiter qui fut initialement considéré comme une nouvelle planète. Des observations ultérieures révélèrent des milliers d'autres objets dans la même région, ce qui conduisit à leur reclassification comme astéroïdes.

Les écarts entre la position d'Uranus et les calculs théoriques de son orbite conduisirent à suspecter qu'une autre planète plus lointaine en perturbait le mouvement. Les calculs d'Urbain Le Verrier permirent la découverte de Neptune en 1846. La précession de l'avance du périhélie de Mercure conduisit également Le Verrier à postuler l'existence d'une planète située entre Mercure et le Soleil, Vulcain en 1859, ce qui s'avéra au bout du compte être une fausse piste. Les anomalies de trajectoire des planètes externes firent émettre par Percival Lowell l'hypothèse d'une planète X. Après sa mort, l'observatoire Lowell conduisit une recherche qui aboutit à la découverte de Pluton par Clyde Tombaugh en 1930. Pluton se révéla être trop petit pour perturber les orbites des géantes gazeuses et sa découverte fut une coïncidence. Comme Cérès, il fut d'abord considéré comme une planète avant d'être reclassifié en 2006 comme planète naine.

En 1992, David Jewitt et Jane Luu découvrirent (15760) 1992 QB<sub>1</sub>. Cet objet se révéla être le premier d'une nouvelle catégorie, qui fut nommée ceinture de Kuiper, un analogue glacé à la ceinture d'astéroïdes et dont Pluton fait partie.

Mike Brown, Chadwick Trujillo et David L. Rabinowitz annoncèrent la découverte d'Éris en 2005, un objet éparé plus grand que Pluton, et d'ailleurs le plus grand découvert en orbite autour du Soleil depuis Neptune.

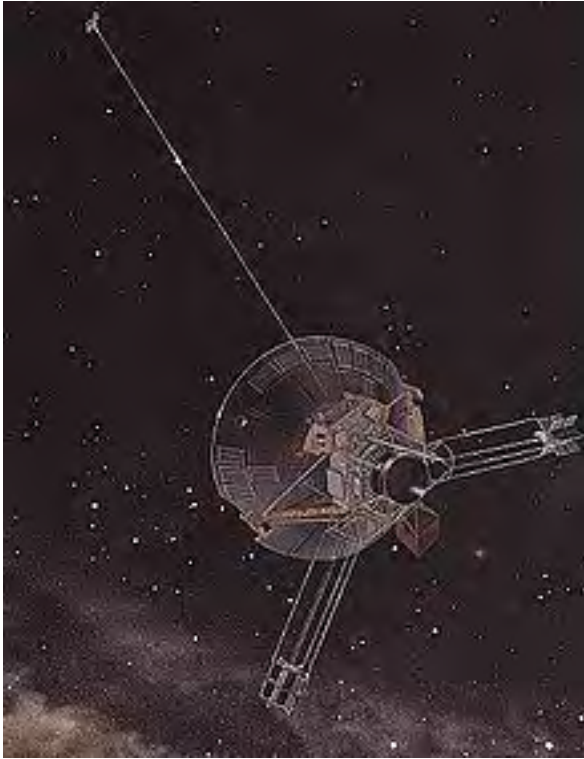
## Exploration spatiale

Depuis le début de l'ère spatiale, de nombreuses missions d'exploration par sondes spatiales ont été mises en œuvre. Toutes les planètes du Système solaire ont été visitées à divers degrés par des sondes robotisées : au minimum, des photographies en furent prises, et dans certains cas des atterrisseurs ont effectué des tests sur les sols et les atmosphères.

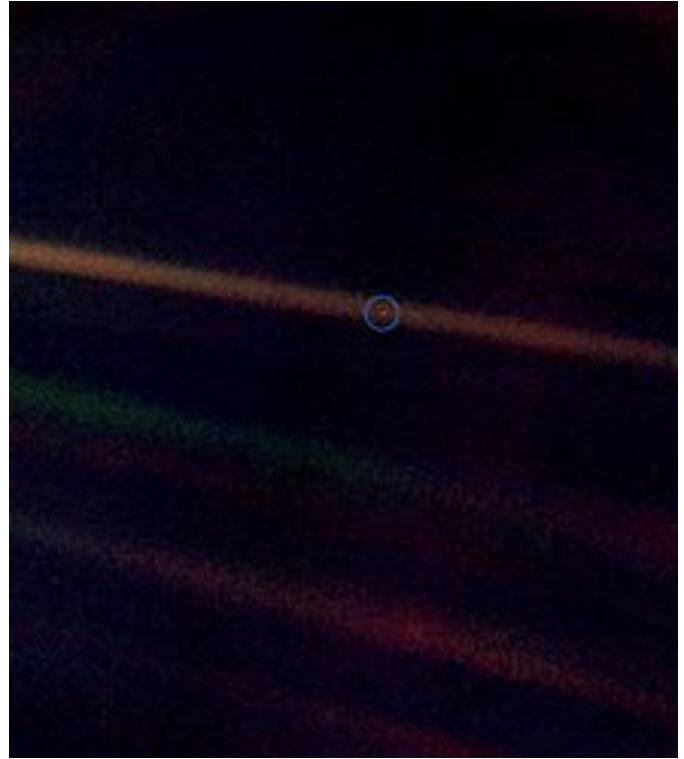
Le premier objet humain lancé dans l'espace fut le satellite soviétique *Sputnik 1* en 1957, qui orbita la Terre pendant trois mois. La sonde américaine *Explorer 6*, lancée en 1959, fut le premier satellite à renvoyer une image de la Terre prise de l'espace. La première sonde à voyager avec succès vers un autre corps fut *Luna 1* qui dépassa la Lune en 1959; à l'origine, elle devait la percuter mais manqua sa cible et devient le premier objet artificiel à entrer en orbite solaire. *Mariner 2* fut la première sonde à survoler une autre planète, Vénus, en 1962. Le premier survol réussi de Mars fut effectué par *Mariner 4* en 1964; Mercure fut approchée par *Mariner 10* en 1974.

La première sonde à explorer les planètes externes fut *Pioneer 10*, qui survola Jupiter en 1973. *Pioneer 11* visita Saturne en 1979. Les deux sondes *Voyager* réalisèrent un survol de toutes les géantes gazeuses à partir de leur lancement en 1977. Elles survolèrent Jupiter en 1979 et Saturne en 1980 et 1981. *Voyager 2* continua par un survol d'Uranus en 1986 et de Neptune en 1989. Les sondes *Voyager* sont sur le chemin de l'héliogaine et de l'héliopause; selon la NASA, elles ont rencontré le choc terminal à environ 93 UA du Soleil. La NASA confirme officiellement le 12 septembre 2013, après analyse des données recueillies par la sonde, que *Voyager 1*, à plus de 18 milliards de kilomètres du Soleil, a quitté la zone d'influence directe de ce dernier, l'héliosphère (zone de prédominance magnétique, la sonde étant toujours dans la zone de prédominance gravitationnelle de notre étoile). Elle se trouve désormais dans l'espace interstellaire.

Aucun objet de la ceinture de Kuiper n'a encore été visité par une sonde, mais *New Horizons*, lancée le 19 janvier 2006, est en route pour cette région; la sonde doit survoler Pluton en juillet 2015, ainsi que par la suite d'autres corps si cela s'avère possible. En 1966, la Lune devint le premier objet du Système solaire en dehors de la Terre autour duquel un satellite artificiel fut mis en orbite (*Luna 10*). Elle fut suivie par Mars en 1971 (*Mariner 9*), Vénus en 1975 (*Venera 9*), Jupiter en 1995 (*Galileo*, qui réalisa le premier survol d'un astéroïde, Gaspra, en 1991), l'astéroïde Éros en 2000 (*NEAR Shoemaker*) et Saturne en 2004 (*Cassini-Huygens*). La sonde Messenger est en orbite autour de Mercure depuis le 18 mars 2011. *Dawn* devrait atteindre l'astéroïde Vesta en 2011 et la planète naine Cérès en 2015. La première sonde à se poser sur un autre corps fut la sonde soviétique *Luna 2*, qui impacta la Lune en 1959. La surface de Vénus fut atteinte en 1966 (*Venera 3*), Mars en 1971 (*Mars 3*, bien que le premier atterrissage sur Mars ne fut réalisé que par *Viking 1* en 1976), Éros en 2001 (*NEAR Shoemaker*) et le satellite de Saturne Titan en 2005 (*Huygens*). L'orbiteur *Galileo* lâcha également une sonde dans l'atmosphère de Jupiter en 1995; la géante gazeuse ne possédant pas de surface à proprement parler, la sonde fut détruite par la température et la pression lors de sa descente.



Vue d'artiste de Pioneer 10 lorsque la sonde dépassa l'orbite de Pluton en 1983. La dernière transmission fut reçue en janvier 2003, à plus de 82 UA de distance. La sonde, vieille de plus de 35 ans, fut la première à entrer dans le Système solaire externe et s'éloigne du Soleil à plus de 43 400 km/h



Photographie de la Terre (entourée d'un cercle) prise par la sonde Voyager 1, à six milliards de kilomètres de distance. Les raies lumineuses sont des pics de diffraction provenant du Soleil (hors-cadre, sur la gauche)

### Exploration humaine

L'exploration humaine du Système solaire est pour l'instant limitée aux environs immédiats de la Terre. Le premier être humain à avoir atteint l'espace (défini comme une altitude de plus de 100 km) et à orbiter la Terre fut le cosmonaute soviétique Youri Gagarine le 12 avril 1961. Le premier homme à marcher sur une autre surface du Système solaire fut l'astronaute américain Neil Armstrong, qui atterrit sur la Lune le 21 juillet 1969. La première station orbitale pouvant héberger plus d'un passager fut le Skylab américain, qui accueillit des équipes de trois astronautes entre 1973 et 1974. La première station permanente fut la station spatiale soviétique Mir, qui fut occupée en continu entre 1989 et 1999, à laquelle succéda la station spatiale internationale, hébergeant une présence humaine dans l'espace depuis lors.

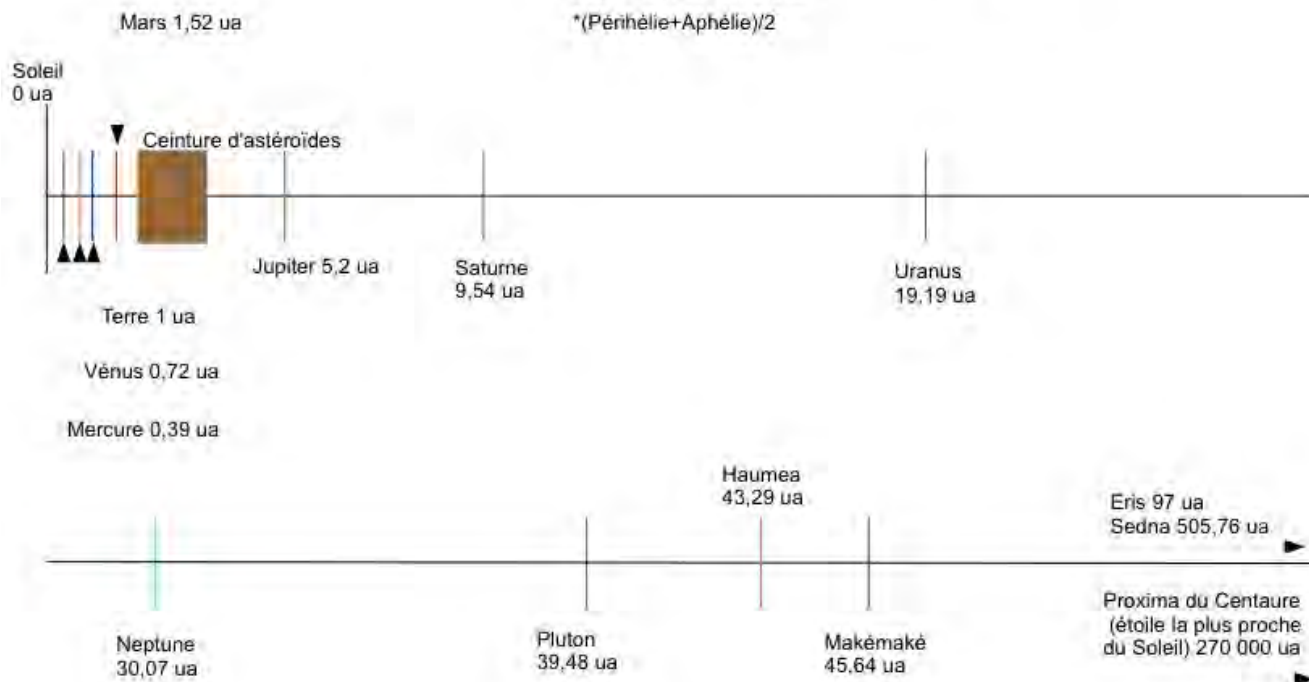
### I) Quelques chiffres sur le système solaire

	Soleil	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
<b>Dist Soleil Mkm</b>	0	57,91	108,2	149,597	227,94	778,33	1426,98	2870,99	4497,07
<b>Dist Soleil UA</b>	0	0,387	0,7233	1	1,5237	5,2028	9,5388	19,1914	30,0611
<b>Diamètre km</b>	1 392 684	4 878	12 102	12 756	6 786	142 984	120 536	51 118	49 528
<b>Poids/Terre</b>	332 981	0,055	0,815	1	0,1074	317,94	95,181	14,531	17,135
<b>Densité</b>		5,43	5,25	5,52	3,95	1,33	0,69	1,29	1,64
<b>T° moy surface</b>	5 500	430/-	460	14 °	-60	-120	-170	-220	-218
<b>Gravité/terre</b>	274	0,28	0,878	1	0,379	2,4	0,923	0,793	1,122
<b>Orbite (jours)</b>		87,97	224,7	365,25	686,98	4 332	10 759	30 684	60 189
<b>Orbite (ans)</b>		0,24	0,62	1	1,88	11,8623	29,458	84,01	164,79
<b>Rotation</b>	37,3 j	59 j	243 j	24 h	24,62 h	9,941 h	10,233 h	17,9 h	19,2 h
<b>Inclinaison axe</b>	7,25°	2°	177,3°	23,5°	25,19°	3,12°	26,73°	97,86°	29,6°
<b>Ecc orbite</b>		0,2056	0,0068	0,017	0,0934	0,0483	0,056	0,0461	0,0097
<b>Incl / écliptique</b>	0	7 °	3,397 °	0	1,85 °	1,308 °	2,488	0,744 °	1,774 °
<b>Anneaux</b>	non	non	non	non	non	3	12 +	13 +	5
<b>Nb Satellites</b>		0	0	1	2	67+	62 + 150+	27	14+
<b>Satellites dont le diamètre est supérieur à 1.000 km</b>				Lune		Ganymède Callisto Io Europe	Titan Rhéa Japet Dioné Thétis	Titania Obéron Umbriel Ariel	Triton

1 ua = 149 597 871 km

### DISTANCE MOYENNE\* DES OBJETS CELESTES DU SYSTEME SOLAIRE PAR RAPPORT AU SOLEIL EN UNITE ASTRONOMIQUE

\*(Périhélie+Aphélie)/2



Distance moyenne des objets célestes du système solaire par rapport au soleil en UA

### Éléments orbitaux des planètes et planètes naines

Orbites des planètes et des planètes naines du Système solaire				
	Demi grand axe (UA)	Excentricité	Inclinaison (°)	Période (années)
<b>Mercure</b>	0,38710	0,205631	7,0049	0,2408
<b>Vénus</b>	0,72333	0,006773	3,3947	0,6152
<b>Terre</b>	1,00000	0,016710	0,00000	1,00000
<b>Mars</b>	1,52366	0,093412	1,8506	1,8808
<b>Cérès (planète naine)</b>	2,7665	0,078375	10,5834	4,601
<b>Jupiter</b>	5,20336	0,048393	1,3053	11,862
<b>Saturne</b>	9,53707	0,054151	2,4845	29,457
<b>Uranus</b>	19,1913	0,047168	0,7699	84,018
<b>Neptune</b>	30,0690	0,008586	1,7692	164,78
<b>Pluton (planète naine)</b>	39,4817	0,248808	17,1417	248,4
<b>Hauméa (pl. naine)</b>	43,2829	0,19089	28,2141	284,76
<b>Makémaké (pl. naine)</b>	45,64	0,15	29	308
<b>Éris (planète naine)</b>	67,668	0,44177	44,18694	557

### III – Notre Galaxie : la Voie Lactée... et ensuite ?

#### A) Qu'est-ce qu'une galaxie ?

Une **galaxie** est un assemblage d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière sombre ou noire, contenant **parfois** un trou noir supermassif en son centre. La Voie lactée, la galaxie dans laquelle se trouve le Système solaire, compte quelques centaines de milliards d'étoiles ( $10^{11}$ ) et a une extension de l'ordre de 80 000 à 100 000 années-lumière. La plupart des galaxies typiques comportent un nombre similaire d'astres, mais il existe aussi des galaxies naines comptant à peu près une dizaine de milliards d'étoiles ( $10^{10}$ ), et des galaxies géantes comptant plusieurs milliers de milliards d'étoiles ( $10^{12}$ ). Sur la base de ces chiffres et de la taille de l'univers observable, on estime que celui-ci compte quelques centaines de milliards de galaxies de masse significative. La population de galaxies naines est cependant très difficile à déterminer, du fait de leur masse et de leur luminosité très faibles. L'univers dans son ensemble, dont l'extension réelle est inconnue, est susceptible de compter un nombre immensément plus grand de galaxies. Les galaxies en tant que systèmes stellaires de grande taille ont été mises en évidence dans le courant des années 1920, principalement par l'astronome américain Edwin Hubble, bien que des premières données indiquant ce fait remontent à 1914. Les galaxies sont de trois types morphologiques principaux : elliptiques, spirales, irrégulières. Une description plus étendue des types de galaxies a été donnée à la même époque par Hubble et est depuis nommée séquence de Hubble.

**Mais, toutes les étoiles ne sont pas situées dans des galaxies.** S'il semble établi que c'est presque exclusivement au sein des galaxies que se forment les étoiles, celles-ci sont susceptibles d'en être expulsées, soit du fait d'interactions entre galaxies, soit du fait de rencontres rapprochées entre une étoile et un astre très massif, tel un trou noir supermassif situé au centre d'une galaxie. On observe ainsi certaines étoiles dotées d'une vitesse élevée par rapport à leur galaxie, signe qu'elles n'y sont plus liées gravitationnellement. De telles étoiles sont de ce fait appelées « étoiles en fuite ». Plusieurs représentantes de cette classe sont connues, telles SDSS J090745.0+024507 et GRO J1655-40, toutes deux en train de quitter la Voie lactée. La première est probablement issue d'une rencontre rapprochée avec le trou noir central de notre galaxie, Sgr A\*, la seconde est sans doute issue d'une supernova asymétrique dont le résidu compact a été expulsé de la région où l'explosion a eu lieu. Suivant les régions de l'Univers, on estime aujourd'hui qu'environ 30% des étoiles se situent en dehors des galaxies. Certains scientifiques vont même jusqu'à envisager que la proportion aille jusqu'à 50% !

**Encore plus curieux :** on a découvert en juillet 2014 deux étoiles (nommées ULAS J001535.72+015549.6 et ULAS J074417.48+253233.0) qui s'avèrent être des géantes rouges vraiment très distantes. Elles seraient en orbite autour de la Voie Lactée, mais sans vraiment en faire partie. En effet, elles se situent respectivement à 780 000 et 900 000 années-lumière de nous. La Voie Lactée ayant un diamètre d'environ 100 000 à 120 000 années-lumière elles n'en font pas partie au sens strict, mais elles font partie de ce qu'on appelle le « halo » de la Voie Lactée. Certains astronomes pensent que le halo est comme un nuage de miettes galactiques, le résultat, tout au long de la vie de la Voie lactée, de la fusion avec de nombreuses galaxies plus petites. De par leurs propriétés, les géantes rouges du halo préservent l'histoire de la formation de notre Voie lactée. Ces étoiles sont vraiment les fantômes du passé galactique.

Les distances de ces deux étoiles, les plus lointaines de la galaxie jamais découvertes à ce jour, sont tellement importantes qu'il est difficile de se les représenter : *"Pour mettre cela en perspective, quand la lumière de ULAS J001535.72+015549.6 (que nous voyons aujourd'hui) a quitté l'étoile, nos ancêtres hominidés commençaient juste à faire du feu sur Terre"...* Ces très lointaines étoiles posent une grosse question aux astrophysiciens : comment sont-elles arrivées là ? La densité de gaz dans ces régions étant bien trop faible pour que des étoiles puissent y naître, celles-ci sont donc venues d'ailleurs. Trois hypothèses sont possibles : 1) soit elles ont été expulsées du disque de la Voie lactée suite à un jeu de billard gravitationnel (par exemple lors d'une interaction avec un trou noir), 2) soit elles ont été arrachées à une galaxie que la Voie lactée a absorbée au cours de son histoire, ou 3) soit elles appartiennent à une minuscule galaxie satellite non encore répertoriée dans le halo de la Voie lactée. La deuxième ou la troisième hypothèse seraient privilégiées dans le cas présent.

#### Étymologie

Le mot « galaxie » provient du terme grec désignant notre propre galaxie, ὁ γαλαξίας / *ho galaxias* (« laiteux », sous-entendu κύκλος / *kyklos* « cercle »), dérivé du nom τὸ γάλα / *to gala* « lait ». On trouve aussi en grec ancien ὁ τοῦ γάλακτος κύκλος / *ho tou galaktos kyklos* « le cercle de lait », ou encore ὁ κύκλος γαλακτικός / *ho kyklos galaktikos*, « cercle laiteux », à cause de son apparence dans le ciel. Dans la mythologie grecque, Zeus plaça son fils Héraclès, né de son union avec la mortelle Alcène, sur le sein de son épouse Héra lorsqu'elle était endormie afin que le bébé devienne immortel en buvant son lait divin. Lorsque celle-ci se réveilla, elle se rendit compte qu'elle allaitait un bébé inconnu qu'elle repoussa, et un jet de lait aspergea le ciel, formant cette pâle bande lumineuse appelée « Voie lactée ». Dans la littérature astronomique, le mot « Galaxie » muni d'un G majuscule se réfère à notre propre galaxie (la Voie lactée), afin de la distinguer des autres galaxies. Avant la mise en évidence des galaxies, était employé le terme de « nébuleuse », qui décrivait tout objet diffus de la sphère céleste. Cette dénomination remonte à William Herschel, qui établissant son catalogue d'objets du ciel profond, utilisa le terme de « *nébuleuse spirale* » pour des objets tels que M31. Ceux-ci allaient plus tard être identifiés comme étant d'immenses agglomérations d'étoiles, et lorsque les distances entre elles commencèrent à être comprises, elles furent nommées « *univers-iles* ». Cependant, cette nomenclature tomba donc en désuétude au profit du terme « galaxie ».

## Identification des galaxies

Des dizaines de milliers de galaxies ont été recensées, parmi d'autres objets, à travers de nombreux catalogues astronomiques, tels que le catalogue Messier et le New General Catalogue, qui référencent également des nébuleuses, mais aussi plus spécifiquement les catalogues PGC, UGC, MCG, CGCG, IC, etc. Ainsi, la galaxie spirale barrée couramment appelée M109 est-elle également identifiée par les numéros NGC 3992, PGC 37617, UGC 6937, MCG+09-20-044, CGCG269-023, etc. Certaines galaxies remarquables ont reçu un nom d'usage (parfois plusieurs) couramment employé à la place des numéros d'identification, telles que par exemple la galaxie d'Andromède, les nuages de Magellan, les galaxies des Antennes, la galaxie du Tourbillon (également appelée *galaxie des Chiens de Chasse*), la galaxie du Sombrero, etc.

## Quelques ordres de grandeur

Une galaxie typique comme la Voie lactée comprend quelques centaines de milliards d'étoiles et a une taille de l'ordre de 100 000 années-lumière de diamètre et 10 000 à 20 000 années-lumière d'épaisseur (une année-lumière équivaut à environ 9 500 milliards de kilomètres). On estime à ce jour qu'il y a au moins 100 milliards de galaxies dans notre univers. Chaque galaxie ayant une moyenne minimale de 100 milliards d'étoiles, cela amène le nombre d'étoiles à  $(100 \times 10^9) \times (100 \times 10^9) = 10\,000 \times 10^{18}$  étoiles (10 000 000 000 000 000 000 000 000 étoiles !). Il faut plus de dix milliards d'années pour que la lumière des plus lointaines galaxies parvienne jusqu'à la Terre.

## Historique des observations : La Voie lactée

Dès l'Antiquité, les philosophes tentèrent de saisir la nature de la bande lumineuse connue sous le nom de Voie lactée. Le philosophe grec Anaxagore (500—428 av. J.-C.) la concevait comme « l'effet de la lumière des astres qui ne sont pas offusqués par le Soleil ». De la même manière, Démocrite (450—370 av. J.-C.), suggéra qu'elle était due à un grand nombre de petites étoiles. Aristote, cependant, pensait que ce qu'on observait était la combustion d'une partie de l'air, enflammé par le mouvement des astres, impliquant donc qu'elle se trouvât dans la sphère sublunaire.



*Cœur de la Voie lactée vu en infrarouge par le télescope spatial Spitzer de la NASA*

L'astronome perse Al-Biruni (973 - 1048 apr. J.-C.) réfuta cependant cette proposition, en tentant de calculer la parallaxe de la Voie lactée, et en notant que puisqu'elle est nulle, elle doit se trouver à grande distance de la Terre, et donc hors de l'atmosphère. Il proposa également que la Voie lactée était une collection d'innombrables étoiles nébuleuses.

Les preuves de cela vinrent en 1610, quand Galilée utilisa sa lunette astronomique pour étudier la Voie lactée et découvrit qu'elle était effectivement composée d'un nombre incalculable d'étoiles de faible éclat. Dans un traité de 1755, Emmanuel Kant, devançant le travail de Thomas Wright, spécula à juste titre que notre galaxie pouvait être un corps en rotation d'un nombre incroyable d'étoiles tenues ensemble par des forces gravitationnelles, au même titre que le Système solaire. Le disque d'étoiles résultant peut être vu, en perspective, comme une bande dans le ciel, pour un observateur se trouvant en son sein. Kant avança également que quelques-unes des nébuleuses visibles dans le ciel nocturne pourraient être des galaxies.

La première tentative de description de la forme de la Voie lactée et de la disposition du Soleil en son sein fut faite par William Herschel en 1785. Il compta avec beaucoup de prudence le nombre d'étoiles dans différentes régions du ciel. Il fit un diagramme de la forme de la Voie lactée et plaça le Système solaire près du centre. En 1920, Jacobus Kapteyn arriva à une image d'une petite galaxie ellipsoïdale (d'environ 15 000 parsecs de diamètre), avec le Soleil également proche du centre. Une méthode différente, proposée par Harlow Shapley, fondée sur la position des amas globulaires, mena à une image radicalement différente de tout ce qui avait été vu jusque-là : un disque plat d'un diamètre d'environ 70 000 parsecs (soit un peu plus de 200 000 années-lumière) avec le Soleil très éloigné du centre. Les deux analyses ne tinrent pas compte de l'absorption de la lumière par la poussière interstellaire (phénomène appelé extinction) présente dans le plan galactique, mais après que Robert Jules Trumpler eut quantifié cet effet en 1930, en étudiant les amas ouverts, l'image actuelle de notre galaxie émergea.



## Les autres objets nébuleux

Vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Charles Messier établit un catalogue contenant 110 « nébuleuses », comme on appelait alors indistinctement les objets diffus observés dans le ciel. Ce catalogue fut suivi d'un plus grand, de 5 000 objets, établi par William Herschel. En 1845, Lord Rosse construisit un nouveau télescope qui fut capable de distinguer les nébuleuses elliptiques et spirales. Il essaya également de mettre en évidence des sources ponctuelles à l'intérieur de certaines nébuleuses, donnant ainsi crédit à la conjecture de Kant.



*Croquis de la Galaxie du Tourbillon M51, fait par Lord Rosse en 1845*



*Photographie de la « Grande nébuleuse d'Andromède » (M31 ou NGC 224) datant de 1899. On y reconnaît également ses deux galaxies satellites les plus brillantes, M32 et NGC 205*

En 1917, Herber Curtis observa des clichés de la supernova SN 1885A dans la « grande nébuleuse d'Andromède » (M31, dans le catalogue Messier). En cherchant dans la photographie, il trouva 11 novas de plus. Curtis remarqua que ces novas étaient en moyenne 10 magnitudes plus faibles que celle de notre galaxie. Grâce à ces résultats, il fut capable d'estimer la distance qui nous séparait d'elles à environ 150 000 parsecs. Il devint donc adepte de ce que l'on appelle la théorie des « univers-iles », avançant que les nébuleuses spirales sont en réalité des galaxies indépendantes, mais sa découverte resta peu diffusée.

En 1920, le « Grand Débat », concernant la nature de la Voie lactée, des nébuleuses spirales, et la taille de l'Univers, prit place avec comme principaux protagonistes Harlow Shapley et Herber Curtis. Pour renforcer son idée que la grande nébuleuse d'Andromède était une galaxie externe, Curtis nota l'apparence des lignes sombres s'apparentant aux nuages de poussière présents dans la Voie lactée, ainsi qu'un décalage de la lumière dû à l'effet Doppler-Fizeau. Le fait fut définitivement établi par Edwin Hubble au début des années 1920 en utilisant un nouveau télescope. Il fut capable de résoudre les parties externes de quelques nébuleuses spirales comme étant des collections d'étoiles individuelles et identifia quelques variables appelées céphéides, dont la période de variation de lumière est fonction de la luminosité absolue. Ceci permit ainsi d'estimer la distance nous séparant de ces nébuleuses : elles étaient bien trop lointaines pour faire partie de la Voie lactée. En 1936, Hubble créa un système de classification des galaxies qui est encore utilisé de nos jours : la séquence de Hubble.

## Composition

### Milieu interstellaire

#### La matière sombre

Dans les années 1970, on réalisa que la masse totale visible, dans les galaxies, des étoiles et du gaz, ne pouvait pas expliquer correctement la vitesse de rotation de celles-ci, qui est systématiquement anormalement élevée par rapport à ce qu'elle aurait dû être étant donné la masse visible dont les galaxies étaient composées. Ceci amena à postuler l'existence d'une nouvelle forme de matière, appelée matière sombre. Celle-ci n'émet aucun rayonnement, mais son existence est révélée par l'influence de son champ gravitationnel sur la dynamique des étoiles. Dès le début des années 1990, le télescope spatial Hubble apporta une grande amélioration dans les observations lointaines. Ces nouvelles observations permirent notamment d'établir que la matière sombre de notre Galaxie ne peut se composer uniquement d'étoiles faibles et petites. D'autres observations cosmologiques arrivent à la même conclusion, attestant l'idée que la matière sombre est une nouvelle forme de matière inconnue en laboratoire. Au sein des galaxies, la matière forme un halo sphérique plus étendu que la galaxie elle-même, et ayant un profil de densité dit en « sphère isotherme », c'est-à-dire décroissant comme l'inverse du carré de la distance au centre.

### Types et morphologie

**Il y a trois grands types de galaxies : les elliptiques, les spirales, et les irrégulières.** Une description détaillée des différents types de galaxies basée sur leur apparence est établie par la séquence de Hubble. Puisque la séquence de Hubble est entièrement basée sur la caractéristique morphologique visuelle, il arrive qu'elle ne tienne pas compte de caractéristiques importantes telles que le taux de formation d'étoiles (dans les galaxies starburst) ou l'activité du noyau (dans les galaxies actives). À l'époque de la réalisation de sa classification, Hubble pensait que les différents types de morphologies galactiques correspondaient à un degré d'évolution variable de ces objets, partant d'un état sphérique sans structure (type E0), puis s'aplatissant progressivement (type E1 à E7), avant de produire les bras spiralés (types Sa, Sb, Sc, ou SBa, SBb, SBc). Cette

hypothèse d'évolution a depuis été totalement invalidée, mais la dénomination en termes de « galaxie précoce » (*early-type galaxy* en anglais) pour les elliptiques et « galaxie tardive » (*late-type galaxy*) pour les spirales est par contre, toujours usitée.



*Les différents types de galaxies, selon la classification de Hubble : le type E correspond à une galaxie elliptique, le S à une galaxie spirale et le SB à une galaxie spirale barrée*

### Galaxies elliptiques

Le système de classification de Hubble compte les galaxies elliptiques sur base de leur excentricité (c'est-à-dire de l'aplatissement de leur image projetée sur le ciel), allant de E0 (presque sphérique) à E7 (fortement allongée), le chiffre suivant le « E » correspondant à la quantité  $10 \times (1 - b/a)$ , où  $a$  et  $b$  sont le demi grand axe et le demi petit axe de la galaxie telle qu'elle est observée. Ces galaxies ont un profil ellipsoïdal, leur donnant une apparence elliptique quel que soit l'angle de vue. Leur apparence montre peu de structures et elles ne possèdent pas beaucoup de matière interstellaire. Par conséquent, ces galaxies contiennent peu d'amas ouverts et ont un taux de formation d'étoiles peu élevé. Des étoiles plus anciennes et plus évoluées, tournant autour de leur centre de gravité commun de manière aléatoire, dominent donc ces galaxies. En ce sens, elles présentent une certaine similitude avec les amas globulaires, mais à plus grande échelle.

Les galaxies les plus grandes sont des elliptiques géantes. On pense que de nombreuses galaxies elliptiques se sont formées grâce à une interaction de galaxies qui ont fini par fusionner. Elles peuvent atteindre des tailles énormes (comparée aux galaxies spirales, par exemple). D'autre part, ces galaxies elliptiques géantes sont souvent trouvées au cœur des grands amas de galaxies. Les galaxies starburst sont souvent le résultat d'une collision des galaxies. La galaxie elliptique géante la plus proche de notre Galaxie est M87, dans la constellation de la Vierge, à 60 millions d'années-lumière.



*La galaxie elliptique géante ESO 325-G004*



*La galaxie spirale M63*



*Galaxie elliptique géante M104, appelée « Galaxie du sombrero »*

### **Galaxies spirales**



*La galaxie spirale barrée NGC 1300*



*M51 ou galaxie du tourbillon (whirlpool galaxy), composée de NGC 5194 à gauche et de sa petite sœur NGC 5195 à droite. La galaxie spirale M51 est dans la Constellation des Chiens de Chasse, sous l'extrémité de la queue de la Grande Ourse*

Les galaxies spirales forment la classe la plus emblématique des galaxies. Elles sont faites d'un disque en rotation et composé d'étoiles et de milieu interstellaire, avec un bulbe central d'étoiles généralement plus anciennes. De ce bulbe émergent des bras relativement brillants. Dans le schéma de classification de Hubble, les galaxies spirales correspondent au type *S*, suivi d'une lettre (*a*, *b*, ou *c*), qui indique le degré d'enroulement des bras spiraux ainsi que la taille du bulbe central. Une galaxie *Sa* est dotée de bras relativement mal définis et possède une région centrale relativement importante. En revanche, une galaxie *Sc* possède des bras très ouverts et bien tracés ainsi qu'un bulbe de petite taille. Dans les galaxies spirales, les bras spiraux forment une spirale logarithmique approximative, un schéma qui peut être, en théorie, le résultat d'un dérangement dans la masse d'étoiles rotative uniforme. Les bras spiraux tournent autour du centre, au même titre que les étoiles, mais avec une vitesse angulaire constante. Cela veut dire que les étoiles entrent et sortent des bras spiraux; les étoiles proches du centre galactique orbitent plus vite que les bras alors que les étoiles les plus externes se déplacent moins vite que les bras. On pense que les bras spiraux sont des zones où la densité de matière est plus haute, on peut donc les voir comme des « vagues de densité ». Lorsque les étoiles traversent un bras, la vitesse de chaque système stellaire est modifiée par les forces gravitationnelles supplémentaires exercées par une densité de matière plus élevée (cette vitesse retourne à la normale une fois que l'étoile ressort du bras). Cet effet est semblable à une « vague » de ralentissement sur une autoroute saturée en voitures. Les bras sont visibles à cause de leur teneur en étoiles jeunes et brillantes, dues à la forte densité de matière qui facilite la formation d'étoiles. Or les étoiles les plus lumineuses sont aussi les plus massives, et ont une durée de vie très brève (quelques millions d'années contre 10 milliards d'années pour le Soleil), aussi les zones les plus lumineuses sont-elles au voisinage des lieux de formation d'étoiles, les étoiles massives n'ayant pas le temps de s'en éloigner significativement lors de leur brève existence.

### **Galaxies spirales barrées**

La majorité des galaxies spirales ont une bande d'étoiles linéaire en leur centre, à partir de laquelle émergent les bras spiraux. Dans la classification de Hubble, elles sont désignées d'un *SB*, suivi d'une lettre minuscule (*a*, *b*, ou *c*), indiquent encore une fois la forme et la disposition des bras spiraux (de la même manière que les galaxies spirales non-barrées). On pense que les barres sont des structures temporaires qui peuvent survenir suite à un rayonnement de densité du cœur vers l'extérieur, ou suite à une interaction avec une autre galaxie faisant intervenir la force de marée. De nombreuses galaxies spirales barrées sont actives, cela est peut-être du gaz canalisé le long des bras. Notre propre galaxie est une grande galaxie spirale barrée d'environ 30 000 parsecs de diamètre et de 1 000 parsecs d'épaisseur. Elle contient approximativement  $2 \times 10^{11}$  étoiles et a une masse totale d'environ  $6 \times 10^{11}$  masses solaires.

## La plus grande galaxie spirale connue dans l'Univers représente 5 fois la taille de notre galaxie

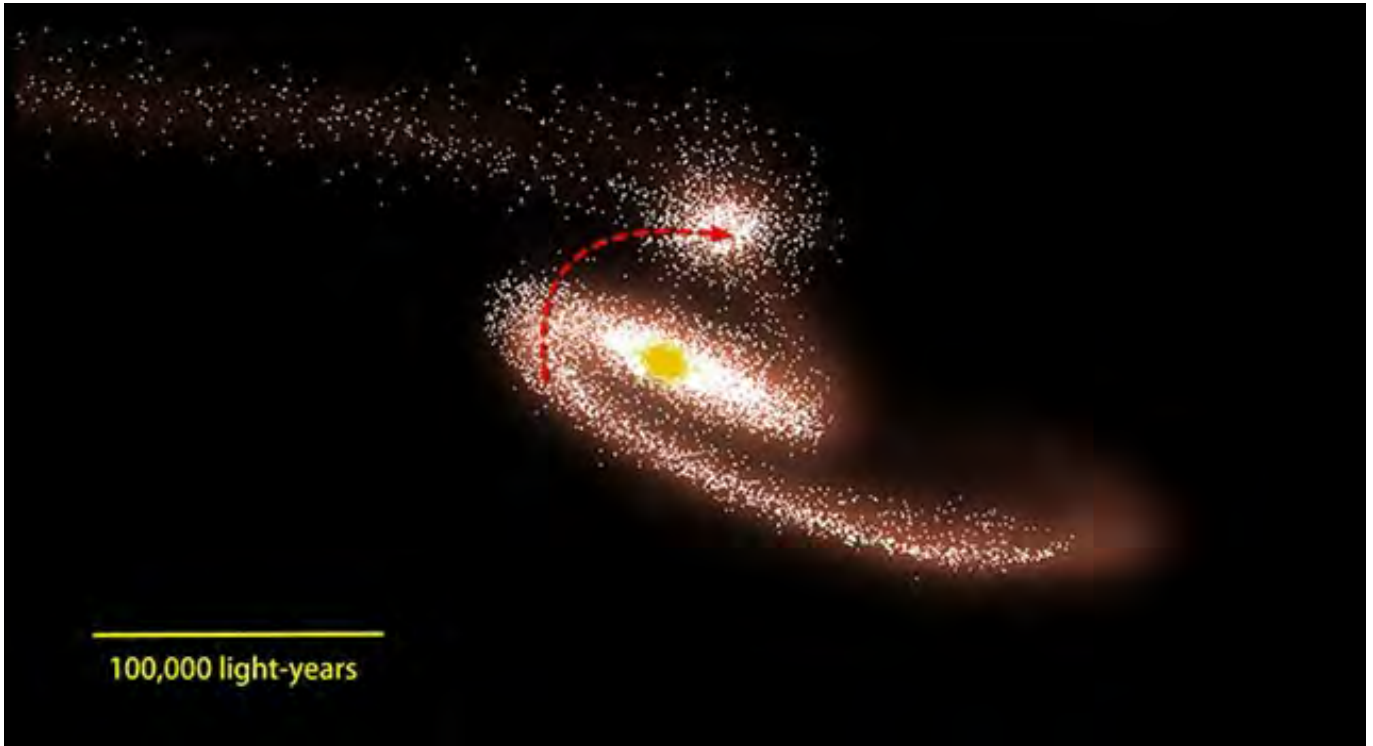


La galaxie spirale barrée NGC 6872 se classe parmi les plus grands systèmes stellaires depuis des décennies. Une équipe d'astronomes des États-Unis, du Chili et du Brésil lui a décerné le titre de la plus grande galaxie spirale connue dans l'univers, basée sur des données d'archives obtenues par la mission de l'observatoire spatiale GALEX (Galaxy Evolution Explorer). En mesurant la distance entre l'extrémité de ses deux bras en spirales, NGC 6872 s'étend sur plus de 522 000 années-lumière, ce qui fait plus de cinq fois la taille de notre Voie Lactée.

C'est notamment grâce à la capacité de GALEX à détecter la lumière ultraviolette des jeunes étoiles qui sont les plus chaudes. La taille et l'apparence inhabituelle de la galaxie sont dues à l'interaction qu'elle entretient avec une galaxie beaucoup plus petite appelée IC 4970 (juste au-dessus du centre de la grande galaxie NGC 6872 dans l'image), qui ne dispose que d'environ un cinquième de la masse de NGC 6872. Cet étrange couple est situé à 212 millions d'années-lumière de la Terre dans la constellation du Paon. Les astronomes pensent que les grandes galaxies, dont la nôtre, ont pris en volume et en masse suite à des fusions et à l'absorption de nombreux systèmes plus petits et cela sur des milliards d'années. Curieusement, l'interaction gravitationnelle de NGC 6872 et IC 4970 a peut-être fait le contraire, engendrant ce qui peut se développer en une nouvelle petite galaxie, encerclée de jaune dans l'image d'entête, une candidate "galaxie naine de marée" (galaxie en interaction). Selon le professeur d'astronomie et membre de l'équipe Duilia de Mello : « Le bras nord-est de NGC 6872 est le plus perturbé et ondulant avec la formation d'étoiles, mais à son extrémité, visible seulement dans l'ultraviolet, il y a un objet qui semble être une "galaxie naine de marée" (marée galactique) similaire à celles observées dans les autres systèmes en interaction ». Des simulations sur ordinateur de la collision entre NGC 6872 et IC 4970 reproduisent les caractéristiques de base des galaxies telles que nous les voyons aujourd'hui. Elles indiquent que la plus proche rencontre avec IC 4970 a eu lieu il y a 130 millions d'années et que la plus petite galaxie a suivi une trajectoire (la courbe en pointillés sur la représentation ci-dessous) à proximité du plan du disque de la spirale et qu'elle tourne dans le même sens.

Les chercheurs ont étudié la galaxie à travers le spectre en utilisant les données d'archives du Very Large Telescope (VLT) de L'Observatoire Européen Austral, du projet Two Micron All Sky Survey (2MASS), du télescope spatial Spitzer, ainsi que du GALEX. En analysant la distribution de l'énergie par longueur d'onde, l'équipe a découvert un modèle distinct de l'âge stellaire le long des deux bras proéminents de la galaxie spirale. Les plus jeunes étoiles apparaissent dans l'extrémité du bras nord-ouest, à l'intérieur de la candidate naine de marée et les âges stellaires augmentent progressivement vers le centre de la galaxie. Le bras sud-ouest affiche la même tendance, ce qui est probablement relié à des vagues de formation d'étoiles déclenchée par la rencontre galactique. Une étude réalisée en 2007 présentait des simulations informatiques de la collision qui reproduit l'apparence globale du système telle que nous l'observons aujourd'hui. Selon la meilleure estimation, IC 4970 s'est le plus rapproché il y a environ 130 millions d'années, elle a suivi un chemin qui l'a amené près du disque de la spirale et elle tourne dans le même sens. L'étude actuelle est conforme à cette image.

Comme dans toutes les spirales barrées, NGC 6872 contient une barre, composée d'étoiles, qui fait la transition entre les bras spiraux et les régions centrales de la galaxie. Elle mesure environ 26 000 années-lumière de rayon, soit environ deux fois la longueur moyenne des spirales barrées trouvées aux alentours. L'équipe n'a trouvé aucun signe récent de formation d'étoiles le long de la barre, ce qui indique qu'elle s'est formée il y a au moins quelques milliards d'années. Ses vieilles étoiles fournissent une trace fossile de la population stellaire de la galaxie avant la rencontre avec IC 4970 qui a un peu tout chamboulé.



La candidate “naine de marée” (galaxie en interaction) est plus lumineuse dans l’ultraviolet que les autres régions de la galaxie, le signe qu’elle porte de nombreuses jeunes étoiles chaudes âgées d’à peine 200 millions d’années

### Morphologies particulières



L’objet de Hoag, une galaxie annulaire



La galaxie lenticulaire NGC 5866

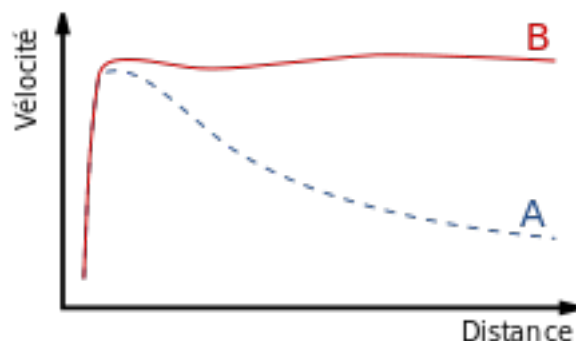
Les galaxies particulières sont des formations galactiques développant des propriétés inhabituelles dues à des interactions gravitationnelles avec d’autres galaxies, les forces de marée, responsables de ces déformations. Les galaxies annulaires, possédant une structure formée d’étoiles et de gaz en forme d’anneau autour du centre galactique, sont de bons exemples de galaxies particulières. Une galaxie annulaire peut se former lorsqu’une galaxie plus petite passe à travers le centre d’une galaxie spirale. Un tel évènement a pu se produire sur la galaxie d’Andromède, qui présente plusieurs anneaux en infrarouge. Une galaxie lenticulaire est une forme de transition, ayant à la fois les propriétés d’une galaxie elliptique et spirale. Dans la séquence de Hubble, elles portent la mention *SO*. Elles possèdent des bras, certes mal définis, et un halo d’étoiles elliptique<sup>30</sup> (les galaxies lenticulaires barrées sont de type *SB0*). En plus de morphologies mentionnées ci-dessus, il existe un certain nombre de galaxies qui n’entrent dans aucune de ces catégories. Il s’agit des galaxies irrégulières. Une galaxie « *Irr-I* » possède une certaine structure, mais n’est pas clairement apparentée à un type quelconque de la séquence de Hubble.

Les galaxies « *Irr-II* » ne possèdent aucune structure comparable à quoi que ce soit dans le schéma de Hubble, et peuvent même avoir été déchirées. Des exemples proches de galaxies irrégulières (naines) sont les nuages de Magellan.

### Galaxies naines

En dépit de la prééminence des grandes galaxies elliptiques et spirales, il semble que la plupart des galaxies de l'univers sont des galaxies naines. Ces galaxies minuscules ont une taille pouvant descendre à 1 % de celle de la Voie lactée, et contiennent seulement quelques milliards, voire quelques centaines de millions d'étoiles. Des galaxies naines ultra-compactes, qui ont été trouvées récemment, font seulement 100 parsecs de long. La majorité des galaxies naines orbitent autour d'une galaxie plus grande; la Voie lactée a au moins une douzaine de satellites nains, chiffre probablement inférieur au nombre total de satellites de ce type. Les galaxies naines peuvent elles-mêmes aussi être classées comme étant elliptiques, spirales, ou irrégulières.

### Rotation des galaxies



*Courbe de rotation galactique : prédite (A) et observée (B)*

Un graphique représentant la vitesse de rotation de la matière en fonction de la distance entre celle-ci et le centre galactique peut prendre deux formes, la courbe plate B étant la plus répandue. Analysons de plus près les formes des courbes de rotation. L'article cité en donne un grand nombre. Près du centre galactique, la vitesse est proportionnelle à la distance au centre galactique. La vitesse angulaire de rotation est donc constante comme dans un solide. La courbe devient ensuite parabolique, ce qui correspond à une densité de masse d'étoiles constante. Après le maximum, la courbe est généralement plate, la densité d'étoiles est décroissante. Enfin, très loin du centre galactique où la densité d'étoiles est très faible, on retrouve les lois de Kepler, qui ne peuvent être vérifiées qu'en présence d'étoiles suffisamment lumineuses faisant partie de la galaxie en question.

### Activités exceptionnelles



*Les Galaxies des Antennes, une paire de galaxies en interaction allant probablement fusionner dans 400 millions d'années*

### Interaction

La distance moyenne séparant les galaxies dans un amas est relativement petite. Par conséquent, les interactions entre galaxies sont assez fréquentes, et jouent un rôle important dans leur évolution. Lorsque deux galaxies se manquent de peu, elles subissent néanmoins des déformations dues à la force de marée, et peuvent échanger une certaine quantité de gaz et de poussière. Les collisions se produisent lorsque deux galaxies passent directement l'une à travers l'autre et ont un moment angulaire relatif suffisant pour ne pas fusionner. Les étoiles de ces galaxies en interactions subiront la traversée sans entrer en collision les unes avec les autres. Cependant, le gaz et la poussière présents dans les deux galaxies interagissent. Cela peut déclencher un sursaut de formation d'étoiles car le milieu interstellaire a été dérangé et comprimé. Une collision peut sévèrement distordre les deux galaxies, formant des structures s'apparentant à des barres, des anneaux, ou des longues queues.

L'interaction la plus violente est la fusion galactique. Dans ce cas, le moment relatif des deux galaxies est insuffisant pour leur permettre de se libérer de l'emprise de l'autre et de poursuivre leurs routes respectives. Au lieu de ça, elles fusionneront graduellement pour former une galaxie unique, plus grande.



*Rencontre et/ou fusion entre les galaxies NGC 2207 et IC2163*

Les fusions apportent d'énormes changements à la morphologie des deux galaxies de départ. Cependant, dans le cas où l'une des deux galaxies est beaucoup plus massive que l'autre, on assiste à un phénomène de cannibalisme. Dans ce cas, la galaxie la plus grande restera relativement inchangée tandis que la plus petite sera déchirée à l'intérieur de l'autre. La Voie lactée est actuellement en train d'absorber de la sorte la Galaxie Elliptique Naine du Sagittaire et la Galaxie Naine du Grand Chien.

