

L'Univers froid avec Herschel

Sandrine Bottinelli

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements

Contents

1 Introduction : l'infrarouge, le spatial et Herschel

Le 14 mai 2009, une fusée Ariane 5 a effectué un décollage parfait, emmenant à son bord les observatoires spatiaux Herschel et Planck. Cet exposé a pour but de présenter l'Observatoire Spatial Herschel, le défi technologique qu'il représente, et les nombreuses avancées qu'il apportera dans différents domaines astrophysiques.

1.1 L'infrarouge

Herschel est un observatoire conçu pour observer les radiations infrarouges et submillimétriques. Ce type de radiations fait partie des nombreuses régions du spectre électromagnétique qui sont invisibles à l'œil humain (voir figure 1). En effet, celui-ci est insensible aux radiations très (par exemple les rayons gamma) ou au contraire peu (comme les ondes radio) énergétiques. Il faut donc utiliser des instruments spécifiquement construits pour détecter le type de radiation auquel on s'intéresse. L'avantage étant que les images obtenues à différentes longueurs d'onde révèlent des phénomènes et environnements physiques particuliers, apportant ainsi de nombreuses informations complémentaires sur l'objet étudié, et donc permettant de mieux le caractériser et le connaître.

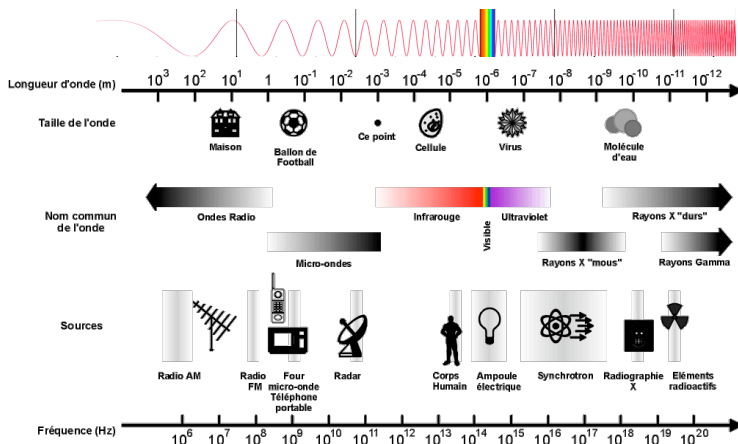


Figure 1: Le spectre électromagnétique: l'œil humain ne perçoit qu'une infime partie de ce spectre, le domaine du visible. Herschel quant à lui est sensible aux ondes dans l'infrarouge lointain et le submillimétrique.

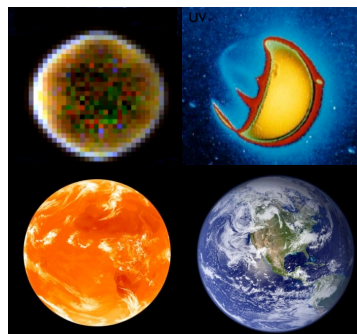