#### **Galaxies 'Starburst'**



*M82, l'archétype des galaxies starburst*

Les étoiles sont créées dans les galaxies à partir du gaz froid qui s'est formé dans les nuages moléculaires géants. Certaines galaxies, les *galaxies starburst*, ont un taux de formation d'étoiles vertigineux. Toutefois, si elles continuaient à fonctionner ainsi, ces galaxies épuiserait leurs réserves de gaz en un laps de temps inférieur à leur durée de vie. Par conséquent, un tel événement ne dure en général que 10 millions d'années, ce qui est relativement court par rapport à l'histoire de la galaxie. Les galaxies starburst étaient plus communes dans le passé, et contribuent actuellement d'environ 15 % au taux de formations d'étoiles total. Les galaxies starburst sont caractérisées par de fortes concentrations de gaz et de poussière ainsi qu'un nombre élevé de jeunes étoiles. Les plus massives d'entre elles ionisent les nuages environnants et créent des régions HII. Ces étoiles massives finissent en supernovas, produisant ainsi un rémanent qui interagit avec le gaz environnant. Cela enclenche une réaction en chaîne de formation d'étoiles qui se propage à travers toute la région gazeuse. Un tel sursaut d'étoiles ne prend fin que lorsque le gaz disponible est consommé ou dispersé.

Les starburst sont souvent associés avec les galaxies en interaction ou en fusion. L'exemple-type de galaxie subissant un starburst est M82, qui a récemment interagit avec M81, de taille supérieure. Les galaxies irrégulières présentent souvent des nœuds où le taux de formation est particulièrement élevé.



## Noyau actif



M87, une radiogalaxie elliptique émettant un jet de particules

Certaines galaxies sont dites actives. Cela veut dire qu'une partie significative de l'énergie totale est émise par des sources autres que les étoiles, la poussière, ou le milieu interstellaire. Le modèle standard décrivant une galaxie est basé sur le disque d'accrétion présent autour du trou noir supermassif de la galaxie. Le rayonnement issu des galaxies actives provient de l'énergie potentielle gravitationnelle de la matière lorsqu'elle tombe du disque vers le trou noir. Environ 10 % de ces objets présentent une paire de jets de particules dont la vitesse est proche de celle de la lumière. Les galaxies actives émettant un rayonnement hautement énergétique sous forme de rayons X sont appelées galaxies de Seyfert ou quasars, selon leur luminosité. On pense que les blazars sont des galaxies actives émettant des jets pointés vers la terre. Une radiogalaxie émet un rayonnement situé dans les ondes radio depuis ses jets. Un modèle unificateur explique que les différences entre les divers types de galaxies actives ne sont dues qu'à l'angle de vue de l'observateur.

### Formation et évolution

L'étude de la formation et de l'évolution galactique permet d'esquisser des réponses aux questions concernant l'évolution des galaxies à travers l'histoire de l'univers. Dans ce domaine, quelques théories sont devenues largement acceptées, mais c'est encore un champ très actif de l'astrophysique. Des travaux récents laissent penser que les premières galaxies se seraient formées plus tôt que prévu (une galaxie lointaine contenant des étoiles âgées de 750 millions d'années se serait ainsi formée 200 millions d'années environ après le Big Bang).

### Formation

Les modèles cosmologiques actuels décrivant la formation de l'univers sont basés sur la théorie du Big Bang, selon laquelle l'espace-temps, et avec lui toute la matière et l'énergie composant l'univers, a jailli dans une expansion sans commune mesure, alors qu'il était comprimé à une taille infinitésimale. Environ 300 000 ans après cet événement initial, la température avait baissé suffisamment pour permettre la formation des atomes d'hydrogène et d'hélium, dans un phénomène appelé Recombinaison. Presque tout l'hydrogène était neutre (non-ionisé) et absorbait donc la lumière, les étoiles ne s'étaient pas encore formées; pour cette raison, cette période porte le nom d'Âge sombre. C'est à partir des fluctuations de densité (ou irrégularités anisotropiques) que les plus grandes structures de la matière commencèrent à se former. Des agglomérations de matière baryonique se condensèrent à l'intérieur de halos de matière noire froide. Ces structures primordiales finiront par devenir les galaxies que nous observons aujourd'hui. Des preuves de l'apparence des galaxies primordiales ont été trouvées en 2006, lorsque l'on a découvert que la galaxie IOK-1 avait un décalage vers le rouge anormalement élevé de 6,96, ce qui correspond à seulement 750 millions d'années après le Big Bang, ce qui en fait l'objet le plus lointain jamais observé. Bien que certains scientifiques aient déclaré que d'autres objets (tels que Abell 1835 IR1916) possédaient des *redshifts* encore plus haut (reflétant donc l'univers à des époques encore antérieures), l'âge et la composition de IOK-1 sont établis avec plus de fiabilité. L'existence de telles protogalaxies suggère qu'elles ont dû se développer durant l'Âge sombre.

### Évolution

Un milliard d'années après la formation de la galaxie, des structures clés commencent à apparaître : des amas globulaires, le trou noir supermassif central et le bulbe galactique constitué d'étoiles de population II. La création d'un trou noir supermassif semble jouer un rôle majeur car il régule activement la croissance des galaxies en limitant la quantité totale de matière ajoutée. Durant cette époque, les galaxies subissent un sursaut majeur de formation d'étoiles. Durant les deux milliards d'années suivantes, la matière accumulée s'installe dans le disque galactique. Une galaxie continuera d'absorber les matériaux environnants (présents dans les nuages interstellaires rapides et dans les galaxies naines) durant toute sa vie. Ces matériaux se constituent principalement d'hydrogène et d'hélium. Le cycle de naissance et de mort des étoiles augmente lentement la quantité de matériaux lourds, ce qui peut éventuellement mener à la formation de planètes. L'évolution des galaxies peut être fortement affectée par une interaction ou une collision. Les fusions de galaxies étaient fréquentes dans le passé, et la majorité

des galaxies avaient des morphologies particulières. Étant donnée la distance entre les étoiles, la grande majorité des systèmes stellaires ne seront pas dérangés par une collision. Cependant, le déchirement gravitationnel de gaz et de poussière interstellaire produit une longue traînée d'étoiles. De telles structures, causées par la force de marée, peuvent être vues sur les Galaxies des Souris ou des Antennes.



*I Zwicky 18 (en bas à gauche) ressemble à une galaxie récemment formée*

La Voie lactée et la galaxie d'Andromède se rapprochent l'une de l'autre à la vitesse de 130 km/s, et pourraient bien entrer en collision dans 5 à 6 milliards d'années. Bien que la Voie lactée ne soit jamais entrée en collision avec une grande galaxie comme Andromède, le nombre de preuves de collision de la Voie lactée avec des galaxies naines augmente.

De telles interactions à grande échelle sont rares. Dans le passé, les fusions de deux systèmes de taille égales devinrent moins fréquentes. La plupart des galaxies brillantes sont restées pratiquement inchangées durant les derniers milliards d'années, et le taux net de formation d'étoiles a probablement atteint son maximum il y a approximativement 10 milliards d'années.

### Tendances futures

À présent, la plupart des étoiles se forment dans les petites galaxies, où le gaz froid n'est pas épuisé. Les galaxies spirales, comme la Voie lactée, produisent des étoiles de nouvelles générations tant qu'elles ont des nuages d'hydrogène moléculaire denses. Les galaxies elliptiques déjà en grande partie dépourvues de ce gaz ne forment donc pas d'étoiles. Les réserves de matière créant les étoiles sont limitées : une fois que les étoiles ont converti tout l'hydrogène disponible en éléments plus lourds, la formation de nouvelles étoiles prendra fin. L'époque actuelle d'étoiles naissantes devrait continuer durant encore cent milliards d'années. Mais l'« Ère Stellaire » s'arrêtera dans dix à cent mille milliards d'années ( $10^{13}$  à  $10^{14}$ , lorsque les étoiles les moins massives (et donc celles qui ont la plus grande durée de vie), les minuscules naines rouges, d'environ 0,08 masse solaire, finiront leur « combustion » et s'effondreront. À la fin de l'Ère Stellaire, les galaxies ne seront composées que d'objets compacts : des naines brunes, des naines blanches en train de se refroidir (qui, une fois froides, deviennent des naines noires), des étoiles à neutrons, et des trous noirs; ainsi que des planètes et divers planétésimaux. Ensuite, toute la matière tombera dans les trous noirs centraux ou sera dispersée dans l'espace intergalactique.

### Structures à plus grande échelle

Le **Sextette de Seyfert** est un groupe de galaxies situé dans la constellation du Serpent à environ 200 millions d'années-lumière de la Voie lactée. En apparence constitué de six galaxies, il n'en contient en fait que cinq, dont seulement quatre sont en interaction :

- NGC 6027 est la plus brillante du groupe, une galaxie lenticulaire à peu près au milieu de l'ensemble (en bas sur l'image ci-contre),
- NGC 6027a est une galaxie spirale au halo diffus reconnaissable à sa ceinture de poussières,
- NGC 6027b est quasiment en contact avec les deux précédentes (oblique sur l'image ci-contre),
- NGC 6027c est une galaxie spirale barrée bien dessinée vue pratiquement par la tranche,
- NGC 6027d est une galaxie spirale vue du dessus bien plus éloignée que les quatre précédentes (près d'1,2 milliard d'années-lumière selon d'anciennes mesures) et qui n'entre donc pas en interaction avec les autres membres du groupe,
- NGC 6027e (en bas à droite) n'est pas une galaxie mais simplement une queue de marée issue de NGC 6027 par effet de marée galactique.

Le Sextette de Seyfert est l'un des groupes de galaxies les plus compacts connus — l'ensemble tient en moins de 100 000 années-lumière, c'est-à-dire la largeur de la Voie lactée — et est l'un des plus isolés. Chacune des galaxies en interaction a une largeur qui n'excède pas 35 000 années-lumière.



*Le Sextette de Seyfert est un exemple de groupe de galaxies compact*

La plupart des galaxies sont gravitationnellement reliées à un certain nombre d'autres. Les groupes de galaxies sont les types de groupes galactiques les plus courants dans l'univers, et ceux-ci contiennent la majorité des galaxies (et donc la majorité de la masse baryonique) présentes dans l'univers. Ils comportent quelques dizaines de membres. La Voie lactée fait ainsi partie d'un groupe de galaxies appelé Groupe local dont elle est le membre le plus massif avec la Galaxie d'Andromède (M31), ses autres membres étant de masse nettement plus faible. Lorsqu'une concentration de galaxies contient plus d'une centaine de galaxies situées dans une zone de quelques mégaparsecs, elle est alors appelée amas. Les amas de galaxies sont souvent dominés par une galaxie elliptique géante. Avec le temps, celle-ci détruit ses satellites, qui viennent ajouter leur masse à la sienne, par le biais des forces de marée. L'amas auquel appartient le Groupe local est appelé amas de la Vierge, du nom de la constellation dans laquelle se trouve son centre. Les superamas contiennent des dizaines de milliers de galaxies, elles-mêmes isolées ou regroupées en amas et en groupes. À l'échelle des superamas, les galaxies seraient disposées en feuilles et en filaments, laissant entre eux d'immenses vides. À une échelle supérieure, l'Univers semble être isotrope et homogène. Groupes, amas et superamas ne sont pas des structures figées. Les galaxies qui les composent interagissent entre elles, et sont susceptibles de fusionner. D'autres galaxies peuvent y naître à partir de la matière présente non encore condensée en galaxies.

### Observations à longueurs d'onde multiple

Initialement, la majorité des observations se faisaient en lumière visible. Comme les étoiles rayonnent le gros de leur lumière dans ce domaine du spectre électromagnétique, l'observation des étoiles formant les galaxies externes à la Voie lactée est un composant majeur de l'astronomie optique. En outre, elle est également utile à l'observation des régions HII ionisées et des bras poussiéreux. La poussière présente dans le milieu interstellaire est opaque à la lumière visible. Par contre, elle devient plus transparente dans l'infrarouge lointain; celui-ci peut donc être utile à l'observation de l'intérieur des nuages moléculaires géants et des noyaux galactiques. L'infrarouge peut aussi être utilisé pour observer les galaxies distantes et décalées vers le rouge qui se sont formées tôt dans l'histoire de l'Univers. Comme la vapeur d'eau ainsi que le dioxyde de carbone absorbent des portions utiles du spectre infrarouge, les observatoires à infrarouges se situent en haute altitude ou dans l'espace. La première étude non-visuelle des galaxies, en particulier des galaxies actives, fut faite en ondes radio. L'atmosphère est en effet presque transparente aux ondes radio situées entre 5 Hz et 3 GHz (l'ionosphère terrestre bloque le signal en dessous de cette plage). De grands interféromètres radio ont été utilisés pour cartographier les jets émis par les galaxies actives. Les radiotélescopes peuvent aussi être utilisés pour observer l'hydrogène neutre (via la raie à 21 centimètres), incluant potentiellement, la matière non-ionisée des débuts de l'univers qui forma les galaxies en s'effondrant. Les télescopes à ultraviolet permettent de mieux mettre en évidence les étoiles chaudes, souvent massives et de durée de vie limitée, mettant ainsi en évidence le phénomène de formation d'étoiles dans les galaxies. Dans le domaine des rayons X, on observe la matière beaucoup plus chaude, notamment la distribution du gaz chaud au sein des amas de galaxies, ainsi que des phénomènes énergétiques au sein du cœur des galaxies où se trouve souvent un trou noir supermassif dont la présence est entre autres trahie par l'existence de volutes de gaz très chaud en train d'être englouties par le trou noir central.

## B) Notre galaxie, la Voie Lactée

### a) Description de la Voie Lactée

La **Voie lactée** (appelée aussi « **notre galaxie** », ou parfois simplement « **la Galaxie** », avec une majuscule) est la galaxie dans laquelle se situe le Système solaire (et donc la Terre). Elle est partiellement visible dans de bonnes conditions d'observation (en l'absence de pollution lumineuse), notamment sous les tropiques, sous la forme d'une bande plus claire dans le ciel nocturne. Comme nous sommes en son sein, et plus précisément à sa périphérie, il est difficile de connaître sa forme exacte, mais l'on sait qu'elle est assez semblable à celle de la galaxie d'Andromède. Il s'agit donc d'une galaxie spirale, mais il est difficile d'établir s'il s'agit d'une galaxie spirale ordinaire ou d'une galaxie spirale barrée, son noyau présentant une barre de faible extension découverte en 1991. Le type de spirale (*a*, *b* ou *c* selon le degré d'ouverture des bras) est lui aussi difficile à déterminer du fait que nous n'avons pas de vue externe de notre galaxie. Divers arguments favorisent des bras plutôt fermés (*b*) ou plutôt ouverts (*c*), aussi son type est-il considéré comme étant S(B)bc.

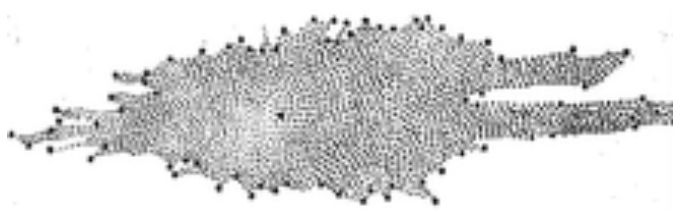
En tout état de cause, sa forme générale est un disque de plus de 100 000 années-lumière (30 kpc) de diamètre comportant un bulbe central, lui-même entouré d'un halo sphérique de faible densité de 100 000 al (30 kpc) de diamètre. Elle contient, selon les derniers relevés du télescope spatial Kepler, entre 200 et 400 milliards d'étoiles selon le consensus généralement accepté (234 milliards selon une récente estimation), dont le Soleil, pour une masse totale évaluée comprise entre quelques centaines et quelques milliers de milliards de masses solaires selon les estimations.

Compte tenu de la position très excentrée du Système solaire, les étoiles les plus éloignées de notre galaxie sont distantes d'environ 78 000 al (24 kpc), alors que l'étoile la plus proche du Soleil, Proxima Centauri, se trouve à 4,22 al. La dénomination « voie lactée » désignait d'abord uniquement la partie observable à l'œil nu de notre galaxie qui crée la bande blanchâtre tracée dans le ciel nocturne par le disque galactique, mais elle est maintenant fréquemment utilisée pour désigner toute notre galaxie : elle s'écrit alors « Voie lactée » avec une majuscule, comme la Galaxie (notre galaxie). Les scientifiques estiment que la Voie lactée s'est formée il y a 13,2 milliards d'années, soit l'âge approximatif de l'Univers.

### Étymologie du nom

Le nom de « Voie lactée » (*Galaxias* en grec) trouve son origine dans la mythologie grecque : Zeus, désirent rendre Héraclès immortel, lui fit téter le sein de Héra alors endormie. Celle-ci essaye d'arracher Héraclès de son sein, et y parvient en laissant une giclée de lait s'épandre dans le ciel, formant la Voie lactée.

*Observation du centre galactique à l'aide d'un laser,  
à l'unité Yepun du VLT de l'observatoire  
du Cerro Paranal, au Chili*



*Notre Galaxie vue par Caroline Herschel en 1785.  
Le Système solaire est supposé près du centre (ce que l'on  
sait être faux, de nos jours)*

Dans l'Antiquité, les premières observations des comètes donnent naissance à de nombreuses mythologies de la Voie lactée puis à des interprétations issues de la philosophie naturelle grecque. Aristote dans son traité *Du ciel* divise le cosmos en monde céleste, composé d'éléments sphériques parfaits et monde sublunaire avec ses objets imparfaits. Dans son traité des *Météorologiques*, il considère la *voie lactée* comme un météore atmosphérique placé dans la moyenne région sublunaire. Théophraste, disciple d'Aristote, regarde la Voie lactée comme le point de suture des deux hémisphères qui réunit et forme la sphère céleste; là où les hémisphères se rejoignent, elle est selon lui plus brillante qu'ailleurs. Mais Démocrite et Anaxagore, bien plus anciens, jugent que cette blancheur céleste doit être produite par une multitude d'étoiles, trop petites pour être aperçues distinctement. Cette conception stellaire de la Voie lactée est apparue en fait d'abord en Inde. La conception aristotélicienne reste valable en occident pendant le Moyen Âge, sauf pour certains savants comme Albert le Grand ou Averroès qui reprennent la théorie ptoléméenne : l'astronome grec, dans l'*Almageste*, donne à la voie lactée une origine stellaire. L'influence aristotélicienne reste prédominante en occident jusqu'au XV<sup>e</sup> siècle bien que le philosophe alexandrin néoplatonicien Olympiodore le Jeune dès le VI<sup>e</sup> siècle réfute cette conception météorologique par deux arguments principaux : des planètes passent parfois devant la Voie lactée; la Voie lactée n'a aucun effet sur la parallaxe. Tandis que plusieurs astronomes arabes et perses du Moyen Âge penchent pour son origine stellaire. Al-Bīrūnī, astronome perse du début du XI<sup>e</sup> siècle, décrit la galaxie de la Voie lactée comme un rassemblement de nombreuses étoiles nébuleuses. Alhazen, réfute la théorie d'Aristote sur la Voie lactée en opérant une tentative d'observation et de mesure de la parallaxe et ainsi « détermina que parce que la Voie lactée n'a pas de parallaxe, elle est très éloignée de la Terre et n'appartient pas à son atmosphère ». Au début du XII<sup>e</sup> siècle, Avempace, astronome andalous, était d'avis que la Voie lactée est faite d'un grand nombre d'étoiles mais que la réfraction de l'atmosphère terrestre lui donne l'aspect d'un "voile continu", pour appuyer sa thèse, il se servit de la conjonction de Mars et de Jupiter qui a eu lieu en février 1117, et qui avait l'aspect d'une figure élancée, malgré l'aspect circulaire des deux planètes. L'observation à l'œil nu de la Voie lactée ne permet de distinguer qu'une très faible partie des étoiles dont elle se compose. Avec sa lunette astronomique, Galilée découvre dès 1610 que la Voie lactée est un nuage très dense d'étoiles mais considère à tort qu'elle n'est pas constituée de gaz (alors qu'il s'avérera qu'elle regorge de nombreuses nébuleuses). En 1750, le savant Thomas Wright, dans son ouvrage *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, étudie sa structure et imagine qu'elle forme un nuage aplati, disque parsemé d'étoiles parmi lesquelles se trouve le Soleil au centre. Deux autres cosmologues amateurs, Emmanuel Kant (*Histoire générale de la nature et Théorie du ciel* en 1755) et Jean-Henri Lambert (*Lettres cosmologiques de Lambert*) plus connus pour leurs traités de philosophie et de mathématiques, parviennent à la même période à des conclusions identiques. La preuve que les étoiles de notre galaxie sont des objets semblables au Soleil (et donc considérablement plus éloignés étant donné leur faible éclat) date du XIX<sup>e</sup> siècle avec les observations de l'astronome allemand Friedrich Bessel. La première tentative de décrire la forme de la Voie lactée et la position du Soleil au sein de celle-ci est effectuée par William Herschel en 1785 en dénombrant les étoiles dans différentes régions du ciel. Malheureusement, ne connaissant pas leur distance, il suppose pour élaborer son modèle quantitatif cinq groupes d'hypothèses de base dont plusieurs se révélèrent fausses (toutes les étoiles ont une même luminosité intrinsèque et leur distance décroît en proportion de leur magnitude apparente; absence d'extinction interstellaire). En 1845, Lord Rosse construit un télescope suffisamment puissant pour différencier des galaxies elliptiques des galaxies spirales. En 1920, une des conséquences du Grand Débat est la tentative de déterminer la nature elliptique ou spirale de la Voie lactée qui fait alors l'objet d'une quarantaine de modèles différents. Jacobus Kapteyn, en utilisant un raffinement de la méthode d'Herschel, propose un modèle en 1920 à l'image d'une petite galaxie elliptique d'environ 15 kiloparsecs de diamètre, avec le Soleil près du centre. La

mise en évidence du phénomène de rotation galactique par Jacobus Kapteyn en 1922 et d'extinction interstellaire par Robert Jules Trumpler en 1930 aboutissent à l'élaboration dans les années 1930 du modèle actuel de galaxie spirale avec un bulbe central.

### La place du Soleil dans la Galaxie



Coupe de la Voie lactée avec la position du Soleil

Les premiers travaux quantitatifs relatifs à la structure détaillée de notre Galaxie remontent à 1918 avec Harlow Shapley. En étudiant la répartition sur la sphère céleste des amas globulaires il parvint à l'image selon laquelle notre Galaxie était une structure symétrique de part et d'autre de son disque visible, et que son centre était situé dans la direction de la constellation du Sagittaire aux coordonnées approximatives de  $17^{\text{h}} 30^{\text{m}}$  et  $-30^{\circ}$ . Ainsi était-il établi que le Soleil ne pouvait être situé au centre de la Voie Lactée. Shapley est de ce fait considéré comme l'auteur d'une seconde révolution copernicienne. Dans son analyse, Shapley put estimer l'ordre de grandeur aujourd'hui admis pour l'extension de la Voie lactée : plusieurs dizaines de milliers de parsecs. Une dizaine d'années plus tard, Bertil Lindblad puis Jan Oort montrèrent indépendamment que les étoiles de la Voie lactée tournaient autour du centre, mais selon une rotation différentielle (c'est-à-dire que leur période orbitale dépendait de leur distance au centre), et qu'un amas globulaire et certaines étoiles ne tournaient pas à la même vitesse que le disque lui-même, suggérant fortement une structure en spirale.

### La structure spirale

La mise en évidence explicite de la structure spirale de la Voie lactée eut lieu en 1953 quand furent mis en évidence les trois premières portions de bras spiraux au voisinage du Soleil, par les statistiques de position et de distance de plus de 1 000 étoiles géantes bleues proches. La structure spirale globale de la Voie lactée fut mise en évidence peu après, à l'aide de l'étude de la galaxie par la raie à 21 centimètres prédite en 1944 par Hendrik van de Hulst et résultant de la présence d'hydrogène atomique dans le milieu interstellaire; ce rayonnement fut observé en 1951 par Edward Mills Purcell et Harold Ewen et utilisé pour cartographier en détail notre Galaxie à partir de 1954 par les Hollandais Hendrik van de Hulst, C. A. Muller et Jan Oort, Gart Westerhout et M. Schmidt. D'un point de vue plus visuel, c'est la comparaison faite en 1955 entre des photographies panoramiques de la Galaxie et celles d'autres galaxies spirales vues par la tranche (comme NGC 891) qui achevèrent de donner l'aperçu de sa forme.

### Type de spirale

L'observation des autres galaxies montre que les galaxies spirales sont de plusieurs types : avec ou sans barre centrale, et avec des bras spiraux plus ou moins évasés (types  $Sa$  à  $Sc$ ). La position interne du Soleil dans notre Galaxie rend particulièrement difficile la détermination précise du type de spirale, et c'est autant en comparant certaines propriétés de notre Galaxie avec des galaxies extérieures de type connu que par l'observation directe que son type peut éventuellement être déterminé. Cette tâche n'est cependant à l'heure actuelle pas entièrement terminée. L'observation directe des bras spiraux dans le domaine visible favorise une spirale de type  $Sc$ . La taille du bulbe galactique, assez grande favorise par contre un type  $Sb$ , tout comme la quantité observée d'hydrogène atomique (HI). Par contre, la présence d'une région HII géante, W49 favorise elle, tout comme semble-t-il le taux de formation d'étoiles observé, un type  $Sc$ .

### Présence d'une barre

Une barre au voisinage du centre galactique a été découverte en Décembre 1991 par Leo Blitz et David Spergel, après avoir été soupçonnée dès 1979 par l'étude de la cinématique des régions HI situés à proximité du centre galactique. Cette découverte tardive s'explique en partie par le fait que la barre est vue de face, et a donc une taille angulaire minimale. Elle est de plus relativement petite, ce qui la rend d'autant plus difficile à séparer du bulbe.

### Le gauchissement de la Voie lactée

Le disque de la galaxie n'est pas parfaitement plat (voir la deuxième figure de la revue de presse de l'Université de Berkeley). Ce gauchissement a une amplitude de 20 000 al (6 kpc) dans la direction nord et de 3 000 al (1 kpc) dans la direction sud. Le gauchissement commence à 30 000 al (9 kpc) du centre galactique (ce qui est à peu près la distance du Soleil au centre de la galaxie, même si le gauchissement de la Voie Lactée ne fait pas de doutes, le fait qu'il commence à la distance du Soleil est un curieux hasard et des questions se posent quant à la présence d'un biais observationnel qui fausserait cette valeur). L'hydrogène neutre, la poussière, les molécules telles que le CO et les étoiles font partie de ce gauchissement.

## Observation à l'œil nu

*En France, à l'écart des lumières des grandes agglomérations, la Voie lactée est bien visible comme ici depuis la ville de Villard-de-Lans*



Visible depuis la Terre sous la forme d'une bande blanchâtre traversant la voûte céleste, le phénomène visuel de la Voie Lactée provient en majeure partie des étoiles et du gaz la composant. Si le nombre d'étoiles visibles à l'œil nu est faible (quelques milliers au plus dans de bonnes conditions d'observations), le nombre d'étoiles résolues augmente considérablement à l'aide d'un instrument d'observation (lunette astronomique ou télescope). Cependant, ayant une brillance de surface assez faible, la Voie lactée est relativement difficile à observer à l'œil nu à proximité des grandes villes, ou dans toute région souffrant de pollution lumineuse. Le plan de la Voie lactée n'est pas aligné avec celui de l'écliptique, mais incliné à environ 60° par rapport à celui-ci. Les deux se croisent au niveau des constellations des **Gémeaux** et, à l'opposé, du **Sagittaire**. La portion la plus épaisse de la Voie lactée est située dans le Sagittaire, correspondant au renflement du bulbe galactique, entourant le centre galactique. Le fait que la Voie Lactée divise le ciel nocturne en deux hémisphères quasi-égaux prouve que le Système solaire est proche du plan galactique, conclusion pour la première fois trouvée par Harlow Shapley en 1918. Les autres constellations traversées par la Voie lactée, sont, d'est en ouest partant des Gémeaux :

- Orion
- Le Taureau
- Le Cocher
- Persée
- Andromède
- Cassiopée
- Céphée
- Le Léopard
- Le Cygne
- La Lyre
- Le Petit Renard
- La Flèche
- L'Aigle
- Ophiuchus
- Le Serpent
- L'Écu de Sobieski

pour la partie au nord de l'écliptique.

Au sud de l'écliptique, elle traverse les constellations suivantes :

- La Couronne australe
- Le Scorpion
- L'Autel
- La Règle
- Le Loup
- Le Triangle austral
- Le Compas
- Le Centaure
- La Mouche
- La Croix du Sud
- La Carène
- Les Voiles
- La Poupe
- La Boussole
- La Licorne
- Le Grand Chien
- Les Gémeaux

Le nombre de constellations effectivement traversées par le disque de la voie lactée reste imprécis car dépendant de l'extension exacte que l'on donne au disque. Le disque de la Voie lactée demeure irrégulier par endroits. Cela est en partie dû aux hétérogénéités intrinsèques du disque, ainsi qu'à la présence plus ou moins marquée de gaz et de poussières interstellaires qui l'obscurcissent plus ou moins selon la direction d'observation. Plus précisément, c'est la distance qui nous sépare des régions de forte densité de poussières, appelées nébuleuses obscures, qui détermine l'éclat de la région observée. Les régions les plus denses se manifestent en été, saison la plus favorable à son observation. La portion la moins lumineuse de la Voie lactée est ainsi située à proximité de la constellation de la Croix du Sud, et porte le nom évocateur de Sac à Charbon, qui est une nébuleuse obscure à la fois étendue, dense, et relativement proche de nous (600 années-lumière environ). De plus, le disque de la Voie lactée apparaît légèrement voilé par endroit, conséquence probable d'interactions avec de petites galaxies voisines. Ainsi, le disque semble-t-il parfois posséder quelques excroissances, comme par exemple au niveau d'Ophiuchus (voir illustrations en tête d'article et ci-contre), du Loup et de Persée.

### Interprétations mythologiques

La présence de la bande lumineuse de la Voie lactée dans le ciel a bien sûr donné lieu à de nombreuses interrogations dans de nombreuses civilisations, qui ont souvent inclus la Voie lactée au sein de leur cosmogonie. Ainsi le terme de « Voie lactée » dérive-t-il de la mythologie grecque. Celle-ci expliquait sa présence par la légende d'Héraclès, héros mythologique né de l'union de Zeus et d'une mortelle, Alcmène. Pour lui assurer l'immortalité, Zeus avait mis Héraclès encore nourrisson au sein de son épouse Héra, profitant du sommeil de celle-ci, afin qu'Héraclès puisse devenir immortel en s'abreuvant de son lait. En se réveillant, Héra aperçoit cet enfant qui n'est pas d'elle et le repousse. Le lait qui jaillit encore de son sein se répand alors dans le ciel en une traînée blanchâtre qui forme la Voie lactée. Le terme de « galaxie » trouve d'ailleurs lui aussi racine dans cette légende, puisqu'il est emprunté au latin *galaxias*, lui-même emprunté au grec *γαλαξίας* signifiant « voie lactée » (en grec, *γαλακτος* signifie « lait »). Bien évidemment les interprétations mythologiques des autres civilisations sont radicalement différentes de celle-ci.

### Structure et composition



Image en fausses couleurs du proche infrarouge du centre galactique

Les observations du télescope spatial Spitzer datant de 2005 ont permis de réunir des preuves suggérant que la Voie lactée est une galaxie spirale barrée. Elle consiste en un noyau en forme de barre entouré par un disque de gaz, de poussières, et d'étoiles. Le disque galactique présente certaines structures de bras formant approximativement une spirale logarithmique. La distribution de masse à l'intérieur de la Galaxie ressemble fortement à celle d'une galaxie de type SBc, dans la classification de Hubble. Ce genre de galaxie présente en effet des bras vaguement morcelés. Ce fut seulement dans les années 1980 que les astronomes ont commencé à suspecter la Voie lactée d'être une galaxie spirale barrée plutôt qu'une spirale ordinaire, ce que le télescope spatial Spitzer a confirmé en 2005, montrant que la barre centrale de la Galaxie était plus grande que prévu. Cela plaide en faveur d'un classement du type SBbc. En 1970, Gérard de Vaucouleurs avait prédit que la Voie lactée était de type SAB(rs)bc, le « rs » indiquant la présence d'un anneau discontinu autour de la région centrale. La masse de la Voie lactée est estimée à  $5,8 \times 10^{11} M_{\odot}$ , étant composée de 200 à 400 milliards d'étoiles. Selon une étude d'astronomes du Caltech, chaque étoile de la Voie lactée peut abriter une planète, la galaxie étant composée d'au moins 100 milliards de planètes dont 17 milliards de taille terrestre (de type exoplanètes). Sa magnitude visuelle intégrée absolue a été estimée à -20,9. On pense que la plupart de la masse de la Galaxie (83 %) provient de la matière noire environnante, formant un halo galactique relativement homogène.

### Le centre galactique

Le diamètre du disque galactique, qui présente un renflement en son centre, est de 70 000 à 100 000 années-lumière. La distance séparant le centre du Soleil est, en 2013, estimée à  $(26\,000 \pm 1\,400)$  années-lumière. Autrefois, cette distance était estimée à 35 000 années-lumière. Le centre galactique abrite un objet compact de très grande masse (nommé Sagittarius A\*) qui est un trou noir supermassif dont la masse est égale à 4 millions de fois celle du Soleil. La plupart des galaxies contiendraient un tel trou noir en leur centre. La barre de la Galaxie est d'une longueur d'environ 27 000 années-lumière et est placée à  $44 \pm 10^{\circ}$  par rapport au segment Soleil - centre galactique. Il est principalement composé d'anciennes étoiles rouges, à savoir des naines et des géantes rouges). Cette barre est entourée par un anneau appelé « l'anneau de 5 kpc » (16 000 al). Celui-ci contient une grande partie de l'hydrogène moléculaire présent de la Galaxie et est sans doute la partie la plus active concernant la formation d'étoiles. Vu depuis la galaxie d'Andromède, ce serait l'élément le plus brillant de notre Galaxie.



*Panorama de la Voie lactée, le centre de la galaxie est visible au milieu de la photo*

### Les bras spiraux

Chaque bras décrit une spirale logarithmique (comme toutes les galaxies spirales) d'environ 12 degrés. Il y aurait quatre bras majeurs partant du centre de la Galaxie. En dehors des bras spiraux, il y a aussi l'Anneau extérieur ou l'Anneau de la Licorne, un anneau d'étoiles autour de la Voie lactée, comme le suggèrent les astronomes Brian Yanny et Heidi Jo Newberg, qui se compose de gaz et d'étoiles arrachées à d'autres galaxies, il y a quelques milliards d'années.



*Structure observée et extrapolée des bras spiraux*

#### Couleur

Cyan

Mauve

Vert

Rose

Orange

#### Bras

Bras de Persée

Bras de la Règle et du Cygne (avec une extension nouvellement découverte)

Bras Écu-Croix

Bras Sagittaire-Carène

*Il existe au moins deux petits bras ou aux embranchements, y compris :*

Bras d'Orion (qui contient le Système solaire)

Comme cela est le cas pour de nombreuses galaxies, la distribution de la masse au sein de la Voie lactée est telle que la vitesse orbitale de nombreuses étoiles de la Galaxie ne dépend pas fortement de leur éloignement avec le centre. Loin du bulbe central ou de la jante extérieure, la vitesse stellaire typique est entre 210 et 240 km/s. Ainsi, la période orbitale de l'étoile est directement proportionnelle à la longueur du chemin parcouru. Ce n'est pas comme dans le Système solaire, où les différentes

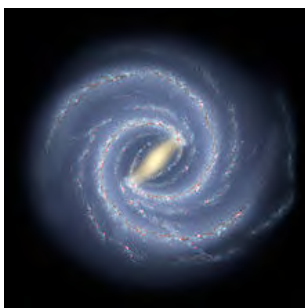


orbites sont censées avoir une vitesse propre. Cela est une preuve majeure en faveur de l'existence de la matière noire. Un autre aspect intéressant est le problème dit du « *Wind-up* » concernant les bras spiraux. Si l'on estime que les régions intérieures du bras tournent plus vite que la partie extérieure, alors la structure en spirale sera fortement amincie à cause de cette torsion. Mais les observations confirment que ce n'est pas le cas; de ce fait, les astronomes proposent que la forme des bras spiraux résulte d'une vague de densité de matière provenant du centre galactique. Ce phénomène peut être comparé à un embouteillage sur l'autoroute — toutes les voitures sont en mouvement, mais il y a des régions où la circulation est plus lente.

### Le halo

Le halo galactique est la composante sphéroïdale de notre galaxie située au-delà du bulbe; il représente 20 à 25 % de la masse galactique et est peuplé d'étoiles âgées de population II et d'une quantité importante de poussière et de gaz interstellaire, sur lesquelles se diffracte ou se réfléchit la lumière émise par les bien plus nombreuses étoiles du bulbe. Une quantité importante de cette matière interstellaire provient de l'explosion d'anciennes supernovae dans cette région.

### Rotation galactique



*Vue d'artiste de la Voie lactée, obtenue à partir des mesures de mouvements d'étoiles caractéristiques; notre galaxie est de type spirale avec un barreau dense autour du bulbe du centre galactique; le Système solaire est proche de la périphérie, dans un des « bras » de la spirale et, dans le ciel nocturne, on observe la traînée laiteuse de la « voie lactée » par sa tranche, plus dense en direction du centre galactique*

Les vitesses spatiales des étoiles sont déterminées :

- le long de la ligne de visée par leur vitesse radiale, dont la valeur est fournie par le déplacement des raies spectrales (mesure de l'effet Doppler-Fizeau);
- sur le plan tangent du ciel par les variations de l'ascension droite et de la déclinaison des étoiles sur de longues périodes (mesure des mouvements propres); la distance, mesurée par la parallaxe, permet de calculer les composantes de la vitesse tangentielle à partir des mouvements propres.

L'étude de ces vitesses montre que l'ensemble de notre galaxie est en rotation autour de son centre de masse, appelé centre galactique.

Les vitesses des différents objets se décomposent en :

- une vitesse de rotation circulaire autour du centre galactique, qui ne dépend que de la distance au centre galactique;
- une vitesse de mouvement propre; la vitesse particulière du Soleil est considérée par rapport à un ensemble d'étoiles voisines, appelé *centre local des vitesses* : elle est de 19,5 km/s vers la constellation d'Hercule ( $\alpha=18^h$ ,  $\delta=30^\circ$ ).

Les objets du halo ont une rotation lente et des orbites excentriques, alors que ceux du disque tournent rapidement. La partie située à moins de 2 000 al (600 pc) du centre galactique semble même tourner de façon solidaire à une vitesse angulaire uniforme, donc avec une vitesse linéaire proportionnelle à la distance du centre de notre galaxie.

Dans le reste du disque, où se trouve le Soleil, la vitesse angulaire des objets décroît tellement vite que la vitesse linéaire de rotation reste quasiment égale à 220 km/s depuis 3 200 al (1 kpc) du centre jusqu'à 50 000 al (15 kpc).

Ainsi, si la période de révolution galactique du Soleil, situé à 28 000 al (8,6 kpc) du centre galactique, est évaluée à 226 millions d'années, une étoile située à 3 200 al (1 kpc) fera le tour de notre galaxie en 26 millions d'années seulement. Le Système solaire aurait donc effectué entre 20 et 21 révolutions galactiques depuis sa formation voici 4,55 milliards d'années. Il semblerait qu'on ait sous-estimé la vitesse de rotation de notre galaxie. Les résultats publiés en 2009 d'un suivi des étoiles les plus brillantes de notre galaxie par un réseau de 10 radiotélescopes, laissent penser qu'au niveau du soleil, la galaxie tourne à une vitesse de 254 km/s, soit 15 % de plus que l'estimation précédente, ce qui pourrait signifier que la masse de la galaxie puisse aussi être revue à la hausse (peut-être de 50 %).

**Position du Soleil dans notre galaxie :** Le Soleil se trouve proche de la périphérie à environ 28 000 années-lumière (8,6 kpc) du centre galactique, mais à seulement 50 al du plan équatorial.

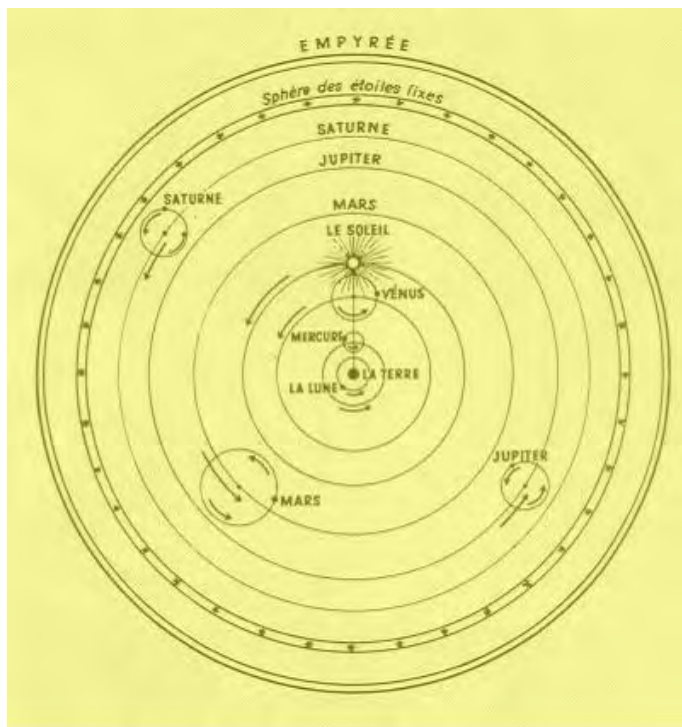
### b) Les exoplanètes

Dès que les hommes eurent compris que notre terre et les autres planètes du système solaire tournaient autour du soleil, notre étoile, et qu'une multitude d'autres étoiles existaient dans le ciel, ils se sont évidemment posé la question de savoir si ces autres étoiles avaient, elles aussi, des planètes en orbite, certaines d'entre elles étant susceptibles d'accueillir une forme de vie. Ils se sont donc mis en quête de découvrir ces planètes que nous appelons des exoplanètes (planètes en dehors du système solaire).

En astronomie, un **système planétaire** (parfois confondu avec système stellaire) est un système composé de planètes, ainsi que de divers corps célestes inertes tels des astéroïdes et comètes, gravitant autour d'une étoile (ou plusieurs). Le Système solaire est un exemple de système planétaire. Par extension, et de façon impropre, le terme « système solaire » est parfois employé

pour désigner d'autres systèmes planétaires. Le premier système planétaire découvert autour d'une étoile de type solaire en dehors du Système solaire est celui de l'étoile 51 Pegasi en 1995. Depuis ce temps, des centaines de planètes extra-solaires ont été découvertes.

### Historique : Jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle



Modèle géocentrique de Ptolémée



Modèle héliocentrique simplifié de Nicolas Copernic

Avant le XVI<sup>e</sup> siècle, le géocentrisme est le mode d'explication dominant du monde occidental. Au XVI<sup>e</sup> siècle, Giordano Bruno, partisan de l'héliocentrisme, met en avant une théorie selon laquelle les étoiles, tout comme le Soleil, sont accompagnées de planètes. Son entêtement à soutenir cette vision des choses (opposée au dogme lui vaudra l'excommunication et le bûcher en 1600. Ensuite, Kepler, Galilée et d'autres reprendront la vision héliocentrique (qui veut dire soleil au milieu) de Copernic. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, Isaac Newton fait de même dans le *General Scholium (en)*, la conclusion de ses *Principia* : « Et si les étoiles fixes sont les centres de systèmes semblables, ils seront alors tous construits selon le même concept ».

### XIX<sup>e</sup> siècle

Des revendications de découvertes d'exoplanètes sont faites depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Ainsi, en 1855, le capitaine W. S. Jacob de l'observatoire de Madras rapporte des anomalies observationnelles concernant l'étoile binaire 70 Ophiuchi, anomalies qui font que la présence d'un « corps planétaire dans ce système est hautement probable ». Dans les années 1890, Thomas J. J. See de l'Université de Chicago et de l'*United States Naval Observatory* énonce que les anomalies prouvent l'existence d'un corps sombre dans le système de 70 Ophiuchi, avec une période orbitale de 36 ans autour d'une des étoiles, bien que Forest Ray Moulton remette en doute ces affirmations de See dans un article publié en 1999.

### XX<sup>e</sup> siècle

Lors des années 1950 et 1960, Peter van de Kamp du *Swarthmore College* revendique la découverte de planètes en orbite autour de l'étoile de Barnard. De nos jours, les astronomes considèrent généralement tous les anciens rapports de détections comme erronés.

### Depuis les années 1990

En 1991, Andrew G. Lyne, M. Bailes et S.L. Shemar annoncent la découverte d'une planète de pulsar en orbite autour de PSR B1829-10, en utilisant la mesure des infimes variations de la périodicité des pulsars (en), qui permettent de calculer les principaux paramètres orbitaux des corps responsables de ces perturbations. L'annonce fait brièvement l'objet d'une attention intense, mais Lyne et son équipe la rétractent en 1992, invoquant des erreurs dans leur démarche.

La découverte des premières planètes extrasolaires d'un système planétaire autre que celui autour du Soleil est annoncée le 9 janvier 1992 par Aleksander Wolszczan et Dale Frail dans une publication de *Nature*. La découverte de ces planètes entourant le pulsar PSR B1257+12 est réalisée à partir d'observations prises en septembre 1990 par les installations du radiotélescope d'Arecibo.

Le 6 octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz annoncent la découverte de la première exoplanète en orbite autour d'une étoile de type solaire d'après des observations qu'ils ont réalisées à l'observatoire de Haute-Provence grâce à la méthode des vitesses radiales. L'étoile hôte est 51 Pegasi, dans la constellation de Pégase, à environ 40 années-lumière de la Terre.

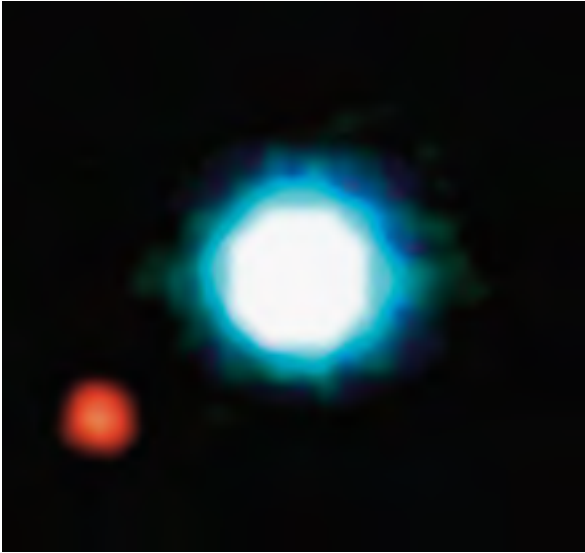


Image composite montrant 2M1207 b (en rouge) en orbite autour de son étoile 2M1207 prise par l'Observatoire européen austral

La première photographie optique d'une exoplanète est publiée le 13 novembre 2008 dans la revue *Science*. Prise par le télescope spatial Hubble et traitée par l'équipe de l'astronome Paul Kalas, la planète a une masse probablement proche de celle de Jupiter. Baptisée Fomalhaut b, elle est en orbite autour de l'étoile Fomalhaut dans la constellation du Poisson austral (Piscis Austrinus) à environ 25 années-lumière. Fomalhaut b est distante d'environ dix fois la distance séparant Saturne du Soleil. Cette découverte est annoncée en même temps et dans la même revue que celle de l'équipe de l'astronome canadien Christian Marois concernant la première observation directe, à 129 années lumière, d'un système solaire entier composé de trois planètes géantes photographiées dans l'infrarouge autour de l'étoile HR 8799.

### Caractéristiques physiques

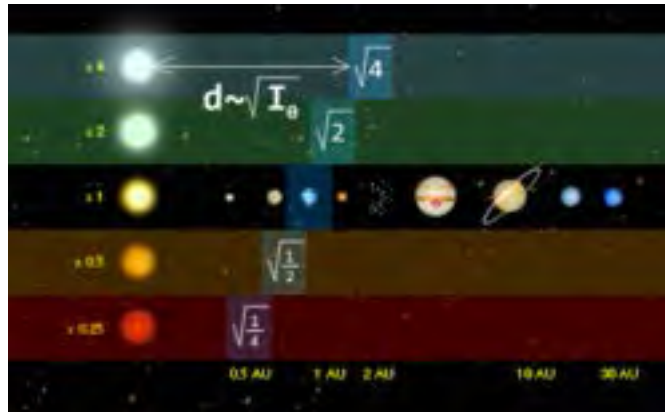
En général, un système planétaire se développe autour d'une étoile. Dans certains cas, on peut le retrouver autour d'un pulsar, d'une naine rouge ou d'une naine brune. La très grande majorité des systèmes planétaires connus jusqu'à présent n'est formée que d'une seule planète.

### Formation et évolution

Les systèmes planétaires seraient généralement formés lors de la naissance des étoiles. Ainsi, l'effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire formerait un disque protoplanétaire qui évoluerait par la suite en un système planétaire. Ce scénario de formation ne semble pas valide dans les cas de planètes de pulsar puisque ces derniers sont formés par des supernovae et qu'un système planétaire ne pourrait possiblement pas survivre à une telle explosion. Les planètes s'évapoureraient, seraient expulsées hors de leur orbite par les masses de gaz provenant de l'étoile qui explose ou s'échapperaient du champ gravitationnel de cette étoile centrale à cause de la soudaine perte de la majorité de la masse de cette dernière. Une hypothèse est que les planètes de pulsar pourraient se créer à partir du disque d'accrétion entourant un pulsar. La formation ou non de systèmes planétaires serait aussi reliée au type spectral d'une étoile. Ainsi, les étoiles avec une métallicité élevée ont plus de probabilités de former et de retenir des systèmes planétaires et leurs planètes ont tendance à être plus massives que les planètes orbitant autour d'étoiles de faible métallicité. De plus, les étoiles semblables au Soleil et ayant un système planétaire seraient prédisposées à être déficientes en lithium. Des observations faites par le télescope spatial Spitzer indiquent que la formation de planètes ne se produit pas autour d'autres étoiles dans les environs d'une étoile de classe O à cause de la photo-évaporation.

### Zone habitable

La zone habitable, ou zone d'habitabilité, est la région du système dans laquelle une exoplanète peut contenir de l'eau sous forme liquide et ainsi offrir des conditions favorables à l'émergence de la vie. En général, pour un système planétaire avec une étoile de la grosseur du Soleil, cette distance est semblable à celle de la Terre, soit 1 unité astronomique. Si l'étoile centrale est plus petite et moins lumineuse, cette distance sera plus petite et vice versa. Au début de l'année 2011, on estime qu'il existe environ une cinquantaine de planètes potentiellement habitables. La planète tellurique Gliese 581 g est considérée comme étant l'exoplanète la plus potentiellement habitable. À cet effet, lors d'une entrevue avec Lisa-Joy Zgorski de la *National Science Foundation*, Steven Vogt déclare « Je ne suis pas un biologiste, ni quelqu'un qui voudrait jouer ce rôle à la TV. Mais, selon moi, étant donné la propension qu'a la vie à s'épanouir partout où elle le peut, je dirais que la probabilité qu'il y ait de la vie sur Gliese 581 g est de 100 %. Je n'ai quasiment aucun doute à ce sujet. ».



Un exemple d'un système capable de calculer la position de la zone habitable selon la grosseur de l'étoile centrale

### Méthodes de détection

La majorité des systèmes planétaires ont été découverts dans un rayon de 300 années-lumière autour du Système solaire. Pour découvrir des systèmes planétaires, il faut détecter les exoplanètes orbitant autour de l'étoile. Il est très difficile d'y parvenir d'une manière directe, et ce, pour plusieurs raisons :

- une planète ne produit pas de lumière visible : elle diffuse celle qu'elle reçoit de son étoile.
- la distance qui sépare la Terre de l'étoile est beaucoup plus importante que celle qui sépare l'exoplanète et son étoile.

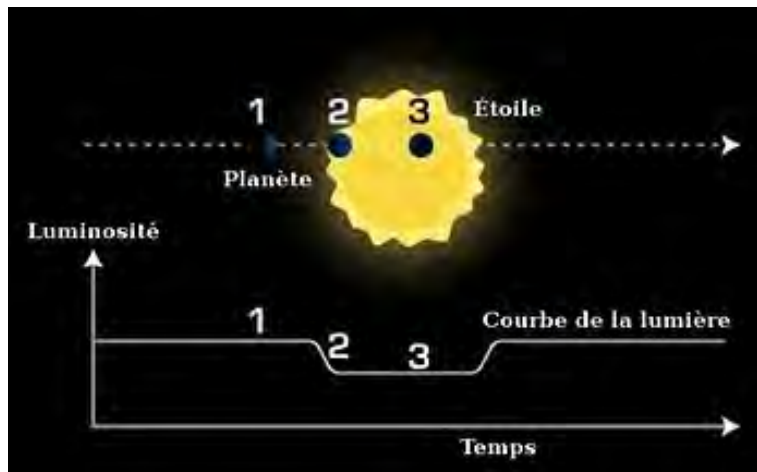
Le pouvoir séparateur des instruments de détection doit donc être très élevé pour pouvoir les distinguer.

Jusqu'à la fin des années 2000, les seules méthodes de détection sont des méthodes « indirectes », car elles ne détectent pas directement les photons venant de la planète.

### Par la vitesse radiale

Cette méthode est basée sur l'étude du spectre lumineux de l'étoile. Les mouvements d'un astre sont influencés par la présence d'une planète orbitant autour de lui, ce qui provoque un décalage périodique de sa position. Cela permet de déterminer la vitesse radiale grâce à l'effet Doppler-Fizeau. De la même manière que pour les binaires spectroscopiques, ceci donne des informations concernant la position de l'orbite et la masse de la planète. Puisque cette méthode de détection est plus performante pour des vitesses radiales élevées, les exoplanètes découvertes ainsi sont généralement très massives et situées très près de leur étoile. C'est par cette méthode que la plupart des planètes extrasolaires ont été détectées.

### Par le transit



Le transit de la planète devant son étoile fait varier la luminosité de cette dernière

Cette méthode de détection est basée sur l'étude de la luminosité de l'étoile. En effet, si celle-ci varie périodiquement, cela peut provenir du fait qu'une planète passe devant et occulte partiellement cette dernière lors d'un transit astronomique. Cette méthode permet du même coup d'étudier la composition de l'atmosphère de la planète en transit. Cette méthode de détection est proposée pour la première fois en 1951 par Otto Struve de l'Observatoire Yerkes de l'Université de Chicago. Elle est proposée à nouveau à deux reprises : en 1971 par Frank Rosenblatt de l'Université Cornell, puis en 1980 par William Borucki du *Ames Research Center* de la NASA, en Californie. Bien que la variation de luminosité d'une étoile soit plus facilement repérable que la variation de sa vitesse radiale, cette méthode se révèle peu efficace en termes de quantité de planètes détectées par rapport à la somme des étoiles observées. En effet, elle ne peut être utilisée que dans le cas où le système stellaire observé est positionné quasiment par la tranche par rapport au Système solaire. Si on considère des orientations aléatoires des systèmes planétaires, la probabilité géométrique de détection par cette méthode est inversement proportionnelle à la distance entre l'étoile et la planète. On estime à 5 % des étoiles avec une exoplanète la quantité détectable avec cette méthode. De plus, le transit astronomique peut être un phénomène rare. Ainsi, dans le Système solaire, les transits de Vénus et de Mercure ne peuvent être observés tout au plus que quelquefois par siècle.

### Par astrométrie

La méthode de détection par astrométrie repose sur la détection des perturbations angulaires de la trajectoire d'une étoile. Puisque ces perturbations sont limitées, la précision des instruments actuels n'est pas encore suffisante pour détecter un système planétaire par cette méthode. La mise en place de l'instrument d'interférométrie Prima du Very Large Telescope pourrait éventuellement permettre la détection de systèmes planétaires selon cette méthode.

### Par l'effet de microlentille gravitationnelle



*Microlentille gravitationnelle d'une planète extrasolaire*

Cette méthode s'appuie sur la courbure de la lumière émise par une étoile distante ou un quasar, lorsqu'un objet massif s'aligne « suffisamment » avec cette source, phénomène appelé « lentille gravitationnelle ». La distorsion de la lumière est due au champ gravitationnel de l'objet lentille, une des conséquences de la relativité générale, comme l'a décrit Albert Einstein en 1915. Il en découle un effet de lentille, formation de deux images déformées de l'étoile distante, voire davantage.

Dans le cas de la recherche d'exoplanètes, la planète cible, en orbite autour de l'étoile lentille, fournit une information supplémentaire, permettant de déterminer sa masse et sa distance de l'étoile. On parle de microlentille car la planète n'émet pas ou très peu de lumière. Cette technique permet d'observer des astres de masse même relativement faible, puisque les observations ne s'appuient pas sur la radiation reçue.

### Directe

L'utilisation combinée de systèmes de correction en temps réel appelés optique adaptative et de la coronagraphie a permis récemment d'observer une exoplanète directement à l'aide du VLT. D'énormes efforts sont consacrés actuellement à l'amélioration des techniques d'optique adaptative, de coronagraphie stellaire, et de traitement d'image, afin de développer une imagerie astronomique à très haut contraste capable de détecter des exoplanètes de la taille de la Terre.

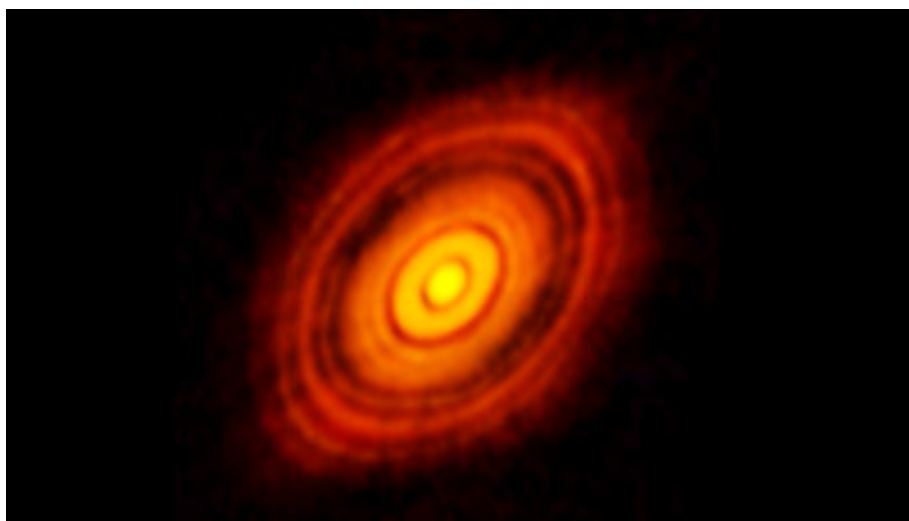
### Liste de systèmes planétaires notoires

Au 29 octobre 2014, on comptait **1 857 planètes** dont l'existence était annoncée (les 8 planètes du Système solaire et 1 849 exoplanètes) dans 1 161 systèmes planétaires dont 471 systèmes multiples (c'est-à-dire comportant plusieurs planètes). À celles-ci, il convient d'ajouter qu'il y a actuellement plus de 3 000 candidats supplémentaires en attente de confirmation, ce qui mène à environ 5000 planètes potentiellement connues. Ceci ne représente qu'un infime échantillon de toutes les planètes qui existent étant donné que notre propre galaxie, la Voie lactée, en compterait à elle seule plus de 100 milliards. Il est donc évidemment impossible de dresser la liste complète de l'ensemble des planètes existantes. La présente liste n'est par ailleurs pas définitive car, les techniques étant de plus en plus sophistiquées, de nouvelles planètes sont constamment découvertes.

Quelques exemples :

- Système solaire - Le Soleil et son système planétaire, le premier de la sorte à avoir été découvert.
- PSR B1257+12 - le premier véritable système planétaire extrasolaire, découvert en 1990, le premier système planétaire autour d'un pulsar, le premier système découvert comportant plusieurs exoplanètes.
- 51 Pegasi - avec 51 Pegasi b qui est la première exoplanète orbitant autour d'une étoile non-dégénérée, découverte en 1995. On pense qu'il s'agit en fait d'un système protoplanétaire, c'est-à-dire en cours de formation.
- Gliese 581 - avec l'exoplanète Gliese 581 g, une planète tellurique susceptible d'abriter la vie telle que nous la connaissons sur Terre.
- HD 10180 - système avec six planètes confirmées et une planète non confirmée, ce qui fait de lui le système planétaire avec le plus de planètes, à égalité avec Kepler-11 et Gliese 581, après notre Système solaire.
- Upsilon Andromedae - le premier système planétaire multiple découvert autour d'une étoile de la séquence principale.
- Epsilon Eridani - le système le plus proche.
- PSR B1620-26 - le premier système planétaire découvert comportant plusieurs étoiles.
- 55 Cancri - le premier système planétaire autre que le Système solaire où l'on a découvert 5 planètes en orbite.
- Gliese 876 - le premier système découvert autour d'une naine rouge et le premier découvert à avoir une résonance orbitale
- HD 69830 - contient trois planètes de masse semblable à Neptune et possède également une ceinture d'astéroïdes, tout ça dans l'espace d'une UA.
- 2M1207 - le premier système imagé et le premier autour d'une naine brune.
- Mu Arae - système avec le premier neptune chaud découvert.
- Kepler-11 - système avec six planètes confirmées.
- 16 Cygni - premier système planétaire à étoiles multiples (trois).

**1) Nouvelle découverte d'exoplanètes (publiée le 7/11/2014) effectuée par le radio-télescope de Alma au Chili**, composé de 66 antennes à plus de 5.000 mètres d'altitude. Ce projet gigantesque est le fruit d'un partenariat international entre l'Europe, les États-Unis et le Japon (en association avec le Chili) dont le coût est estimé à près de 1,5 milliard d'euros. Alma n'observe pas la lumière visible mais des ondes radio millimétriques émises par les objets froids (en l'occurrence des poussières à - 150 °C environ). Pour la première fois depuis la naissance du projet, au milieu des années 1990, et sa mise en service partielle, en 2011, Alma a observé dans sa configuration la plus puissante un disque de poussières entourant une étoile jeune, HL Tauri, située à 450 années-lumière. «Quand j'ai vu cette image, je me suis d'abord demandé si c'était une vue d'artiste ou le résultat d'une simulation, mais non, il s'agissait bien d'une observation réelle, s'enthousiasme Frédéric Gueth, directeur adjoint de l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram). Obtenir des images détaillées de ces objets était l'un des principaux objectifs d'Alma. Ce n'est pas une surprise d'obtenir un cliché aussi précis aujourd'hui mais un soulagement».



*Le radiotélescope Alma a effectué le premier cliché détaillé du disque de poussières qui entoure une jeune étoile située à 450 années-lumière de la Terre*

On distingue sur le cliché la structure en anneaux concentriques de ce disque protoplanétaire. Les trois cercles sombres principaux correspondent probablement aux orbites de planètes géantes en formation. On ne distingue pas les planètes elles-mêmes mais seulement le sillon qu'elles ont tracé en agrégeant ou en éjectant la matière qui s'y trouvait. L'étoile, au centre, est encore prise dans un grand nuage sphérique de poussières. C'est vraiment un astre très jeune, de poids similaire au Soleil il a 1 million d'années seulement (à comparer aux 4,5 milliards d'années de notre Soleil). Il est encore en phase de contraction. La matière ne s'est pas encore assez comprimée pour déclencher les réactions de fusion thermonucléaire qui la feront "brûler" comme le Soleil». C'est une petite surprise d'observer un disque protoplanétaire aussi structuré autour d'une étoile aussi jeune. Cela démontre une nouvelle fois que les processus à l'origine de la formation de planètes sont très communs. Notre système solaire est loin d'être une exception dans le cosmos. D'autre part, la résolution ne permet pas encore de distinguer ce qui se passe dans l'environnement le plus proche de l'étoile. Le disque ci-dessus est environ trois fois plus grand que notre système solaire. L'anneau sombre le plus proche de l'étoile correspond à une orbite comprise entre celle de Saturne et Jupiter. On ne sonde donc pas encore la zone où on s'attend à trouver les petites planètes dites "terrestres", mais on a un très bel aperçu du système planétaire "externe". Il s'agit néanmoins déjà d'un très joli résultat qui permet d'ajouter une pièce de plus dans le puzzle de la formation des planètes.

**2) Parallèlement, on annonce le 6 janvier 2015** que des chercheurs du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics et du JPL de la Nasa, entre autres, ont annoncé qu'ils ont **identifié six nouvelles planètes à cœur rocheux situées dans la zone d'habitabilité de leur étoile**, c'est-à-dire à une distance compatible avec l'existence d'eau liquide à leur surface. Ce n'est pas tant ces cas individuels qui sont intéressants mais leur accumulation progressive. Il reste en effet difficile de confirmer avec certitude l'existence d'une exoplanète particulière. **Le télescope spatial Kepler**, qui a permis de découvrir ces nouvelles exoplanètes, ne repère que les mini-éclipses provoquées par le passage d'une planète devant son étoile. Pour imaginer la prouesse, cela revient à détecter la baisse de luminosité d'un phare maritime lorsqu'un grain de sable passe dans son faisceau. Au bout de trois de ces transits, les chercheurs ont de bonnes raisons de penser qu'ils ont mis la main sur une planète. Mais ils n'en sont jamais sûrs à 100 %.

Parmi elles, deux semblent un peu plus intéressantes qui tournent autour de naines rouges plus petites et plus froides que notre soleil. La première, Kepler-438b serait 12 % plus grosse que la Terre et recevrait 40 % de lumière en plus. Elle tourne autour de son étoile en 35 jours seulement et a 70% de chances d'être rocheuse. Elle aurait aussi 70% de chances d'être dans une zone « habitable ». La seconde, Kepler-442b, serait 1/3 plus grosse que notre planète et recevrait une quantité d'énergie lumineuse supérieure des 2/3 à ce que la Terre reçoit. Elle tourne autour de son étoile en 112 jours et a 60% de chances d'être rocheuse et 97% de chances d'être dans une zone « habitable ». Pour être dans une zone habitable, la quantité de chaleur doit être ni trop chaude (sinon l'eau [peut-être présente] se mettrait à bouillir), ni trop froide sinon l'eau gèlerait. Evidemment, l'habitabilité n'est que supposée, on peut juste dire que ce sont des candidates prometteuses.

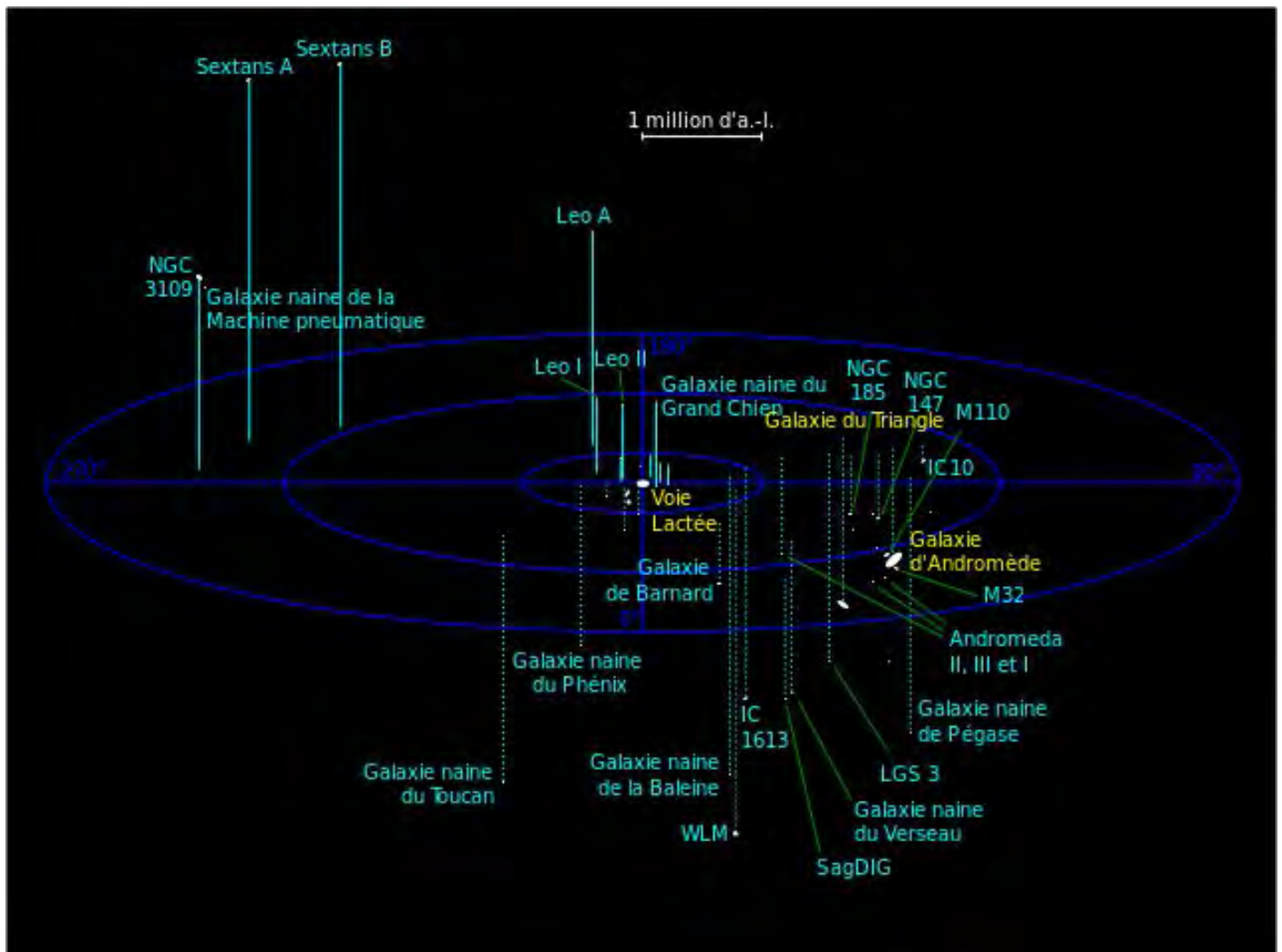
### Une confirmation délicate

La méthode classique pour confirmer l'existence d'une exoplanète consiste à détecter l'influence gravitationnelle qu'elle exerce sur son étoile. Mais pour des petites planètes situées assez loin de leur étoile, comme c'est le cas ici, cette mesure est très difficile à faire. Dans le cas d'étoiles peu lumineuses comme celles qu'a étudiées Kepler, c'est mission impossible. La seule solution consiste à écarter les autres scénarios astrophysiques pouvant expliquer une baisse périodique de la luminosité des étoiles observées par des analyses statistiques poussées. C'est ce qui a été fait ici. Selon les chercheurs, il y a ainsi plus de 99 % de chances pour que chacune de ces six nouvelles cousines existe vraiment. Suivant les critères statistiques plus ou moins restrictifs appliqués, cela porte à une dizaine le nombre de ces cousines potentielles de la Terre. Et il y en a vraisemblablement bien d'autres. Nous en avons déjà identifié une trentaine dans les données de Kepler. Les six mentionnées ici en faisaient justement partie.

### C) Les groupes de galaxies

*Notre Galaxie dans l'Univers* : Notre galaxie appartient à un groupe de galaxies appelé « groupe local ». Ce groupe appartient lui-même à un ensemble plus vaste appelé « l'amas de la Vierge ». Cet amas appartient lui-même (on ne le sait que depuis peu) à un « Super-amas » appelé Laniakéa.

**a) Le Groupe local** comprend deux grandes galaxies : la Voie lactée et la galaxie d'Andromède (aussi appelé M31), quelques objets intermédiaires et plus de 25 galaxies naines. Le Groupe local est organisé suivant deux sous-groupes, chacun centré sur la Voie lactée et M31 respectivement. La galaxie d'Andromède est la grande galaxie la plus proche de notre galaxie, à environ 2,5 millions d'années lumière mais il y a beaucoup de petites galaxies très proches. Nombre de galaxies naines du Groupe local sont des satellites ou des compagnons de la Voie lactée. La plus proche de toutes est la galaxie du Grand Chien, située à environ 25 000 années-lumière de nous et à 42 000 années-lumière du centre galactique, suivie respectivement par la galaxie du Sagittaire à 80 000 années-lumière, puis par le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan à 179 000 et 210 000 années-lumière respectivement. Il est fort probable que notre galaxie ait « avalé » une galaxie assez récemment dans son histoire, la Galaxie du Sagittaire; mais cette collision, dont l'étude est en cours, n'est pas encore bien modélisée. Notre Galaxie est également en orbite très elliptique autour de la galaxie d'Andromède avec laquelle elle devrait fusionner dans quelques milliards d'années. Cette future galaxie a déjà été baptisée : Milkomeda (de *Milk* : lait — en référence à *Milky Way*, c'est-à-dire la Voie lactée — et *Meda* — en référence à Andromeda).



Carte du Groupe local

Le Groupe local est l'ensemble d'une quarantaine de galaxies auquel appartient la Voie lactée. Son diamètre est d'environ 3 millions de parsecs (soit environ 10 millions d'années-lumière). Le Groupe local semble être un représentant typique des groupes de galaxies qui se trouvent dans l'univers. Il possède à peu près tous les types usuels de galaxies, à l'exception des galaxies elliptiques géantes qui ne sont jamais présentes dans des structures aussi petites.

### Historique

D'après l'historien des sciences américain Steven J. Dick, l'expression « Groupe local » est due à l'astronome allemand Walter Baade qui l'utilisa, le premier, en 1935, dans une publication relative à l'amas globulaire NGC 2419. L'expression est reprise, dès 1936, par l'astronome américain Edwin Hubble, dans le chapitre VI de son ouvrage *The Realm of Nebulae*. Hubble recense huit galaxies — la Voie lactée, le Grand Nuage de Magellan (LMC), le Petit Nuage de Magellan (SMC), la galaxie d'Andromède (M31), M32, NGC 205, la galaxie du Triangle (M33), la galaxie de Barnard (NGC 6822) et IC 1613 — et trois membres potentiels — IC 10 ainsi que NGC 6946 et IC 342. Alors que l'appartenance d'IC 10 au Groupe local sera établie en 1996, IC 342 en sera exclue en 2000. D'après Dick, c'est Baade qui utilisa, le premier, en 1944, l'expression « Groupe local de galaxies », dans une publication établissant l'appartenance au Groupe local de la galaxie irrégulière NGC 147 et de la galaxie naine sphéroïdale NGC 185. En 1963, Baade porte à dix-huit le nombre de galaxies du Groupe local, en ajoutant à la liste les galaxies du Dragon (*Draco*), du Fourneau (*Fornax*), du Lion I (*Leo I*), du Lion II (*Leo II*), du Sculpteur (*Sculptor*) et de la Petite Ourse (*Ursa Minor*) ainsi que la galaxie IC 5152 qui en sera exclue en 1999. Entre 1963 et 2000, la découverte de plusieurs galaxies naines fait passer le nombre à 38, avec un taux de découverte à peu près constant de quatre galaxies par décennie. Le nombre exact de galaxies du Groupe local est incertain du fait des difficultés de détection de ses membres les moins lumineux, et de l'incertitude sur l'extension physique réelle du Groupe local.

### Caractéristiques

Les deux membres principaux de ce groupe sont la galaxie d'Andromède (M31) et notre galaxie, chacune d'elles possédant son propre système de galaxies satellites. Autour de la Voie lactée, gravitent les deux nuages de Magellan et les galaxies du Grand Chien, du Sagittaire, de la Petite Ourse, du Dragon, de la Carène, du Sextant, du Sculpteur, du Fourneau, du Lion I, du Lion II et du Toucan. La galaxie naine du Grand Chien est la galaxie la plus proche de la nôtre, à environ 25 000 années-lumière de distance. Le système d'Andromède comprend M32, la M33, M110, NGC 147, NGC 185, Andromeda I, Andromeda II, Andromeda III et Andromeda IV. La galaxie du Triangle (M33), la troisième plus grande galaxie du Groupe local, possède probablement la galaxie naine des Poissons comme satellite. Les autres membres du Groupe local sont gravitationnellement indépendants de ces larges sous-groupes.

### Membres

La liste suivante énumère les membres du Groupe local, classés par distance croissante depuis la Terre :

Galaxie	Classe	Type	Distance	Sous-groupe	Luminosité (10 <sup>6</sup> soleils)
La Voie lactée (notre galaxie)	Spirale	Sb	0	Voie lactée	8 300
Galaxie naine du Grand Chien	Irrégulière	Irr	environ 7,7 kpc (~25 100 a.l.)	Voie lactée	20
SagDEG	Naine elliptique	dSph(t)	environ 24,4 kpc (~79 600 a.l.)	Voie lactée	18
Grand Nuage de Magellan	Irrégulière	Irr/SB(s)m	environ 48,5 kpc (~158 000 a.l.)	Voie lactée	2 100
Galaxie naine du Bouvier	Naine sphéroïde	dSph	60±6 kpc (~196 000 a.l.)	Voie lactée	?
Petit Nuage de Magellan	Irrégulière	SB(s)m pec	61±3 kpc (~199 000 a.l.)	Voie lactée	580
Galaxie naine de la Petite Ourse	Naine sphéroïde	dE4	environ 63 kpc (~205 000 a.l.)	Voie lactée	0,3
Galaxie naine du Dragon	Naine sphéroïde	dE0 pec	80±10 kpc (~261 000 a.l.)	Voie lactée	0,3
Galaxie naine du Sextant	Naine sphéroïde	dE3	86±6 kpc (~280 000 a.l.)	Voie lactée	0,5
Galaxie naine du Sculpteur	Naine sphéroïde	dE3	environ 87 kpc (~284 000 a.l.)	Voie lactée	2,2
Galaxie naine de la Carène	Naine sphéroïde	dE3	environ 100 kpc (~326 000 a.l.)	Voie lactée	0,4
Galaxie naine du Fourneau	Naine sphéroïde	dSph/E2	138±8 kpc (~450 000 a.l.)	Voie lactée	16
Leo II	Naine sphéroïde	dE0 pec	210±15 kpc (~685 000 a.l.)	Voie lactée	0,6
Leo I	Naine sphéroïde	dE3	250±25 kpc (~815 000 a.l.)	Voie lactée	4,8
Galaxie naine du Phénix	Irrégulière	Irr	environ 396 kpc (~1,29 millions d' a.l.)	Voie lactée	?
Galaxie de Barnard	Naine elliptique	IB(s)m IV-V	500±10 kpc (~1,63 millions d' a.l.)		94
NGC 185	Naine sphéroïde	dE3 pec	660±30 kpc (~2,15 millions d' a.l.)	Andromède	130
NGC 147	Naine elliptique	dE5 pec	660±30 kpc (~2,15 millions d' a.l.)	Andromède	130
IC 10	Irrégulière-Starbust	dIrr IV/BCD	660±60 kpc (~2,15 millions d' a.l.)	Andromède	?
Leo A	Irrégulière	IBm V	690±60 kpc (~2,25 millions d' a.l.)	Voie lactée	3
Andromeda II	Naine sphéroïde	dE0	environ 700 kpc (~2,28 millions d' a.l.)	Andromède	2,4
IC 1613	Irrégulière	IAB(s)m V	725±35 kpc (~2,36 millions d' a.l.)	Andromède/LC	64
Andromeda III	Naine sphéroïde	dE2	760±70 kpc (~2,48 millions d' a.l.)	Andromède	1,1
Galaxie naine de Cassiopée	Naine sphéroïde	dSph	760±70 kpc (~2,48 millions d' a.l.)	Andromède	5,7

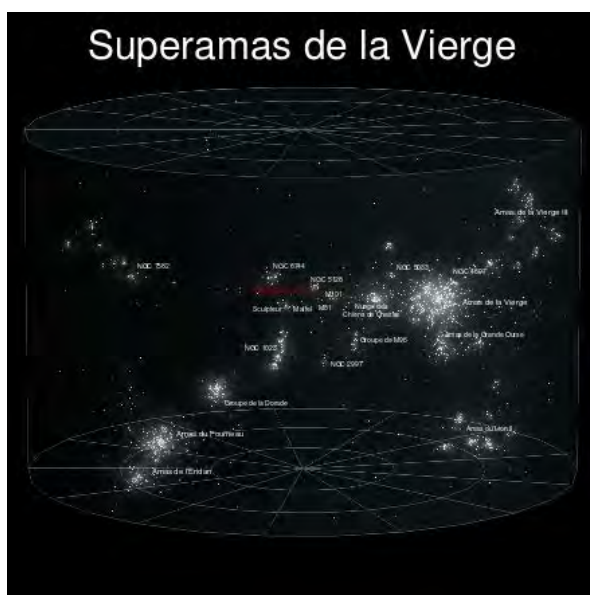


Galaxie	Classe	Type	Distance	Sous-groupe	Luminosité (10 <sup>6</sup> soleils)
M32	Elliptique	E2	763±24 kpc (~2,49 millions d' a.l.)	Andromède	380
Galaxie naine des Poissons	Irrégulière	dIr/dSph	769±25 kpc (~2,51 millions d' a.l.)	Andromède ou Triangle	1.3
Galaxie naine de la Baleine	Naine sphéroïde	dSph/E4	775±50 kpc (~2,53 millions d' a.l.)		?
Galaxie d'Andromède (M31)	Spirale	SA(s)b I-II	778±17 kpc (~2,54 millions d' a.l.)	Andromède	25 000
Andromeda I	Naine sphéroïde	dE3 pec?	810±30 kpc (~2,64 millions d' a.l.)	Andromède	4.7
Andromeda V	Naine sphéroïde	dSph	810±45 kpc (~2,64 millions d' a.l.)	Andromède	?
M110	Elliptique	E5 pec	830±35 kpc (~2,71 millions d' a.l.)	Andromède	370
Galaxie du Triangle (M33)	Spirale	SA(s)cd II-III	847±60 kpc (~2,76 millions d' a.l.)	Andromède ou Triangle	3 000
Galaxie naine du Toucan	Naine sphéroïde	dE5	870±60 kpc (~2,84 millions d' a.l.)		?
Wolf-Lundmark-Melotte	Irrégulière	Ir+	930±30 kpc (~3,03 millions d' a.l.)		500
Andromeda VI	Naine sphéroïde	dSph	environ 955 kpc (~3,11 millions d' a.l.)	Andromède	?
Galaxie naine du Verseau	Naine elliptique	Im V	1 025±50 kpc (~3,34 millions d' a.l.)		?
DDO 216 également nommée : Pegasus, PegDIG	Naine irrégulière	SB(s)m pec	1,07±0,05 Mpc (~3,49 millions d' a.l.)	Voie lactée	12
SagDIG	Irrégulière	IB(s)m V	environ 1 300 kpc (~4,24 millions d' a.l.)		6.9

## b) Localisation dans l'univers : l'amas de la Vierge

Le Groupe local forme un ensemble considéré comme typique de quelques dizaines de galaxies. Cet ensemble interagit faiblement avec ses voisins, tels le Groupe IC 342/Maffei, le Filament du Sculpteur ou le Nuage des Chiens de Chasse. Tous sont situés en périphérie d'un amas de galaxies relativement massif, appelé amas de la Vierge. L'Amas de la Vierge est lui-même le centre d'une structure plus vaste appelée Superamas de la Vierge (ou superamas local). L'appartenance au sens strict du Groupe local à l'Amas de la Vierge est ambiguë du fait de sa distance à celui-ci. Le Groupe local s'éloigne aujourd'hui de l'amas de la Vierge (du fait de l'expansion de l'Univers), mais il n'est pas exclu que la masse du Superamas local dans sa totalité et la proximité de ce dernier soient à terme suffisantes pour retenir le Groupe local et le faire tomber sur lui.

L'amas de la Vierge est un grand amas de galaxies proche de nous, à une distance de 15 à 22 Mpc (~48,9 à 71,8 millions d' a.l.). Il fut découvert par Charles Messier en 1781 qui cartographia un grand nombre de ses galaxies les plus importantes, notamment la galaxie géante M87. Cet amas est au centre du superamas de la Vierge dont fait partie le Groupe local où se trouve notre Galaxie. Il est situé dans la constellation de la Vierge et son diamètre angulaire est d'environ 8 degrés. Il comporte approximativement 1300-2000 galaxies, dont beaucoup sont visibles avec un petit télescope. La distance précise nous séparant de l'amas est mal connue; les meilleures estimations actuelles, basées sur les céphéides en utilisant le télescope spatial Hubble, donnent une distance moyenne d'environ 20 Mpc. L'amas est un agrégat irrégulier d'au moins trois sous-amas centrés sur les galaxies M87, M86 et M49. Le plus important est celui centré sur M87, avec une masse approximative de 10<sup>14</sup> masses solaires, ce qui est environ un ordre de grandeur plus élevé que les deux autres. L'amas est un mélange hétérogène de galaxies spirales et elliptiques. Actuellement, on suppose que les galaxies spirales sont distribuées en un filament allongé, environ 4 fois plus long que large, et qui s'étend depuis la Galaxie jusqu'au Nuage W. La constellation comporte aussi la galaxie M104 longtemps considérée comme une galaxie spirale que le télescope spatial Spitzer révéla être en fait une elliptique géante. Les galaxies suivantes se trouvent dans l'amas de la Vierge : M49, M58, M59, M60, M61, M84, M85, M86, M87, M88, M89, M90, M91, M98, M99, et M100.



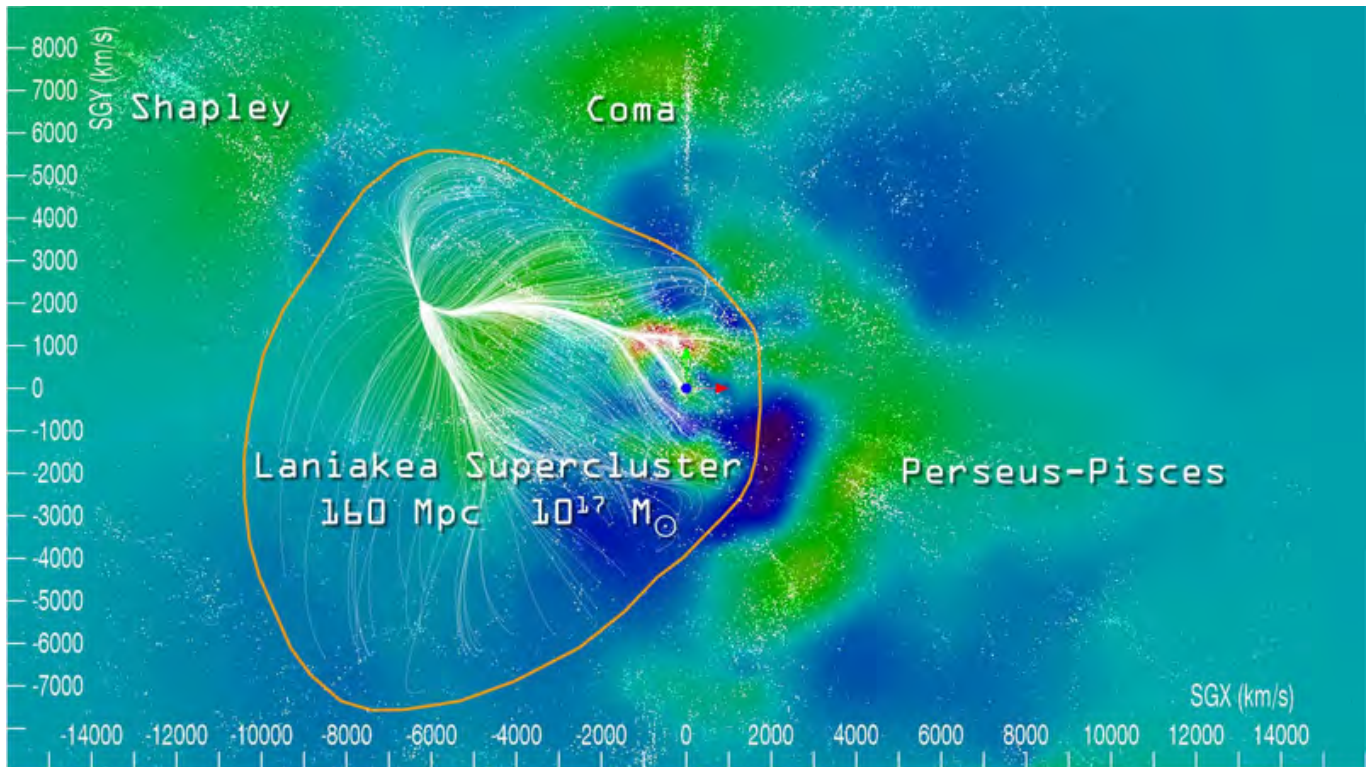
Position du Groupe local dans le Superamas de la Vierge

### c) Laniakéa

Notre **superamas de galaxies** s'appelle Laniakea et est 100 fois plus volumineux que nous le pensions. Pour la première fois, une équipe de recherche internationale, dont des chercheurs français, viennent de cartographier les nouvelles frontières de notre superamas de galaxies au sein duquel les galaxies s'écoulent littéralement, à la manière de l'eau dans un bassin alluvial. Ils lui ont donné le nom hawaïen de Laniakea : « horizons célestes immenses ».

Dans l'Univers, les galaxies se regroupent dans des groupes ou amas, et se déplacent en suivant des « courants », le long de filaments délimitant de grandes régions connues sous le nom de « vides ». Les régions étendues, avec une haute concentration de galaxies, comme celle dans laquelle nous vivons, sont appelées des « superamas ». Notre galaxie, la Voie Lactée, qui abrite notre Système Solaire, fait partie d'un groupe de galaxies appelée Amas Local, qui comprend notamment la galaxie d'Andromède (M 31, la seule galaxie visible à l'œil nu dans l'hémisphère nord), la galaxie spirale du Triangle (M33) et le Grand Nuage de Magellan, qui est une galaxie satellite de la notre. Les autres membres de l'Amas Local sont des petites galaxies elliptiques ou irrégulières, ainsi que des galaxies naines sphéroïdales. La taille de notre Amas Local est d'environ 3 millions d'années lumière, c'est-à-dire 30 fois le diamètre de la Voie Lactée.

Or l'Amas Local est relativement proche d'autres amas de galaxies comme celui de la Vierge, permettant d'édifier un nouveau système. En effet, les amas de galaxies sont regroupés dans des ensembles plus vastes appelés superamas. Mais la définition d'un superamas vient d'évoluer considérablement grâce à une cartographie dynamique. Pour la première fois, les chercheurs proposent une définition dynamique de notre superamas de galaxies, évoquant la notion de « bassin versant », comme en hydrologie. En effet, il leur a été possible de délimiter un volume cosmique dans lequel circulent des « courants de galaxies », comme des cours d'eau dans des ravines. D'un diamètre de 500 millions d'années-lumière, ce « continent extragalactique » contient une masse d'environ 100 millions de milliards de fois la masse du Soleil. Les chercheurs lui ont donné le nom hawaïen Laniakea, accepté par l'Union Astronomique Internationale. Ce nom signifie « horizons célestes immenses », en hommage à Hawaï, pays de navigateurs aux étoiles qui abrite quelques-uns des plus grands télescopes du monde, utilisés pour cette découverte et celles qui suivront.



**Cosmographie de l'Univers Local**

*Une tranche du Superamas Laniakea dans le plan équatorial supergalactique. Les nuances de couleur représentent des valeurs de densité de matière avec en rouge la haute densité et en bleu les vides. Les galaxies individuelles sont montrées comme des points blancs. On observe en blanc des courants de galaxies se déversant dans le bassin d'attraction du Laniakea, tandis que des courants en bleu foncé s'éloignent de ce bassin local et permettent de séparer notre continent de ses voisins. Le contour orange inclut les limites extérieures de ces courants. Ce domaine a une mesure de 500 millions d'années-lumière de diamètre et inclut  $\sim 10^{17} M_{\odot}$  (100 millions de milliards de masses solaires)*

Cette recherche met un point final aux questionnements sur le « Grand Attracteur », qui duraient depuis 30 ans : les chercheurs montrent que cette région qui semblait attirer toutes les galaxies voisines, sans paraître pourtant plus dense, apparaît en réalité aujourd'hui comme un large vallon où se déverse la matière, un peu comme le point le plus bas d'une large baignoire plate. L'étude montre par ailleurs que Laniakea contient environ 100 000 grosses galaxies comme la nôtre et 1 million de plus petites.

## Une nouvelle méthode pour cartographier les galaxies

Les réseaux de structures sont connectés avec des frontières mal définies lorsque l'on ne fait qu'une cartographie statique. L'équipe a mis au point une nouvelle méthode pour définir les structures à grande échelle à l'aide des courants de galaxies. Ces calculs sont basés sur les observations conduites par Hélène Courtois, directrice d'une équipe de recherche à l'Institut de physique nucléaire de Lyon (Université Claude Bernard Lyon 1 / CNRS), et les méthodes de visualisation de Daniel Pomarède, chercheur à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA de Saclay. Il s'agit d'une méthode ressemblant à la recherche de bassins versants alluviaux. Dans les cartes 3D de l'Univers, nous pouvons trouver des lieux où les courants de galaxies, qui sont dus aux concentrations de matière, se séparent ou se rassemblent tout comme l'eau de part et d'autre de la ligne de partage des eaux.

Pour aboutir à une telle cartographie dynamique, les chercheurs se sont appuyés sur le plus grand catalogue de vitesses de galaxies jamais publié (8 000 galaxies), qu'ils ont préparé depuis des années pour construire une carte vaste et détaillée de la distribution de matière (noire et lumineuse) dans l'univers. Dans ce volume d'Univers, tous les mouvements des galaxies sont dirigés vers l'intérieur (par analogie, cette surface délimite notre bassin alluvial). Notre superamas (ou continent de galaxies) est alors défini comme étant le volume englobé, se séparant nettement des autres continents voisins : défini de cette manière, Laniakea est cent fois plus volumineux que ce que l'on pensait depuis 50 ans.

## D) D'autres galaxies

Bien sûr, en dehors des galaxies « proches » de nous et faisant partie des amas ou super-amas de notre voisinage, il y a 100 milliards d'autres galaxies, ou plus, dans notre univers. Le télescope Hubble en a photographié des « champs » entiers.



*Un « champ » de galaxies pris par Hubble. Dans cette photo du ciel profond (dans la direction de la constellation du Dragon) la plupart des points visibles ne sont pas des étoiles mais des galaxies, situées à des distances de 5 à 10 milliards d'années-lumière du soleil*

## E) Les trous noirs

En astrophysique, un **trou noir** est un objet céleste si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper. De tels objets ne peuvent ni émettre, ni réfléchir la lumière et sont donc noirs, ce qui en astronomie revient à dire qu'ils sont invisibles. Toutefois, plusieurs techniques d'observation indirecte dans différentes longueurs d'ondes ont été mises au point et permettent d'étudier les phénomènes qu'ils induisent. En particulier, la matière happée par un trou noir est chauffée à des températures considérables avant d'être « engloutie » et émet une quantité importante de rayons X. Envisagée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, dans le cadre de la mécanique classique, leur existence — prédite par la relativité générale — est une certitude pour la quasi-totalité de la communauté scientifique concernée (astrophysiciens et physiciens théoriciens). Dans le cadre de la relativité générale, un trou noir est défini comme une singularité gravitationnelle occultée par un horizon *absolu* appelé *horizon des événements*. Selon la physique quantique, un trou noir est susceptible de s'évaporer par l'émission d'un rayonnement de corps noir appelé *rayonnement de Hawking*. Un trou noir ne doit pas être confondu avec un trou blanc ni avec un trou de ver.

### Présentation et terminologie

Un trou noir possède une masse donnée, concentrée en un point que l'on appelle singularité gravitationnelle. Cette masse permet de définir une sphère appelée horizon du trou noir, centrée sur la singularité et dont le rayon est une limite maximale en deçà de laquelle le trou noir empêche tout rayonnement et *a fortiori* toute matière de s'échapper. Cette sphère représente en quelque sorte l'extension spatiale du trou noir. C'est ainsi que le terme « trou » est inapproprié : il serait plus correct de parler de « boule noire » pour conceptualiser concrètement sa forme physique réelle tridimensionnelle dans l'espace. Pour un trou

noir de masse égale à celle du Soleil, son rayon vaut environ 3 kilomètres. À une distance interstellaire (en millions de kilomètres), un trou noir n'exerce pas plus d'attraction que n'importe quel autre corps de même masse; il ne s'agit donc pas d'un « aspirateur » irrésistible. Par exemple, si le Soleil se trouvait remplacé par un trou noir de même masse, les orbites des corps tournant autour (planètes et autres) resteraient pour l'essentiel inchangées (seuls les passages à proximité de l'horizon induiraient un changement notable). Il existe plusieurs sortes de trous noirs. Lorsqu'ils se forment à la suite de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, on parle de *trou noir stellaire*, dont la masse équivaut à quelques masses solaires. Ceux qui se trouvent au centre des galaxies possèdent une masse bien plus importante pouvant atteindre plusieurs milliards de fois celle du Soleil; on parle alors de *trou noir supermassif* (ou trou noir galactique). Entre ces deux échelles de masse, il existerait des *trous noirs intermédiaires* avec une masse de quelques milliers de masses solaires. Des trous noirs de masse bien plus faible, formés au début de l'histoire de l'Univers, peu après le Big Bang, sont aussi envisagés et sont appelés *trous noirs primordiaux*. Leur existence n'est, à l'heure actuelle, pas confirmée.

Il est par définition impossible d'observer directement un trou noir. Il est cependant possible de déduire sa présence de son action gravitationnelle : soit par les effets sur les trajectoires des étoiles proches; soit au sein des microquasars et des noyaux actifs de galaxies, où de la matière, située à proximité, tombant sur le trou noir va se trouver considérablement chauffée et émettre un fort rayonnement X. Les observations permettent ainsi de déceler l'existence d'objets massifs et de très petite taille. Les seuls objets correspondant à ces observations et entrant dans le cadre de la relativité générale sont les trous noirs.



*Image simulée d'un trou noir stellaire situé à quelques dizaines de kilomètres d'un observateur (à 9 fois le rayon du trou noir) et dont l'image se dessine sur la voûte céleste dans la direction du Grand Nuage de Magellan. L'image de celui-ci apparaît dédoublée sous la forme de deux arcs de cercle, en raison de l'effet de lentille gravitationnelle fort. La Voie lactée qui apparaît en haut de l'image est également fortement distordue, au point que certaines constellations sont difficiles à reconnaître, comme la Croix du Sud (au niveau de l'étoile orange lumineuse, Gacrux, en haut à gauche de l'image) dont la forme de croix caractéristique est méconnaissable. Une étoile relativement peu lumineuse (HD 49359, magnitude apparente de 7,5) est située presque exactement derrière le trou noir. Elle apparaît ainsi sous la forme d'une image double, dont la luminosité apparente est extraordinairement amplifiée, d'un facteur d'environ 4 500, pour atteindre une magnitude apparente de -1,7. Les deux images de cette étoile, ainsi que les deux images du Grand Nuage sont situées sur une zone circulaire entourant le trou noir, appelée anneau d'Einstein.*

## Historique

Le concept de trou noir a émergé à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la gravitation universelle d'Isaac Newton. La question était de savoir s'il existait des objets dont la masse était suffisamment grande pour que leur vitesse de libération soit plus grande que la vitesse de la lumière. Cependant, ce n'est qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle et avec l'avènement de la relativité générale d'Albert Einstein que le concept de trou noir devient plus qu'une curiosité. En effet, peu après la publication des travaux d'Einstein, une solution de l'équation d'Einstein impliquant l'existence d'un trou noir central est publiée par Karl Schwarzschild. Les travaux fondamentaux sur les trous noirs remontent aux années 1960, précédant de peu les premières indications observationnelles solides en faveur de leur existence. La première « observation » d'un objet contenant un trou noir fut celle de la source de rayons X Cygnus X-1 par le satellite Uhuru en 1971. Le terme de « trou noir » a émergé, dans le courant des années 1960, par l'intermédiaire du physicien américain Kip Thorne. Auparavant, on utilisait les termes de « corps de Schwarzschild » ou d'« astre occlus ». Le terme de « trou noir » a rencontré des réticences dans certaines communautés linguistiques, notamment francophones et russophones, qui le jugeaient quelque peu inconvenant.

## Propriétés

Un trou noir est un objet astrophysique comme un autre. Il se caractérise par le fait qu'il est très difficile à observer directement (voir ci-dessous), et que sa région centrale ne peut être décrite de façon satisfaisante par les théories physiques en leur état du début du XXI<sup>e</sup> siècle, car elle abrite une singularité gravitationnelle. Cette dernière ne peut être décrite que dans le cadre d'une théorie de la gravitation quantique, manquante à ce jour. En revanche, on sait parfaitement décrire les conditions physiques qui règnent dans son voisinage immédiat, de même que son influence sur son environnement, ce qui permet de les détecter par diverses méthodes indirectes.

Par ailleurs, les trous noirs sont étonnants en ce qu'ils sont décrits par un très petit nombre de paramètres. En effet, leur description, dans l'univers dans lequel nous vivons, ne dépend que de trois paramètres : la masse, la charge électrique et le moment cinétique. Tous les autres paramètres du trou noir (par exemple ses effets sur les corps environnants et leur étendue)

sont fixés par ceux-ci. Par comparaison, la description d'une planète fait intervenir des centaines de paramètres (composition chimique, différenciation de ses éléments, convection, atmosphère, etc.). La raison pour laquelle un trou noir n'est décrit que par ces trois paramètres est connue depuis 1967 : c'est le théorème de calvitie démontré par Werner Israel. Celui-ci explique que les seules interactions fondamentales à longue portée étant la gravitation et l'électromagnétisme, les seules propriétés mesurables des trous noirs sont données par les paramètres décrivant ces interactions, à savoir la masse, le moment cinétique et la charge électrique. Pour un trou noir, la masse et la charge électrique sont des propriétés habituelles que décrit la physique classique (c'est-à-dire non-relativiste) : le trou noir possède un champ gravitationnel proportionnel à sa masse et un champ électrique proportionnel à sa charge.

L'influence du moment cinétique est en revanche spécifique à la relativité générale. Celle-ci stipule en effet qu'un corps en rotation va avoir tendance à « entraîner » l'espace-temps dans son voisinage. Ce phénomène, difficilement observable dans le système solaire en raison de son extrême faiblesse pour des astres non compacts, est connu sous le nom d'effet Lense-Thirring (aussi appelé *frame dragging*, en anglais). Il prend une amplitude considérable au voisinage d'un trou noir en rotation, au point qu'un observateur situé dans son voisinage immédiat serait inévitablement entraîné dans le sens de rotation du trou noir. La région où ceci se produit est appelée ergorégion. La masse d'un trou noir galactique correspond en général à environ un millième de la masse de la matière présente dans le bulbe central.

### Quatre types théoriques

Les quatre types théoriques de trous noirs en fonction du moment cinétique ( $J$ ) et de la charge électrique ( $Q$ ). La masse ( $M$ ) est toujours strictement positive.		
	$M > 0$	
	$J = 0$	$J \neq 0$
$Q = 0$	Schwarzschild	Kerr
$Q \neq 0$	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

Un trou noir possède toujours une masse non nulle. En revanche, ses deux autres caractéristiques, à savoir le moment cinétique (rotation) et la charge électrique, peuvent en principe prendre des valeurs nulles (c'est-à-dire égales à zéro) ou non nulles. La combinaison de ces états permet de définir quatre types de trous noirs.

Quand la charge électrique et le moment cinétique sont nuls, on parle de trou noir de Schwarzschild, du nom de Karl Schwarzschild qui, le premier, a mis en évidence ces objets comme solutions des équations de la relativité générale (les équations d'Einstein), en 1916. Quand la charge électrique est non nulle et le moment cinétique nul, on parle de trou noir de Reissner-Nordström. Ces trous noirs ne présentent pas d'intérêt astrophysique notable, car aucun processus connu ne permet de fabriquer un objet compact conservant durablement une charge électrique significative; celle-ci se dissipe normalement rapidement par absorption de charges électriques opposées prises à son environnement. Un trou noir de Reissner-Nordström est donc un objet théorique très improbable dans la nature. Si le trou noir possède un moment cinétique (c'est-à-dire qu'il est en rotation sur lui-même) mais n'a pas de charge électrique, on parle de trou noir de Kerr, du nom du mathématicien néo-zélandais Roy Kerr qui a trouvé la formule décrivant ces objets en 1963. Contrairement aux trous noirs de Reissner-Nordström et de Schwarzschild, les trous noirs de Kerr présentent un intérêt astrophysique considérable, car les modèles de formation et d'évolution des trous noirs indiquent que ceux-ci ont tendance à absorber la matière environnante par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion dans lequel la matière tombe en spiralant toujours dans le même sens dans le trou noir. Ainsi, la matière communique du moment cinétique au trou noir qui l'engloutit. Les trous noirs de Kerr sont donc les seuls que l'on s'attend réellement à rencontrer en astronomie. Cependant, il reste possible que des trous noirs à moment cinétique très faible, s'apparentant en pratique à des trous noirs de Schwarzschild, existent. La version électriquement chargée du trou noir de Kerr, dotée comme lui d'une rotation, est connue sous le nom de trou noir de Kerr-Newman et ne présente comme le trou noir de Reissner-Nordström ou celui de Schwarzschild que peu d'intérêt astrophysique étant donné sa très faible probabilité.

D'un point de vue théorique, il peut exister une multitude d'autres types de trous noirs avec des propriétés différentes. Par exemple, il existe un analogue du trou noir de Reissner-Nordström, mais en remplaçant la charge électrique par une charge magnétique, c'est-à-dire créée par des monopôles magnétiques, dont l'existence reste extrêmement hypothétique à ce jour. On peut de même généraliser le concept de trou noir à des espaces comprenant plus de trois dimensions. Ceci permet d'exhiber des types de trous noirs ayant des propriétés parfois différentes de celles des trous noirs présentés ci-dessus.

### Le trou et le noir

L'existence des trous noirs est envisagée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle indépendamment par John Michell et Pierre-Simon de Laplace. Il s'agissait alors d'objets prédits comme suffisamment denses pour que leur vitesse de libération soit supérieure à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire que même la lumière ne peut vaincre leur force gravitationnelle. Plutôt qu'une telle force (qui est un concept newtonien), il est plus juste de dire que la lumière subit en fait un décalage vers le rouge infini. Ce décalage vers le rouge est d'origine gravitationnelle : la lumière perd la totalité de son énergie en essayant de sortir du puits de potentiel d'un trou noir. Ce décalage vers le rouge est donc d'une nature quelque peu différente de celui dû à l'expansion de l'Univers, que l'on observe pour les galaxies lointaines et qui résulte d'une expansion d'un espace ne présentant pas de puits de potentiels très profonds. De cette caractéristique provient l'adjectif « noir », puisqu'un trou noir ne peut émettre de lumière. Ce qui est valable pour la lumière l'est aussi pour la matière : aucune particule ne peut s'échapper d'un trou noir une fois capturée par celui-ci, d'où le terme de « trou ».

## Horizon des événements

La zone sphérique qui délimite la région d'où lumière et matière ne peuvent s'échapper, est appelée « horizon des événements ». On parle parfois de « surface » du trou noir, quoique le terme soit quelque peu impropre (il ne s'agit pas d'une surface solide ou gazeuse comme la surface d'une planète ou d'une étoile). Il ne s'agit pas d'une région qui présente des caractéristiques particulières : un observateur qui franchirait l'horizon ne ressentirait rien de spécial à ce moment-là (voir ci-dessous). En revanche, il se rendrait compte qu'il ne pourrait plus s'échapper de cette région s'il essayait de faire demi-tour. C'est une sorte de point de non retour. En substance, c'est une situation qui est un peu analogue à celle d'un baigneur qui s'éloignerait de la côte. Si par exemple le baigneur ne peut nager que deux kilomètres, il ne ressentira rien s'il s'éloigne à plus d'un kilomètre de la côte; mais s'il doit faire demi-tour, il se rendra compte qu'il n'a pas assez d'énergie pour atteindre la rive. En revanche, un observateur situé au voisinage de l'horizon remarquera que le temps s'écoule différemment pour lui et pour un observateur situé loin du trou noir. Si ce dernier lui envoie des signaux lumineux à intervalles réguliers (par exemple une seconde), alors l'observateur proche du trou noir recevra des signaux plus énergétiques (la fréquence des signaux lumineux sera plus élevée, conséquence du décalage vers le bleu subi par la lumière qui tombe vers le trou noir) et les intervalles de temps séparant deux signaux consécutifs seront plus rapprochés (moins d'une seconde, donc). Cet observateur aura donc l'impression que le temps s'écoule plus vite pour son confrère resté loin du trou noir que pour lui. À l'inverse, l'observateur resté loin du trou noir verra son collègue évoluer de plus en plus lentement, le temps chez celui-ci donnant l'impression de s'écouler plus lentement. Si l'observateur distant voit un objet tomber dans un trou noir, les deux phénomènes de dilatation du temps et de décalage vers le rouge vont se combiner. Les éventuels signaux émis par l'objet seront de plus en plus rouges, de moins en moins lumineux (la lumière émise perd de plus en plus d'énergie avant d'arriver à l'observateur lointain) et de plus en plus espacés. En pratique, le nombre de photons reçus par l'observateur distant va décroître très rapidement, jusqu'à devenir nul : à ce moment-là, l'objet en train de chuter dans le trou noir est devenu invisible. Même si l'observateur distant tente d'approcher l'horizon en vue de récupérer l'objet qu'il a eu l'impression de voir s'arrêter juste avant l'horizon, celui-ci demeurera invisible. Pour un observateur s'approchant d'une singularité, ce sont les effets de marée qui vont devenir importants. Ces effets, qui déterminent les déformations d'un objet (le corps d'un astronaute, par exemple) du fait des hétérogénéités du champ gravitationnel, seront inéluctablement ressentis par un observateur s'approchant de trop près d'un trou noir ou d'une singularité. La région où ces effets de marée deviennent importants est entièrement située dans l'horizon pour les trous noirs super massifs, mais empiète notablement hors de l'horizon pour des trous noirs stellaires. Ainsi, un observateur s'approchant d'un trou noir stellaire serait déchiqueté avant de passer l'horizon, alors que le même observateur qui s'approcherait d'un trou noir super massif passerait l'horizon sans encombre. Il serait tout de même inéluctablement détruit par les effets de marée en s'approchant de la singularité.

## Ergosphère

### Dernière orbite circulaire stable (ISCO)

« Dernière orbite circulaire stable » redirige ici. Pour les autres significations, voir *Orbite circulaire*. La dernière orbite circulaire stable, généralement abrégée en ISCO (pour l'anglais *Innermost stable circular orbit*), désigne l'orbite circulaire la plus proche d'un trou noir en-deçà de laquelle la matière finit inéluctablement par tomber sur le trou noir. Pour un trou noir de Schwarzschild, le rayon de l'ISCO vaut trois fois le rayon de Schwarzschild de ce trou noir. Pour un trou noir de Kerr, il varie en fonction du moment angulaire du trou noir considéré et n'est plus que de 0,6 fois le rayon de Schwarzschild pour un trou noir ayant une rotation maximale.

## Sphère photonique, singularité

Au centre d'un trou noir se situe une région dans laquelle le champ gravitationnel et les distorsions de l'espace-temps (on parle plutôt de courbure de l'espace-temps) deviennent infinis. Cette région s'appelle une singularité gravitationnelle. La description de cette région est délicate dans le cadre de la relativité générale puisque celle-ci ne peut décrire des régions où la courbure devient infinie. De plus, la relativité générale est une théorie qui ne peut pas incorporer en général des effets gravitationnels d'origine quantique. Or quand la courbure tend vers l'infini, on peut montrer que celle-ci est nécessairement sujette à des effets de nature quantique. Par conséquent, seule une théorie de la gravitation incorporant tous les effets quantiques (on parle alors de gravitation quantique) est en mesure de décrire correctement les singularités gravitationnelles. La description d'une singularité gravitationnelle est donc pour l'heure problématique. Néanmoins, tant que celle-ci est située à l'intérieur de l'horizon du trou noir, elle ne peut influencer ce qui est à l'extérieur de cet horizon, de la même façon que de la matière située à l'intérieur de l'horizon d'un trou noir ne peut en ressortir. Ainsi, aussi mystérieuses que soient les singularités gravitationnelles, notre incapacité à les décrire, signe de l'existence de limitations de la relativité générale à décrire tous les phénomènes gravitationnels, n'empêche pas la description des trous noirs pour la partie située de notre côté de l'horizon des événements.

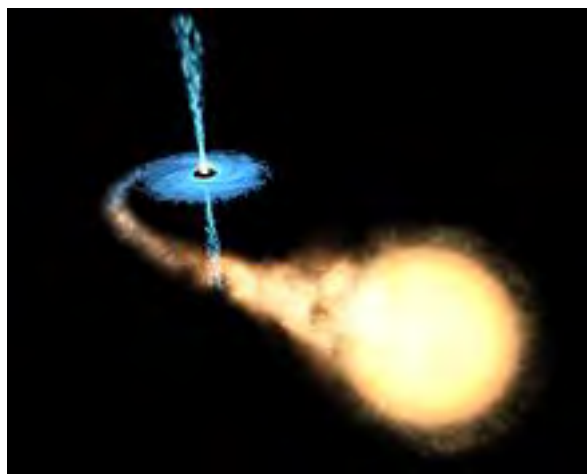
## Formation

La possibilité de l'existence des trous noirs n'est pas une conséquence exclusive de la relativité générale : la quasi-totalité des autres théories de la gravitation physiquement réalistes permet également leur existence. Toutefois, la relativité générale, contrairement à la plupart de ces autres théories de la gravité, a non seulement prédit que les trous noirs *peuvent* exister, mais aussi qu'ils seront formés partout où suffisamment de matière peut être compactée dans une région de l'espace. Par exemple, si l'on compressait le Soleil dans une sphère d'environ trois kilomètres de rayon (soit à peu près quatre milliardièmes de sa taille), il deviendrait un trou noir. Si la Terre était compressée dans un volume de quelques millimètres cubes, elle deviendrait également un trou noir. Pour l'astrophysique, un trou noir peut être considéré comme le stade ultime d'un effondrement gravitationnel. Les deux stades de la matière qui, en termes de compacité, précèdent l'état de trou noir, sont ceux atteints par exemple par les naines blanches et les étoiles à neutrons. Dans le premier cas, c'est la pression de dégénérescence des électrons qui maintient la naine blanche dans un état d'équilibre face à la gravité. Dans le second, il ne s'agit pas de la pression de

dégénérescence des nucléons, mais de l'interaction forte qui maintient l'équilibre. Un trou noir ne peut se former à la suite de l'effondrement d'une naine blanche : celle-ci, en s'effondrant, initie des réactions nucléaires qui forment des noyaux plus lourds que ceux qui la composent. Ce faisant, le dégagement d'énergie qui en résulte est suffisant pour disloquer complètement la naine blanche, qui explose en supernova dite thermonucléaire (ou de type Ia). Un trou noir se forme lorsque la force de gravité est suffisamment grande pour dépasser l'effet de la pression, chose qui se produit quand l'astre progéniteur dépasse une certaine masse critique. Dans ce cas, plus aucune force connue ne permet de maintenir l'équilibre, et l'objet en question s'effondre complètement. En pratique, plusieurs cas de figures sont possibles : soit une étoile à neutrons accrète de la matière issue d'une autre étoile, jusqu'à atteindre une masse critique, soit elle fusionne avec une autre étoile à neutron (phénomène *a priori* beaucoup plus rare), soit le cœur d'une étoile massive s'effondre directement en trou noir.

L'hypothèse de l'existence d'un état plus compact que celui d'étoile à neutrons a été proposée dans le courant des années 1980; ce serait celui des étoiles à quarks aussi appelées étoiles étranges en raison du nom donné pour des raisons historiques à certains des quarks constituant l'objet, appelés « quarks étranges ». Des indications d'une possible détection indirecte de tels astres ont été obtenues depuis le courant des années 1990, sans trancher pour autant définitivement la question<sup>12</sup>, mais cela ne change rien au fait qu'au-delà d'une certaine masse ce type d'astre finit par s'effondrer en trou noir, seule la valeur de la masse limite change. En 2006, on distingue quatre grandes classes de trous noirs en fonction de leur masse : les trous noirs stellaires, super-massifs, intermédiaires et primordiaux (ou micro trous noirs). L'existence voire l'abondance de chaque type de trou noir est directement liée à la possibilité de leur formation.

### Trous noirs stellaires



*Illustration de la formation de jets. Au sein d'un système binaire composé d'un trou noir et d'une étoile, cette dernière voit son gaz arraché et aspiré vers le trou noir. En s'approchant, le gaz engendre un disque d'accrétion qui fournit lui-même la matière dont est composé le jet*

Un trou noir de la masse du soleil aurait un diamètre de 6 kilomètres. Les trous noirs stellaires ont une masse d'au moins quelques masses solaires. Ils naissent à la suite de l'effondrement gravitationnel du résidu des étoiles massives (environ dix masses solaires et plus, initialement). En effet, lorsque la combustion par les réactions thermonucléaires dans le cœur de l'étoile massive se termine, faute de carburant, une supernova se produit. Cette dernière peut laisser derrière elle un cœur qui continue à s'effondrer rapidement. En 1939, Robert Oppenheimer a montré que si ce cœur a une masse supérieure à une certaine limite (appelée limite d'Oppenheimer-Volkoff et égale à environ 3,3 masses solaires) la force gravitationnelle l'emporte définitivement sur toutes les autres forces et un trou noir se forme.

L'effondrement vers un trou noir est susceptible d'émettre des ondes gravitationnelles, qui devraient être détectées dans un futur proche avec des instruments tels que le détecteur Virgo de Cascina en Italie, ou avec les deux interféromètres américains de LIGO. Les trous noirs stellaires sont aujourd'hui observés dans les binaires X et les microquasars et sont responsables parfois de l'apparition de jets tels que ceux observés dans certains noyaux actifs de galaxies.

### Trous noirs supermassifs

Les trous noirs super-massifs ont une masse comprise entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires. Ils se trouvent au centre des galaxies et leur présence provoque parfois l'apparition de jets et du rayonnement X. Les noyaux de galaxies qui sont ainsi plus lumineux qu'une simple superposition d'étoiles sont alors appelés noyaux actifs de galaxies. Notre galaxie, la Voie lactée, contient un tel trou noir (Sagittarius A), ainsi qu'il a été démontré par l'observation des mouvements extrêmement rapides des étoiles proches du trou noir. En particulier, une étoile nommée S2 a pu être observée lors d'une révolution complète autour d'un objet sombre non détecté en moins de onze ans. L'orbite elliptique de cette étoile l'a amenée à moins de vingt unités astronomiques de cet objet (soit une distance de l'ordre de celle Uranus-Soleil) et la vitesse à laquelle l'orbite est parcourue permet d'assigner une masse d'environ 2,3 millions de masses solaires pour l'objet sombre autour duquel elle gravite. Aucun modèle autre que celui d'un trou noir ne permet de rendre compte d'une telle concentration de matière dans un volume aussi restreint. Le télescope Chandra a également permis d'observer au centre de la galaxie NGC 6240 deux trous noirs super-massifs en orbite l'un autour de l'autre. La formation de tels géants est encore débattue, mais certains pensent qu'ils se sont formés très rapidement au début de l'univers.



*Le jet émis depuis le centre de la galaxie M87 est probablement formé grâce à la présence d'un trou noir supermassif dont la masse est estimée à 6,8 milliards de masses solaires. Seul un côté du jet est visible, il s'agit de celui dirigé vers nous. Celui-ci apparaît bien plus brillant que le contre jet, car ayant sa luminosité considérablement augmentée par l'effet de décalage vers le bleu, alors que le contre jet subit un décalage vers le rouge qui le rend bien moins lumineux.*

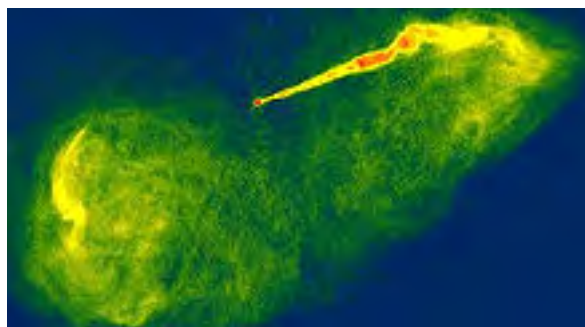
### Trous noirs intermédiaires

Les trous noirs intermédiaires sont des objets récemment découverts et ont une masse entre 100 et 10 000 masses solaires. Dans les années 1970, les trous noirs de masse intermédiaire étaient supposés se former dans le cœur des amas globulaires mais aucune observation ne venait soutenir cette hypothèse. Des observations dans les années 2000 ont montré l'existence de sources de rayons X ultra-lumineuses (*Ultra-luminous X-ray source* en anglais, ou *ULX*)<sup>21</sup>. Ces sources ne sont apparemment pas associées au cœur des galaxies où l'on trouve les trous noirs super-massifs. De plus, la quantité de rayons X observée est trop importante pour être produite par un trou noir de 20 masses solaires, accrétant de la matière avec un taux égal à la limite d'Eddington (limite maximale pour un trou noir stellaire). Ces trous noirs intermédiaires pourraient aussi résulter de l'effondrement d'étoile de population III : ce sont des populations hypothétiques d'étoiles très massives (des milliers de masses solaires) qui se seraient formées au début de l'Univers, constituées des éléments les plus légers : l'hydrogène ou l'hélium.

### Trous noirs primordiaux

Les trous noirs primordiaux, aussi appelés *micro trous noirs* ou *trous noirs quantiques*, auraient une taille très petite. Ils se seraient formés durant le Big Bang (d'où l'appellation trou noir « primordial »), à la suite de l'effondrement gravitationnel de petites sur-densités dans l'univers primordial. Dans les années 1970, les physiciens Stephen Hawking et Bernard Carr ont étudié un mécanisme de formation des trous noirs dans l'univers primordial. Ils avancèrent l'idée d'une profusion de mini-trous noirs, minuscules par rapport à ceux envisagés par la formation stellaire. La densité et la répartition en masse de ces trous noirs ne sont pas connues et dépendent essentiellement de la façon dont se produit une phase d'expansion rapide dans l'univers primordial, l'inflation cosmique. Ces trous noirs de faible masse émettent, s'ils existent, un rayonnement gamma qui pourrait éventuellement être détecté par des satellites comme INTEGRAL. La non détection de ce rayonnement permet de mettre des limites supérieures sur l'abondance et la répartition en masse de ces trous noirs. Selon certains modèles de physique des hautes énergies, il serait possible de créer des mini-trous noirs similaires en laboratoire, dans des accélérateurs de particules comme le LHC, installé près de Genève, en Suisse. En 2005, Frans Pretorius est parvenu à simuler la fusion complète de deux trous noirs; la phase finale de ce processus est plus simple qu'on l'imaginait et surtout plus courte : de l'ordre de la milliseconde.

### Observation



*Jet de plasma observé en interférométrie dans la galaxie M87. L'effet est imputé au champ magnétique intense à proximité du trou noir supermassif en rotation situé au centre de cette galaxie*

Les deux seules classes de trous noirs pour lesquelles on dispose d'observations nombreuses (indirectes, mais de plus en plus précises, voir paragraphe suivant) sont les trous noirs stellaires et super-massifs. Le trou noir super-massif le plus proche est celui qui se trouve au centre de notre Galaxie à environ 8 kilo-parsecs. Une des premières méthodes de détection d'un trou noir



est la détermination de la masse des deux composantes d'une étoile binaire, à partir des paramètres orbitaux. On a ainsi observé des étoiles de faible masse avec un mouvement orbital très prononcé (amplitude de plusieurs dizaines de km/s) mais dont le compagnon est invisible. Le compagnon massif invisible peut généralement être interprété comme une étoile à neutrons ou un trou noir, puisqu'une étoile normale avec une telle masse se verrait très facilement. La masse du compagnon (ou la fonction de masses, si l'angle d'inclinaison est inconnu) est alors comparée à la masse limite maximale des étoiles à neutrons (environ 3,3 masses solaires). Si elle dépasse cette limite, on considère que l'objet est un trou noir. Sinon, il peut être une naine blanche. On considère également que certains trous noirs stellaires apparaissent lors des sursauts de rayons gamma (ou *GRB*, pour *gamma-ray burst* en anglais). En effet, ces derniers se formeraient via l'explosion d'une étoile massive (comme une étoile Wolf-Rayet) en supernova, et que dans certains cas (décrits par le modèle collapsar), un flash de rayons gamma est produit au moment où le trou noir se forme. Ainsi, un GRB pourrait représenter le signal de la naissance d'un trou noir. Des trous noirs de plus faible masse peuvent aussi être formés par des supernovæ classiques. Le rémanent de la supernova 1987A est soupçonné d'être un trou noir, par exemple. Un deuxième phénomène directement relié à la présence d'un trou noir, cette fois pas seulement de type stellaire, mais aussi super-massif, est la présence de jets observés principalement dans le domaine des ondes radio. Ces jets résultent des changements de champ magnétique à grande échelle se produisant dans le disque d'accrétion du trou noir.

### Observation directe

La petite taille d'un trou noir stellaire (quelques kilomètres) rend son observation directe impossible. En guise d'exemple, et même si la taille angulaire d'un trou noir est plus grande que celle d'un objet classique de même rayon, un trou noir d'une masse solaire et situé à un parsec (environ 3,26 années-lumière) aurait un diamètre angulaire de 0,1 *micro* seconde d'arc. Cependant, la situation est plus favorable pour un trou noir super-massif. En effet, la taille d'un trou noir est proportionnelle à sa masse. Le trou noir du centre galactique a une masse, bien estimée, d'environ 3,6 millions de masses solaires. Son rayon de Schwarzschild est donc d'environ 11 millions de kilomètres. La taille angulaire de ce trou noir, situé à environ 8,5 kiloparsecs est de l'ordre de 40 microsecondes d'arc. Cette résolution est inaccessible dans le domaine visible, mais est assez proche des limites actuellement atteignables en interférométrie radio. La technique de l'interférométrie radio, avec une sensibilité suffisante, est limitée en fréquence au domaine millimétrique. Un gain d'un ordre de grandeur en fréquence permettrait une résolution meilleure que la taille angulaire du trou noir. L'imagerie directe du trou noir du centre galactique est donc envisageable dans les années qui viennent. Le trou noir super-massif situé au centre de la galaxie M87 est environ 2 000 fois plus éloigné (18,7 Mpc) mais estimé près de 1 000 fois plus massif. Ce trou noir pourrait ainsi devenir le second trou noir imagé après celui de la Voie Lactée.

### Exemples de trous noirs stellaires

Cygnus X-1, détecté en 1965, est le premier objet astrophysique identifié comme pouvant être la manifestation d'un trou noir. C'est un système binaire qui serait constitué d'un trou noir en rotation et d'une étoile géante. Les systèmes binaires stellaires qui contiennent un trou noir avec un disque d'accrétion formant des jets sont appelés micro-quasars, en référence à leurs parents extragalactiques : les quasars. Les deux classes d'objets partagent en fait les mêmes processus physiques. Parmi les micro-quasars les plus étudiés, on notera GRS 1915+105, découvert en 1994 pour avoir des jets supraluminiques. Un autre cas de tels jets fut détecté dans le système GRO J1655-40. Mais, sa distance est sujette à controverse et ses jets pourraient ne pas être supraluminiques. Notons aussi le micro-quasar très spécial SS 433, qui a des jets persistants en précession et où la matière se déplace par paquets à des vitesses de quelques fractions de la vitesse de la lumière.

### Exemples de trous noirs super-massifs

Les candidats aux trous noirs super-massifs ont premièrement été les noyaux actifs de galaxie et les quasars découverts par les radioastronomes dans les années 1960. Cependant, les observations les plus convaincantes de l'existence de trous noirs super-massifs sont celles des orbites des étoiles autour du centre galactique appelé Sagittarius A\*. L'orbite de ces étoiles et les vitesses atteintes ont permis aujourd'hui d'exclure tout autre type d'objet qu'un trou noir super-massif, de l'ordre de 4 millions de masses solaires à cet endroit de la galaxie. Par la suite, des trous noirs super-massifs ont été détectés dans de nombreuses autres galaxies. En février 2005, une étoile géante bleue, appelée SDSS J090745.0+024507 fut observée quittant notre galaxie avec une vitesse deux fois supérieure à la vitesse de libération de la Voie lactée, soit 0,0022 fois la vitesse de la lumière. Quand on remonte la trajectoire de cette étoile, on voit qu'elle croise le voisinage immédiat du centre galactique. Sa vitesse et sa trajectoire confortent donc également l'idée de la présence d'un trou noir super-massif à cet endroit dont l'influence gravitationnelle aurait provoqué l'éjection de cette étoile de la Voie Lactée. En novembre 2004, une équipe d'astronomes a rapporté la découverte du premier trou noir de masse intermédiaire dans notre galaxie et orbitant à seulement trois années-lumière du centre galactique. Ce trou noir aurait une masse d'environ 1 300 masses solaires et se trouve dans un amas de seulement sept étoiles. Cet amas est probablement le résidu d'un amas massif d'étoiles qui a été dénudé par la présence du trou noir central. Cette observation conforte l'idée que les trous noirs super-massifs grandissent en absorbant des étoiles et autres trous noirs, qui pourra être confirmée par l'observation directe des ondes gravitationnelles émises par ce processus, par l'intermédiaire de l'interféromètre spatial LISA. En juin 2004, des astronomes ont trouvé un trou noir super-massif, appelé Q0906+6930, au centre d'une galaxie lointaine d'environ 12,7 milliards d'années-lumière, c'est-à-dire lorsque l'univers était encore très jeune. Cette observation montre que la formation des trous noirs super-massifs dans les galaxies est un phénomène relativement rapide. En 2012, le plus gros trou noir de l'histoire a été découvert dans la galaxie NGC 1277 situé à 220 millions d'années-lumière dans la constellation de Persée. Il aurait une masse de 17 milliards de masses solaires et représente 14 % de la masse de sa propre galaxie (contre 0,1 pour les autres en moyenne).

## Trous noirs et physique fondamentale

### Théorèmes sur les singularités

Une question cruciale à propos des trous noirs est de savoir sous quelles conditions ils peuvent se former. Si les conditions nécessaires à leur formation sont extrêmement spécifiques, les chances que les trous noirs soient nombreux peuvent être faibles. Un ensemble de théorèmes mathématiques dus à Stephen Hawking et Roger Penrose a montré qu'il n'en était rien : la formation des trous noirs peut se produire dans une variété de conditions extrêmement génériques. Pour des raisons évidentes, ces travaux ont été nommés théorèmes sur les singularités. Ces théorèmes datent du début des années 1970, époque où il n'y avait guère de confirmation observationnelle de l'existence des trous noirs. Les observations ultérieures ont effectivement confirmé que les trous noirs étaient des objets très fréquents dans l'univers.

### Singularités nues et censure cosmique

Au centre d'un trou noir se situe une singularité gravitationnelle. Pour tout type de trou noir, cette singularité est « cachée » du monde extérieur par l'horizon des événements. Cette situation s'avère très heureuse : la physique actuelle ne sait certes pas décrire une singularité gravitationnelle mais cela a peu d'importance, car celle-là étant à l'intérieur de la zone délimitée par l'horizon, elle n'influe pas sur les événements du monde extérieur. Il se trouve cependant qu'il existe des solutions mathématiques aux équations de la relativité générale dans lesquelles une singularité existe sans être entourée d'un horizon. C'est par exemple le cas pour les solutions de Kerr ou de Reissner-Nordström, quand la charge ou le moment cinétique dépasse une certaine valeur critique. Dans ce cas, on ne parle plus de trou noir (il n'y a plus d'horizon donc plus de « trou ») mais de singularité nue. De telles configurations sont extrêmement difficiles à étudier en pratique car la prédiction du comportement de la singularité reste toujours impossible; mais cette fois, il influence l'univers dans lequel nous vivons. L'existence de singularités nues a donc pour conséquence l'impossibilité d'une évolution déterministe de l'univers dans l'état des connaissances actuelles. Pourtant, les trous noirs de Kerr ou de Reissner-Nordström (ainsi que le cas général de Kerr-Newman) ne peuvent pas arriver à leurs valeurs critiques respectives par apport externe de moment cinétique ou de charges électriques. En effet, plus on se rapprocherait de la valeur critique d'un trou noir de Kerr, moins un objet externe pourrait augmenter son moment cinétique. De façon comparable, à l'approche de la charge maximale d'un trou noir de Reissner-Nordström, les charges électriques de même signe que celle du trou noir projetées vers celui-ci y parviendraient de plus en plus difficilement en raison de la répulsion électrostatique exercée par le trou noir. Pour amener les charges à pénétrer dans le trou noir, il faudrait les y projeter à une vitesse relativiste (à cause de la répulsion électrique), ce qui contribuerait à leur conférer une énergie croissante devenant bien supérieure à leur énergie de masse (au repos). D'où une contribution à la masse du trou noir, suffisante pour compenser l'augmentation de charge du trou noir. Finalement, le rapport charge/masse du trou noir « saturerait » juste en dessous de la valeur critique. Ces éléments, ainsi que des considérations plus fondamentales, ont conduit le mathématicien anglais Roger Penrose à formuler en 1969 l'hypothèse dite de la censure cosmique, stipulant qu'aucun processus physique ne pouvait permettre l'apparition de singularités nues dans l'univers. Cette hypothèse, qui possède plusieurs formulations possibles, a été l'objet d'un pari entre Stephen Hawking d'une part et Kip Thorne et John Preskill d'autre part, ces derniers ayant parié que des singularités nues pouvaient exister. En 1991, Stuart L. Shapiro et Saul A. Teukolsky montrèrent sur foi de simulations numériques que des singularités nues pouvaient se former dans l'univers. Quelques années plus tard, Matthew Choptuik mit en évidence un ensemble important de situations à partir desquelles la formation de singularités nues était possible. Ces configurations demeurent cependant extrêmement particulières, et nécessitent un ajustement fin des conditions initiales pour mener à la formation des singularités nues. Leur formation est donc *possible*, mais en pratique extrêmement *improbable*. En 1997, Stephen Hawking reconnut qu'il avait perdu son pari avec Kip Thorne et John Preskill. Un autre pari a depuis été lancé, où des conditions plus restrictives sur les conditions initiales pouvant mener à des singularités nues ont été rajoutées.

### Entropie

En 1971, le physicien britannique Stephen Hawking montra que la surface totale des horizons des événements de n'importe quel trou noir classique ne peut jamais décroître. Cette propriété est tout à fait semblable à la deuxième loi de la thermodynamique, avec la surface jouant le rôle de l'entropie. Dans le cadre de la physique classique, on pourrait violer cette loi de la thermodynamique en envoyant de la matière dans un trou noir, ce qui la ferait disparaître de notre univers, avec la conséquence d'un décroissement de l'entropie totale de l'univers. Pour éviter de violer cette loi, le physicien Jacob Bekenstein proposa qu'un trou noir possède une entropie (sans en préciser la nature exacte) et qu'elle soit proportionnelle à la surface de son horizon. Bekenstein pensait alors que les trous noirs n'émettent pas de radiation et que le lien avec la thermodynamique n'était qu'une simple analogie et pas une description physique des propriétés du trou noir. Néanmoins, Hawking a peu après démontré par un calcul de théorie quantique des champs que le résultat sur l'entropie des trous noirs est bien plus qu'une simple analogie et qu'il est possible de définir rigoureusement une température associée au rayonnement des trous noirs (voir ci-dessous). Utilisant les équations de la thermodynamique des trous noirs, il apparaît que l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à la surface de son horizon. C'est un résultat universel qui peut être appliqué dans un autre contexte aux modèles cosmologiques comportant eux aussi un horizon comme l'univers de de Sitter.

L'interprétation microscopique de cette entropie reste en revanche un problème ouvert, auquel la théorie des cordes a cependant réussi à apporter des éléments de réponse partiels. Il a été ensuite montré que les trous noirs sont des objets à entropie maximale, c'est-à-dire que l'entropie maximale d'une région de l'espace délimitée par une surface donnée est égale à celle du trou noir de même surface. Ce constat a amené les physiciens Gerard 't Hooft et ensuite Leonard Susskind à proposer un ensemble d'idées, appelé principe holographique, basé sur le fait que la description de la surface d'une région permet de reconstituer toute l'information relative à son contenu, de la même façon qu'un hologramme code des informations relatives à un volume sur une simple surface, permettant ainsi de donner un effet de relief à partir d'une surface. La découverte de

l'entropie des trous noirs a ainsi permis le développement d'une analogie extrêmement profonde entre trous noirs et thermodynamique, la thermodynamique des trous noirs, qui pourrait aider dans la compréhension d'une théorie de la gravité quantique.

### Évaporation et radiation de Hawking

En 1974, Stephen Hawking appliqua la théorie quantique des champs à l'espace-temps courbé de la relativité générale, et découvrit que contrairement à ce que prédisait la mécanique classique, les trous noirs pouvaient effectivement émettre une radiation (proche d'une radiation thermique) aujourd'hui appelée rayonnement de Hawking : les trous noirs ne sont donc pas complètement « noirs ». La radiation de Hawking correspond en fait à un spectre de corps noir. On peut donc y associer la « température » du trou noir, qui est inversement proportionnelle à sa taille. De ce fait, plus le trou noir est important, plus sa température est basse. Un trou noir de la masse de la planète Mercure aurait une température égale à celle du rayonnement de fond diffus cosmologique (à peu près 2,73 kelvins). Si le trou noir est plus massif, il sera donc plus froid que la température du fond et accroîtra son énergie plus vite qu'il n'en perdra *via* la radiation de Hawking, devenant ainsi encore plus froid. Un trou noir stellaire a ainsi une température de quelques microkelvins, ce qui rend la détection directe de son évaporation totalement impossible à envisager. Cependant, pour des trous noirs moins massifs, la température est plus élevée et la perte d'énergie associée lui permet de voir sa masse varier sur des échelles cosmologiques. Ainsi, un trou noir de quelques millions de tonnes s'évaporerait-il en une durée inférieure à celle de l'âge de l'Univers. Alors que le trou noir s'évapore, le trou noir devient plus petit, donc plus chaud. Certains astrophysiciens ont proposé que l'évaporation complète de trous noirs produirait un flash de rayons gamma. Ceci serait une signature de l'existence de trous noirs de très faible masse. Il s'agirait alors de trous noirs primordiaux. La recherche actuelle explore cette possibilité avec les données du satellite européen INTEGRAL.

### Paradoxe de l'information

Une question de physique fondamentale encore irrésolue au début du XXI<sup>e</sup> siècle est le fameux paradoxe de l'information. En effet, en raison du théorème de calvitie déjà cité, il n'est pas possible de déterminer *a posteriori* ce qui est entré dans le trou noir. Cependant, vue d'un observateur éloigné, l'information n'est jamais complètement détruite puisque la matière tombant dans le trou noir ne disparaît qu'après un temps infiniment long. Alors, l'information qui a formé le trou noir est-elle perdue ou pas ? Des considérations générales sur ce que devrait être une théorie de la gravité quantique suggèrent qu'il ne peut y avoir qu'une quantité finie et limitée d'entropie (c'est-à-dire une quantité maximale et finie d'information) associée à l'espace près de l'horizon du trou noir. Mais la variation de l'entropie de l'horizon plus celle de la radiation de Hawking est toujours suffisante pour prendre en compte toute l'entropie de la matière et de l'énergie tombant dans le trou noir... Mais restent de nombreuses questions. En particulier au niveau quantique, est-ce que l'état quantique de la radiation de Hawking est déterminé de manière unique par l'histoire de ce qui est tombé dans le trou noir ? De même, est-ce que l'histoire de ce qui est tombé est déterminée de manière unique par l'état quantique du trou noir et de sa radiation ? En d'autres termes, est-ce que les trous noirs sont, ou ne sont pas, déterministes ? Cette propriété est bien sûr conservée dans la relativité générale comme dans la physique classique, mais pas dans la mécanique quantique.

Pendant de longues années, Stephen Hawking a maintenu sa position originelle de 1975 voulant que la radiation de Hawking soit entièrement thermique, et donc complètement aléatoire, représentant ainsi une nouvelle source d'information non-déterministe. Cependant, le 21 juillet 2004, il présenta un nouvel argument, allant à l'opposé de sa première position. Dans ses nouveaux calculs, l'entropie associée à un trou noir serait effectivement inaccessible à un observateur extérieur. De plus, dans l'absence de cette information, il est impossible de relier de manière univoque l'information de la radiation de Hawking (contenue dans ses corrélations internes) à l'état initial du système. Cependant, si le trou noir s'évapore complètement, cette identification univoque peut être faite et l'unitarité est préservée (l'information est donc conservée). Il n'est pas clair que la communauté scientifique spécialisée soit absolument convaincue par les arguments présentés par Hawking. Mais Hawking lui-même fut suffisamment convaincu pour régler le pari qu'il avait fait en 1997 avec le physicien John Preskill de Caltech, provoquant ainsi un énorme intérêt des médias. En juillet 2005, l'annonce de Hawking a donné lieu à une publication dans la revue *Physical Review* et fut débattue par la suite au sein de la communauté scientifique sans qu'un consensus net ne se dégage quant à la validité de l'approche proposée par Hawking.

### Trous noirs et trous de ver

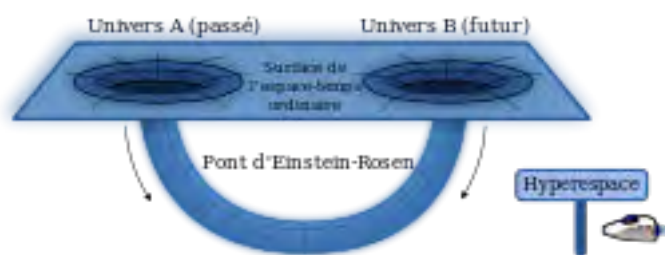


Schéma d'un trou de ver

La relativité générale indique qu'il existerait des configurations dans lesquelles deux trous noirs sont reliés l'un à l'autre. Une telle configuration est habituellement appelée trou de ver ou plus rarement pont d'Einstein-Rosen. De telles configurations ont beaucoup inspiré les auteurs de science-fiction (voir par exemple les références de la section médias) car elles proposent un moyen de voyager très rapidement sur de grandes distances, voire voyager dans le temps. En pratique, de telles configurations,

si elles sont autorisées par la relativité générale, semblent totalement irréalisables dans un contexte astrophysique car aucun processus connu ne semble permettre la formation de tels objets.

### Propositions alternatives aux trous noirs

La démonstration de l'existence des trous noirs stellaires s'appuie sur l'existence d'une limite supérieure pour la masse des étoiles à neutrons. La valeur de cette limite dépend fortement des hypothèses faites concernant les propriétés de la matière dense. La découverte de nouvelles phases exotiques de la matière pourrait repousser cette limite. Une phase constituée de quarks libres (non liés pour former des protons et neutrons par exemple) à haute densité pourrait permettre l'existence d'étoiles à quarks tandis que des modèles de supersymétrie prévoient l'existence d'étoiles Q. Certaines extensions du modèle standard postulent l'existence de préons qui constitueraient les blocs élémentaires des quarks et des leptons, lesquels pourraient hypothétiquement former des étoiles à préons. Ces modèles hypothétiques pourraient expliquer un certain nombre d'observations de candidats trous noirs stellaires. Cependant, il peut être montré à partir d'arguments généraux en relativité générale que tous ces objets auraient une masse maximale. Étant donné que la densité moyenne d'un trou noir à l'intérieur de son rayon de Schwarzschild est inversement proportionnelle au carré de sa masse, les trous noirs supermassifs sont beaucoup moins denses que les trous noirs stellaires (la masse volumique d'un trou noir de  $10^8$  masses solaires est comparable à celle de l'eau; un trou noir de dix milliards ( $10^{10}$ ) de masses solaires serait moins dense que l'air). En conséquence, la physique de la matière formant un trou noir supermassif est bien mieux comprise et les explications alternatives possibles pour l'observation des trous noirs supermassifs sont beaucoup plus ordinaires. Par exemple, un trou noir supermassif pourrait être modélisé par un grand amas d'objets très sombres. Cependant, ces alternatives ne sont généralement pas assez stables pour expliquer les candidats trous noirs supermassifs. Les éléments de preuve en faveur des trous noirs stellaires et supermassifs impliquent que, pour que les trous noirs ne se forment pas, la relativité générale doit échouer comme théorie de la gravité, peut-être à cause de l'apparition de corrections quantiques. Une caractéristique très attendue d'une théorie de la gravité quantique serait l'absence de singularités ou d'horizons des événements (et donc l'absence de trous noirs). Ces dernières années, une grande attention a été portée au modèle des « fuzzballs » (littéralement « balles (ou pelotes) chevelues ») développé en théorie des cordes. Basée sur des calculs dans des situations spécifiques en théorie des cordes, la proposition suggère que de façon générale les états individuels d'une solution trou noir ne doit pas avoir d'horizon des événements ni de singularité mais que pour un observateur classique/semi-classique la moyenne statistique de ces états apparaît comme un trou noir ordinaire en relativité générale. De nombreuses autres alternatives (étoiles noires, étoiles sombres (en), étoiles à énergie noire (en), objets en effondrement éternel (ca), étoiles exotiques (étoiles électrofaibles, étoiles à préons, étoiles à bosons), etc.) ont également été proposées, tous ces objets restant néanmoins purement théoriques en l'état actuel de nos connaissances.

## G) L'Univers et le « big bang »

**L'Univers** est l'ensemble de tout ce qui existe, régi par un certain nombre de lois. La cosmologie cherche à appréhender l'Univers d'un point de vue scientifique, comme l'ensemble de la matière distribuée dans le temps et dans l'espace. Pour sa part, la cosmogonie vise à établir une théorie de la création de l'Univers sur des bases philosophiques ou religieuses. La différence entre ces deux définitions n'empêche pas nombre de physiciens d'avoir une conception finaliste de l'univers : voir à ce sujet le Principe anthropique. Si l'on veut faire correspondre le mouvement des galaxies avec les lois physiques telles qu'on les conçoit actuellement, on peut considérer que l'on n'accède par l'expérience qu'à une faible partie de la matière de l'Univers, le reste se composant de matière noire. Par ailleurs, pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'univers, il faut également introduire le concept d'énergie sombre. Plusieurs modèles alternatifs ont été proposés pour faire correspondre les équations et nos observations en prenant d'autres approches.

### Découverte dans l'Histoire

Les sciences grecques tentèrent de comprendre le monde et de l'expliquer :

- les philosophes Parménide, Platon, et Aristote avaient intégré l'idée d'une Terre sphérique, mais ils la voyaient au centre de l'Univers physique, alors que l'école de Milet se représentait la Terre plate;
- Ératosthène tenta de réaliser des calculs précis, notamment la mesure de la circonférence d'un méridien terrestre;
- Aristarque de Samos est le premier à envisager un modèle de système planétaire héliocentré. Cette découverte ne fut alors pas suivie, pour des raisons philosophiques surtout parce qu'une telle cosmologie est en désaccord avec la conception géocentrée du monde qui était retenue par de grands philosophes comme Parménide, Platon, et Aristote. Il calcule aussi la distance Terre-Lune pour laquelle il trouve une valeur discutée, mais qui se situe en tout état de cause dans un ordre de grandeur acceptable, ainsi qu'une distance Terre-Soleil.;
- Hipparque poursuit ce travail : il recalcule, selon des méthodes nouvelles, la distance Terre-Soleil ainsi que la distance Terre-Lune (pour laquelle il retient la valeur de  $67 \frac{1}{3}$  rayons terrestres, contre 60,2 en réalité), recense 1 500 étoiles, retrouve approximativement la période de précession des équinoxes, qui était déjà connue des Babyloniens.
- Ptolémée poursuit le travail d'Hipparque. Son Almageste sera la référence astronomique essentielle pendant treize siècles.

Ces connaissances du monde grec perdurèrent et influencèrent les sciences arabes après l'effondrement de l'Empire romain d'Occident. Elles restèrent présentes en Orient (particulièrement, avec des hauts et des bas, à Byzance), même si Cosmas d'Alexandrie tenta, sans succès, de restaurer le modèle d'un monde plat. La Renaissance porte à son apogée cette représentation du monde, grâce aux explorations et aux grandes découvertes qui eurent lieu du XIII<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècles, à partir de systèmes géographiques et cosmologiques très élaborés (projection de Mercator).

La révolution copernicienne bouleverse cette cosmologie en trois étapes :

1. Copernic redécouvre l'héliocentrisme. Toutefois, cette redécouverte n'est que partiellement révolutionnaire : en effet, Copernic reste attaché aux sphères transparentes du modèle d'Aristote (pourtant délaissé par Ptolémée) censées soutenir les planètes et leur imprimer leur mouvement; il présente son système comme un simple artifice destiné à simplifier les calculs.
2. Le dominicain Giordano Bruno défend la réalité du modèle héliocentrique et l'étend à toutes les étoiles, ouvrant la dimension de l'Univers physique à l'infini. Il sera brûlé au bûcher en tant qu'hérétique non pour des raisons scientifiques, mais religieuses.
3. Kepler, Galilée et Newton posent les bases fondamentales de la mécanique à partir du mouvement des planètes, grâce à leurs études respectivement du mouvement elliptique des planètes autour du Soleil, l'affinement des observations astronomiques avec la définition du mouvement uniformément accéléré, et la formalisation mathématique de la force de gravité. L'*Univers*, toutefois, reste confiné dans le système solaire.



*L'Univers selon le système de Ptolémée, vu par Andreas Cellarius en 1660-1661*

Des modèles physiques tels que la sphère armillaire ou l'astrolabe ont été élaborés. Ils permettent d'enseigner et de calculer la position des astres dans le ciel visible. Aujourd'hui encore, la carte du ciel mobile aide les astronomes amateurs à se repérer dans le ciel, c'est une réincarnation de l'astrolabe.

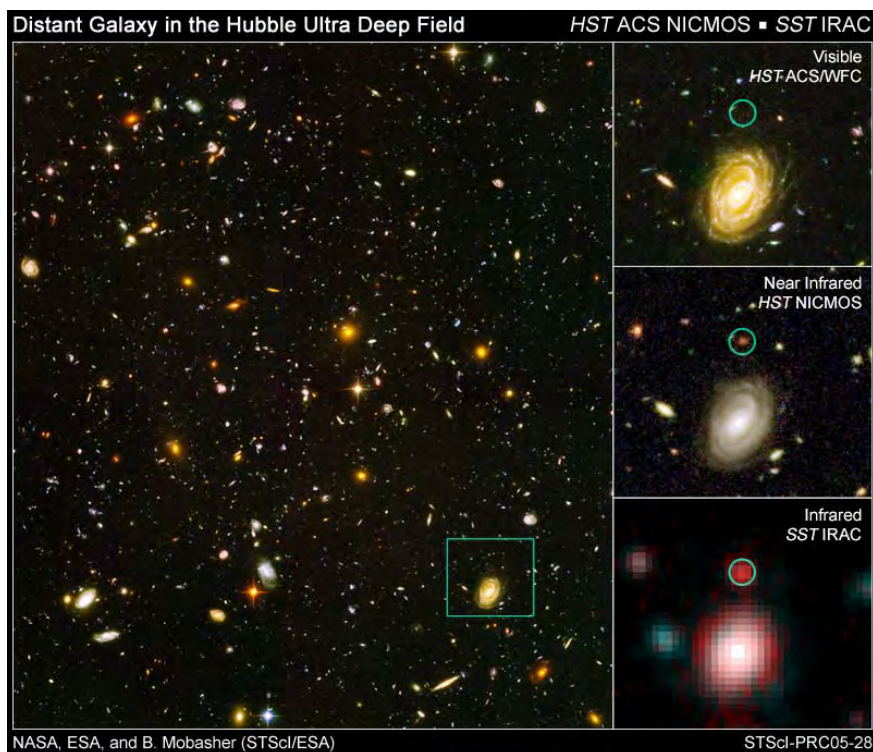
### **Naissance - Expansion, âge et Big Bang**

Les observations du décalage vers le rouge des rayonnements électromagnétiques en provenance d'autres galaxies suggèrent que celles-ci s'éloignent de notre galaxie, à une vitesse radiale d'éloignement proportionnelle à ce décalage (effet Doppler). En étudiant les galaxies proches, Edwin Hubble s'est aperçu que la vitesse d'éloignement d'une galaxie était proportionnelle à sa distance par rapport à l'observateur (loi de Hubble); une telle loi est explicable par un Univers visible en expansion. Bien que la constante de Hubble ait été révisée par le passé dans d'importantes proportions (dans un rapport de 10 à 1), la loi de Hubble a été extrapolée aux galaxies éloignées, pour lesquelles la distance ne peut être calculée au moyen de la parallaxe; cette loi est ainsi utilisée pour déterminer la distance des galaxies les plus éloignées. En extrapolant l'expansion de l'Univers dans le passé, on arrive à une époque où celui-ci a dû être beaucoup plus chaud et beaucoup plus dense qu'aujourd'hui. C'est le modèle du Big Bang, conçu par Georges Lemaître prêtre catholique belge, qui est un ingrédient essentiel du modèle standard de la cosmologie actuel et possède aujourd'hui un grand nombre de confirmations expérimentales. La description du début de l'histoire de l'Univers par ce modèle ne commence cependant qu'après qu'il fut sorti d'une période appelée ère de Planck durant laquelle l'échelle d'énergie de l'Univers était si grande que le modèle standard n'est pas en mesure de décrire les phénomènes quantiques qui s'y sont déroulés. Durant cette époque, seule une théorie de la gravitation quantique pourrait expliquer le comportement microscopique de la matière sous l'influence importante de la gravité. Mais les physiciens ne disposent pas encore (en 2013) d'une telle théorie. Pour des raisons de cohérence avec les observations, après l'ère de Planck le modèle du Big Bang privilégie aujourd'hui l'existence d'une phase d'inflation cosmique très brève mais durant laquelle l'Univers aurait grandi de façon extrêmement rapide. C'est à la suite de cette phase que l'essentiel des particules de l'Univers aurait été créé avec une haute température, enclenchant un grand nombre de processus importants qui ont finalement abouti à l'émission d'une grande quantité de lumière, appelé fond diffus cosmologique, qui peut être aujourd'hui observé avec une grande précision par toute une série d'instruments (ballons-sondes, sondes spatiales). C'est l'observation de ce rayonnement fossile micro-onde, remarquablement uniforme dans toutes les directions, qui constitue aujourd'hui l'élément capital qui assoit le modèle du Big Bang comme description correcte de l'Univers dans son passé lointain. De nombreux éléments du modèle restent encore à déterminer (par exemple le modèle décrivant la phase d'inflation), mais il y a aujourd'hui consensus de la communauté scientifique autour du modèle du Big Bang. Dans le cadre du modèle  $\Lambda$ CDM, les contraintes issues des observations de la sonde WMAP sur les paramètres cosmologiques indiquent une valeur la plus probable pour l'âge de l'Univers à environ 13,82 milliards d'années avec une incertitude de 0,02 milliard d'années, ce qui est en accord avec les données indépendantes issues de l'observation des amas globulaires ainsi que celle des naines blanches. Cet âge a été confirmé en 2013 par les observations du satellite Planck.

L'expansion de l'Univers est modélisée par la théorie de la relativité générale. Celle-ci stipule en effet que l'Univers dans son ensemble est soumis à des forces imposées par les différentes formes de matière qui le composent, et qu'il ne peut demeurer statique : soit il est mû par une force centrifuge qui le fait s'étendre (expansion consécutive au Big Bang et qui pourrait aboutir au Big Rip), soit, dépourvu d'une telle force, ses forces centripètes de gravitation le font se ramasser (Big Crunch). Réciproquement, l'expansion de l'Univers exerce une influence sur la densité et la pression de cette matière. Ainsi, c'est la connaissance des propriétés physiques de ces formes de matière (en particulier leur équation d'état) qui permet de prédire le comportement de l'expansion. Les équations qui la décrivent sont connues sous le nom d'équations de Friedmann. Les observations permettent non seulement de connaître le taux d'expansion actuel de l'Univers (la constante de Hubble à l'instant présent), mais aussi celui de l'Univers par le passé, fournissant ainsi indirectement des informations sur les formes de matière qui emplissent l'Univers. Dans le cadre des modèles d'univers les plus classiques, et notamment dans celui des univers de Friedmann, l'expansion ralentit au cours du temps. Dans certains cas, l'expansion finit même par s'arrêter et se muer en contraction, précipitant l'Univers dans le Big Crunch.

### Taille et Univers observable

À ce jour, aucune donnée scientifique ne permet de dire si l'Univers est fini ou infini. Certains théoriciens penchent pour un Univers infini, d'autres pour un Univers fini mais non borné. Un exemple d'Univers fini et non borné serait l'espace se refermant sur lui-même. Si on partait tout droit dans cet Univers, après un trajet, très long certes, il serait possible de repasser à proximité de son point de départ. Les articles populaires et professionnels de recherche en cosmologie emploient souvent le terme « Univers » dans le sens d'« Univers observable ». L'être humain vit au centre de l'Univers observable, ce qui est en contradiction apparente avec le principe de Copernic qui dit que l'Univers est plus ou moins uniforme et ne possède aucun centre en particulier. Le paradoxe se résout simplement en tenant compte du fait que la lumière se déplace à la même vitesse dans toutes les directions et que sa vitesse n'est pas infinie : regarder au loin revient à regarder un événement décalé dans le passé du temps qu'il a fallu à la lumière pour parcourir la distance séparant l'observateur du phénomène observé. Or il ne nous est pas possible de voir de phénomène issu d'avant le Big Bang. Ainsi, les limites de l'Univers observable correspondent au lieu le plus lointain de l'Univers pour lesquelles la lumière a mis moins de 13,8 milliards d'années à parvenir à l'observateur, ce qui le place inmanquablement au centre de son Univers observable. On appelle « horizon cosmologique » la première lumière émise par le Big Bang il y a 13,8 milliards d'années.



*HUDF-JD2, galaxie primordiale mise en évidence dans le cercle situé sur les trois agrandissements à droite de l'image. Son décalage vers le rouge est  $z=6,5$ , donnant un temps de regard vers le passé de 850 millions d'années après le Big Bang*

On estime que le diamètre de cet Univers observable est de 100 milliards d'années lumière. Celui-ci contient environ  $7 \times 10^{22}$  étoiles, réparties dans environ 100 milliards de galaxies, elles-mêmes organisées en amas et superamas de galaxies. Mais le nombre de galaxies pourrait être encore plus grand, selon le champ profond observé avec le télescope spatial Hubble. Il est cependant possible que l'Univers observable ne soit qu'une infime partie d'un Univers réel beaucoup plus grand. La définition de l'Univers choisie par cet article (« ensemble de tout ce qui existe ») soulève par ailleurs différents problèmes. Tout d'abord, il ne peut pas posséder de « bord » au sens intuitif du terme. En effet, l'existence de bord impliquerait l'existence d'un extérieur à l'Univers. Or par définition l'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe, il ne peut donc rien exister à l'extérieur. Toutefois cela ne signifie pas que l'Univers est infini, il peut être fini sans avoir de « bord », sans avoir en fait d'extérieur. Cela soulève une autre interrogation : que signifie pour l'Univers d'être en expansion s'il n'a ni bord ni extérieur ?

## Objets les plus distants

À ce jour (septembre 2014), la galaxie la plus distante jamais observée serait z8 GND 5296 dont la découverte a été annoncée le 23 octobre 2013. Formée environ 700 millions d'années après le Big Bang, elle serait située à une distance comobile d'environ 30 milliards d'années-lumière du Système solaire.

Les autres galaxies les plus distantes observées à ce jour seraient :

- la galaxie MACS0647-JD dont la découverte a été annoncée le 15 novembre 2012;
- la galaxie UDFy-38135539, découverte en 2010, dont l'âge est estimé à environ 13,692 milliards d'années;
- la galaxie UDFj-39546284, découverte en 2011, dont l'âge est estimé à environ 13,2 milliards d'années;
- les galaxies de l'amas galactique Abell 2218, découvert en 2001, dont l'âge est estimé à environ 13 milliards d'années.

## Forme

Une importante question de cosmologie est de connaître la forme de l'Univers.

1. Est-ce que l'Univers est « plat » ? C'est-à-dire : est-ce que le théorème de Pythagore pour les triangles droits est valide à de plus grandes échelles ? Actuellement, la plupart des cosmologues pensent que l'Univers observable est (presque) plat, juste comme la Terre est (presque) plate.
2. Est-ce que l'Univers est *simplement connexe* ? Selon le modèle standard du Big Bang, l'Univers n'a aucune frontière spatiale, mais peut néanmoins être de taille finie.

Ceci peut être compris par une analogie bidimensionnelle : la surface de la Terre n'a aucun bord, mais possède une aire bien déterminée. Vous pouvez également penser à un cylindre et imaginer de coller les deux extrémités du cylindre ensemble, mais sans plier le cylindre. C'est aussi un espace bidimensionnel avec une surface finie, mais au contraire de la surface de la Terre, il est plat, et peut ainsi servir de meilleur modèle. Par conséquent, à proprement parler, nous devrions appeler les étoiles et les galaxies mentionnées ci-dessus « images » d'étoiles et de galaxies, puisqu'il est possible que l'Univers soit fini et si petit que nous pouvons voir une ou plusieurs fois autour de lui, et le vrai nombre d'étoiles et de galaxies physiquement distinctes pourrait être plus petit. Des hypothèses d'Univers multiconnexes ont été proposées et sont en cours d'étude.

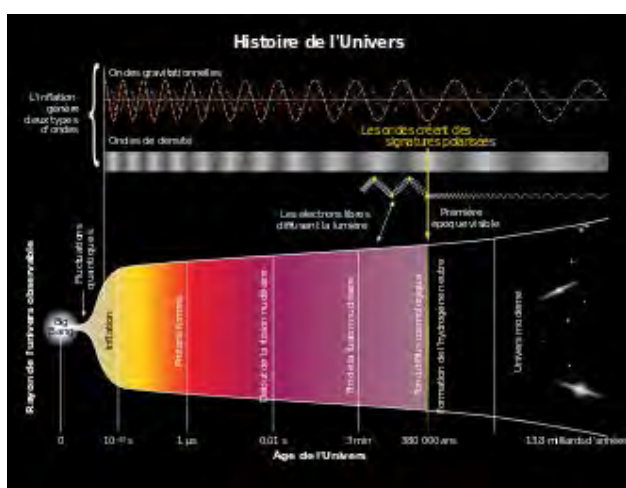
## Modèle dimensionnel

L'Univers a-t-il trois, six, dix dimensions ou plus ? La théorie des cordes prédit qu'espace et matière sont consubstantiels. Il n'y a pas de « contenant » (l'espace) mais un fond d'espace-temps qui interagit avec la matière. Dans certains cas particuliers, la notion de « nombre de dimensions de l'espace » dépend de l'intensité avec laquelle les cordes réagissent entre elles. Si cette interaction est faible, elles semblent se propager dans un espace à neuf dimensions - auxquelles il faut rajouter celle du temps. Si cette interaction croît, cela développe une dimension de plus (ou plus en fonction de l'intensité de l'interaction) à laquelle il faut toujours rajouter celle du temps. Supposons maintenant qu'on enferme l'Univers dans un espace « fini » (une boîte pour être concret) et que cet espace rapetisse jusqu'à  $10^{-32}$  centimètre de côté, la théorie des cordes le prédit équivalent à un Univers très grand. La conception d'espace est fondamentalement bouleversée. La mise en route du grand collisionneur de hadrons de Genève, *Large Hadron Collider* (plus communément appelé LHC), viendra peut-être confirmer cette théorie. Elle ne pourra en revanche pas l'infirmier, car aucun ordre de grandeur n'a été prédit par la théorie des cordes. Ainsi, si le phénomène n'est pas détecté, cela pourrait signifier que trop peu d'énergie a été générée pour rendre le phénomène observable, sans impliquer pour autant que la théorie soit nécessairement erronée.

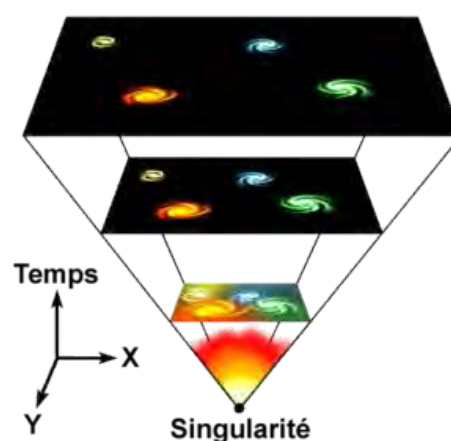
## Avenir

Selon les prédictions du modèle cosmologique le plus couramment admis de nos jours, les « objets galactiques » auront une fin: c'est la mort thermique de l'Univers. Le Soleil, par exemple, s'éteindra dans 5 (à 7) milliards d'années, lorsqu'il aura consumé tout son combustible. À terme, les autres étoiles évolueront elles aussi dans des cataclysmes cosmologiques (explosions, effondrements). Déjà les naissances d'étoiles ralentissent faute de matière, qui se raréfie au fil du temps. Dans 20 milliards d'années environ, aucun astre ne s'allumera plus. L'Univers sera peuplé d'étoiles éteintes (étoiles à neutrons, naines blanches, trous noirs) et des naines rouges résiduelles. À bien plus longues échéances, les galaxies se désagrégeront dans des collisions géantes par leurs interactions gravitationnelles internes et externes. En ce qui concerne le contenant (« l'espace »), certains physiciens pensent que le processus d'expansion sera gravitationnellement ralenti et s'inversera selon le scénario du *Big Crunch*. Pour d'autres, l'expansion, qui semble à présent accélérée par la présence d'une énergie répulsive de nature inconnue (l'énergie sombre), continuera à jamais. Peu à peu, les astres éteints s'agglutineront en trous noirs. L'Univers, sans aucune structure, ne sera plus qu'un bain de photons de plus en plus froids. Toute activité dans l'Univers s'éteindra ainsi à jamais : c'est le *Big Chill*. Si au contraire la quantité d'énergie sombre croît, l'Univers continuera son expansion à une vitesse toujours plus grande pour exploser à toutes les échelles : toute la matière qui le compose (y compris les atomes) se déchirera par dilatation de l'espace. C'est le *Big Rip* (littéralement : « grand déchirement »). Certains modèles prévoient une telle fin dans 22 milliards d'années. Chacun de ces scénarii dépend donc de la quantité d'énergie sombre que contiendra l'Univers à un moment donné. Actuellement, l'état des connaissances suggère non seulement qu'il y a insuffisamment de masse et d'énergie pour provoquer ce *Big Rip*, mais que l'expansion de l'Univers semble s'accélérer et continuera donc pour toujours. C'est en 1998 que deux équipes d'astronomes, le *Supernova Cosmology Project* et le *High-Z supernovae search team* respectivement dirigés par Saul Perlmutter et Brian P. Schmidt sont parvenues au résultat inattendu que l'expansion de l'Univers semblait s'accélérer. Ce résultat est surprenant car il n'existe aucune théorie pour l'interpréter. Il implique en effet l'existence d'une forme inconnue de matière dont la pression serait négative, avec un comportement répulsif et non pas attractif vis-à-vis de la gravitation. Cette forme hypothétique et inhabituelle de matière, de nature inconnue, communément appelée énergie sombre ou parfois constante cosmologique, représente à l'heure actuelle un des problèmes non résolus de la cosmologie moderne. En 2011, le Prix Nobel de physique est attribué à S. Perlmutter, B. P. Schmidt et A. G. Riess pour cette découverte.

**Le Big Bang** est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers. Il a été initialement proposé en 1927 par le chanoine catholique belge Georges Lemaître, qui décrivait dans les grandes lignes l'expansion de l'Univers, avant que celle-ci soit mise en évidence par l'astronome américain Edwin Hubble en 1929. Ce modèle a été désigné pour la première fois sous le terme ironique de « *Big Bang* » lors d'une émission de la BBC, *The Nature of Things* (dont le texte fut publié en 1950), par le physicien britannique Fred Hoyle, qui lui-même préférait les modèles d'état stationnaire. De façon générale, le terme « Big Bang » est associé à toutes les théories qui décrivent notre Univers comme issu d'une dilatation rapide qui fait penser (**abusivement**) à une explosion, et est également le nom associé à cette époque dense et chaude qu'a connu l'Univers il y a 13,8 milliards d'années sans que cela préjuge de l'existence d'un « instant initial » ou d'un commencement à son histoire. Le concept général du Big Bang, à savoir que l'Univers est en expansion et a été plus dense et plus chaud par le passé, doit sans doute être attribué au Russe Alexandre Friedmann, qui l'avait proposé en 1922, cinq ans avant Lemaître. Son assise ne fut cependant établie qu'en 1965 avec la découverte du fond diffus cosmologique, l'« éclat disparu de la formation des mondes », selon les termes de Georges Lemaître, qui attesta de façon définitive la réalité de l'époque dense et chaude de l'Univers primordial. Albert Einstein, en mettant au point la relativité générale, aurait pu déduire l'expansion de l'Univers, mais a préféré modifier ses équations en y ajoutant sa constante cosmologique, car il était persuadé que l'Univers devait être statique. Le terme de « Big Bang chaud » (« *Hot Big Bang* ») était parfois utilisé initialement pour indiquer que, selon ce modèle, l'Univers était plus chaud quand il était plus dense. Le qualificatif de « chaud » était ajouté par souci de précision, car le fait que l'on puisse associer une notion de température à l'Univers dans son ensemble n'était pas encore bien compris au moment où le modèle a été proposé, au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.



*Le Big Bang marque le début de l'Univers, issu possiblement d'une singularité*



*Selon le modèle du Big Bang, l'Univers actuel a émergé d'un état extrêmement dense et chaud il y a un peu plus de 13 milliards et demi d'années*

## Introduction

La découverte de la relativité générale par Albert Einstein en 1915 marque le début de la cosmologie moderne, où il devient possible de décrire l'Univers dans son ensemble comme un système physique, son évolution à grande échelle étant décrite par la relativité générale. Einstein est d'ailleurs le premier à utiliser sa théorie fraîchement découverte, tout en y ajoutant un terme supplémentaire, la constante cosmologique, pour proposer une solution issue de la relativité générale décrivant l'espace dans son ensemble, appelée univers d'Einstein. Ce modèle introduit un concept extrêmement audacieux pour l'époque, le principe cosmologique, qui stipule que l'Homme n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, ce qu'Einstein traduit par le fait que l'Univers soit homogène et isotrope, c'est-à-dire semblable à lui-même quels que soient le lieu et la direction dans laquelle on regarde. Cette hypothèse était relativement hardie, car, à l'époque, aucune observation concluante ne permettait d'affirmer l'existence d'objet extérieur à la Voie lactée, bien que le débat sur cette question existe dès cette époque (par la suite appelé le Grand Débat). Au principe cosmologique, Einstein ajoute implicitement une autre hypothèse qui paraît aujourd'hui nettement moins justifiée, celle que l'Univers est statique, c'est-à-dire n'évolue pas avec le temps. C'est cet ensemble qui le conduit à modifier sa formulation initiale en ajoutant à ses équations le terme de constante cosmologique. L'avenir lui donne tort, car dans les années 1920, Edwin Hubble découvre la nature extragalactique de certaines « nébuleuses » (aujourd'hui appelées galaxies), puis leur éloignement de la Galaxie avec une vitesse proportionnelle à leur distance : c'est la loi de Hubble. Dès lors, plus rien ne justifie l'hypothèse d'un Univers statique proposée par Einstein. Avant même la découverte de Hubble, plusieurs physiciens, dont Willem de Sitter, Georges Lemaître et Alexandre Friedmann, découvrent d'autres solutions de la relativité générale décrivant un Univers en expansion. Leurs modèles sont alors immédiatement acceptés dès la découverte de l'expansion de l'Univers. Ils décrivent ainsi un Univers en expansion depuis plusieurs milliards d'années. Par le passé, celui-ci était donc plus dense et plus chaud.

## État originel

À l'origine, l'univers est une boule hyper chaude, incroyablement dense, au sein de laquelle les notions d'espace et de temps n'existent pas. Un état que nos lois de la physique sont incapables d'expliquer. Ce noyau du futur univers ne contient rien qui nous puissions reconnaître aujourd'hui. Le plus bref de ces moments est connu sous le nom d'ère de Planck. Du faisceau d'énergie originel émerge une soupe chaude de « plasma » de quelque 10 milliards de trillions de trillions de degrés Celsius et



contenant des particules et des antiparticules fondamentales. Il n'y a pas de photon donc pas de lumière. L'univers commence brutalement son expansion partout en même temps. Sa taille grandit d'un trillion de fois en un trillième de seconde. La température chute alors à dix millions de degrés Celsius en moins d'un millième de seconde. Les réactions qui se produisent entre particules et antiparticules donnent naissance aux premiers protons, neutrons et autres particules plus lourdes. En 100 secondes, alors que l'univers atteint une largeur de plusieurs centaines d'années lumière, les noyaux de presque tous les atomes d'hydrogène et d'hélium se forment. S'ensuit une période de plusieurs milliers d'années durant lesquelles l'univers poursuit son expansion et se refroidit de facto. Mais l'ensemble est trop chargé en énergie pour que les particules aient pu s'associer pendant suffisamment longtemps afin de produire les atomes. La matière, élaborée dans les énormes chaudrons que sont les étoiles, apparaît bien plus tard.

### **Big Bang ou état stationnaire ?**

La découverte de l'expansion de l'Univers prouve que celui-ci n'est pas statique, mais laisse place à plusieurs interprétations possibles :

- soit il y a conservation de la matière (hypothèse *a priori* la plus réaliste), et donc dilution de celle-ci dans le mouvement d'expansion, et, dans ce cas, l'Univers était plus dense par le passé : c'est le Big Bang;
- soit on peut imaginer, à l'inverse, que l'expansion s'accompagne d'une création (voire d'une disparition) de matière. Dans ce cadre-là, l'hypothèse la plus esthétique est d'imaginer un phénomène de création continue de matière contrebalançant exactement sa dilution par l'expansion. Un tel Univers serait alors stationnaire.

Dans un premier temps, c'est cette seconde hypothèse qui a été la plus populaire, bien que le phénomène de création de matière ne soit pas motivé par des considérations physiques. L'une des raisons de ce succès est que dans ce modèle, appelé théorie de l'état stationnaire, l'univers est éternel. Il ne peut donc y avoir de conflit entre l'âge de celui-ci et l'âge d'un objet céleste quelconque. À l'inverse, dans l'hypothèse du Big Bang, l'Univers a un âge fini, que l'on déduit directement de son taux d'expansion (voir équations de Friedmann). Dans les années 1940, le taux d'expansion de l'Univers était très largement surestimé, ce qui conduisait à une importante sous-estimation de l'âge de l'Univers. Or diverses méthodes de datation de la Terre indiquaient que celle-ci était plus vieille que l'âge de l'Univers estimé par son taux d'expansion. Les modèles de type Big Bang étaient donc en difficulté vis-à-vis de telles observations. Ces difficultés ont disparu suite à une réévaluation plus précise du taux d'expansion de l'Univers.

### **Preuves observationnelles**

Deux preuves observationnelles décisives ont donné raison aux modèles de Big Bang : il s'agit de la détection du fond diffus cosmologique, rayonnement de basse énergie (domaine micro-onde) vestige de l'époque chaude de l'histoire de l'univers, et la mesure de l'abondance des éléments légers, c'est-à-dire des abondances relatives de différents isotopes de l'hydrogène, de l'hélium et du lithium qui se sont formés pendant la phase chaude primordiale.

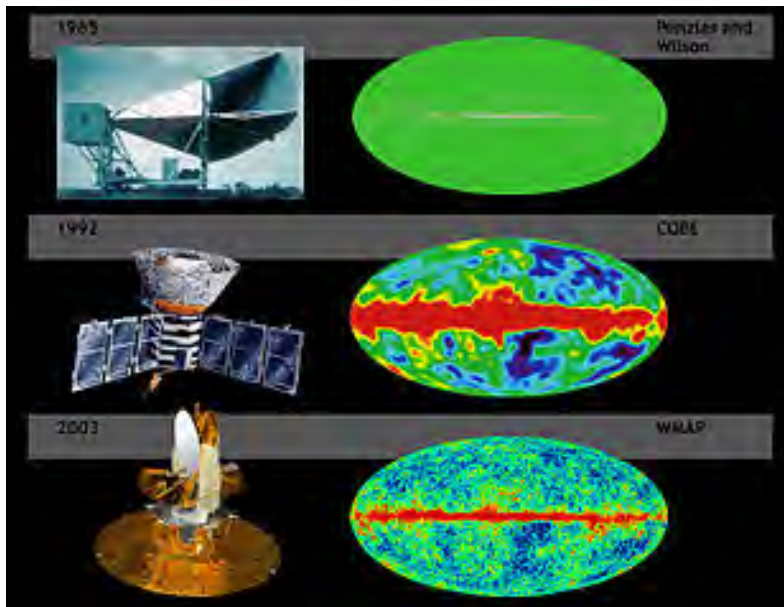
Ces deux observations remontent au début de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et ont assis le Big Bang comme le modèle décrivant l'univers observable. Outre la cohérence quasi parfaite du modèle avec tout un autre ensemble d'observations cosmologiques effectuées depuis, d'autres preuves relativement directes sont venues s'ajouter : l'observation de l'évolution des populations galactiques, et la mesure du refroidissement du fond diffus cosmologique depuis plusieurs milliards d'années.

### **Le fond diffus cosmologique**

L'expansion induit naturellement que l'Univers a été plus dense par le passé. À l'instar d'un gaz qui s'échauffe quand on le comprime, l'Univers devait aussi être plus chaud par le passé. Cette possibilité semble évoquée pour la première fois en 1934 par Georges Lemaître, mais n'est réellement étudiée qu'à partir des années 1940. Selon l'étude de George Gamow (entre autres), l'Univers doit être rempli d'un rayonnement qui perd de l'énergie du fait de l'expansion, selon un processus semblable à celui du décalage vers le rouge du rayonnement des objets astrophysiques distants. Gamow réalise en effet que les fortes densités de l'Univers primordial doivent avoir permis l'instauration d'un équilibre thermique entre les atomes, et par suite l'existence d'un rayonnement émis par ceux-ci. Ce rayonnement devait être d'autant plus intense que l'Univers était dense, et devait donc encore exister aujourd'hui, bien que considérablement moins intense. Gamow fut le premier (avec Ralph Alpher et Robert C. Herman) à réaliser que la température actuelle de ce rayonnement pouvait être calculée à partir de la connaissance de l'âge de l'Univers, la densité de matière, et l'abondance d'hélium. Ce rayonnement est appelé aujourd'hui fond diffus cosmologique, ou parfois rayonnement fossile. Il correspond à un rayonnement de corps noir à basse température (2,7 kelvins), conformément aux prédictions de Gamow. Sa découverte, quelque peu fortuite, est due à Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson en 1965, qui seront récompensés par le Prix Nobel de physique en 1978.

L'existence d'un rayonnement de corps noir est facile à expliquer dans le cadre du modèle du Big Bang : par le passé, l'Univers est très chaud et baigne dans un rayonnement intense. Sa densité, très élevée, fait que les interactions entre matière et rayonnement sont très nombreuses, ce qui a pour conséquence que le rayonnement est thermalisé, c'est-à-dire que son spectre électromagnétique est celui d'un corps noir. L'existence d'un tel rayonnement dans la théorie de l'état stationnaire est par contre quasiment impossible à justifier (bien que ses rares tenants affirment le contraire).

Bien que correspondant à un rayonnement à basse température et peu énergétique, le fond diffus cosmologique n'en demeure pas moins la plus grande forme d'énergie électromagnétique de l'Univers : près de 96 % de l'énergie existant sous forme de photons est dans le rayonnement fossile, les 4 % restants résultant du rayonnement des étoiles (dans le domaine visible) et du gaz froid dans les galaxies (en infrarouge). Ces deux autres sources émettent des photons certes plus énergétiques, mais nettement moins nombreux.



*Le fond diffus cosmologique, découvert en 1965 est le témoin le plus direct du Big Bang.*

*Depuis, ses fluctuations ont été étudiées par les sondes spatiales COBE (1992), WMAP (2003) et Planck (2009)*

Dans la théorie de l'état stationnaire, l'existence du fond diffus cosmologique est supposée résulter d'une thermalisation du rayonnement stellaire par d'hypothétiques aiguillettes de fer microscopiques, un tel modèle s'avère en contradiction avec les données observables, tant en termes d'abondance du fer qu'en termes d'efficacité du processus de thermalisation (il est impossible d'expliquer dans ce cadre que le fond diffus cosmologique soit un corps noir quasiment parfait) ou d'isotropie (on s'attendrait à ce que la thermalisation soit plus ou moins efficace selon la distance aux galaxies).

La découverte du fond diffus cosmologique fut historiquement la preuve décisive du Big Bang.

### La nucléosynthèse primordiale

Dès la découverte de l'interaction forte et du fait que c'était elle qui était la source d'énergie des étoiles, s'est posée la question d'expliquer l'abondance des différents éléments chimiques dans l'Univers. Au tournant des années 1950 deux processus expliquant cette abondance étaient en compétition : la nucléosynthèse stellaire et la nucléosynthèse primordiale.

Des tenants de l'idée d'état stationnaire comme Fred Hoyle supposaient que de l'hydrogène était produit constamment au cours du temps, et que celui-ci était peu à peu transformé en hélium puis en éléments plus lourds au cœur des étoiles. La fraction d'hélium ou des autres éléments lourds restait constante au cours du temps car la proportion d'hélium augmentait du fait de la nucléosynthèse, mais diminuait en proportion semblable du fait de la création d'hydrogène. À l'inverse, les tenants du Big Bang supposaient que tous les éléments, de l'hélium à l'uranium, avaient été produits lors de la phase dense et chaude de l'univers primordial. Le modèle actuel emprunte aux deux hypothèses :

D'après celle-ci, l'hélium et le lithium ont effectivement été produits pendant la nucléosynthèse primordiale, mais les éléments plus lourds, comme le carbone ou l'oxygène, ont été créés plus tard au cœur des étoiles (nucléosynthèse stellaire). La principale preuve de cela vient de l'étude de l'abondance des éléments dits « légers » (hydrogène, hélium, lithium) dans les quasars lointains. D'après le modèle du Big Bang, leurs abondances relatives dépendent exclusivement d'un seul paramètre, à savoir le rapport de la densité de photons à la densité de baryons, qui est quasi constant depuis la nucléosynthèse primordiale. À partir de ce seul paramètre, que l'on peut d'ailleurs mesurer par d'autres méthodes, on peut expliquer l'abondance des deux isotopes de l'hélium ( $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ ) et de celle du lithium ( $^7\text{Li}$ ). On observe également une augmentation de la fraction d'hélium au sein des galaxies proches, signe de l'enrichissement progressif du milieu interstellaire par les éléments synthétisés par les étoiles.

### L'évolution des galaxies

Le modèle du Big Bang présuppose que l'Univers ait été par le passé dans un état bien plus homogène qu'aujourd'hui. La preuve en est apportée par l'observation du fond diffus cosmologique dont le rayonnement est extraordinairement isotrope : les écarts de température ne varient guère plus d'un cent-millième de degré selon la direction d'observation.

Il est donc supposé que les structures astrophysiques (galaxies, amas de galaxies) n'existaient pas à l'époque du Big Bang mais se sont peu à peu formées. Le processus à l'origine de leur formation est d'ailleurs connu depuis les travaux de James Jeans en 1902 : c'est l'instabilité gravitationnelle. Le Big Bang prédit donc que les galaxies que nous observons se sont formées quelque temps après le Big Bang, et d'une manière générale que les galaxies du passé ne ressemblaient pas exactement à celles que l'on observe dans notre voisinage. Comme la lumière voyage à une vitesse finie, il suffit de regarder des objets lointains pour voir à quoi ressemblait l'univers par le passé. L'observation des galaxies lointaines, qui d'après la loi de Hubble ont un grand décalage vers le rouge montre effectivement que les galaxies primordiales étaient assez différentes de celles d'aujourd'hui : les interactions entre galaxies étaient plus nombreuses, les galaxies massives moins nombreuses, ces dernières étant apparues plus tard des suites des phénomènes de fusion entre galaxies. De même, la proportion de galaxies spirale, elliptique et irrégulière varie au cours du temps. Toutes ces observations sont relativement délicates à effectuer, en grande partie car les galaxies lointaines sont peu lumineuses et nécessitent des moyens d'observation très performants pour être bien observées. Depuis la mise en service du télescope spatial Hubble en 1990 puis des grands observatoires au sol VLT, Keck, Subaru, l'observation des galaxies à grand redshift a permis de vérifier les phénomènes d'évolution des populations galactiques prédits par les modèles

de formation et d'évolution des galaxies dans le cadre des modèles du Big Bang. L'étude des toutes premières générations d'étoiles et de galaxies demeure un des enjeux majeurs de la recherche astronomique du début du XXI<sup>e</sup> siècle.

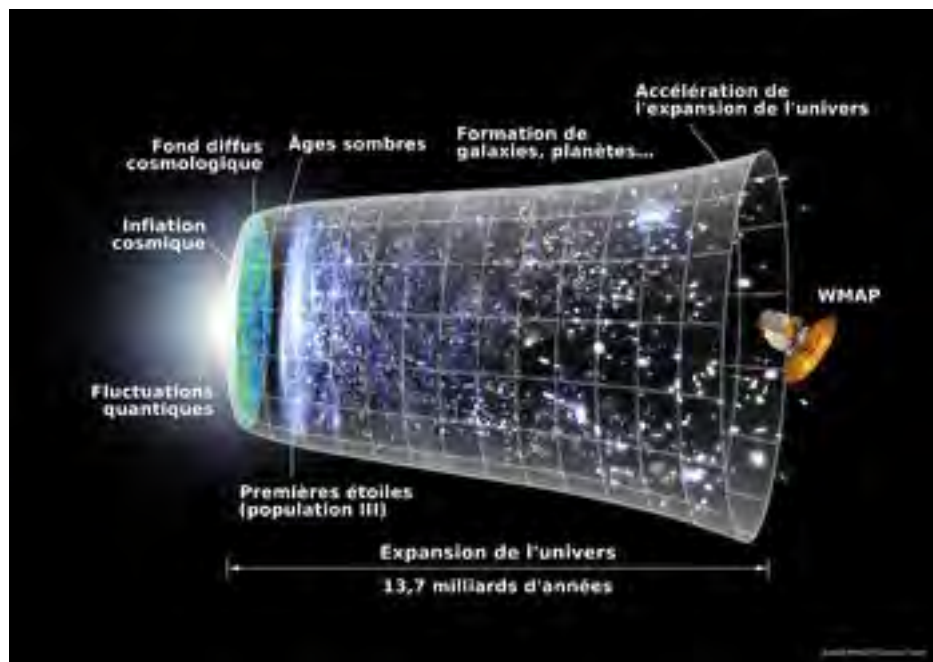
### La mesure de la température du fond diffus cosmologique à grand décalage vers le rouge

En décembre 2000, Raghunathan Srianand, Patrick Petitjean et Cédric Ledoux ont mesuré la température du fond diffus cosmologique baignant un nuage interstellaire dont ils ont observé l'absorption du rayonnement émis par le quasar d'arrière plan PKS 1232+0815, situé à un décalage vers le rouge de 2,57. L'étude du spectre d'absorption permet de déduire la composition chimique du nuage, mais aussi sa température si l'on peut détecter les raies correspondant à des transitions entre différents niveaux excités de divers atomes ou ions présents dans le nuage (dans le cas présent, du carbone neutre). La principale difficulté dans une telle analyse est d'arriver à séparer les différents processus physiques pouvant peupler les niveaux excités des atomes. Les propriétés chimiques de ce nuage, ajoutées à la très haute résolution spectrale de l'instrument utilisé (le spectrographe UVES du Very Large Telescope) ont pour la première fois permis d'isoler la température du rayonnement de fond. Srianand, Petitjean et Ledoux ont trouvé une température du fond diffus cosmologique comprise entre 6 et 14 kelvins, en accord avec la prédiction du Big Bang, de 9,1 K, étant donné que le nuage est situé à un décalage vers le rouge de 2,33 771.

## Chronologie de l'histoire de l'Univers

### L'Univers aujourd'hui (+ 13,8 milliards d'années)

L'Univers est à l'heure actuelle extrêmement peu dense (quelques atomes par mètre cube, voir l'article densité critique) et froid (2,73 kelvins, soit -271 °C). En effet, s'il existe des objets astrophysiques très chauds (les étoiles), le rayonnement ambiant dans lequel baigne l'Univers est très faible. Cela provient du fait que la densité d'étoiles est extrêmement faible dans l'Univers : la distance moyenne d'un point quelconque de l'univers à l'étoile la plus proche est immense. L'observation astronomique nous apprend de plus que les étoiles ont existé très tôt dans l'histoire de l'Univers : moins d'un milliard d'années après le Big Bang, étoiles et galaxies existaient déjà en nombre. Cependant, à des époques encore plus reculées elles n'existaient pas encore. Si tel avait été le cas, le fond diffus cosmologique porterait les traces de leur présence.



*Le scénario de l'expansion de l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à nos jours*

Du fait de l'expansion, l'Univers était par le passé plus dense et plus chaud. La chronologie du Big Bang revient essentiellement à déterminer à rebours l'état de l'Univers à mesure que sa densité et sa température augmentent dans le passé.

### La recombinaison (+ 380 000 ans)

380 000 ans après le Big Bang, alors que l'Univers est mille fois plus chaud et un milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui, les étoiles et les galaxies n'existaient pas encore. Ce moment marque l'époque où l'Univers est devenu suffisamment peu dense pour que la lumière puisse s'y propager, essentiellement grâce au fait que le principal obstacle à sa propagation était la présence d'électrons libres. Lors de son refroidissement, l'Univers voit les électrons libres se combiner aux noyaux atomiques pour former les atomes. Cette époque porte pour cette raison le nom de recombinaison. Comme elle correspond aussi au moment où l'Univers a permis la propagation de la lumière, on parle aussi de découplage entre matière et rayonnement. La lueur du fond diffus cosmologique a donc pu se propager jusqu'à nous depuis cette époque.

### La nucléosynthèse primordiale (+ 3 minutes)

Moins de 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers est composé d'un plasma d'électrons et de noyaux atomiques. Quand la température est suffisamment élevée, les noyaux atomiques eux-mêmes ne peuvent exister. On est alors en présence d'un mélange de protons, de neutrons et d'électrons. Dans les conditions qui règnent dans l'Univers primordial, ce n'est que lorsque

sa température descend en dessous de 0,1 MeV (soit environ un milliard de degrés) que les nucléons peuvent se combiner pour former des noyaux atomiques. Il n'est cependant pas possible de fabriquer ainsi des noyaux atomiques lourds plus gros que le lithium. Ainsi, seuls les noyaux d'hydrogène, d'hélium et de lithium sont produits lors de cette phase qui commence environ une seconde après le Big Bang et qui dure environ trois minutes. C'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse primordiale, dont la prédiction, la compréhension et l'observation des conséquences représentent un des premiers accomplissements majeurs de la cosmologie moderne.

### **L'annihilation électrons-positrons**

Peu avant la nucléosynthèse primordiale (qui débute à 0,1 MeV), la température de l'Univers dépasse 0,5 MeV (cinq milliards de degrés), correspondant à l'énergie de masse des électrons. Au-delà de cette température, interactions entre électrons et photons peuvent spontanément créer des paires d'électron-positrons. Ces paires s'annihilent spontanément mais sont sans cesse recrées tant que la température dépasse le seuil de 0,5 MeV. Dès qu'elle descend en dessous de celui-ci, la quasi-totalité des paires s'annihilent en photons, laissant place au très léger excès d'électrons issus de la baryogenèse (voir ci-dessous).

### **Le découplage des neutrinos**

Peu avant cette époque, la température est supérieure à 1 MeV (dix milliards de degrés), ce qui est suffisant pour qu'électrons, photons et neutrinos aient de nombreuses interactions. Ces trois espèces sont à l'équilibre thermique à des températures plus élevées. Quand l'Univers refroidit, électrons et photons continuent à interagir, mais plus les neutrinos, qui cessent également d'interagir entre eux. À l'instar du découplage mentionné plus haut qui concernait les photons, cette époque correspond à celle du découplage des neutrinos. Il existe donc un fond cosmologique de neutrinos présentant des caractéristiques semblables à celles du fond diffus cosmologique. L'existence de ce fond cosmologique de neutrinos est attestée indirectement par les résultats de la nucléosynthèse primordiale, puisque ceux-ci y jouent un rôle indirect. La détection directe de ce fond cosmologique de neutrinos représente un défi technologique extraordinairement difficile, mais son existence n'en est aucunement remise en cause.

### **La baryogénèse**

La physique des particules repose sur l'idée générale, étayée par l'expérience, que les diverses particules élémentaires et interactions fondamentales ne sont que des aspects différents d'entités plus élémentaires (par exemple, l'électromagnétisme et la force nucléaire faible peuvent être décrits comme deux aspects d'une seule interaction, l'interaction électrofaible). Plus généralement, il est présumé que les lois de la physique et par la suite l'Univers dans son ensemble sont dans un état plus « symétrique » à plus haute température. On considère ainsi que par le passé, matière et antimatière existaient en quantités strictement identiques dans l'Univers. Les observations actuelles indiquent que l'antimatière est quasiment absente dans l'univers observable. La présence de matière est donc le signe qu'à un moment donné s'est formé un léger excès de matière par rapport à l'antimatière. Lors de l'évolution ultérieure de l'Univers, matière et antimatière se sont annihilées en quantités strictement égales, laissant derrière elles le très léger surplus de matière qui s'était formé. Comme la matière ordinaire est formée de particules appelées baryons, la phase où cet excès de matière s'est formé est appelée baryogenèse. Très peu de choses sont connues sur cette phase ou sur le processus qui s'est produit alors. Par exemple l'échelle de température où elle s'est produite varie, selon les modèles, de  $10^3$  à  $10^{16}$  GeV (soit entre  $10^{16}$  et  $10^{29}$  kelvins...). Les conditions nécessaires pour que la baryogenèse se produise sont appelées conditions de Sakharov, à la suite des travaux du physicien russe Andreï Sakharov en 1967.

### **L'ère de grande unification**

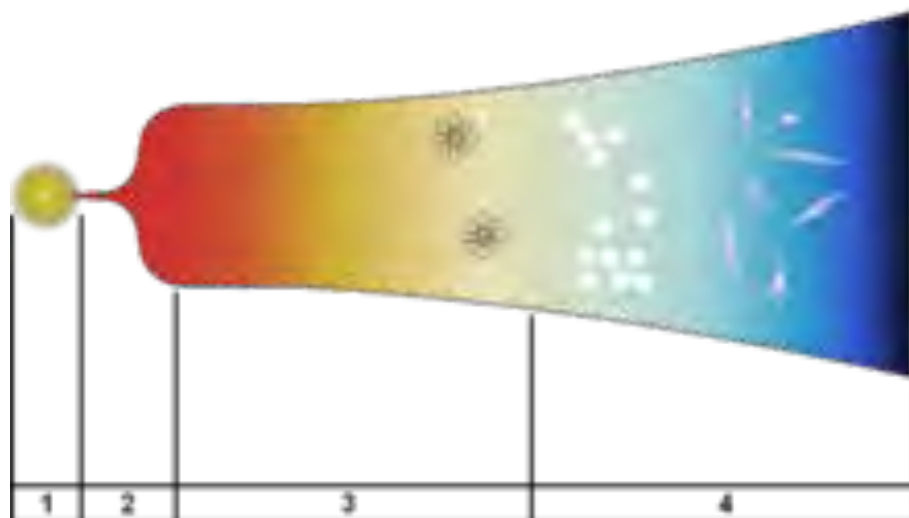
Un nombre croissant d'indications suggère que les forces électromagnétiques, faible et forte ne sont que des aspects différents d'une seule et unique interaction. Celle-ci est en général appelée théorie grand unifiée (« GUT » en anglais, pour *Grand Unified Theory*), ou grande unification. On pense qu'elle se manifeste au-delà de températures de l'ordre de  $10^{16}$  GeV ( $10^{29}$  kelvin). Il est donc probable que l'Univers ait connu une phase où la théorie grand unifiée était de mise. Cette phase pourrait être à l'origine de la baryogenèse, ainsi éventuellement que de la matière noire, dont la nature exacte reste inconnue.

### **L'inflation cosmique**

Le Big Bang amène de nouvelles questions en cosmologie. Par exemple, il suppose que l'Univers est homogène et isotrope (ce qu'il est effectivement, du moins dans la région observable), mais n'explique pas pourquoi il devrait en être ainsi. Or dans sa version naïve, il n'existe pas de mécanisme pendant le Big Bang qui provoque une homogénéisation de l'Univers (voir ci-dessous, le problème de l'horizon). La motivation initiale de l'inflation était ainsi de proposer un processus provoquant l'homogénéisation et l'isotropisation de l'Univers. L'inventeur de l'inflation est Alan Guth qui a été le premier à proposer explicitement un scénario réaliste décrivant un tel processus. À son nom méritent aussi d'être associés ceux de François Englert et Alexei Starobinsky, qui ont également travaillé sur certaines de ces problématiques à la même époque (1980). Il a par la suite été réalisé (en 1982) que l'inflation permettait non seulement d'expliquer pourquoi l'Univers était homogène, mais aussi pourquoi il devait aussi présenter de petits écarts à l'homogénéité, comportant les germes des grandes structures astrophysiques. L'on peut montrer que pour que l'inflation résolve tous ces problèmes, elle doit avoir eu lieu à des époques extrêmement reculées et chaudes de l'histoire de l'Univers (entre  $10^{14}$  et  $10^{19}$  GeV, soit de  $10^{27}$  à  $10^{32}$  degrés...), c'est-à-dire au voisinage des époques de Planck et de grande unification. L'efficacité de l'inflation à résoudre la quasi-totalité des problèmes exhibés par le Big Bang lui a rapidement donné un statut de premier plan en cosmologie, bien que divers autres scénarios, souvent plus complexes et moins aboutis (pré Big Bang, défauts topologiques, univers ekpyrotique), aient été proposés pour résoudre les mêmes problèmes. Depuis l'observation détaillée des anisotropies du fond diffus cosmologique, les modèles d'inflation sont sortis considérablement renforcés. Leur accord avec l'ensemble des observations allié à l'élégance du concept

font de l'inflation le scénario de loin le plus intéressant pour les problématiques qu'il aborde. La phase d'inflation en elle-même se compose d'une expansion extrêmement rapide de l'Univers (pouvant durer un temps assez long), à l'issue de laquelle la dilution causée par cette expansion rapide est telle qu'il n'existe essentiellement plus aucune particule dans l'Univers, mais que celui-ci est rempli d'une forme d'énergie très homogène. Cette énergie est alors convertie de façon très efficace en particules qui très vite vont se mettre à interagir et à s'échauffer. Ces deux phases qui closent l'inflation sont appelées préchauffage pour la création « explosive » de particules et réchauffage pour leur thermalisation. Si le mécanisme général de l'inflation est parfaitement bien compris (quoique de très nombreuses variantes existent), celui du préchauffage et du réchauffage le sont beaucoup moins et sont toujours l'objet de nombreuses recherches.

### L'ère de Planck — La cosmologie quantique



*Schéma simplifié du Big Bang*

- 1 : Big Bang
- 2 : Inflation
- 3 : Nucléosynthèse
- 4 : Formation des galaxies

Au-delà de la phase d'inflation, et plus généralement à des températures de l'ordre de la température de Planck, on entre dans le domaine où les théories physiques actuelles ne deviennent plus valables, car nécessitant un traitement de la relativité générale incluant les concepts de la mécanique quantique. Cette théorie de la gravité quantique, non découverte à ce jour mais qui sera peut-être issue de la théorie des cordes encore en développement, laisse à l'heure actuelle place à des spéculations nombreuses concernant l'Univers à cette époque dite ère de Planck. Plusieurs auteurs, dont Stephen Hawking, ont proposé diverses pistes de recherche pour tenter de décrire l'Univers à ces époques. Ce domaine de recherche est ce que l'on appelle la cosmologie quantique.

### Les problèmes apparents posés par le Big Bang et leurs solutions

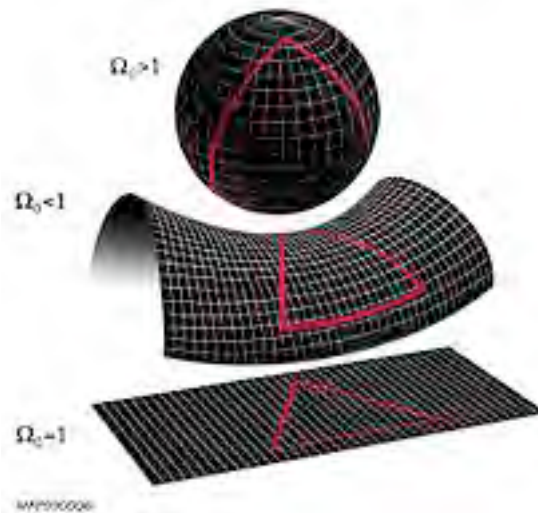
L'étude des modèles de Big Bang révèle un certain nombre de problèmes inhérents à ce type de modèle. En l'absence de modifications, le modèle naïf du Big Bang apparaît peu convaincant, car il nécessite de supposer qu'un certain nombre de quantités physiques sont soit extrêmement grandes, soit extrêmement petites par rapport aux valeurs que l'on pourrait naïvement penser leur attribuer. En d'autres termes, le Big Bang semble nécessiter d'ajuster un certain nombre de paramètres à des valeurs inattendues pour pouvoir être viable. Ce type d'ajustement fin de l'univers est considéré comme problématique dans tout modèle physique (en rapport avec la cosmologie ou pas, d'ailleurs), au point que le Big Bang pourrait être considéré comme un concept posant autant de problèmes qu'il n'en résout, rendant cette solution peu attractive, malgré ses succès à expliquer nombre d'observations. Fort heureusement, des scénarios existent, en particulier l'inflation cosmique, qui, inclus dans les modèles de Big Bang, permettent d'éviter les observations initialement considérées comme étant problématiques. Il est ainsi possible d'avoir aujourd'hui une vision unifiée du contenu matériel, de la structure, de l'histoire et de l'évolution de l'univers, appelée par analogie avec la physique des particules le modèle standard de la cosmologie.

### Le problème de l'horizon

Les observations indiquent que l'univers est homogène et isotrope. Il est facile de montrer à l'aide des équations de Friedmann qu'un univers homogène et isotrope à un instant donné va le rester. Par contre, le fait que l'univers soit homogène et isotrope dès l'origine est plus difficile à justifier. À l'exception d'arguments esthétiques et de simplicité, il n'existe pas a priori de raison valable de supposer que la nature ait choisi que l'univers soit aussi homogène et isotrope que ce que l'on observe. Aucun mécanisme satisfaisant n'explique par ailleurs pourquoi il devrait exister de petits écarts à cette homogénéité, comme ceux qui sont observés dans les anisotropies du fond diffus cosmologique et qui seraient responsables de la formation des grandes structures dans l'univers (galaxie, amas de galaxies, etc.).

Cette situation est insatisfaisante et on a longtemps cherché à proposer des mécanismes qui, partant de conditions initiales relativement génériques, pourraient expliquer pourquoi l'univers a évolué vers l'état observé à notre ère. On peut en effet montrer que deux régions distantes de l'univers observable sont tellement éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont pas eu le temps d'échanger une quelconque information, quand bien même elles étaient bien plus proches l'une de l'autre par le passé qu'elles ne le sont aujourd'hui. Le fait que ces régions distantes présentent essentiellement les mêmes caractéristiques reste donc difficile à justifier. Ce problème est connu sous le nom de problème de l'horizon.

## Problème de la platitude



*Les différents types de géométries possibles pour l'Univers.  
Un autre problème qui apparaît quand on considère l'étude de l'évolution de  
l'univers est celui de son éventuel rayon de courbure*

La relativité générale indique que si la répartition de matière est homogène dans l'univers, alors la géométrie de celui-ci ne dépend que d'un paramètre, appelé courbure spatiale. Intuitivement, cette quantité donne l'échelle de distance au-delà de laquelle la géométrie euclidienne (comme le théorème de Pythagore) cesse d'être valable. Par exemple, la somme des angles d'un triangle de taille gigantesque (plusieurs milliards d'années-lumière) pourrait ne pas être égale à 180 degrés. Il reste parfaitement possible que de tels effets, non observés, n'apparaissent qu'à des distances bien plus grandes que celles de l'univers observable.

Néanmoins un problème apparaît si l'on remarque que cette échelle de longueur, appelée rayon de courbure, a tendance à devenir de plus en plus petite par rapport à la taille de l'univers observable. En d'autres termes, si le rayon de courbure était à peine plus grand que la taille de l'univers observable il y a 5 milliards d'années, il devrait être aujourd'hui plus petit que cette dernière, et les effets géométriques sus-mentionnés devraient devenir visibles. En continuant ce raisonnement, il est possible de voir qu'à l'époque de la nucléosynthèse le rayon de courbure devait être immensément plus grand que la taille de l'univers observable pour que les effets dus à la courbure ne soient pas encore visibles aujourd'hui. Le fait que le rayon de courbure soit encore aujourd'hui plus grand que la taille de l'univers observable est connu sous le nom de problème de la platitude.

## Problème des monopôles

La physique des particules prévoit l'apparition progressive de nouvelles particules lors du refroidissement résultant de l'expansion de l'univers. Certaines sont produites lors d'un phénomène appelé transition de phase que l'on pense générique dans l'univers primordial. Ces particules, dont certaines sont appelées monopôles, ont la particularité d'être stables, extrêmement massives (ordinairement  $10^{15}$  fois plus que le proton) et très nombreuses. Si de telles particules existaient, leur contribution à la densité de l'univers devrait en fait être considérablement plus élevée que celle de la matière ordinaire. Or, si une partie de la densité de l'univers est due à des formes de matière mal connues (voir plus bas), il n'y a certainement pas la place pour une proportion significative de monopôles. Le problème des monopôles est donc la constatation qu'il n'existe pas en proportion significative de telles particules massives dans l'univers, alors que la physique des particules prédit naturellement leur existence avec une abondance très élevée.

## Problème de la formation des structures

Si l'observation révèle que l'univers est homogène à grande échelle, elle révèle aussi qu'il présente des hétérogénéités importantes à plus petite échelle (planètes, étoiles, galaxies, etc.). Le fait que l'univers présente des hétérogénéités plus marquées à petite échelle n'est pas évident en soi. L'on sait expliquer comment, dans certaines circonstances, une petite hétérogénéité dans la distribution de matière peut croître jusqu'à former un objet astrophysique significativement plus compact que son environnement : c'est ce que l'on appelle le mécanisme d'instabilité gravitationnelle, ou instabilité de Jeans (du nom de James Jeans). Cependant, pour qu'un tel mécanisme se produise, il faut supposer la présence initiale d'une petite hétérogénéité, et de plus la variété des structures astrophysiques observées indique que la répartition en amplitude et en taille de ces hétérogénéités initiales suivait une loi bien précise, connue sous le nom de spectre de Harrison-Zeldovitch. Les premiers modèles de Big Bang étaient dans l'incapacité d'expliquer la présence de telles fluctuations. On parlait alors du problème de la formation des structures.

## Solutions proposées

### Sur le problème de l'horizon

Les problèmes de l'horizon et de la platitude ont une origine commune. Le problème de l'horizon vient du fait qu'à mesure que le temps passe, l'on a accès à des régions de plus en plus grandes, et contenant de plus en plus de matière. Par exemple, avec une expansion dictée par de la matière ordinaire, un nombre croissant de galaxies est visible au cours du temps. Il est donc surprenant que celles-ci possèdent les mêmes caractéristiques.

On se rend compte que ce problème pourrait être résolu si on imaginait qu'une certaine information sur l'état de l'univers ait pu se propager extrêmement rapidement tôt dans l'histoire de l'univers. Dans un tel cas, des régions extrêmement distantes les unes des autres pourraient avoir échangé suffisamment d'information pour qu'il soit possible qu'elles soient dans des configurations semblables. La relativité restreinte stipule cependant que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière, aussi paraît-il difficilement imaginable que le processus proposé soit possible.

Néanmoins, si on suppose que l'expansion de l'univers est très rapide et se fait à taux d'expansion constant, alors on peut contourner la limitation de la relativité restreinte. En effet, dans un tel cas, la distance entre deux régions de l'univers croît exponentiellement au cours du temps, tandis que la taille de l'univers observable reste constante. Une région initialement très petite et homogène va donc avoir la possibilité de prendre une taille démesurée par rapport à la région de l'univers qui est observable. Quand cette phase à taux d'expansion constant s'achève, la région homogène de l'univers dans laquelle nous nous trouvons peut alors être immensément plus grande que celle qui est accessible à nos observations. Quand bien même la phase d'expansion classique reprend son cours, il devient naturel d'observer un univers homogène sur des distances de plus en plus grandes, tant que les limites de la région homogène initiale ne sont pas atteintes. Un tel scénario nécessite que l'expansion de l'univers puisse se faire à taux constant, ou plus généralement de façon accélérée (la vitesse à laquelle deux régions distantes s'éloignent doit croître avec le temps). Les équations de Friedmann stipulent que cela est possible, mais au prix de l'hypothèse qu'une forme de matière atypique existe dans l'univers (elle doit avoir une pression négative).

### ***Sur le problème de la platitude***

Le problème de la platitude peut se résoudre de façon essentiellement identique. Initialement, le problème vient du fait que le rayon de courbure croît moins vite que la taille de l'univers observable. Or cela peut ne plus être vrai si la loi qui gouverne l'expansion est différente de celle qui gouverne l'expansion d'un univers empli de matière ordinaire. Si en lieu et place de celle-ci l'on imagine qu'une autre forme de matière aux propriétés atypiques existe (que sa pression soit négative), alors on peut montrer que dans un tel cas, le rayon de courbure va croître plus vite que la taille de l'univers observable. Si une telle phase d'expansion s'est produite dans le passé et a duré suffisamment longtemps, alors il n'est plus surprenant que le rayon de courbure ne soit pas mesurable.

### ***Sur le problème des monopôles***

Enfin, le problème des monopôles est naturellement résolu avec une phase d'expansion accélérée, car celle-ci a tendance à diluer toute la matière ordinaire de l'univers. Cela amène un nouveau problème : la phase d'expansion accélérée laisse un univers homogène, spatialement plat, sans reliques massives, mais vide de matière. Il faut donc repeupler l'univers avec de la matière ordinaire à l'issue de cette phase d'expansion accélérée. Le scénario de l'inflation cosmique, proposé par Alan Guth au début des années 1980 répond à l'ensemble de ces critères. La forme de matière atypique qui cause la phase d'expansion accélérée est ce que l'on appelle un champ scalaire (souvent appelé inflaton dans ce contexte), qui possède toutes les propriétés requises. Il peut être à l'origine du démarrage de cette phase accélérée si certaines conditions favorables génériques se trouvent réunies en un endroit de l'univers. À l'issue de cette phase d'expansion accélérée, c'est le champ scalaire lui-même responsable de cette phase d'expansion qui devient instable et se désintègre en plusieurs étapes en particules du modèle standard au cours d'un ensemble de processus complexes appelés préchauffage et réchauffage (voir plus haut). Les premiers modèles d'inflation souffraient d'un certain nombre de problèmes techniques, notamment les circonstances qui donnaient lieu au démarrage de la phase d'expansion accélérée et à son arrêt étaient peu satisfaisantes. Les modèles d'inflation plus récents évitent ces écueils, et proposent des scénarios tout à fait plausibles pour décrire une telle phase.

### ***Sur la formation des grandes structures***

De plus l'inflaton possède, comme toute forme de matière, des fluctuations quantiques (résultat du principe d'indétermination d'Heisenberg). Une des conséquences inattendues de l'inflation est que ces fluctuations, initialement de nature quantique, évoluent durant la phase d'expansion accélérée pour devenir des variations classiques ordinaires de densité. Par ailleurs le calcul du spectre de ces fluctuations effectué dans le cadre de la théorie des perturbations cosmologiques montre qu'il suit précisément les contraintes du spectre de Harrison-Zeldovitch.

Ainsi, l'inflation permet d'expliquer l'apparition de petits écarts à l'homogénéité de l'univers, résolvant du même coup le problème de la formation des structures susmentionnées. Ce succès inattendu de l'inflation a immédiatement contribué à en faire un modèle extrêmement attractif, d'autant que le détail des inhomogénéités créées lors de la phase d'inflation peut être confronté aux inhomogénéités existant dans l'univers actuel. L'accord remarquable entre des prédictions et les observations, observé par l'étude des données relatives aux fluctuations du fond diffus cosmologique observé entre autres par les satellites COBE et WMAP (et bientôt également par le satellite Planck), ainsi que les catalogues de galaxies comme celui réalisé par la mission SDSS est sans nul doute un des plus grands succès de la cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle.

Il n'en demeure pas moins vrai que des alternatives à l'inflation ont été proposées malgré les succès indéniables de celle-ci. Parmi ceux-ci, citons le pré Big Bang proposé entre autres par Gabriele Veneziano, et l'univers ekpyrotique. Ces modèles sont globalement considérés comme moins génériques, moins esthétiques et moins achevés que les modèles d'inflation. Ce sont donc ces derniers qui à l'heure actuelle sont de loin considérés comme les plus réalistes.

### ***Le modèle standard de la cosmologie***

La construction de ce qui est désormais appelé le modèle standard de la cosmologie est la conséquence logique de l'idée du Big Bang proposée dans la première partie du XX<sup>e</sup> siècle. Ce modèle standard de la cosmologie, qui tire son nom par analogie avec le modèle standard de la physique des particules, offre une description de l'univers compatible avec l'ensemble des observations de l'univers. Il stipule en particulier les deux points suivants :

- L'univers observable est issu d'une phase dense et chaude (Big Bang), durant laquelle un mécanisme a permis à la région qui nous est accessible d'être très homogène mais de présenter de petits écarts à l'homogénéité parfaite. Ce mécanisme est probablement une phase de type inflation, quoique d'autres mécanismes aient été proposés.
- L'univers actuel est rempli de plusieurs formes de matières :
  - Les photons, c'est-à-dire les particules représentant toute forme de rayonnement électromagnétique,
  - Les neutrinos,
  - La matière baryonique, qui forme les atomes,
  - Une ou plusieurs formes de matière inconnues en laboratoire mais prédites par la physique des particules appelées matière noire, responsable entre autres de la structure des galaxies, bien plus massives que l'ensemble des étoiles qui les composent,
  - Une forme d'énergie aux propriétés inhabituelles, appelée énergie noire ou constante cosmologique, responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers observée aujourd'hui (et probablement sans rapport direct avec l'inflation).

Un très grand nombre d'observations astronomiques rendent ces ingrédients indispensables pour décrire l'univers que nous connaissons. La recherche en cosmologie vise essentiellement à déterminer l'abondance et les propriétés de ces formes de matière, ainsi qu'à contraindre le scénario d'expansion accélérée de l'univers primordial (ou d'en proposer d'autres). Trois ingrédients de ce modèle standard de la cosmologie nécessitent de faire appel à des phénomènes physiques non observés en laboratoire : l'inflation, la matière noire et l'énergie noire. Néanmoins, les indications observationnelles en faveur de l'existence de ces trois phénomènes sont telles qu'il semble extrêmement difficile d'envisager d'éviter d'y faire appel. Il n'existe de fait aucun modèle cosmologique satisfaisant s'affranchissant d'un ou plusieurs de ces ingrédients.

## Quelques fausses idées sur le Big Bang :

### **Le Big Bang ne se réfère pas à un instant « initial » de l'histoire de l'Univers**

Il indique seulement que celui-ci a connu une période dense et chaude. De nombreux modèles cosmologiques décrivent de façons très diverses cette phase dense et chaude. Le statut de cette phase a d'ailleurs été soumis à maints remaniements. Dans un de ses premiers modèles, Georges Lemaître proposait un état initial dont la matière aurait la densité de la matière nucléaire ( $10^{15} \text{ g/cm}^3$ ). Lemaître considérait (à juste titre) qu'il était difficile de prétendre connaître avec certitude le comportement de la matière à de telles densités, et supposait que c'était la désintégration de ce noyau atomique géant et instable qui avait initié l'expansion (hypothèse de l'atome primitif). Auparavant, Lemaître avait en 1931 fait remarquer que la mécanique quantique devait invariablement être invoquée pour décrire les tout premiers instants de l'histoire de l'Univers, jetant par là les bases de la cosmologie quantique, et que les notions de temps et d'espace perdaient probablement leur caractère usuel. Aujourd'hui, certains modèles d'inflation supposent par exemple un univers éternel, d'autres modèles comme celui du pré Big Bang supposent un état initial peu dense mais en contraction suivi d'une phase de rebond, d'autres modèles encore, basés sur la théorie des cordes, prédisent que l'univers observable n'est qu'un objet appelé « brane » (tiré du mot anglais « *membrane* », identique à sa traduction française) plongé dans un espace à plus de quatre dimensions (le « *bulk* »), le big bang et le démarrage de l'expansion étant dus à une collision entre deux branes (univers ekpyrotique). Cependant, c'est lors de cette phase dense et chaude que se forment les particules élémentaires que nous connaissons aujourd'hui, puis, plus tard toutes les structures que l'on observe dans l'Univers. Ainsi reste-t-il légitime de dire que l'univers est né du Big Bang, au sens où l'Univers tel que nous le connaissons s'est structuré à cette époque.

**Le Big Bang n'est pas une explosion, il ne s'est pas produit « quelque part ».** Le Big Bang ne s'est pas produit en un point d'où aurait été éjectée la matière qui forme aujourd'hui les galaxies, contrairement à ce que son nom suggère et à ce que l'imagerie populaire véhicule souvent. À l'époque du Big Bang, les conditions qui régnaient « partout » dans l'Univers (du moins la région de l'Univers observable) étaient identiques. Il est par contre vrai que les éléments de matière s'éloignaient alors très rapidement les uns des autres, du fait de l'expansion de l'Univers. Le terme de Big Bang renvoie donc à la violence de ce mouvement d'expansion, mais pas à un « lieu » privilégié. En particulier il n'y a pas de « centre » du Big Bang ou de direction privilégiée dans laquelle il nous faudrait observer pour le voir. C'est l'observation des régions lointaines de l'Univers (quelle que soit leur direction) qui nous permet de voir l'Univers tel qu'il était par le passé (car la lumière voyageant à une vitesse finie, elle nous fait voir des objets lointains tels qu'ils étaient à une époque reculée, leur état actuel nous étant d'ailleurs inaccessible) et donc de nous rapprocher de cette époque. Ce qu'il nous est donné de voir aujourd'hui n'est pas l'époque du Big Bang lui-même, mais le fond diffus cosmologique, sorte d'écho lumineux de cette phase chaude de l'histoire de l'Univers. Ce rayonnement est essentiellement uniforme quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe, ce qui indique que le Big Bang s'est produit de façon extrêmement homogène dans les régions qu'il nous est possible d'observer. La raison pour laquelle il n'est pas possible de voir jusqu'au Big Bang est que l'Univers primordial est opaque au rayonnement du fait de sa densité élevée, de même qu'il n'est pas possible de voir directement le centre du Soleil et que l'on ne peut observer que sa surface. Voir l'article fond diffus cosmologique pour plus de détails.

### **Implications philosophiques et statut épistémologique**

L'aspect étonnamment « créationniste » que suggère le Big Bang, du moins dans son interprétation naïve, a bien sûr été à l'origine de nombreuses réflexions, y compris hors des cercles scientifiques, puisque pour la première fois était entrevue la possibilité que la science apporte des éléments de réponse à des domaines jusque là réservés à la philosophie et la théologie. Ce point de vue sera en particulier exprimé par le pape Pie XII (voir ci-dessous). Remarquons au passage que la chronologie suggérée par le Big Bang va à l'inverse des convictions des deux grands architectes des théories de la gravitation, Isaac



Newton et Albert Einstein, qui croyaient que la Création était éternelle. Dans le cas d'Einstein, toutefois, il ne semble pas avéré qu'il y avait un préconçu philosophique pour motiver cette intuition, qui pourrait être avant tout issue de motivations physiques. Lemaître élaborera un point de vue différent de celui exprimé par le pape : la cosmologie et la science en général, n'a pas vocation à conforter ou à infirmer ce qui est du domaine du religieux (ou philosophique). Elle se contente de proposer un scénario réaliste permettant de décrire de façon cohérente l'ensemble des observations dont on dispose à un instant donné. Pour l'heure, l'interprétation des décalages vers le rouge en termes d'expansion de l'Univers est établie au-delà de tout doute raisonnable, aucune autre interprétation ne résistant à un examen sérieux, ou étant motivée par des arguments physiques pertinents, et l'existence de la phase dense et chaude est également avérée (voir plus haut).

### Critiques de la part de scientifiques

Par contre les convictions ou les réticences des acteurs qui ont participé à l'émergence du concept ont joué un rôle dans ce processus de maturation, et il a souvent été dit que les convictions religieuses de Lemaître l'avaient aidé à proposer le modèle du Big Bang, bien que cela ne repose pas sur des preuves tangibles. Notons à l'inverse que l'idée que tout l'Univers eût pu avoir été créé à un instant donné paraissait à Fred Hoyle bien plus critiquable que son hypothèse de création lente mais continue de matière dans la théorie de l'état stationnaire, ce qui est sans doute à l'origine de son rejet du Big Bang. De nombreux autres exemples de réticences sont connus chez des personnalités du monde scientifique, en particulier :

- Hannes Alfvén, prix Nobel de physique 1970 pour ses travaux sur la physique des plasmas, qui rejeta en bloc le Big Bang, préférant lui proposer sa propre théorie, l'univers plasma, reposant sur une prééminence des phénomènes électromagnétiques sur les phénomènes gravitationnels à grande échelle, théorie aujourd'hui totalement abandonnée;
- Edward Milne, qui proposa des cosmologies newtoniennes, et fut d'ailleurs le premier à le faire (quoiqu'après la découverte de la relativité générale), dans lesquelles l'expansion était interprétée comme des mouvements de galaxies dans un espace statique et minkowskien;
- De façon plus posée, Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson qui reçurent le prix Nobel de physique pour leur découverte du fond diffus cosmologique, apportant ainsi la preuve décisive du Big Bang, ont reconnu qu'ils étaient adeptes de la théorie de l'état stationnaire. Wilson déclara notamment ne pas avoir eu la certitude de la pertinence de l'interprétation cosmologique de leur découverte : « Arno et moi, bien sûr, étions très heureux d'avoir une réponse de quelque nature que ce soit à notre problème. Toute explication raisonnable nous aurait satisfait. [...] Nous nous étions habitués à l'idée d'une cosmologie de l'état stationnaire. [...] Philosophiquement, j'aimais la cosmologie de l'état stationnaire. Aussi ai-je pensé que nous devions rapporter notre résultat comme une simple mesure : au moins la mesure pourrait rester vraie après que la cosmologie derrière s'avèrerait fausse. »

Même aujourd'hui, et malgré ses succès indéniables, le Big Bang rencontre encore une opposition (quoique très faible) de la part d'une partie du monde scientifique, y compris chez certains astronomes. Parmi ceux-ci figurent ses opposants historiques comme Geoffrey Burbidge, Fred Hoyle et Jayant Narlikar, qui après avoir finalement abandonné la théorie de l'état stationnaire, en ont proposé une version modifiée, toujours basée sur la création de matière, mais avec une succession de phases d'expansion et de recontraction, la théorie de l'état quasi stationnaire, n'ayant pas rencontré de succès probant en raison de leur incapacité à faire des prédictions précises et compatibles avec les données observationnelles actuelles, notamment celles du fond diffus cosmologique. Une des critiques récurrentes du Big Bang porte sur l'éventuelle incohérence entre l'âge de l'Univers, plus jeune que celui d'objets lointains, comme cela a été le cas pour les galaxies Abell 1835 IR1916 et HUDF-JD2, mais la plupart du temps, ces problèmes d'âge résultent surtout de mauvaises estimations de l'âge de ces objets (voir les articles correspondants), ainsi qu'une sous-estimation des barres d'erreur correspondantes.

Dans le monde francophone, Jean-Claude Pecker, membre de l'académie des sciences, Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique émettent des critiques sur le Big Bang. Christian Magnan, chercheur au Groupe de recherches en astronomie (GRAAL) de l'université de Montpellier continue à défendre fermement la réalité du Big Bang mais se montre néanmoins insatisfait du modèle standard de la cosmologie. Il critique notamment ce qu'il décrit comme « la soumission inconditionnelle au modèle d'Univers homogène et isotrope » (c'est-à-dire satisfaisant au Principe cosmologique) qui conduit selon lui à des difficultés. La plupart de ces critiques ne sont cependant pas étayées par des éléments scientifiques concrets, et ces personnes ne comptent pas de publications sur le sujet dans des revues scientifiques à comité de lecture. Il n'en demeure pas moins que la presse scientifique grand public se fait souvent l'écho de telles positions marginales, offrant parfois une vision faussée du domaine à ses lecteurs.

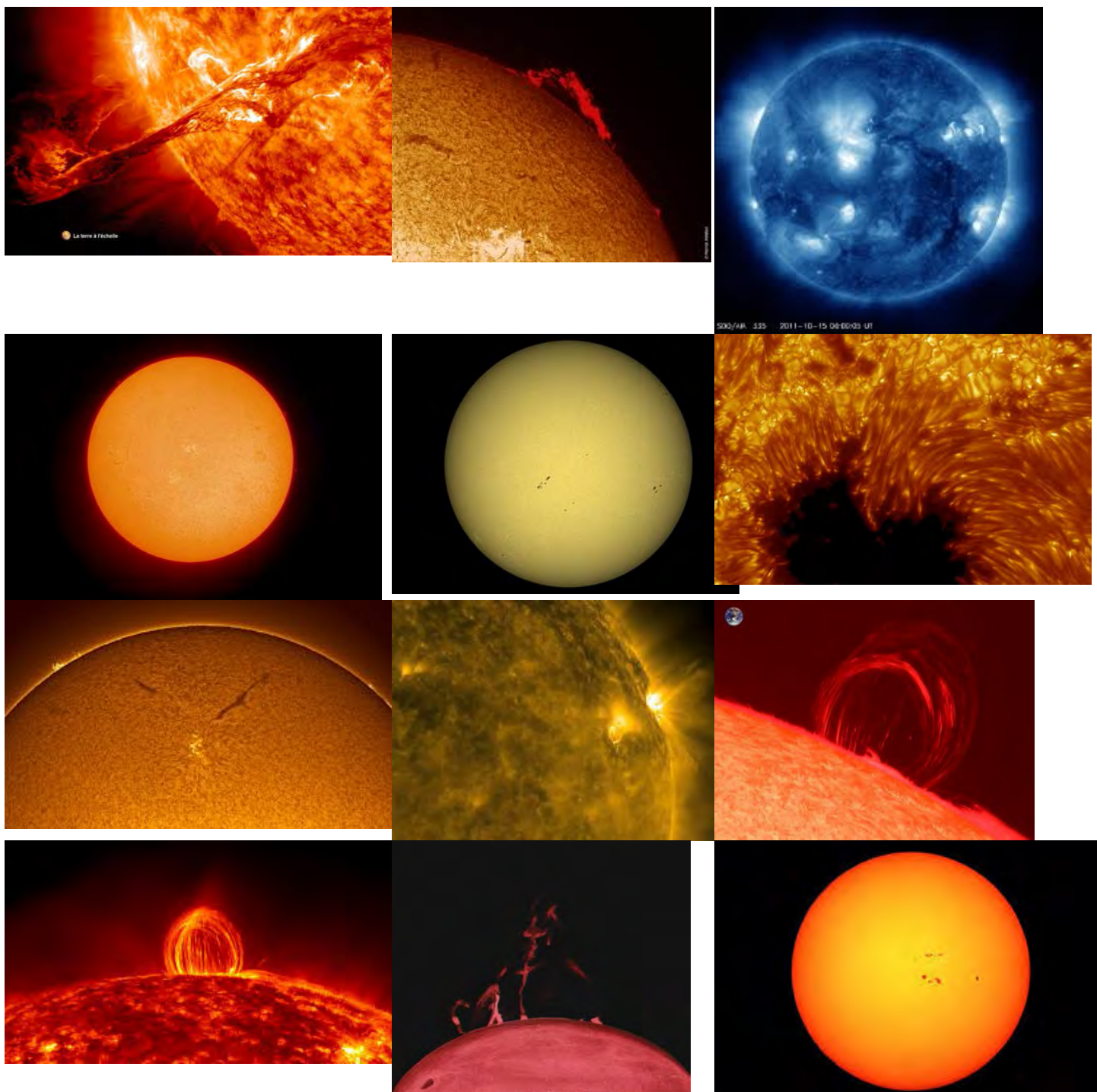
### Statut actuel

Les progrès constants dans le domaine de la cosmologie observationnelle donnent une assise unanimement considérée comme définitive au Big Bang, du moins parmi les chercheurs travaillant dans le domaine. Il n'existe d'autre part aucun modèle concurrent sérieux au Big Bang. Le seul qui ait jamais existé, la théorie de l'état stationnaire, est aujourd'hui complètement marginal du fait de son incapacité à expliquer les observations élémentaires du fond diffus cosmologique, de l'abondance des éléments légers et surtout de l'évolution des galaxies. Ses auteurs se sont d'ailleurs finalement résignés à en proposer au début des années 1990 une version significativement différente, la théorie de l'état quasi stationnaire, qui comme son nom ne l'indique pas comporte un cycle de phases denses et chaudes, lors desquelles les conditions sont essentiellement semblables à celles du Big Bang. Il n'existe désormais pas d'argument théorique sérieux pour remettre en cause le Big Bang. Celui-ci est en effet une conséquence relativement générique de la théorie de la relativité générale qui n'a à l'heure actuelle pas été mise en défaut par les observations. Remettre en cause le Big Bang nécessiterait donc soit de rejeter la relativité générale (malgré l'absence d'éléments observationnels allant dans ce sens), soit de supposer des propriétés extrêmement exotiques d'une ou

plusieurs formes de matière. Même dans ce cas il semble impossible de nier que la nucléosynthèse primordiale ait eu lieu, ce qui implique que l'Univers soit passé par une phase un milliard de fois plus chaude et un milliard de milliards de milliards de fois plus dense qu'aujourd'hui. De telles conditions rendent le terme de Big Bang légitime pour parler de cette époque dense et chaude. De plus, les seuls modèles réalistes permettant de rendre compte de la présence des grandes structures dans l'Univers supposent que celui-ci a connu une phase dont les températures étaient entre  $10^{26}$  et  $10^{29}$  fois plus élevées qu'aujourd'hui. Cela étant, il arrive que la presse scientifique grand public se fasse parfois l'écho de telles positions marginales. Il est par contre faux de dire que l'intégralité du scénario décrivant cette phase dense et chaude est comprise. Plusieurs époques ou phénomènes en sont encore mal connus, comme en particulier celle de la baryogénèse, qui a vu se produire un léger excès de matière par rapport à l'antimatière avant la disparition de cette dernière, ainsi que les détails de la fin de la phase d'inflation (si celle-ci a effectivement eu lieu), en particulier le préchauffage et le réchauffage : si les modèles de Big Bang sont en constante évolution, le concept général est en revanche très difficilement discutable.

# IV – Iconographie

## A) Le soleil

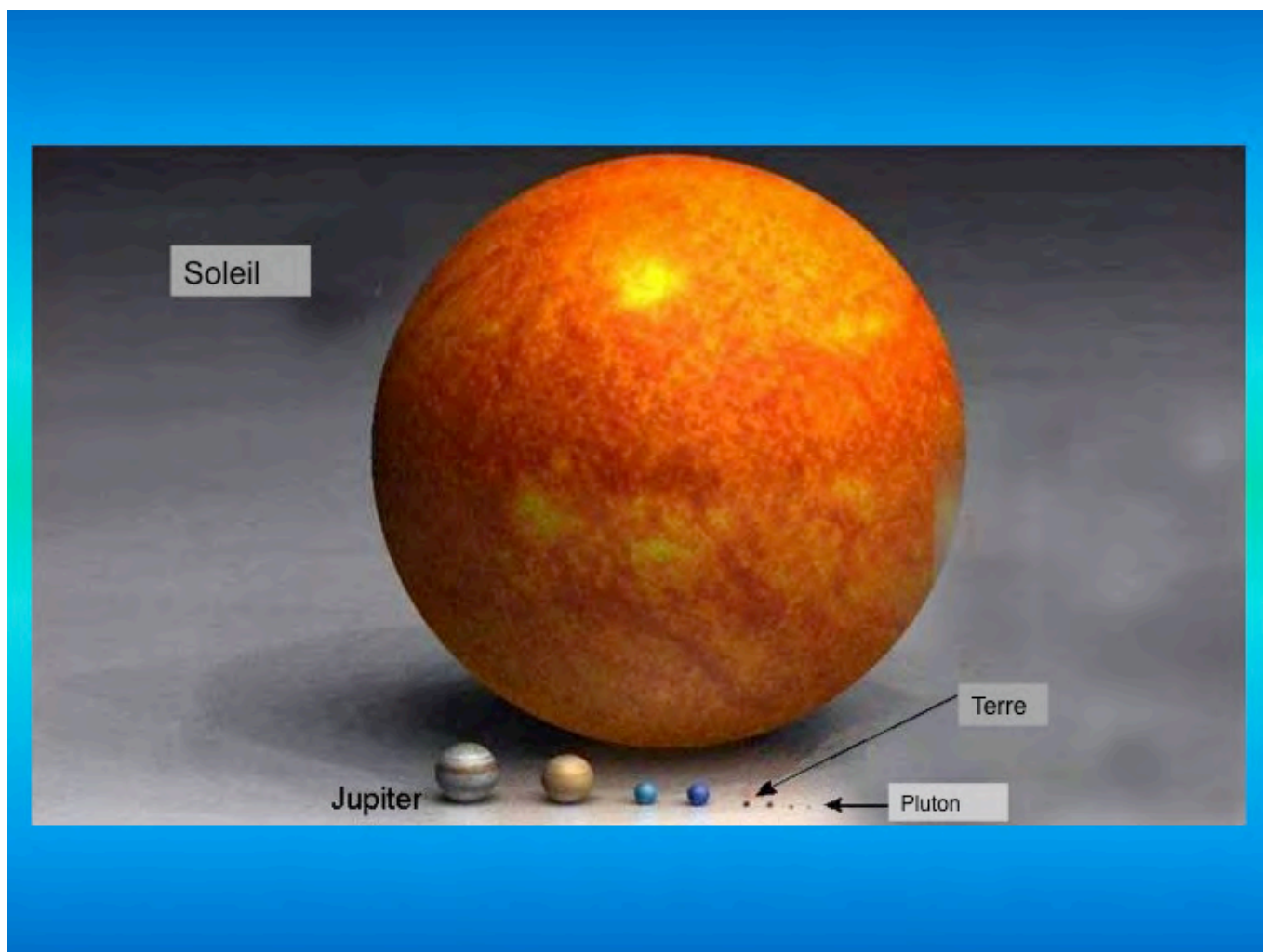
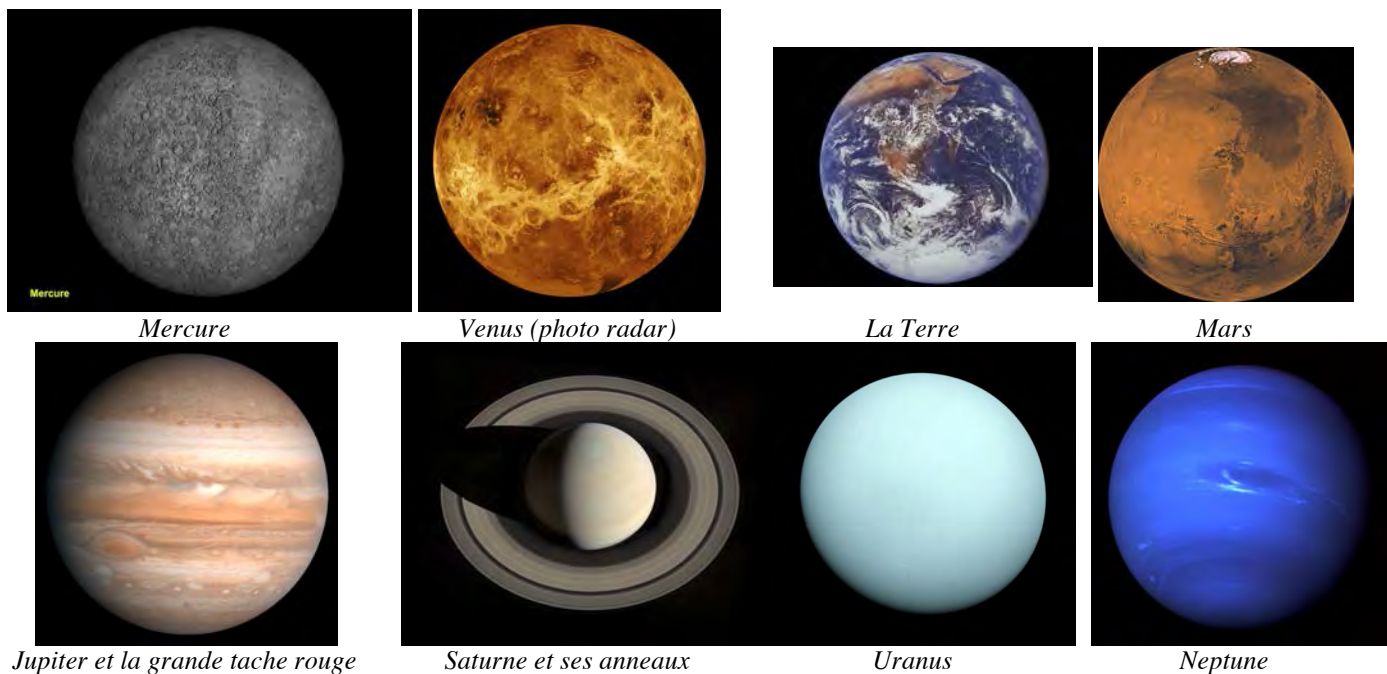


De gauche à droite et de bas en haut :

1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12

1) Gigantesque protubérance solaire de plus de 200.000 km de long en 2012 (voir taille de la terre en bas à gauche) – 2) Protubérance – 3) Le soleil vue en ultra-violet – 4) La sphère solaire – 5) idem avec quelques taches visibles – 6) le bord et l'intérieur d'une tache solaire – 7) Soleil et quelques taches – 8) Eruption solaire – 9) 10) et 11) Protubérances – 12) Taches solaires

## B) Les planètes



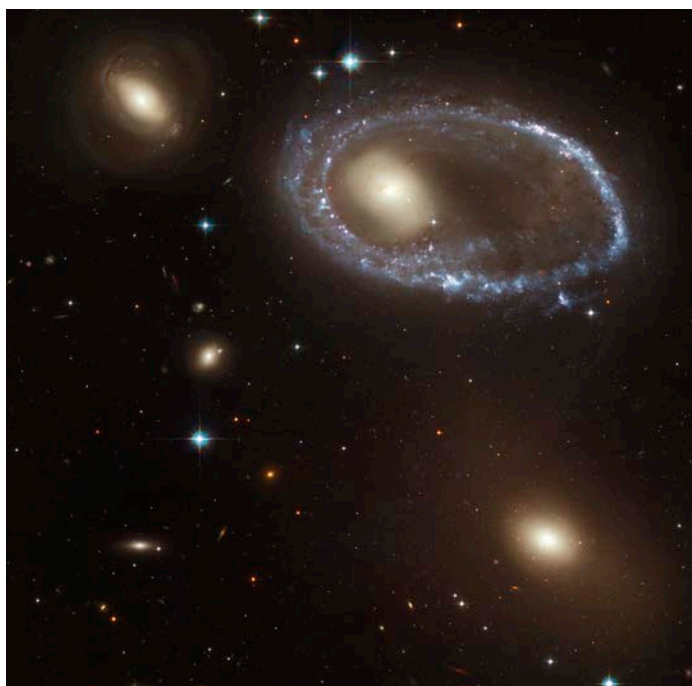
Tailles comparées du soleil et des planètes du système solaire  
En bas, dans l'ordre : Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Terre, Venus, Mars, Mercure et Pluton (qui n'est plus une planète)

## C) Les Galaxies



*La galaxie d'Andromède, également identifiée sous les numéros **M31** et **NGC 224**, est une galaxie spirale située à environ 2,55 millions d'années-lumière du Soleil, dans la constellation d'Andromède*

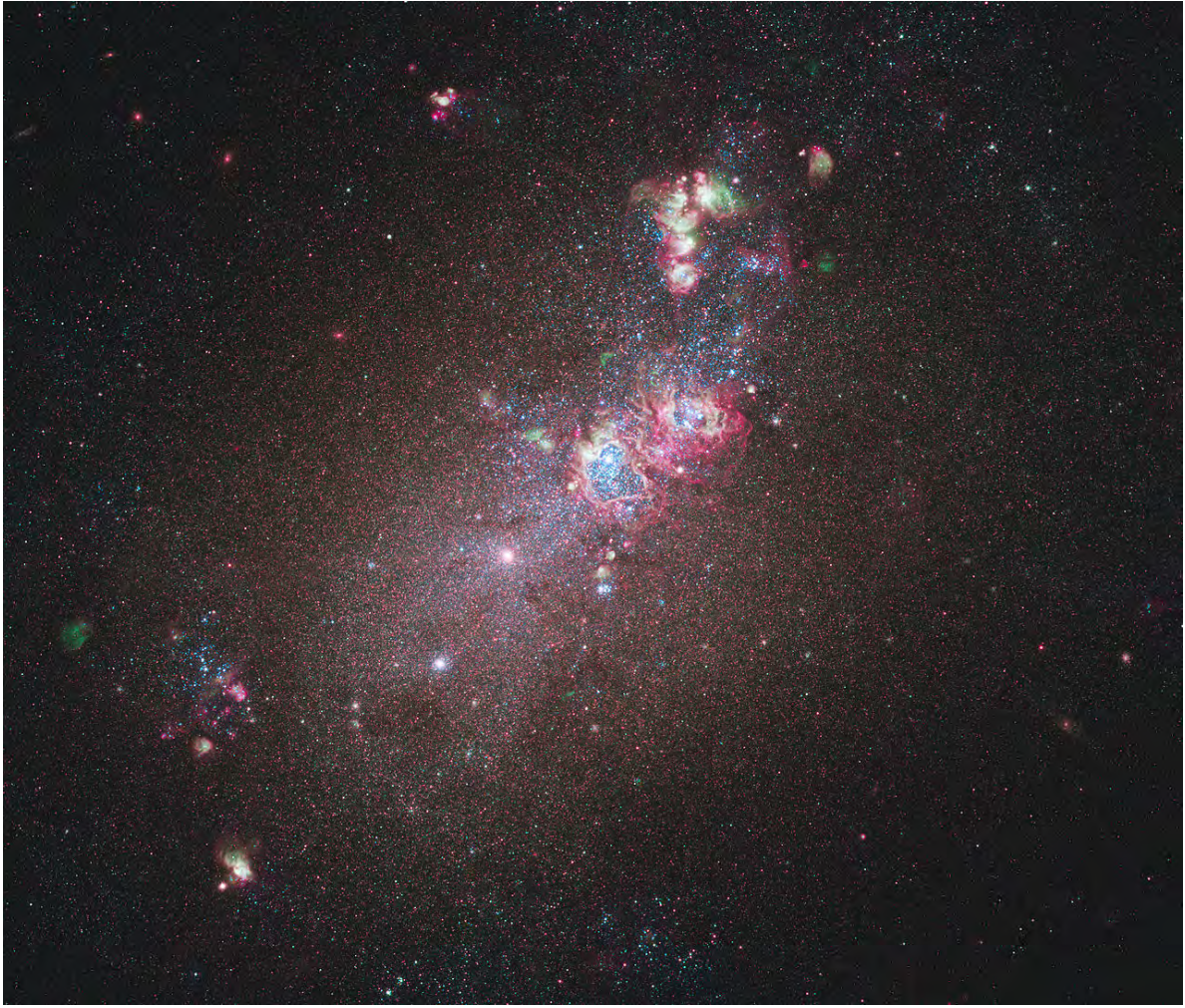
Appelée **Grande Nébuleuse d'Andromède** jusqu'à ce que sa nature galactique ait été reconnue dans les années 1920, la galaxie d'Andromède est la galaxie spirale la plus proche de la Voie lactée et la plus grande galaxie du Groupe local. D'un diamètre approximatif de 140 000 années-lumière, elle contiendrait environ mille milliards d'étoiles. Avec une magnitude visuelle de 3,4, la galaxie d'Andromède est l'une des rares galaxies visibles à l'œil nu depuis la Terre dans l'hémisphère nord. C'est également un des objets les plus étendus de la voûte céleste, avec un diamètre apparent de  $3,18^\circ$ , soit plus de six fois le diamètre apparent de la Lune.



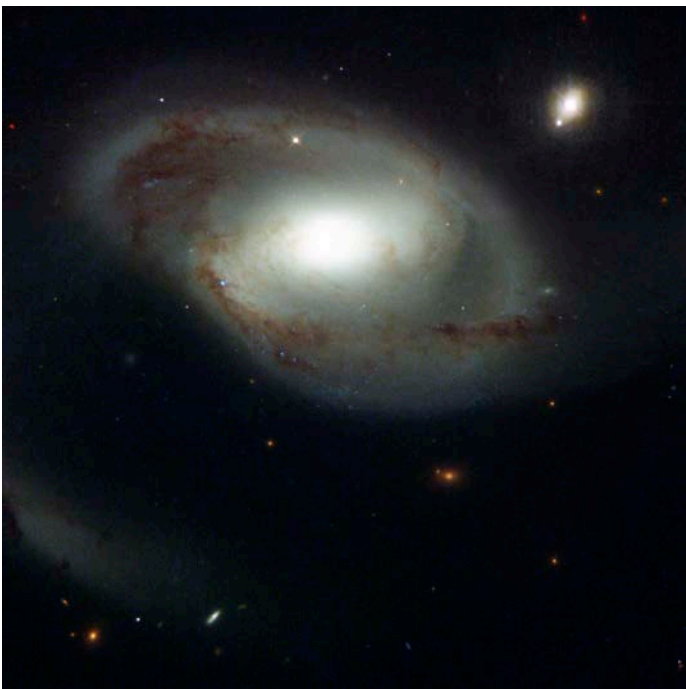
*Galaxie lenticulaire de l'anneau (Ring Galaxy) AM 0644-741, parmi d'autres galaxies sur le même cliché*



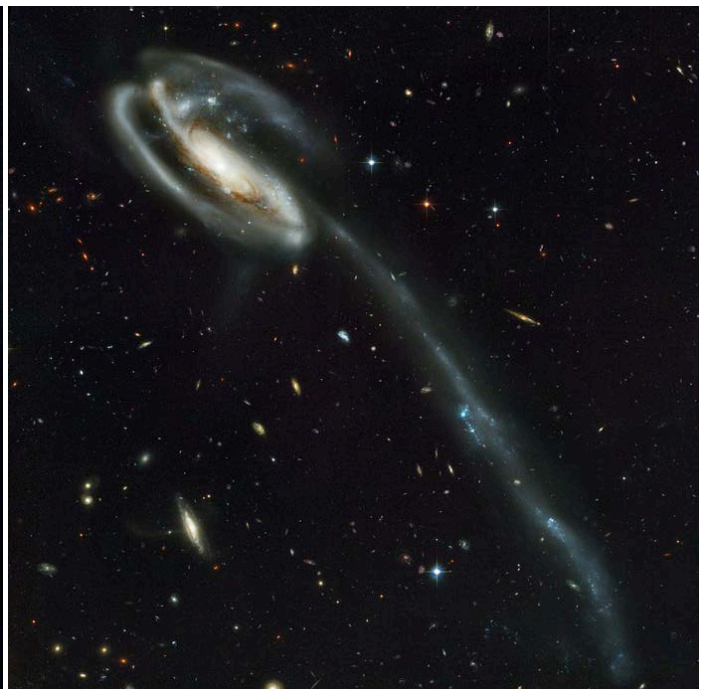
*La galaxie M64, dite de l'œil noir à 17 millions d'années-lumière de nous*



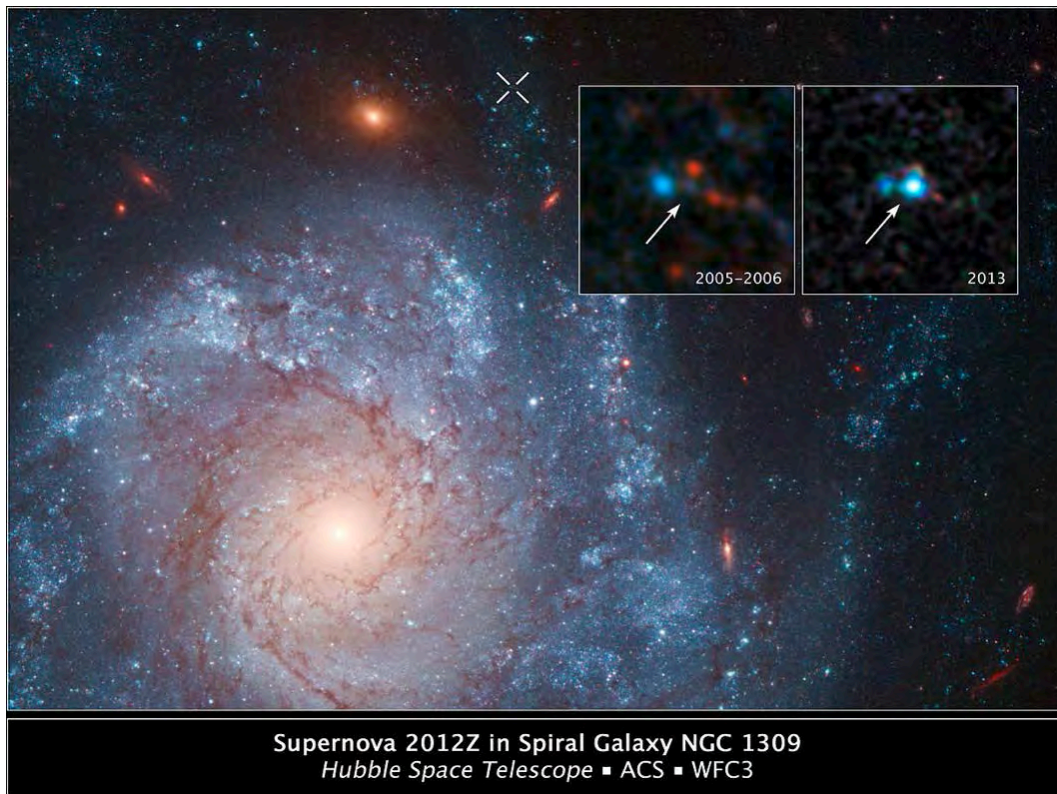
*La Galaxie naine irrégulière NGC 4214 (visible dans la constellation des Chiens de Chasse) prise par le télescope Hubble est un endroit idéal pour étudier la formation et l'évolution de nouvelles étoiles. L'essentiel de la galaxie est composé d'un énorme nuage d'hydrogène qui donne naissance à de nouvelles étoiles. Un vide en forme de cœur est visible en son centre. De forts vents stellaires sont la cause de la création de cette « bulle »*



*La galaxie spirale barrée NGC 4319 et le quasar Makarian 205 dans la constellation du Dragon*

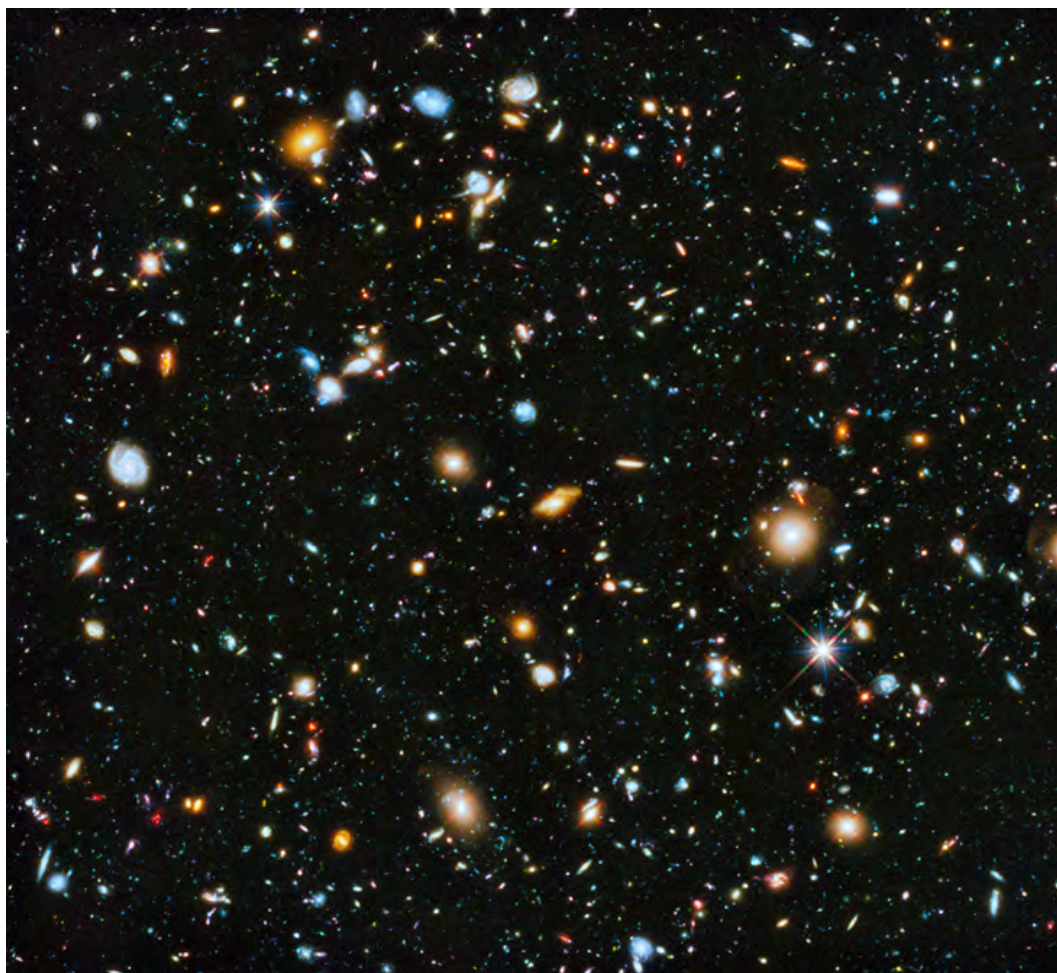


*La galaxie du têtard UGC 10214 dans le Dragon, à 420 millions d'années-lumière. Elle traîne une queue de 280 millions d'AL où se trouvent de très jeunes étoiles. Cette queue est probablement le résultat d'une collision avec une autre galaxie visible au 2° plan, derrière sa tête*



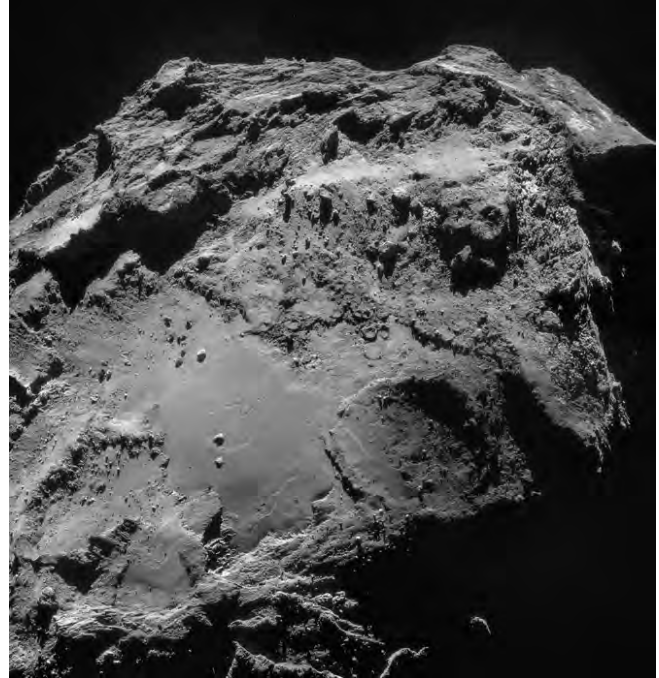
Supernova 2012Z in Spiral Galaxy NGC 1309  
Hubble Space Telescope ■ ACS ■ WFC3

*Explosion d'une supernova de type Iax (plus faible que le type Ia) dans la galaxie NGC 1309 située à 120 millions d'années-lumière dans la constellation de l'Eridan. On voit un détail de la zone où il y a une croix blanche sur la grande photo, des agrandissements de 2 clichés pris en 2005-2006, puis en 2013 (avant et après l'explosion)*

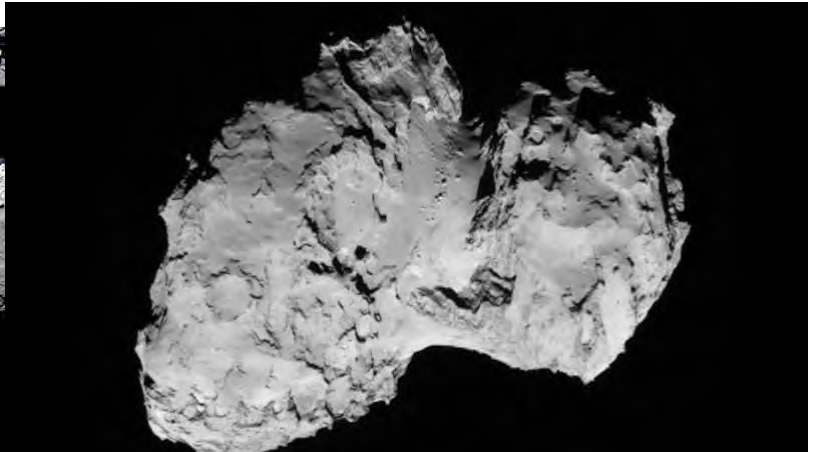
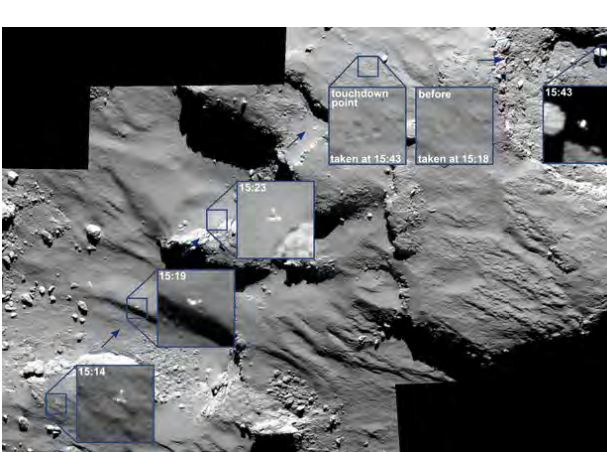


*Un autre champ de galaxies pris par Hubble dans la constellation du Fourneau (hémisphère sud). On a pu, sur ce cliché différencier environ 10.000 galaxies dans cette constellation qui est pauvre en étoiles de grosse taille et/ou d'autres objets lumineux, ce qui facilite ainsi l'exploration du ciel très lointain*

D) La comète Tchourioumov-Guérassimenko (Mission Rosetta Philae)



*Photos de la comète Tchourioumov-Guérassimenko prises par Rosetta*



*Photos de la comète Tchourioumov-Guérassimenko prises par Rosetta*





*Photo prise par l'atterrisseur Philæ lors de sa descente vers la comète*



*Photos de la comète Tchourioumov-Guérassimenko prises par Rosetta*



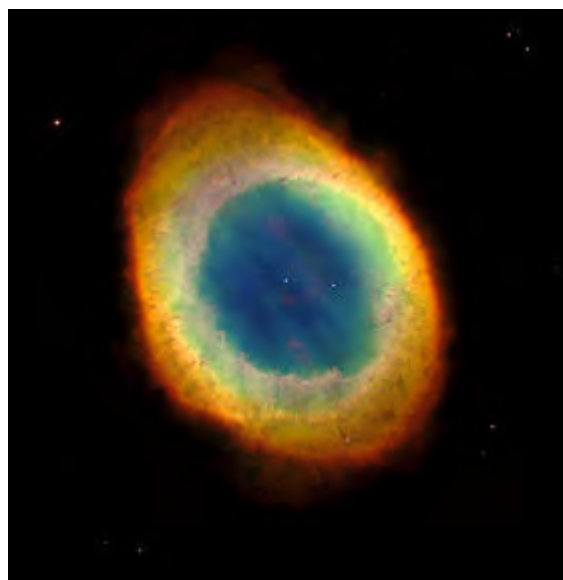
## E) Objets du ciel profond

### a) Nébuleuses planétaires

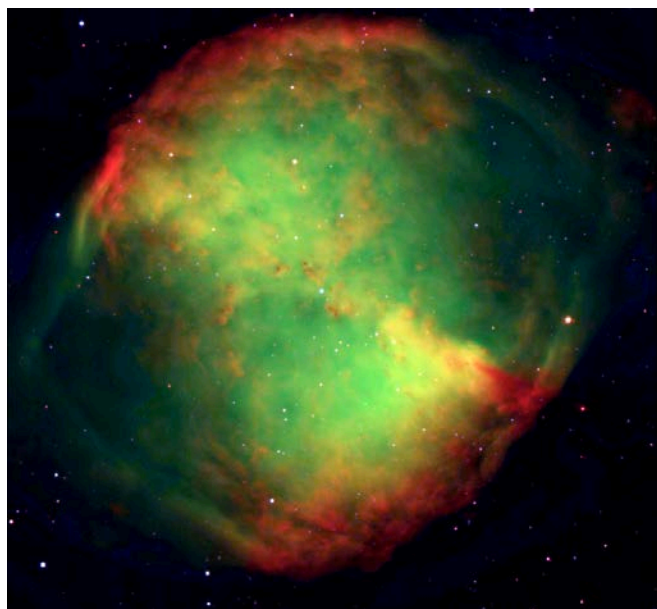
En astronomie, une **nébuleuse planétaire** (qui n'a rien à voir avec une planète) est un objet astronomique qui ressemble à un disque d'aspect nébuleux lorsqu'il est observé à basse résolution. En raison de cet aspect, semblable à celui des planètes, l'adjectif « planétaire » lui a été attaché, et il a été depuis maintenu pour conserver l'uniformité historique. À partir d'observations plus détaillées (en particulier spectroscopiques), on sait maintenant que les nébuleuses planétaires n'ont en fait aucun rapport avec les planètes. Il s'agit d'une nébuleuse en émission, constituée d'une coquille de gaz en expansion, éjecté d'une étoile en fin de vie, en transition de l'état de géante rouge à l'état de naine blanche pendant la branche asymptotique des géantes. Quand une petite étoile (moins de huit masses solaires) vieillit et a fini de consommer tout son hydrogène, puis son hélium, son cœur s'effondre pour former une naine blanche, tandis que les couches externes sont expulsées par la pression de radiation. Ces gaz forment un nuage de matière qui s'étend autour de l'étoile à une vitesse d'expansion de 20 à 30 kilomètres par seconde (70 000 à 100 000 km/h). Ce nuage est ionisé par les photons ultraviolets émis par l'étoile qui est devenue très chaude (50 000 à 100 000 K). L'énergie ainsi acquise par le gaz est réémise sous forme de lumière de moindre énergie, notamment dans le domaine du visible. Ce sont des objets qui évoluent assez rapidement; on en connaît environ 1 500 dans notre Galaxie. Elles jouent un rôle crucial dans l'enrichissement de notre univers, transformant l'hydrogène primordial en éléments plus lourds et expulsant ces nouveaux éléments dans le milieu interstellaire. Les nébuleuses planétaires sont souvent très colorées et leurs images sont parmi les plus spectaculaires. Un des exemples célèbres de ce type d'objet est la *nébuleuse de l'Anneau* située dans la constellation de la Lyre, d'où son autre appellation : *nébuleuse de la Lyre*.



*La nébuleuse de l'hélice NGC 7293, à 695 AL dans la constellation du Verseau*



*Nébuleuse de la Lyre M57 à 2 000 AL dans la constellation du même nom*



*Nébuleuse de l'haltère M27, à 860 AL dans la constellation du Petit Renard*



*Nébuleuse de l'œil de chat NGC 6543, à 3 600 AL dans la constellation du Dragon*

## b) Autres nébuleuses

Une **nébuleuse** (du latin *nebula*, **nuage**) désigne, en astronomie, un objet céleste composé de gaz raréfié, ionisé et/ou de poussières interstellaires. Avant les années 1920, le terme désignait tout objet du ciel d'aspect diffus. Étudiées par des astrophysiciens spécialisés dans l'étude du milieu interstellaire, les nébuleuses jouent un rôle clé dans la formation des étoiles. On distingue 2 grandes familles de nébuleuses :

- les nébuleuses diffuses, qui émettent ou réfléchissent de la lumière,
- les nébuleuses obscures, qui bloquent la lumière.

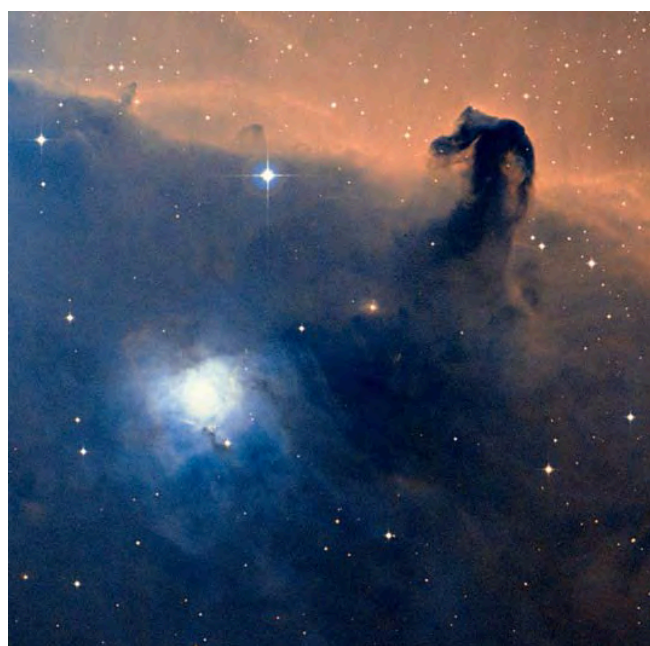
Les rémanents de supernova sont des nébuleuses en émission très étendues et sont le résultat de l'explosion violente d'une étoile de masse élevée. Elles arborent souvent une structure filamenteuse caractéristique qui évoque de la dentelle.

Il existe deux voies possibles pour créer une supernova :

- Une étoile massive qui arrête de générer de l'énergie de son cœur et finit par s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité. On parle de supernova à effondrement de cœur. Alors que l'étoile massive fait plus de 8 masses solaires, le résidu compact fait de l'ordre de 1,5 masse solaire.
- une naine blanche ayant accumulé assez de matière provenant d'une étoile voisine ou entrant en collision avec pour atteindre la masse critique qui engendre une explosion thermonucléaire. On parle de supernova thermonucléaire. Dans le cas où il y a accretion de matière et non collision, l'étoile compagnon peut éventuellement survivre à l'explosion. L'étoile qui est réduite ne laisse pas de résidu compact derrière elle.



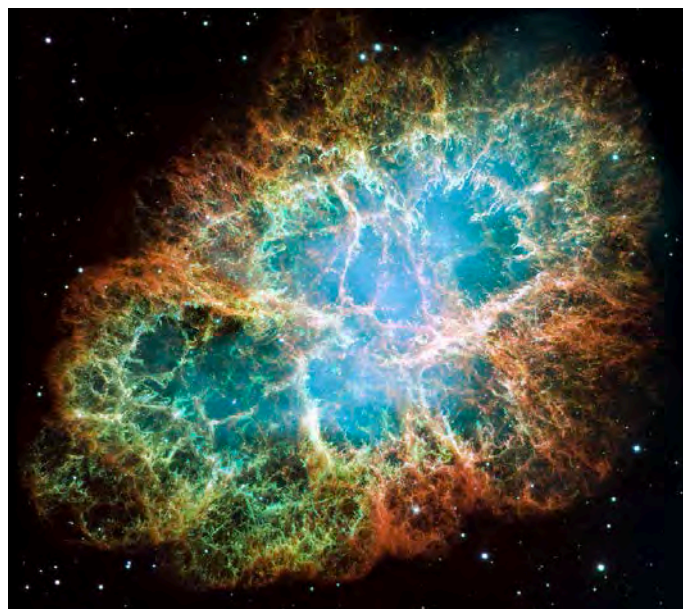
« Nébuleuse en émission » du Croissant NGC 6888, dans le Cygne, à 5 000 AL.



Nébuleuse (sombre) de la tête de cheval (Barnard 33 ou IC 434) à 1 500 AL dans la constellation d'Orion



La nébuleuse diffuse « trifide » M20 à 5 220 AL dans le Sagittaire

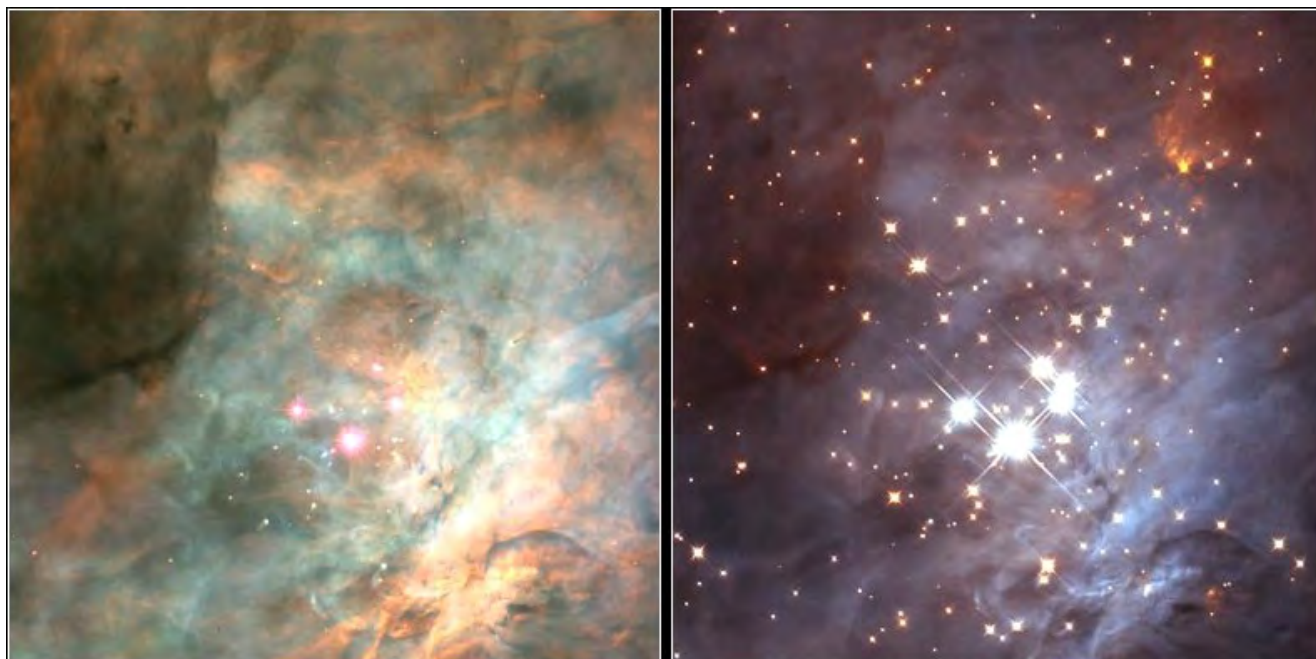


SN 1054, la Nébuleuse du Crabe par le télescope spatial Hubble dans la constellation du Taureau

La nébuleuse du Crabe s'étend sur une distance de six années-lumière et est composée des restes de l'explosion d'une supernova vue le 4 juillet 1054 par les chinois. Elle fut visible en plein jour pendant plusieurs mois. Les filaments oranges sont les restes en lambeaux de l'étoile et se composent principalement d'hydrogène. L'étoile à neutrons qui tourne rapidement sur elle-même, intégrée dans le centre de la nébuleuse, est la dynamo alimentant l'intérieur de la nébuleuse de l'étrange lueur bleuâtre. La lumière bleue provient des électrons tourbillonnant presque à la vitesse de la lumière autour de lignes du champ magnétique de l'étoile à neutrons. L'étoile à neutrons, comme un phare, émet des faisceaux de rayonnements jumeaux qui semblent battre 30 fois par seconde en raison de sa rotation. Une étoile à neutrons est le noyau écrasé ultra-dense de l'étoile qui a explosé.



*NGC 7635, la nébuleuse de la Bulle, est gonflée par le vent stellaire d'une gigantesque étoile centrale de type O, l'étoile BD+602522. Un nuage moléculaire géant est visible sur la droite de l'image. Ce nuage contient l'expansion de la bulle de gaz, alors qu'il est repoussé par les radiations chaudes de l'étoile centrale de la bulle. La radiation réchauffe les régions denses du nuage moléculaire et provoque son illumination. La Nébuleuse de la Bulle mesure environ 10 années-lumière de diamètre et elle est visible dans la constellation de Cassiopee. On estime sa distance aux alentours de 11 000 années-lumière*



*Le **Trapèze**, ou **Trapèze d'Orion** est un amas ouvert d'étoiles compact situé au cœur de la nébuleuse d'Orion, dans la constellation d'Orion. On le voit ici (images de Hubble) en lumière visible à gauche et en infrarouge à droite. Il a été découvert par Galilée. Le Trapèze est un amas relativement jeune qui s'est formé directement à partir de la nébuleuse parente. Les cinq étoiles les plus brillantes font environ 15-30 masses solaires. Elles sont situées à l'intérieur d'un volume de 1,5 années-lumière de diamètre et sont à l'origine de l'essentiel de l'illumination de la nébuleuse environnante. Le Trapèze pourrait faire partie du plus vaste Amas de la Nébuleuse d'Orion, un groupe d'environ 2 000 étoiles à l'intérieur d'un diamètre de 20 années-lumière. L'amas est facilement identifiable par l'astérisme formé par quatre étoiles relativement brillantes. La plus brillante des quatre étoiles est C, ou Theta Orionis C, avec une magnitude apparente de 5,13. A et B sont toutes deux des binaires à éclipses. Les images infrarouge du Trapèze sont plus aptes à pénétrer les nuages de poussières environnants, et ont révélé de nombreuses autres composantes stellaires. Environ la moitié des étoiles de l'amas possèdent des disques circumstellaires en évaporation, qui sont des précurseurs probables de formation planétaire. De plus, des naines brunes et des étoiles en fuite de faible masse ont été repérées*



**M42, la grande nébuleuse d'Orion** vue par le télescope spatial Hubble. Cette image est l'une des images spatiales les plus détaillées jamais produites. Elle a nécessité l'usage de tous les instruments de Hubble au cours de 105 orbites successives. Cette image couvre une surface comparable à celle de la pleine lune. Cette nébuleuse, dans son ensemble, fait 33 années-lumière de large et est à 1 340 années lumière de nous. Elle est la nébuleuse diffuse la plus luisante, visible à l'œil nu dans un ciel de nuit sans pollution lumineuse et peut être facilement vue avec des jumelles. Elle se répand sur un pan de ciel de  $66 \times 60$  minutes d'arc, soit quatre fois plus que la pleine lune. La nébuleuse d'Orion est la partie principale d'un nuage de gaz et de poussières appelé le nuage d'Orion. Ce nuage s'étend sur près de la moitié de la constellation et contient en plus la Boucle de Barnard et la célèbre nébuleuse de la Tête de Cheval. Elle contient un amas ouvert très jeune renfermant de nombreuses étoiles. La nébuleuse d'Orion fut découverte en 1610 par Nicolas-Claude Fabri de Peiresc qui fut apparemment le premier à remarquer son aspect nébuleux. Elle abrite en son sein une énorme bulle de gaz très ténu, d'une température de 2 millions de degrés Celsius. Cette température est tellement élevée que le gaz émet non pas dans le domaine visible, mais dans celui des rayons X. C'est l'un des objets célestes les plus faciles à observer. En hiver, il se trouve dans le baudrier de la constellation d'Orion, juste en dessous de sa ceinture qui se repère facilement étant formée de trois étoiles très serrées et alignées. Le baudrier ressemble à une larme tombant vers l'horizon. En pointant un télescope, une lunette ou encore de bonnes jumelles, la nébuleuse apparaît. Un faible grossissement (entre 30 et 60 fois) permet de l'observer dans son ensemble. Un grossissement plus important, de l'ordre de 100 à 200 fois, permet d'observer les étoiles qui la composent, notamment les quatre qui forment l'amas du Trapèze.



*La nébuleuse de la Tarentule ou NGC 2070 est une gigantesque usine de fabrication d'étoiles de 1000 années-lumière de large. C'est la plus grande et la plus violente nébuleuse d'émission connue dans la groupe galactique local. Située à une distance d'environ 170 000 années-lumière, elle peut être observée dans la constellation de la Dorade dans le ciel austral. Elle appartient à l'une des galaxies voisines de la Voie Lactée, le Grand Nuage de Magellan. La Nébuleuse de la Tarentule contient plus d'un demi million de fois la masse du Soleil, ce vaste et flamboyant nuage accueille certaines des étoiles les plus massives connues. La nébuleuse doit son nom à la disposition de ses secteurs les plus lumineux qui ressemblent en quelque sorte aux pattes d'une araignée. Si la nébuleuse de la tarentule se situait dans notre propre galaxie, à la distance d'une autre pépinière stellaire, la Nébuleuse d'Orion (distante de seulement 1 350 années-lumière), elle couvrirait un quart du ciel et serait visible même en plein jour.*



*M17 également connue sous les noms de nébuleuse Oméga, le Cygne, le Fer à Cheval, ou le Homard est une nébuleuse située dans le Sagittaire. Cette nébuleuse très brillante, aux couleurs rosées, est visible à l'œil nu sous les basses latitudes. Ceci est dû au fait qu'elle abrite des étoiles jeunes nées de la nébuleuse et qui irradient le gaz alentour. En infrarouge, on a pu y observer une quantité importante de poussières favorables à la formation d'étoiles. Au sein de la nébuleuse se trouve un amas ouvert constitué d'une trentaine d'étoiles masquées par la nébuleuse. Le diamètre de la nébuleuse avoisine les 40 années-lumière. La masse totale du gaz qui forme la nébuleuse Oméga est d'environ 800 fois celle du Soleil. M17 est située à 5 500 années lumière de notre système solaire.*



*Nébuleuse de l'Aigle ou M16. Dans son cœur on découvre de vastes colonnes de poussières. Ces colonnes abritent, des globules de Bok (énormes nuages de gaz et de poussières d'une masse de 10 à 50 fois la masse du Soleil) où naissent des étoiles. Ces colonnes sont surnommées les Piliers de la Création. M16, est située à environ 7 000 années-lumière de la Terre, couvre environ 20 années-lumière. Elle est visible avec des jumelles en direction de la constellation du Serpent. La fine colonne verticale de poussières d'étoiles en formation que l'on voit au centre de l'image un peu à gauche, est connue sous le nom de la fée de la nébuleuse de l'aigle.*



NGC 7380 ou la **nébuleuse du Sorcier**. Cette splendeur du ciel est éclairée par les étoiles qu'elle contient et par les étoiles proches situées derrière elles. La gravitation suffisamment forte de la nébuleuse NGC 7380, déclenche la naissance des étoiles en son cœur. Les vents stellaires et les radiations des étoiles sont tellement puissants que le gaz et la poussière sont repoussés et créent des falaises de matière resplendissantes. La nébuleuse du Sorcier est située à seulement 8 000 années-lumière, elle entoure l'amas ouvert NGC 7380. Cette région de formation d'étoiles s'étend sur quelque 100 années-lumière, ce qui dans le ciel terrestre lui donne une taille apparente légèrement plus grande que celle de la Lune. Elle est dans la constellation de Céphée. Image : La couleur rouge provient du feu des étoiles nouvelles situées au cœur de la nébuleuse, le rouge est la signature caractéristique des atomes ionisés de l'hydrogène.

### c) Amas ouverts

En astronomie, un **amas ouvert** est un amas stellaire groupant environ de 100 à 1 000 étoiles de même âge liées entre elles par la gravitation, et dont la dimension varie entre un diamètre de 1,5 à 15 pc, avec une moyenne de 4 à 5 pc. Les amas ouverts sont peu lumineux et s'observent essentiellement dans notre Galaxie, où ils se situent dans le plan galactique, et dans les galaxies proches : les deux Nuages de Magellan et la galaxie d'Andromède.

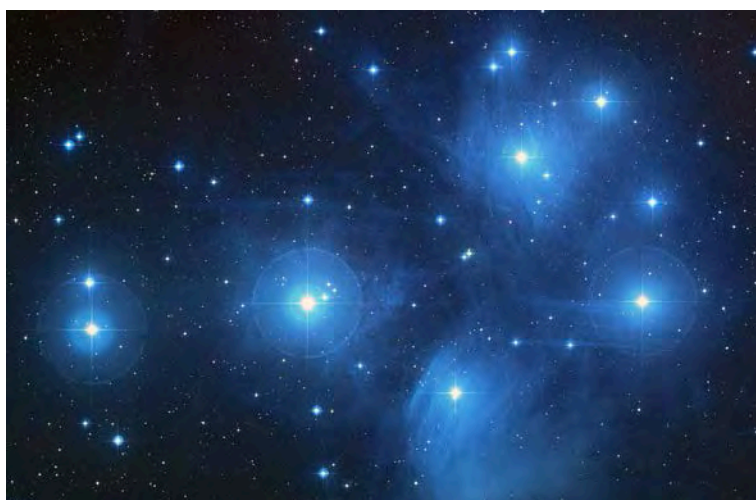
On pense qu'ils se forment au sein des nuages moléculaires, les grands nuages de gaz et de poussières qui constituent les nébuleuses diffuses. Comme le temps nécessaire à leur formation est beaucoup plus faible que leur durée de vie, toutes les étoiles d'un amas ouvert ont plus ou moins le même âge et comme elles proviennent de la même nébuleuse, elles ont la même composition chimique. Ainsi, les seules différences existant entre les étoiles d'un amas ouvert proviennent de leur masse. La plupart des amas ouverts sont dominés par leurs étoiles géantes bleues de type O ou B, qui sont très lumineuses mais de courte durée. On peut estimer l'âge d'un amas ouvert en regardant le rapport entre le nombre d'étoiles bleues, jaunes et rouges : plus les étoiles bleues sont nombreuses, plus l'amas est jeune. L'amas ouvert le plus proche est dans la Grande Ourse, ou pour être plus exact, *c'est la Grande Ourse*. En effet, la plupart des étoiles de ce célèbre astérisme sont les membres d'un vieil amas ouvert mobile presque entièrement dispersé. Sirius est un ancien membre de cet amas et le Soleil est actuellement dans le « courant » de la Grande Ourse, mais n'en est pas un vrai membre, il passe juste à travers. Les étoiles d'un amas ouvert sont initialement très proches les unes des autres et se déplacent à la même vitesse autour du centre de la galaxie. Après environ un



demi milliard d'années, un amas ouvert classique tel que les Pléiades ou les Hyades, tend à être perturbé par des facteurs externes, tels que des nuages moléculaires passant à proximité, donnant des vitesses légèrement différentes à ses étoiles qui dérivent ainsi de plus en plus. Quand ceci se produit, l'amas devient un « courant » d'étoiles, qui ne sont plus assez proches pour former un amas ouvert, mais qui se déplacent toutes dans une direction et à des vitesses semblables. Après environ un milliard d'années, l'amas a totalement disparu, les étoiles l'ayant constitué étant dispersées par la rotation de la voie lactée (comme pour l'amas auquel appartenait le Soleil). Les amas extrêmement denses peuvent rester ensemble plus longtemps, mais aucun amas ouvert ne pourrait subsister aussi longtemps que l'âge du soleil, soit cinq milliards d'années.



*L'amas ouvert M37 dans le Cocher, à 4 500 AL*



*Une pépinière d'étoiles jeunes en formation*

*Les Pléiades, un amas ouvert d'environ 3000 étoiles et situés à une distance de 400 années-lumière (120 parsecs) de la Terre dans la constellation du Taureau. Elles sont aussi appelée "les Sept Sœurs", ou par les désignations astronomiques NGC 1432/35 et M45.*

#### **d) Amas globulaires**

En astronomie, un **amas globulaire** est un amas stellaire très dense, contenant typiquement une centaine de milliers d'étoiles distribuées dans une sphère dont la taille varie de 20 à quelques centaines d'années-lumière. Leur densité est ainsi nettement plus élevée que celle des amas ouverts. Les étoiles de ces amas sont généralement des géantes rouges.

On compte 150 amas globulaires dans notre Galaxie. Mais il en existe sans doute d'autres, indétectables car masqués par le centre galactique. Les amas globulaires font partie du halo galactique, ils orbitent autour du centre galactique à une distance variant de 1 à 100 kiloparsecs. C'est par leur étude que Harlow Shapley, en 1918, a pu déterminer la position du Soleil au sein de la Galaxie. Comme les amas globulaires contiennent les étoiles les plus âgées d'une galaxie, ils contribuent également de façon importante à l'étude de l'évolution des étoiles et des galaxies.

La plupart des amas globulaires sont très anciens et se sont probablement formés en même temps que leur galaxie hôte. Néanmoins, certains amas globulaires de couleur bleue ont été récemment observés et leur couleur est, normalement, représentative des étoiles chaudes et jeunes. On ne sait pas encore si des amas globulaires peuvent se former relativement tard dans la vie d'une galaxie. Certains amas globulaires, comme Omega Centauri de notre Galaxie, peuvent avoir une masse de plusieurs millions de masses solaires. Certaines étoiles de type particulier, comme les traînardes bleues (blue stragglers), les pulsars-millisecondes ou les binaires X de faible masse (*low-mass X-ray binaries*), sont beaucoup plus communes dans les amas globulaires. La densité des étoiles dans les amas globulaires étant très élevée, les collisions ou quasi-collisions entre étoiles y sont parfois possibles, contrairement aux autres régions d'une galaxie. Lorsqu'on a pris en compte la distance des amas globulaires, il est apparu que leur distribution était fortement asymétrique et que la partie observable du disque galactique n'en constituait qu'une fraction, le reste étant obscurci par le gaz et la poussière du disque galactique.

La plupart des amas globulaires de la Voie lactée sont observés à proximité du noyau galactique et une majorité apparaît dans la partie du ciel céleste centrée sur le noyau. En 1918, cette distribution très asymétrique a été utilisée par Harlow Shapley pour déterminer les dimensions de notre galaxie dans son ensemble. En prenant l'hypothèse que les amas globulaires suivaient une distribution plus ou moins sphérique autour du centre de la galaxie, il utilisa leur position pour calculer la position du Soleil dans la Voie lactée. Ce faisant, Shapley a délogé le soleil à la périphérie de notre galaxie (dont on sait maintenant qu'il se trouve à quelque 7,8 kpc du centre). Il a ainsi montré que la taille de notre galaxie est bien plus grande que ce qu'on pensait auparavant. Les distances estimées par Shapley étaient faussées parce qu'il n'avait pas tenu compte de l'absorption de la lumière des astres observés en provenance de certains amas par la poussière galactique, faisant paraître ces amas plus lointains. Son estimation est cependant du même ordre de grandeur que la taille actuellement admise. Les mesures de Shapley indiquaient aussi que le Soleil était relativement loin du centre de la Galaxie, contrairement aux données de son époque

reposant sur la distribution régulière des étoiles ordinaires dans le ciel. En fait, les étoiles ordinaires sont souvent obscurcies par le gaz et les poussières du disque galactique alors que les amas globulaires sont en dehors de ce disque et peuvent être vus de beaucoup plus loin.



*M13, le grand amas d'Hercule, à 22 000 AL*



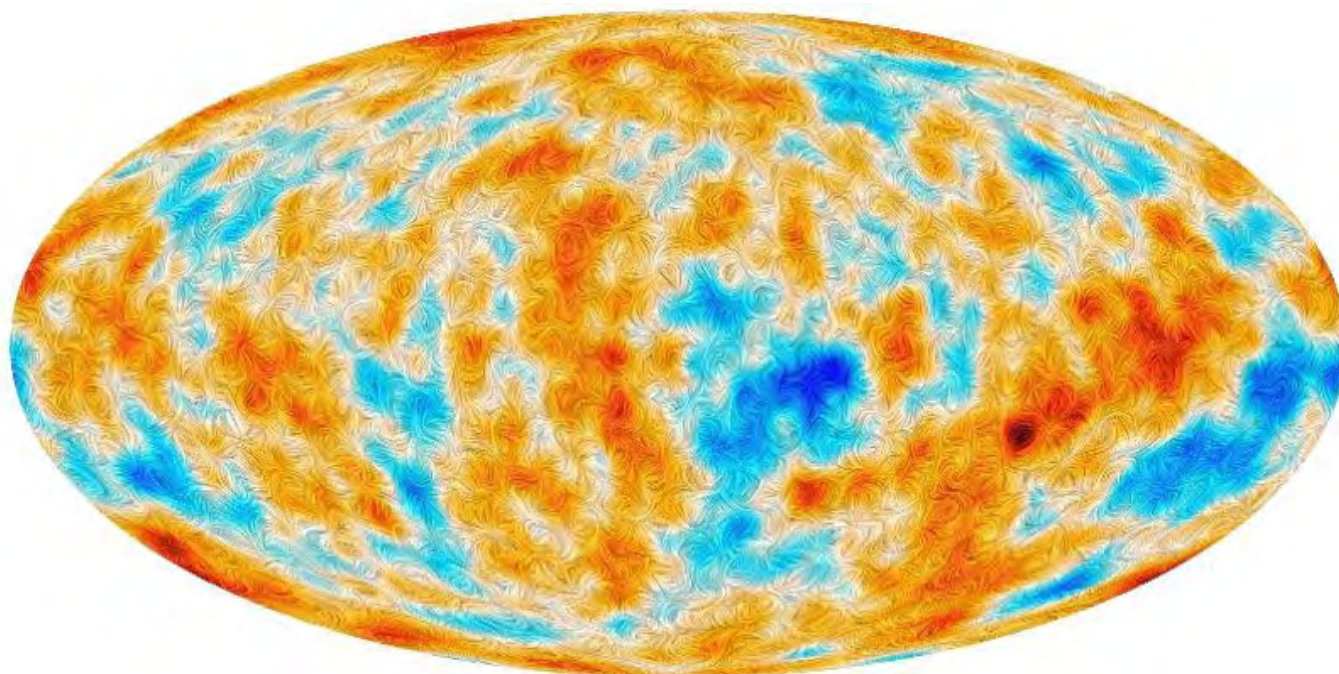
*NGC 5139, Oméga Centauri à 15 700 AL dans le Centaure. Âgé d'environ de 12 milliards d'années, il contient plusieurs millions d'étoiles de population II, avec une densité stellaire telle qu'on évalue la distance moyenne entre les étoiles du centre de l'amas à seulement 0,1 année-lumière. On est ici à la limite d'une galaxie naine, satellite de la Voie Lactée*

## F) Planck dévoile de nouveaux secrets sur l'Univers

Janvier 2015

Les «yeux» du satellite européen Planck n'ont pas grand-chose à voir avec les nôtres. Pour commencer, ils ne regardent pas la lumière visible mais les micro-ondes, c'est-à-dire le rayonnement naturellement émis par des objets très froids plongés dans le noir. Mais ce n'est pas tout. Ils détectent également une autre information capitale : la polarisation de cette lumière. La polarisation est une notion difficile à appréhender, car les humains y sont insensibles. Si nous étions des abeilles, en revanche, nous serions capables de voir la «forme» des rayons lumineux, c'est-à-dire leur polarisation.

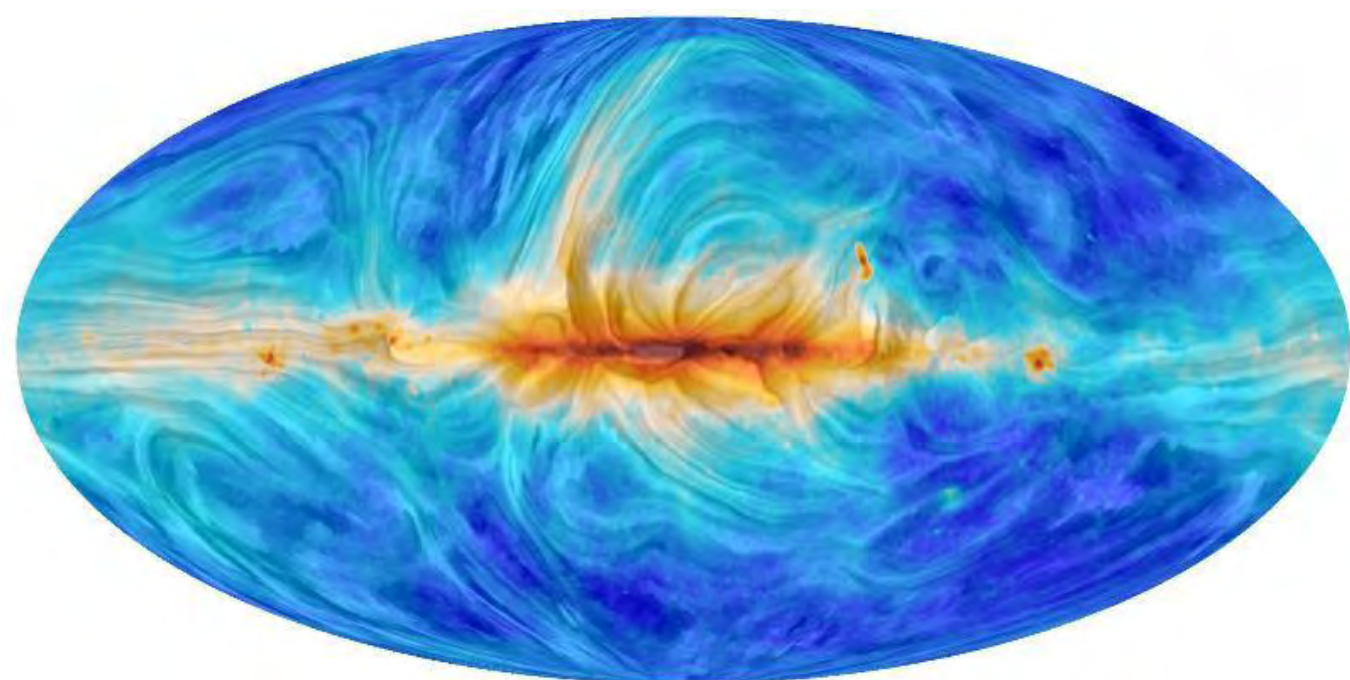
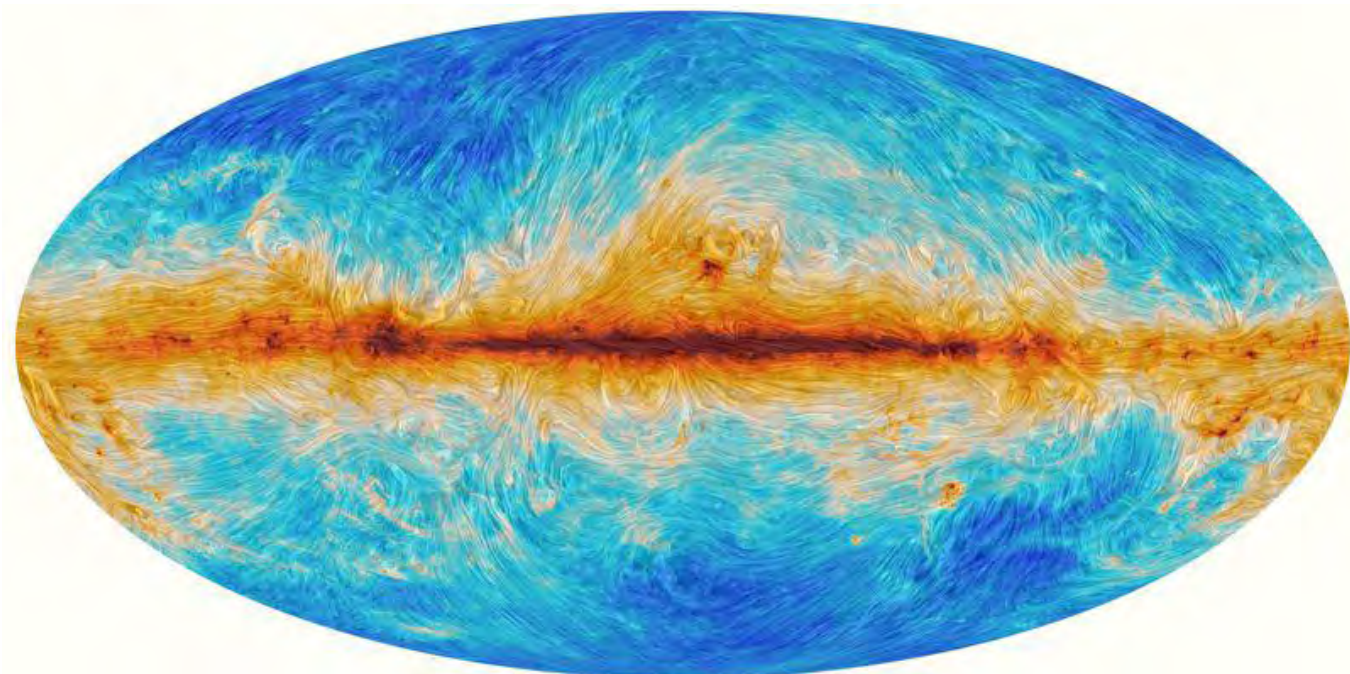
Cette manière dont la lumière «vibre» porte en elle des informations très utiles pour les astrophysiciens. «Cela nous renseigne sur les derniers événements vécus par les grains de lumière qui nous parviennent», résume Cécile Renault, chercheuse au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble. Il aura fallu plusieurs années aux scientifiques de la collaboration Planck pour parvenir à distinguer différentes sources de polarisation et les représenter sur des mappemondes (photos ci-dessus), visions aplanies du ciel complet.



*La carte 1 (ci-dessus) représente la polarisation du rayonnement fossile, première lumière émise par l'Univers il y a 13,8 milliards d'années. Les taches de couleurs correspondent aux infimes variations de température de ce rayonnement très froid (- 270 °C environ) dans lequel nous baignons. Cette information était déjà connue (de façon presque aussi précise) depuis 2013. L'information supplémentaire apportée par la polarisation est l'ensemble de petites lignes, qui sont comme de petites empreintes digitales.*

«Il est vraiment impressionnant de constater que les modèles qui prévoient les variations de température expliquent parfaitement ces motifs, note Cécile Renault. Il n'y a pas besoin de phénomènes ou de théories exotiques pour décrire ce que l'on observe.» Les physiciens qui aiment les surprises seront un peu déçus : le modèle standard décrivant la physique des particules et de leurs interactions est toujours aussi robuste. La composition de l'Univers n'a pas non plus besoin d'être adaptée, les quantités relatives de matière et d'énergie, noires et ordinaires, restant inchangées. Les premières étoiles seraient en revanche nées un peu plus tard que prévu : 550 millions d'années après le big bang (au lieu de 470 millions d'années). Mais l'incertitude autour de cette date reste importante.

*Les cartes 2 et 3 (ci-dessous) décrivent la polarisation de deux sources de lumière dans notre galaxie. La première des deux montre la densité de poussières qui nous entoure. «Ce sont de petites particules solides allongées qui viennent s'aligner le long des lignes de champ magnétique de la Voie lactée et laissent leur empreinte caractéristique dans la lumière», explique François Boulanger, de l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS - CNRS/Université Paris-Sud). Les couleurs correspondent à la quantité de poussières, les lignes à la direction de la polarisation. Ce sont ces données dans une partie du ciel qui ont conduit à réfuter récemment la découverte américaine des ondes gravitationnelles primordiales.*



*La carte 3 (ci-dessus) représente la polarisation liée aux particules chargées se déplaçant à des vitesses extrêmement rapides, mais piégées par le champ magnétique de notre galaxie. On parle communément de rayonnement synchrotron. Chacune de ces deux cartes permet de décrire un aspect particulier du champ magnétique galactique. «De façon schématique, les poussières décrivent le champ magnétique dans des zones où naissent les étoiles alors que le rayonnement synchrotron nous donne une idée de son intensité à la fin de leur vie », précise Vincent Guillet, également astrophysicien à l'IAS.*

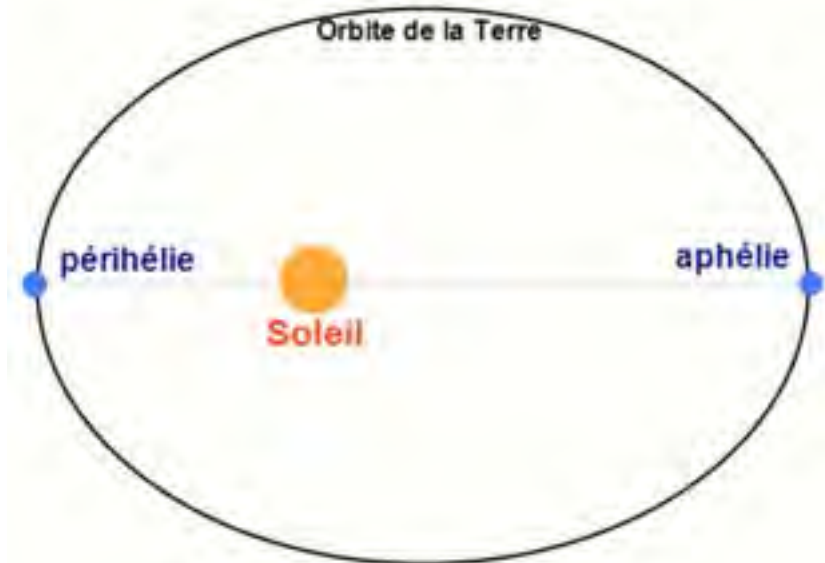
Or le champ magnétique est un élément-clé et très mal compris dans les processus de formation des étoiles. «Nous cherchons à comprendre comment la matière donne naissance à de nouvelles étoiles sans que le champ magnétique ne s'y oppose », ajoute François Boulanger. Ces nouvelles données de Planck vont peut-être apporter aux astrophysiciens les observations qui leur manquaient pour décrire la structure du champ magnétique de la Voie lactée et ainsi s'assurer que leurs simulations numériques sont correctes. Mais elles pourraient aussi leur donner de nouvelles idées.

# Glossaire

## Aphélie et périhélie :

Le **périhélie** est le point de la trajectoire d'un objet céleste en orbite héliocentrique (autour du soleil) qui est le plus proche de l'étoile autour de laquelle il tourne.

L'**aphélie** est, au contraire, le point de la trajectoire d'un objet céleste en orbite héliocentrique qui est le plus éloigné de l'étoile autour de laquelle il tourne.



On a ci-contre le schéma simplifié de l'orbite de la Terre autour du Soleil, montrant ces deux points particuliers que sont l'*aphélie* et le *périhélie*.

L'ellipticité est volontairement exagérée sur ce schéma, l'orbite de la Terre étant en pratique très proche d'un cercle. En effet, à son périhélie la Terre est à 0,9833 UA du soleil contre 1,0167 UA à l'aphélie, soit 3,2 % de différence de distance.

Le périhélie se situe dans le temps terrestre entre le 2 et le 5 janvier et l'aphélie entre le 3 et le 7 juillet.

**Albedo (albédo) :** L'**albédo** ou **albedo** (sans accent), est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchiée à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension, comparable à la réflectivité, mais d'application plus spécifique, utilisée notamment en astronomie et climatologie — ainsi qu'en géologie.

Le mot, d'origine latine signifiant *blancheur*, a été introduit au XVIII<sup>e</sup> siècle en optique et en astronomie par le mathématicien et astronome suisse Johann Heinrich Lambert.

L'albédo, dans sa définition la plus courante dite albédo de Bond, est une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1. D'autres définitions, dont celle de l'albédo géométrique, peuvent donner des valeurs supérieures à 1.

L'albédo est utilisé en astronomie pour avoir une idée de la composition d'un corps trop froid pour émettre sa propre lumière, en mesurant la réflexion d'une source lumineuse externe, comme le Soleil. On peut différencier ainsi facilement les planètes gazeuses, qui ont un fort albédo, des planètes telluriques qui ont elles, un albédo faible.

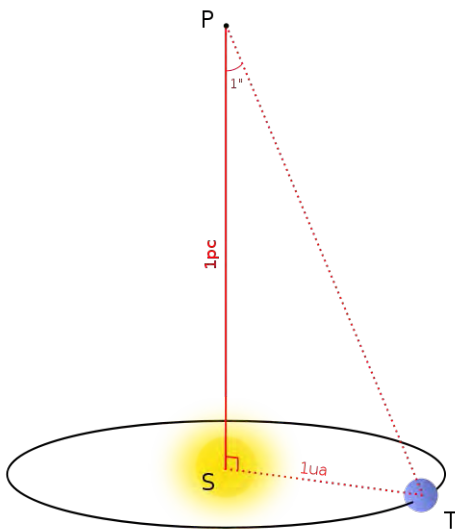
Les astronomes ont affiné cette définition en distinguant d'une part l'albédo de Bond, correspondant à la réflectivité globale d'un astre pour toutes les longueurs d'onde et tous angles de phase confondus, et d'autre part l'albédo géométrique, correspondant au rapport entre l'intensité électromagnétique réfléchiée par un astre à angle de phase nul et l'intensité électromagnétique réfléchiée à angle de phase nul par une surface équivalente à réflectance idéalement lambertienne (c'est-à-dire isotrope quel que soit l'angle de phase) : conséquences de ces définitions, l'albédo de Bond est toujours compris entre 0 et 1, tandis que l'albédo géométrique peut être supérieur à 1.

**Parsec :** Le **parsec** (symbole **pc**) est une unité de longueur utilisée en astronomie. Son nom vient de la contraction de « **parallaxe-seconde** ».

Le parsec est défini comme étant la distance à laquelle une unité astronomique (ua) sous-tend un angle d'une seconde d'arc. Un parsec vaut  $3,085\ 678 \times 10^{16}$  m, soit environ 206 265 unités astronomiques ( $(1/\tan(1''))$  ua exactement) ou 3,2616 années-lumière. Pour des raisons pratiques, les astronomes expriment souvent les distances des objets astronomiques en parsecs plutôt qu'en années-lumière. Cette unité permet une conversion directe des valeurs observées en distance : si la parallaxe annuelle d'une étoile est mesurée en secondes d'arc, alors la distance entre cette étoile et le Soleil, exprimée en parsecs, est égale à l'inverse de cette valeur. La magnitude absolue et le module de distance sont deux unités dérivées du parsec, et l'expression des distances en parsecs facilite la manipulation de ces données.

Cette unité résulte de l'utilisation d'une méthode trigonométrique dite « méthode de la parallaxe », servant à déterminer la distance séparant un observateur d'un objet éloigné quelconque, à la mesure de la distance des objets célestes.

Les premières mesures de distance interstellaire (l'étoile 61 Cygni par Friedrich Wilhelm Bessel en 1838) furent effectuées en utilisant la largeur de l'orbite terrestre comme référence. Le parsec dérivait de cette méthode. La détermination des distances des corps célestes est l'objet principal de l'astrométrie.



Sur la figure 1, (d'échelle très réduite et ne respectant pas les valeurs angulaires), S est le Soleil, T la Terre et P un objet situé à un parsec du Soleil : par définition, l'angle  $\widehat{SPT}$  est égal à une seconde d'arc ( $1''$ ) et la distance TS vaut une unité astronomique (1 UA). Grâce aux règles de trigonométrie, il est possible de calculer SP :

$SP = TS / \tan 1''$  soit environ 206 264,80624548 UA  
 Comme 1 UA =  $1,49597870700 \times 10^{11}$  m  
 on a 1 pc =  $206\,264,80624548 \times 1,49597870700 \times 10^{11}$  m  
 et donc 1 pc =  $3,0856775814672 \times 10^{16}$  m  
 donc 1 pc = 3,2616 années-lumière

Le choix d'une définition arbitraire mais désormais fixe de l'unité astronomique explique la précision des valeurs précédentes, qui pourrait surprendre a priori, et est toute théorique; les mesures astronomiques, en particulier celles des parallaxes, étant en pratique bien rarement meilleures qu'à 1 % près.

L'étoile la plus proche du Soleil,  $\alpha$  Cen C (Proxima Centauri), se trouve à 1,316 parsec (4,28 années-lumière). Les distances des autres objets célestes n'appartenant pas au système solaire sont bien plus grandes et se mesurent couramment en kiloparsecs (symbole **kpc**) ou mégaparsecs (symbole **Mpc**). Les parallaxes ont des valeurs faibles : 0,76'' pour Proxima Centauri; aussi, la méthode parallactique ne permet guère de déterminer des distances stellaires supérieures à 100 parsecs environ, ce qui correspond à des mesures de parallaxe inférieures à 10 millisecondes d'arc. Entre 1989 et 1993, le satellite Hipparcos, lancé par l'Agence spatiale européenne, a mesuré la parallaxe d'environ 100 000 étoiles avec une précision supérieure à la milliseconde d'arc, ce qui a permis de déterminer la distance d'étoiles éloignées de nous de plus d'un kiloparsec.

Historique des estimations de la distance moyenne de la Terre au Soleil (D) en rayons équatoriaux de la Terre (D/R) à partir de la parallaxe horizontale équatoriale du Soleil		
	Parallaxe	D/R
Archimède, <i>L'Arénaire</i> (III <sup>e</sup> siècle av. J.-C.)	40''	10 000
Aristarque de Samos, <i>Des grandeurs et des distances</i> (III <sup>e</sup> siècle av. J.-C.)		380-1520
Hipparque (II <sup>e</sup> siècle av. J.-C.)	7'	490
Posidonios (I <sup>er</sup> siècle av. J.-C.), d'après Cléomède (I <sup>er</sup> siècle)		10 000
Ptolémée (II <sup>e</sup> siècle)	2' 50''	1 210
Godefroy Wendelin (1635)	15''	14 000
Jeremiah Horrocks (1639)	15''	14 000
Christian Huygens (1659)	8,6''	24 000
Jean-Dominique Cassini et Jean Richer (1672)	9/1''	21 700
Jérôme de Lalande (1771)	8,6''	24 000
Simon Newcomb (1895)	8,80''	23 440
Arthur R. Hinks (1909)	8,807''	23 420
H. Spencer Jones (1941)	8,790''	23 466
aujourd'hui	8,794143''	23 455

**Première mesure du rayon de la terre** : elle a été conçue au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. par Ératosthène. Son calcul est simple : le Soleil est si éloigné que ses rayons arrivent parallèlement en tout point de la Terre. Ératosthène a lu qu'à Syène, les rayons tombent verticalement dans un puits à midi (solaire), le jour du solstice d'été. Cela veut dire que le Soleil passe par le zénith, il n'y a alors pas d'ombre. Plus au nord, au même moment, les rayons atteignent Alexandrie sous un angle non nul, qu'il mesure. L'angle mesuré est de  $1/50^{\circ}$  de cercle. Cela signifie que la circonférence de la Terre est cinquante fois plus grande que la distance Syène-Alexandrie. Ératosthène avait lu également que les caravanes de chameaux partant de Syène mettaient cinquante jours pour arriver à Alexandrie en parcourant cent stades par jour. Il calcula que la distance entre les deux villes de la vallée du Nil était de 5 000 stades. Le stade équivaut à 158 m. Par la mesure de l'ombre portée par ces objets de hauteur connue situés en deux points de latitude différente, il trouve la valeur de 250 000 stades (soit 39 500 km) pour la longueur du méridien, c'est-à-dire la circonférence terrestre. Cette mesure est exacte à 2 % près ! Il en déduisit le rayon de la Terre. Notons l'extraordinaire précision de l'estimation faite par Huygens en 1659, qui n'est qu'à 2,3 % de la taille réelle mesurée aujourd'hui.

**Distances dans le système solaire et l'espace interstellaire.** Sur la terre, nous avons l'habitude d'exprimer les grandes distances en kilomètres. Quand il s'agit de mesurer les distances dans le système solaire ou dans l'immensité de l'univers, il faut changer d'unité. Il y aurait trop de zéros à écrire ou à lire si nous exprimions ces mesures en kilomètres et de tels chiffres ne seraient pas parlants pour l'esprit, ils seraient trop abstraits. La communauté des astronomes et astrophysiciens a trouvé bon d'inventer une unité de mesure pour le système solaire : **l'unité astronomique ou UA (AU en anglais)**. Cette unité a été fixée à la distance moyenne qui sépare la terre du soleil, qui servira donc d'étalon. 1 UA = 149 597 870 700 mètres, soit environ, en simplifiant, **150 millions de kilomètres**. En fait la terre a une orbite elliptique autour du soleil, et sa distance au soleil va de 147 à 152 millions de km. Avec cette unité, voici les distances entre le soleil, les planètes et d'autres éléments :

*Distance moyenne des planètes du Système solaire au Soleil*

- Mercure : 0,38 ua (57 Mkm [millions de km])
- Vénus : 0,72 ua (108 Mkm)
- Terre : 1,00 ua (150 Mkm)
- Mars : 1,52 ua (228 Mkm)
- Jupiter : 5,21 ua (781 Mkm)
- Saturne : 9,54 ua (1 431 Mkm)
- Uranus : 19,18 ua (2 877 Mkm)
- Neptune : 30,11 ua (4 516 Mkm)

*Autres distances au Soleil*

- Ceinture d'astéroïdes : entre 2 et 3,5 à 4 ua (300 à 600 Mkm)
- Pluton : de 29 à 49 ua (4 350 à 7 350 Mkm)
- Ceinture de Kuiper : de 30 à 55 ua (4 500 à 8 250 Mkm)
- Sonde Voyager 1 : 129,14 ua (au 27 septembre 2014) (19 350 Mkm)
- Sonde Voyager 2 : 101,69 ua (au 28 mai 2013) (15 240 Mkm)
- Nuage d'Oort : environ de 20 000 à 30 000 ua jusqu'à 100 000 ua (de 3 000 à 15 000 milliards de km)

Il est plus facile de dire et de comprendre que Neptune est à environ 30 UA, soit trente fois plus loin du soleil que nous, que de manipuler le chiffre de 4 516 000 000 km pour dire la même chose !

Au-delà, dans l'immensité de l'espace on va **utiliser l'année-lumière ou al** (ly en anglais), qui n'est pas une mesure de temps mais de longueur. C'est la distance que parcourt la lumière dans le vide à près de 300 000 km par seconde (299 792,458 km/s exactement). En un an cela représente 9 461 milliards de km.

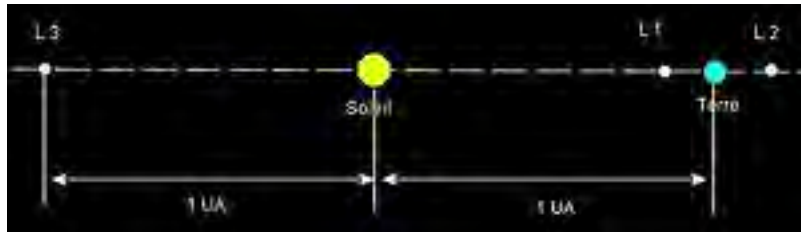
Par exemple, Bételgeuse, étoile supergéante rouge dans la constellation d'Orion, est à 643 al, soit 6 083 423 000 000 000 de km. Et cette étoile, qui est dans notre galaxie, est assez proche de nous puisque notre galaxie a un diamètre d'environ 100 000 al. Les galaxies les plus lointaines se situent à près de 13 milliards d'al de la nôtre. Ce n'est même pas la peine d'essayer d'exprimer cette distance en km !

Les astronomes utilisent aussi comme unité le **parsec (pc)**, où 1 pc = 3,2616 al — voir plus haut sa définition.

## Les points de Lagrange

Un **point de Lagrange** (noté  $L_1$  à  $L_5$ ), ou, plus rarement, **point de libration**, est une position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en orbite l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, fournissent exactement la force centripète requise pour que ce point de l'espace accompagne simultanément l'orbite des deux corps. Dans le cas où les deux corps sont en orbite circulaire, ces points représentent les endroits où un troisième corps de masse négligeable resterait immobile par rapport aux deux autres, au sens où il accompagnerait à la même vitesse angulaire leur rotation autour de leur centre de gravité commun sans que sa position par rapport à eux n'évolue. Au nombre de cinq, ces points se scindent en deux points stables dénommés  $L_4$  et  $L_5$ , et en trois points instables notés  $L_1$  à  $L_3$ . Ils sont nommés en l'honneur du mathématicien français Joseph-Louis Lagrange. Ils interviennent dans l'étude de certaines configurations d'objets du Système solaire (principalement pour les points stables) et dans le placement de divers satellites artificiels (principalement pour les points instables). Ce sont les points remarquables de la « géométrie de Roche » (points-col et extrema) laquelle permet notamment de classer les différents types d'étoiles binaires. Les trois points  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  sont parfois appelés les **points d'Euler**, en l'honneur de Leonhard Euler, l'appellation de **points de Lagrange** étant alors réservées aux deux points  $L_4$  et  $L_5$ .

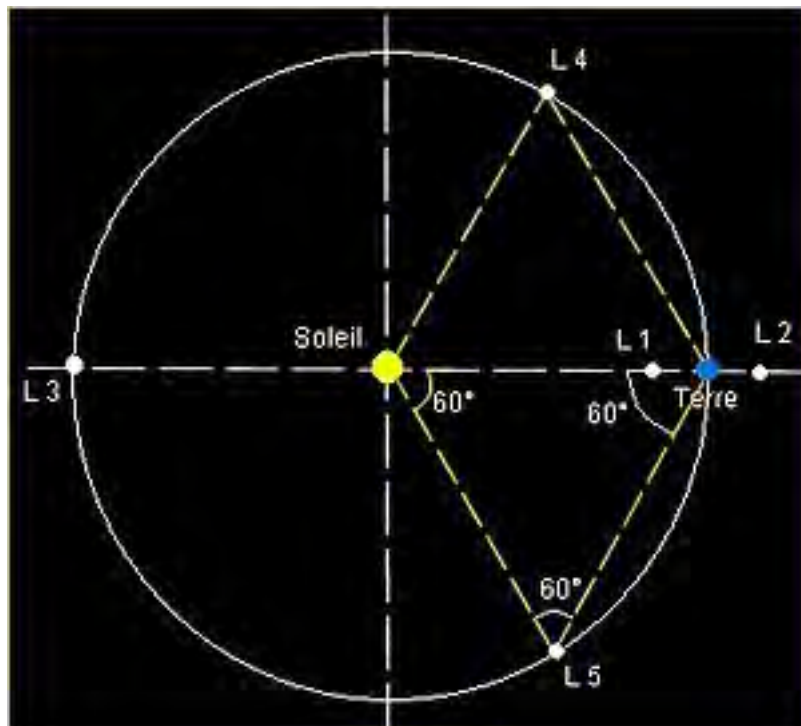
En mécanique céleste, il est un sujet qui a passionné de nombreux mathématiciens : c'est le problème dit des *trois corps*. Newton, après avoir énoncé sa loi qui exprime que « les corps s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance de leurs centres », a cherché à décrire le comportement de trois corps sans y parvenir. Il faut attendre le mathématicien Joseph-Louis Lagrange qui, en 1772, étudia le cas d'un petit corps, de masse négligeable (ce qu'on appelle aujourd'hui *corps d'épreuve* ou particule-test), soumis à l'attraction de deux plus gros : le Soleil et, par exemple, une planète. Il découvrit qu'il existait des positions d'équilibre pour le petit corps, des endroits où toutes les forces se compensent. Un objet de faible masse situé en ces points n'en bouge plus relativement aux deux autres corps, et tourne de concert avec eux (par exemple une planète et le Soleil).



Trois des points de Lagrange sont situés sur l'axe reliant les deux corps. Dans le cas d'une grande dissymétrie de masse entre ceux-ci, deux points sont situés proches et de part et d'autre du corps peu massif, alors que le troisième est quasiment situé à l'opposé du corps peu massif par rapport au corps massif.

Si on donne en exemple les points de Lagrange du système Soleil-Terre, ces cinq points sont notés et définis comme suit (échelle non respectée) :

- **L<sub>1</sub>** : sur la ligne définie par les deux masses, entre celles-ci, la position exacte dépendant du rapport de masse entre les deux corps; dans le cas où l'un des deux corps a une masse beaucoup plus faible que l'autre, le point L<sub>1</sub> est situé nettement plus près du corps peu massif que du corps massif.
- **L<sub>2</sub>** : sur la ligne définie par les deux masses, au-delà de la plus petite. Dans le cas où l'un des deux corps a une masse beaucoup plus faible, la distance de L<sub>2</sub> à ce corps est comparable à celle entre L<sub>1</sub> et ce corps.
- **L<sub>3</sub>** : sur la ligne définie par les deux masses, au-delà de la plus grande. Dans le cas où l'un des deux corps est notablement moins massif que l'autre, la distance entre L<sub>3</sub> et le corps massif est comparable avec celle entre les deux corps.



Les deux derniers points de Lagrange forment avec les deux corps des triangles équilatéraux

- **L<sub>4</sub>** et **L<sub>5</sub>** : sur les sommets des deux triangles équilatéraux dont la base est formée par les deux masses. Sans qu'il y ait de consensus précis, L<sub>4</sub> est celui des deux points en avance sur l'orbite de la plus petite des masses, dans son orbite autour de la grande, et L<sub>5</sub> est en retard. Ces points sont parfois appelés *points de Lagrange triangulaires* ou *points Troyens*, du fait que c'est le lieu où se trouvent les astéroïdes troyens du système Soleil-Jupiter. Contrairement aux trois premiers points, ces deux derniers ne dépendent pas des masses relatives des deux autres corps.

Les points L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> sont des équilibres instables, ce qui les rend utilisables dans le cadre de missions spatiales : on n'y trouve pas de corps naturels, et un équilibre dynamique peut y être maintenu pour une consommation de carburant raisonnable (le champ gravitationnel étant faible dans leur voisinage). Pour de tels satellites, des corrections de trajectoires régulières doivent être appliquées afin de conserver le satellite au voisinage du point. Ce temps caractéristique peut être évalué dans le cas où le rapport de masse des deux corps du système est élevé.

Les principaux avantages de ces positions, en comparaison des orbites terrestres, sont leur éloignement de la Terre et leur exposition au Soleil constante dans le temps. Le point L<sub>1</sub> se prête particulièrement à l'observation du Soleil et du vent solaire. Ce point a été occupé pour la première fois en 1978 par le satellite ISEE-3, et est actuellement occupé par les satellites SoHO et Advanced Composition Explorer. Le point L<sub>2</sub> est à l'inverse particulièrement intéressant pour les missions d'observation du cosmos, qui embarquent des instruments de grande sensibilité devant être détournés de la Terre et de la Lune, et fonctionnant à très basse température. Il est actuellement occupé par les satellites Herschel, Planck, WMAP et Gaia.



Il a été un temps envisagé de placer un télescope spatial au point  $L_4$  ou  $L_5$  du système Terre-Lune, mais cette option a été abandonnée après que des nuages de poussière y ont été observés.

### **Troyens**

Les points  $L_4$  et  $L_5$  sont généralement stables, aussi on y trouve de nombreux corps naturels, dits troyens (satellites ou astéroïdes) :

- dans le système Soleil-Jupiter, on recense (en 2011) environ 5000 astéroïdes aux points  $L_4$  et  $L_5$
- dans le système Soleil-Neptune, huit
- dans le système Soleil-Mars, quatre
- dans le système Saturne-Téthys, les points  $L_4$  et  $L_5$  sont occupés par Télésto et Calypso, respectivement
- dans le système Saturne-Dioné, Hélène et Pollux occupent ces points

Curieusement, il semblerait que le système Soleil-Saturne ne soit pas en mesure d'accumuler des troyens du fait des perturbations joviennes.

Dans le système Soleil-Terre, on connaît (depuis peu) un troyen au point  $L_4$ , l'astéroïde 2010 TK7, qui mesure 300 mètres de diamètre. Certains astronomes soulignent que cet objet pourrait représenter un risque comparable aux géocroiseurs. Ces auteurs proposent également que l'impacteur supposé à l'origine de la Lune (Théia) aurait stationné un temps sur le point  $L_4$  ou  $L_5$  et accumulé de la masse avant d'en être éjecté sous l'action des autres planètes.

# Table des matières

<b>I – Introduction</b>	<b>1</b>
A) Naissance d’une étoile – Présence d’une nébuleuse	1
B) Formation d’un disque protoplanétaire	5
C) Création d’un système planétaire et autres corps	7
D) Vie et mort d’une étoile	8
E) Typologie spectrale des étoiles et évolutions stellaires	12
F) Particularités de notre système solaire	33
a) Nébuleuse et étoile(s)	34
b) Disque protoplanétaire et planètes	35
c) Les satellites des planètes	35
d) Les autres corps	35
<b>II - Description du système solaire et de ses composants</b>	<b>37</b>
A) Généralités	37
B) Influence gravitationnelle dans le système solaire – Sphère de Hill ou Roche)	40
C) Le soleil	42
a) Caractéristiques du soleil	42
b) Les rayonnements du soleil et leurs dangers (alertes de 2012 et 2014)	51
D) Les planètes	58
a) Les planètes internes ou telluriques	58
b) La ceinture d’astéroïdes et une planète naine (Cérès)	60
c) Les planètes externes et gazeuses	61
d) La ceinture de Kuiper, les autres planètes naines et les objets épars	62
E) Le nuage de Hill et le nuage d’Oort	65
F) Les comètes	69
G) La comète Tchourioumov-Gerasimenko et la mission Rosetta / Philæ	76
H) L’exploration du système solaire	98
I) Quelques chiffres sur le système solaire	100
<b>III – Notre Galaxie : la Voie Lactée et ensuite</b>	<b>102</b>
A) Qu’est-ce qu’une galaxie ?	102
B) Notre galaxie, la Voie Lactée	114
a) Description de la Voie Lactée	114
b) Les exoplanètes	120
C) Les groupes de galaxies	126
a. Le groupe local	126
b. L’amas de la Vierge et le super-amas de la Vierge	128
c. Laniakéa	129
D) D’autres galaxies	130
E) Les trous noirs	130
F) L’univers et le « big bang »	139
<b>IV – Iconographie</b>	<b>154</b>
A) Le Soleil	154
B) Les planètes	155
C) Les galaxies	156
D) La comète Tchourioumov-Gerasimenko	159
E) Objets du ciel profond	162
a) Nébuleuses planétaires	162
b) Autres nébuleuses	163
c) Amas ouverts	167
d) Amas globulaires	168
F) Planck et l’Univers	170
<b>Glossaire</b>	<b>172 à 176</b>
<b>Annexe I : Principe de l’accélération gravitationnelle</b>	<b>I à V</b>
<b>Annexe II : Liste de 90 étoiles les plus brillantes vues de la Terre</b>	<b>A</b>

## Assistance gravitationnelle pour augmenter la vitesse

La trajectoire qui semble à première vue la plus simple pour envoyer une sonde à proximité d'une planète du système solaire est l'orbite de transfert (Périgée en orbite basse de la terre, au point d'injection, et apogée aux alentours de l'orbite de la planète visée) car elle minimise le trajet à parcourir.

L'énergie nécessaire est toutefois trop importante et imposerait de privilégier les ergols emportés au détriment du matériel nécessaire à la mission elle-même.

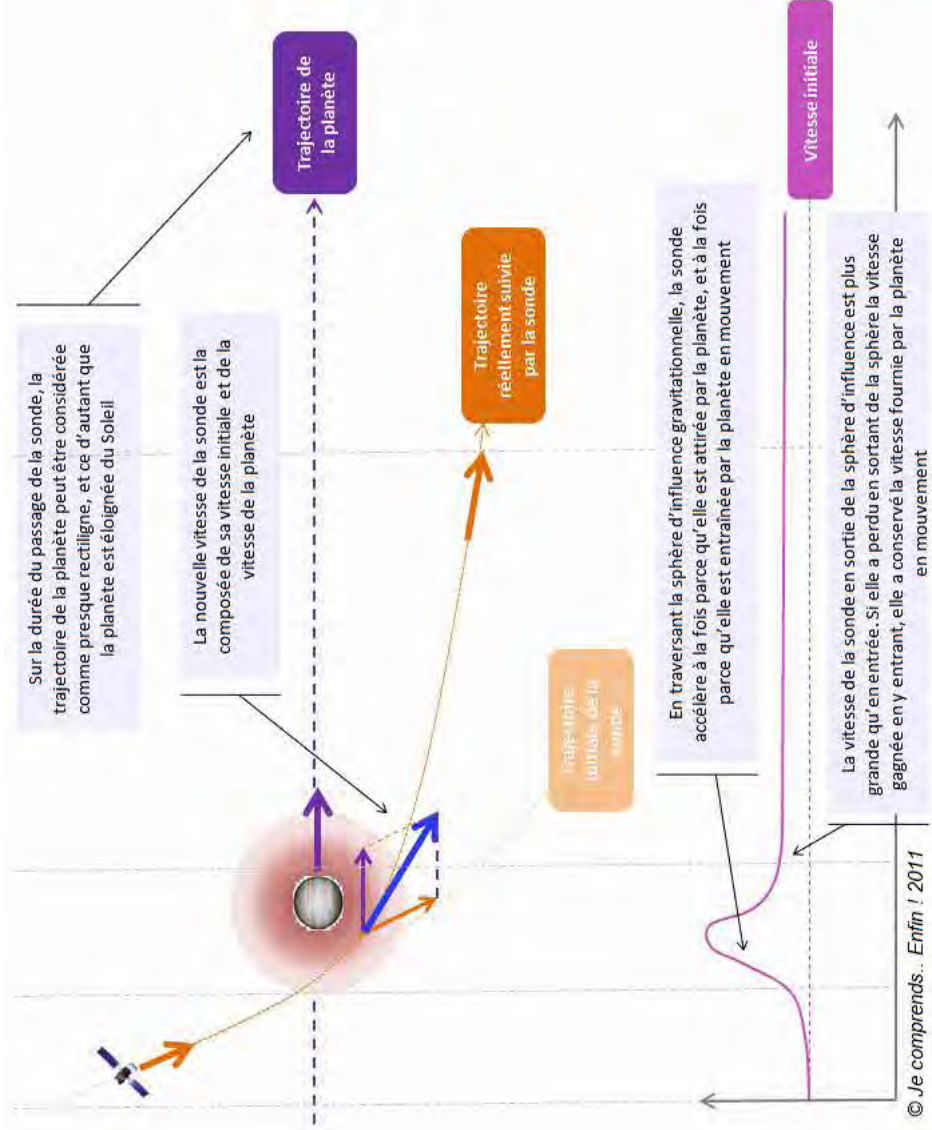
Prenons l'exemple d'une sonde envoyée vers Jupiter : le delta V nécessaire pour passer de l'orbite terrestre à Jupiter est de 9 km/s, soit à peu près l'équivalent du delta V qui est nécessaire pour atteindre l'orbite basse de la Terre. Pour atteindre les planètes encore plus éloignées ce delta V doit être encore plus grand.

Une première solution est d'utiliser des moteurs à grand ISP, capable de fournir une faible impulsion mais sur une grande période. Le trajet sera plus long en temps et en distance car il faudra faire de nombreuses boucles d'accélération pour atteindre la vitesse nécessaire.

La seconde solution, celle qui est la plus utilisée, utilise l'assistance gravitationnelle (parfois appelé effet de fronde) des planètes pour accélérer la sonde. Le trajet sera plus long car il nécessitera plusieurs survols de planètes pour atteindre la vitesse requise. En contrepartie, l'énergie nécessaire à l'accélération n'étant pas fournie par la sonde, la quantité d'ergols à embarquer est plus faible. Pour un trajet Terre / Jupiter, cela représente une masse d'ergols seize fois moins importante si l'on utilise l'assistance gravitationnelle plutôt que de laisser la sonde chercher à rejoindre la planète par ses propres moyens.

D'où vient cette accélération ? Tout simplement de la planète et du fait qu'elle se déplace elle aussi dans l'espace autour du Soleil.

- La sonde s'approche de la planète par l'arrière, c'est-à-dire dans la même direction de mouvement que la planète et entre dans sa sphère d'influence gravitationnelle (la trajectoire de la sonde est toutefois suffisamment éloignée pour pénétrer dans la sphère d'influence, mais sans toutefois être capturée totalement et s'écraser sur la planète)
- L'influence gravitationnelle de la planète s'exerce sur la sonde qui voit sa trajectoire se courber et sa vitesse accélérer, mais non pas dans la direction de sa trajectoire mais dans la direction de la composée de sa vitesse et de celle de la planète
- La sonde dépasse la planète car sa vitesse est plus grande que la vitesse d'évasion. Elle ralentit en s'éloignant car l'effet de l'influence gravitationnelle s'inverse et attire la sonde dans la direction opposée. En quittant la sphère d'influence, elle a alors perdu la vitesse qu'elle a gagnée en s'approchant de la planète
- Bien que la sonde ait perdu en s'éloignant la vitesse gagnée en s'approchant de la planète, l'opération n'est pas nulle. La vitesse de la sonde a totalement changé : sa direction a été modifiée et la trajectoire courbée, et sa vitesse dans le référentiel du Soleil est beaucoup plus importante qu'avant car la planète lui a communiqué une partie de sa vitesse

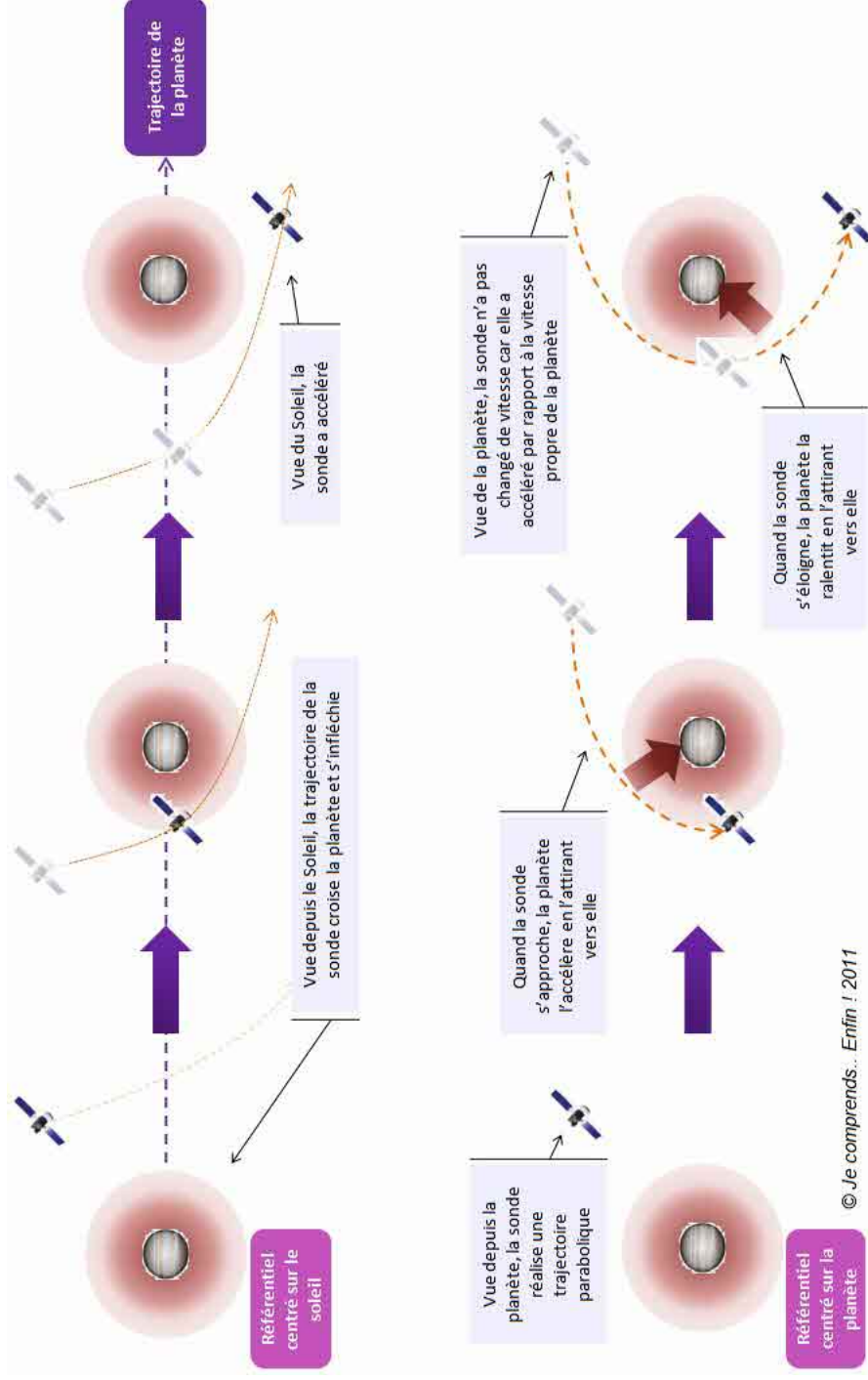


L'assistance gravitationnelle pour accélérer une sonde

Si la sonde a considérablement accéléré dans le référentiel du Soleil, elle n'a pas changé de vitesse dans celui de la planète. La vitesse relative de la sonde par rapport à la planète reste la même :

- **Avant de croiser la planète** : la vitesse de la sonde était plus faible mais elle s'approchait de la planète
- **Après avoir croisé la planète** : la vitesse de la sonde est plus grande mais elle s'éloigne maintenant de la planète

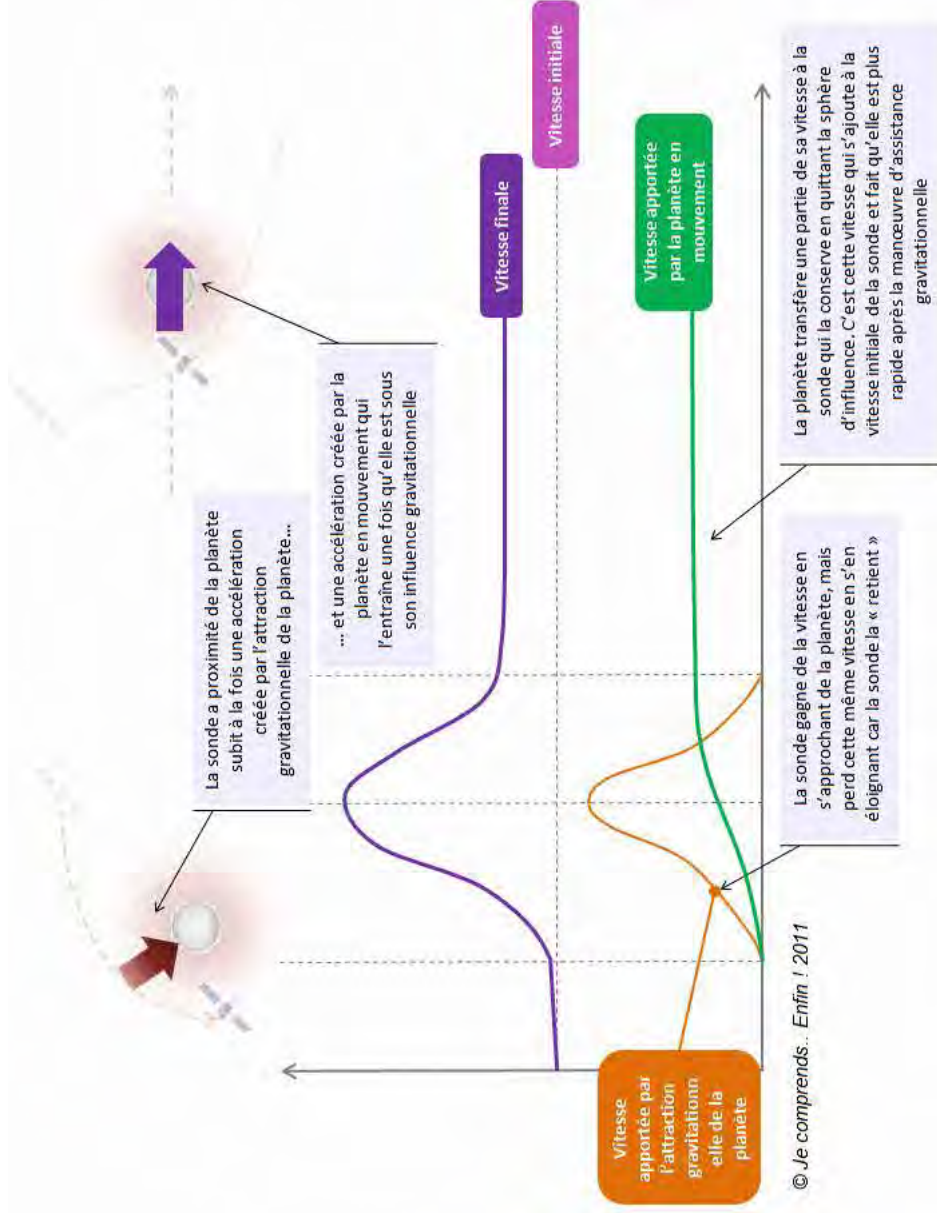
La vitesse gagnée et le changement de trajectoire font que du point de vue de la planète la sonde n'a pas l'air d'avoir modifié sa vitesse.



*La vitesse de la sonde accélérée ne change pas par rapport à la planète*

En résumé, la sonde à l'approche de la planète subit une double variation de sa vitesse causée par :

- **L'influence gravitationnelle** : En entrant dans la sphère d'influence gravitationnelle, la sonde est accélérée (la planète l'attire toujours mais dans une direction opposée à sa trajectoire). Le bilan total est nul et la sonde perd en s'éloignant de la planète toute la vitesse qu'elle a gagnée en s'en approchant. Ce n'est donc pas cette composante qui explique comment la sonde gagne de la vitesse par assistance gravitationnelle
- **Conservation du moment cinétique** : En entrant dans la sphère d'influence, la sonde est comme tirée par la planète dans la direction de son mouvement. L'énergie totale du système est conservée. La sonde est accélérée et la planète ralentie avec des facteurs liés à leurs masses respectives. La sonde accélère beaucoup alors que le ralentissement de la planète est infime. C'est cette accélération qui est conservée par la sonde quand elle quitte la sphère d'influence gravitationnelle de la planète et représente l'augmentation constatée de la vitesse

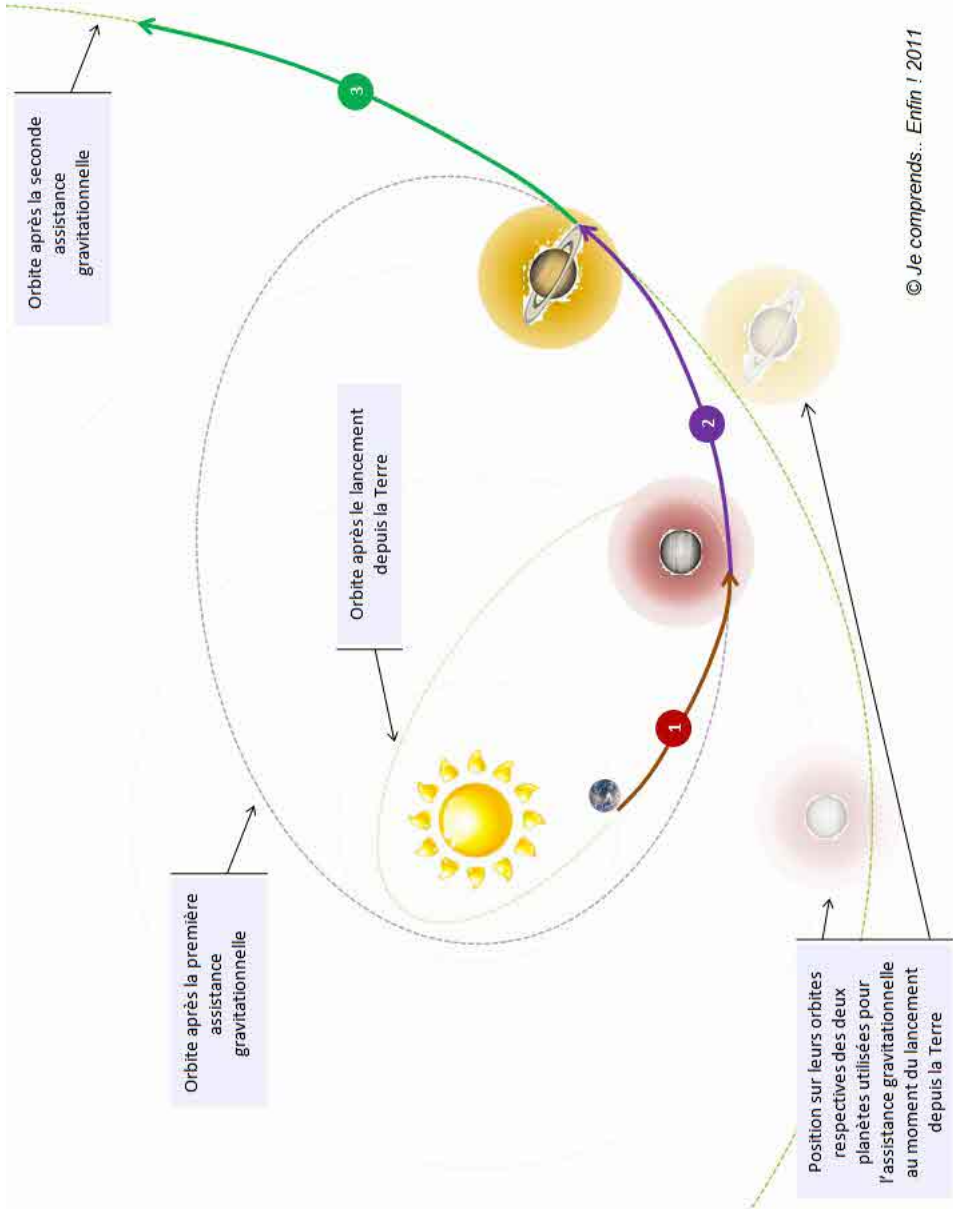


Deux composantes favorisent la variation de vitesse de la sonde

Avant le passage dans la zone d'influence de la planète, la sonde se trouve sur une orbite elliptique dont un des foyers est le Soleil.

Après avoir quitté la zone d'influence, la sonde a accéléré et se trouve sur une nouvelle orbite elliptique, dont un foyer est toujours le Soleil (la sonde n'a pas acquis une vitesse suffisante pour se libérer de l'influence gravitationnelle du Soleil), dont l'excentricité a été modifiée et dont le grand axe est bien supérieur à celui de l'orbite précédente.

L'assistance gravitationnelle peut aussi être utilisée pour modifier le plan de l'orbite et sortir une sonde du plan de l'écliptique (sonde ULYSSES en trajectoire polaire autour du Soleil par exemple).

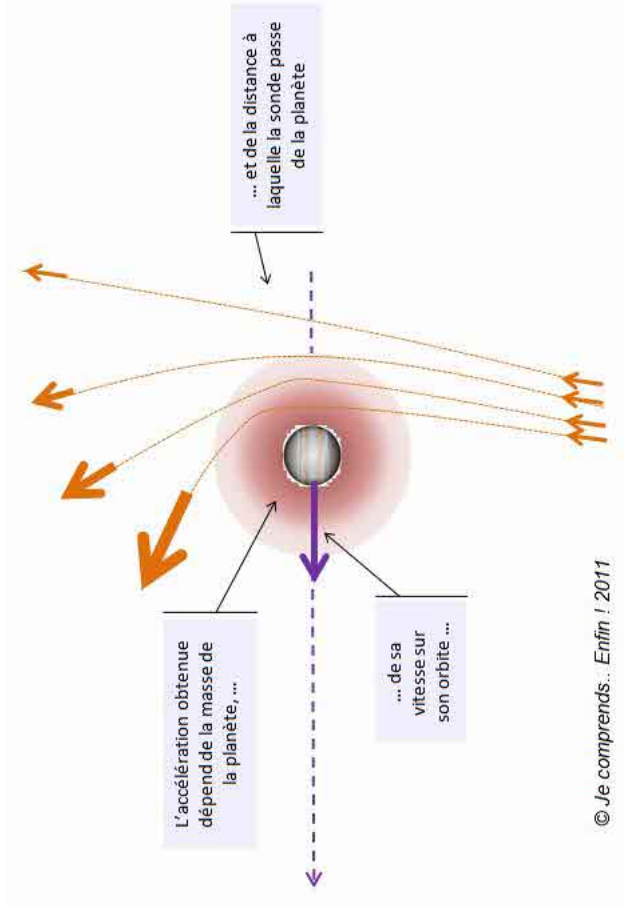


*Bilan des trajectoires avant et après le croisement de la planète*

Si la planète ne se déplaçait pas, la vitesse de la sonde avant et après le survol de la planète serait identique et seule la trajectoire serait courbée.

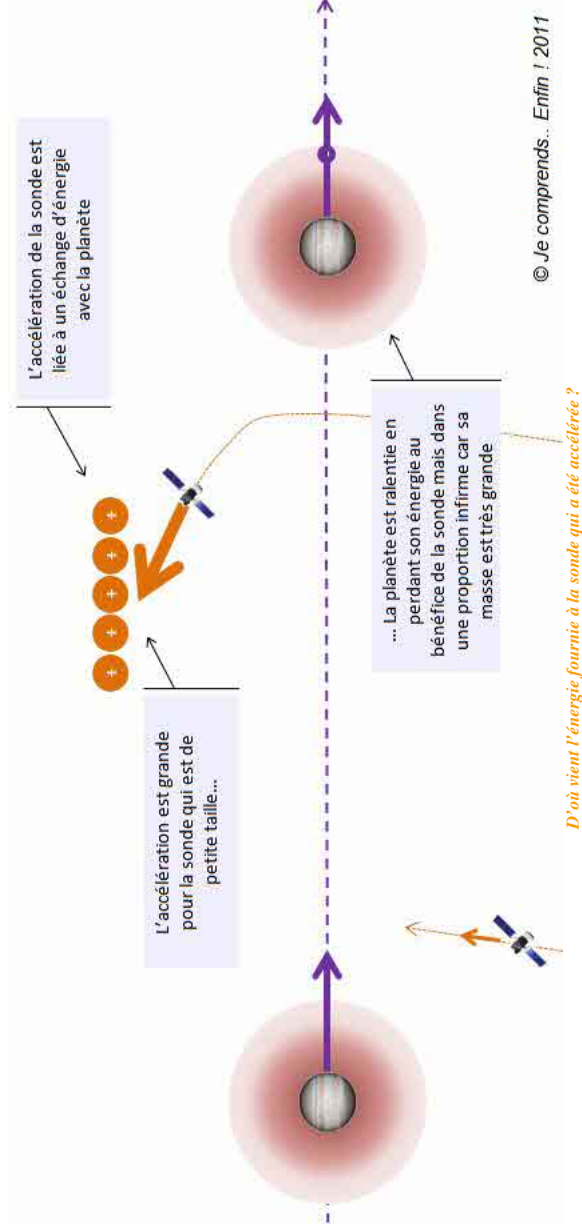
L'accélération est d'autant plus importante que :

- la courbure de la trajectoire est grande (dépend de l'angle avec lequel la sonde aborde l'approche et de la masse de la planète),
- le passage s'effectue au plus près de la planète, c'est-à-dire là où la sphère d'influence est plus forte
- la vitesse de la planète sur son orbite est importante.



*L'accélération obtenue par assistance gravitationnelle dépend de plusieurs facteurs*

L'influence gravitationnelle étant réciproque, cela permet de comprendre comment l'énergie totale du système est conservée : si la sonde subit l'influence gravitationnelle de la planète, l'inverse est également vrai. Alors que la sonde est accélérée, la planète est ralentie. Comme ces influences sont en rapport avec la masse des objets, la vitesse apportée à la sonde est bien visible, alors que celle soustraite à la planète est négligeable face à la petite masse de la sonde.



Liste des étoiles les plus brillantes classée par magnitude apparente V						
Rang	Nom commun	Désignation de Bayer	Type spectral	Magnitude apparente V	Distance (en al)	
0	Soleil		G2-V	-26,73	1 UA	
1	Sirius	$\alpha$ CMa	A1V/DA	-1,47	8,6 al	
2	Canopus	$\alpha$ Car	F0Ib	-0,72	310 al	
3	Arcturus	$\alpha$ Boo	K1.5 IIIpe	-0,04 (var)	34 al	
4	Alpha Centauri A	$\alpha$ 1 Cen	G2V	-0,01	4 al	
5	Véga	$\alpha$ Lyr	A0Va	0,03	25 al	
6	Rigel	$\beta$ Ori	B8Ia	0,12	630 al	
7	Procyon	$\alpha$ CMi	F5 IV-V	0,38	11 al	
8	Achernar	$\alpha$ Eri	B3Vpe	0,46	130 al	
9	Bételgeuse	$\alpha$ Ori	M1-2 Ia-lab	+0,5 (var)	430 al	
10	Hadar	$\beta$ Cen	B1 III	0,6	530 al	
11	Capella A	$\alpha$ 1 Aur	G5IIIe	0,71	42 al	
12	Altair	$\alpha$ Aql	A7IV-V	0,77	16 al	
13	Aldébaran	$\alpha$ Tau	K5III	+0,85 (var)	65 al	
14	Capella B	$\alpha$ 2 Aur	G0III	0,96	42 al	
15	L'Epi	$\alpha$ Vir	B1III-IV	1,04	260 al	
16	Antarès	$\alpha$ Sco	M1Ib	1,09	600 al	
17	Pollux	$\beta$ Gem	K0 IIIb	1,15	34 al	
18	Fomalhaut	$\alpha$ PsA	A3V	1,16	25 al	
19	Deneb	$\alpha$ Cyg	A2 Iae	1,25	1 550 al	
20	Mimosa	$\beta$ Cru	B0.5IV	1,3	350 al	
21	Alpha Centauri B	$\alpha$ 2 Cen	K1-V	1,33	4 al	
22	Régulus	$\alpha$ Leo v	B7 V	1,35	77 al	
23	Acrux I	$\alpha$ 1 Cru	B0.5IV	1,4	320 al	
24	Adhara	$\epsilon$ CMa	B2II	1,51	430 al	
25	Shaula	$\lambda$ Sco	B1.5IV	1,62	700 al	
26	Gaerux	$\gamma$ Cru	M4 III	1,63	88 al	
27	Bellatrix	$\gamma$ Ori	B2III	1,64	240 al	
28	Elnath	$\beta$ Tau	B7III	1,68	130 al	
29	Miraplacidus	$\beta$ Car	A2 IV	1,7	110 al	
30	Alnilam	$\epsilon$ Ori	B0 Iab	1,7	1 300 al	
31	Alnitak A	$\zeta$ 1 Ori	O9 Iab	1,7	820 al	
32	Al Na'ir	$\alpha$ Gru	B7IV	1,74	100 al	
33	Alioth	$\epsilon$ UMa	A0pCr	1,76	81 al	
34	Dubhe A	$\alpha$ 1 UMa	K0 III	1,79	120 al	
35	Kaus Australis	$\epsilon$ Sgr	B9.5 III	1,8	140 al	
36	Suhail al Muhlif	$\gamma$ 12 Vel	O9	1,81	840 al	
37	Mirfak	$\alpha$ Per	F5 Ib	1,82	590 al	
38	Wezen	$\delta$ CMa	F8 Ia	1,84	1 800 al	
39	Alkaid	$\eta$ UMa	B3V SB	1,85	100 al	
40	Sargas	$\theta$ Sco	F1 II	1,86	270 al	
41	Alhena	$\gamma$ Gem	A0 IV	1,9	100 al	
42	Alpha Pavonis	$\alpha$ Pav	B2IV	1,91	180 al	
43	Atria	$\alpha$ TrA	K2 Ib-IIIa	1,92	420 al	
44	Castor A	$\alpha$ 1 Gem	A1 V	1,96	52 al	
45	Murzim	$\beta$ CMa	B1 II-III	1,98	500 al	

Liste des étoiles les plus brillantes classée par magnitude apparente V						
Rang	Nom commun	Désignation de Bayer	Type spectral	Magnitude apparente V	Distance (en al)	
46	Alphard	$\alpha$ Hya	K3 II-III	2	180 al	
47	Hamal	$\alpha$ Ari	K3 II-III	2	66 al	
48	Polaris	$\alpha$ UMi	F7:Ib-II	+2,01 (var)	430 al	
49	Delta Velorum A	$\delta$ 1 Vel	A1 V	2,03	80 al	
50	Deneb Kaitos	$\beta$ Cet	K0 III	2,04	96 al	
51	Saiph	$\alpha$ Ori	B0.5 Iavar	2,05	720 al	
52	Nunki	$\sigma$ Sgr	B3	2,06	220 al	
53	Menkent	$\theta$ Cen	K0IIIb	2,06	61 al	
54	Alpheratz	$\alpha$ And	B8IVpMnH $\gamma$	2,06	97 al	
55	Mirach	$\beta$ And	M0IIIvar	2,06	200 al	
56	Kochab	$\beta$ UMi	K4 III	2,08	130 al	
57	Acrux B	$\alpha$ 2 Cru	B1 V	2,09	320 al	
58	Ras Alhague	$\alpha$ Oph	A5III	2,1	47 al	
59	Algol	$\beta$ Per	B8V	+2,12 (var)	93 al	
60	Beta Gruis	$\beta$ Gru	M5III	2,13	170 al	
61	Denebola	$\beta$ Leo	A3 V	2,14	36 al	
62	Naos	$\zeta$ Pup	O5Iaf	2,21	1 400 al	
63	Lambda Velorum	$\lambda$ Vel	K4.5 Ib-II	2,23	570 al	
64	Eltanin	$\gamma$ Dra	K5 III	2,23	150 al	
65	Alphecca A	$\alpha$ 1 CrB	A0 V	2,24	75 al	
66	Sadir	$\gamma$ Cyg	F8 Ib	2,24	1 500 al	
67	Schedar	$\alpha$ Cas	K0 IIIa	2,25	230 al	
68	Aspidiske	$\iota$ Car	A8 Ib	2,25	690 al	
69	Almach A	$\gamma$ 1 And	K3Ib	2,26	350 al	
70	Mizar A	$\zeta$ 1 UMa	A1 V	2,27	78 al	
71	Caph	$\beta$ Cas	F2 III-IV	2,27	54 al	
72	Epsilon Centauri	$\epsilon$ Cen	B1III	2,27	380 al	
73	Algieba A	$\gamma$ 1 Leo	K1-IIIbCN-0.5	2,28	130 al	
74	Alpha Lupi	$\alpha$ Lup	B1.5 III	2,28	550 al	
75	Dschubba	$\delta$ Sco	B0.2 IV	2,29	400 al	
76	Wei	$\epsilon$ Sco	K2 IIIb	2,29	65 al	
77	Eta Centauri	$\eta$ Cen	B1.5Vne	2,32	310 al	
78	Merak	$\beta$ UMa	A1 V	2,35	79 al	
79	Ankaa	$\alpha$ Phe	K0 III	2,37	77 al	
80	Girtab	$\alpha$ Sco	B1.5 III	2,38	460 al	
81	Gamma	$\gamma$ Cas	B0.5IVe	2,39	610 al	
82	Enif	$\epsilon$ Peg	K2Ib	2,4	670 al	
83	Aludra	$\eta$ CMa	B5 Ia	2,4	3 200 al	
84	Avior A	$\epsilon$ 1 Car	K0 III	2,4	630 al	
85	Scheat	$\beta$ Peg	M2.5 II-III	2,42	200 al	
86	Phecda	$\gamma$ UMa	A0Ve SB	2,43	84 al	
87	Alderamin	$\alpha$ Cep	A7IV	2,44	49 al	
88	Kappa Velorum	$\alpha$ Vel	B2 IV-V	2,46	540 al	
89	Markab	$\alpha$ Peg	B9 III	2,49	140 al	
90	Gienah	$\epsilon$ Cyg	K0 III/M3	2,5	72 al	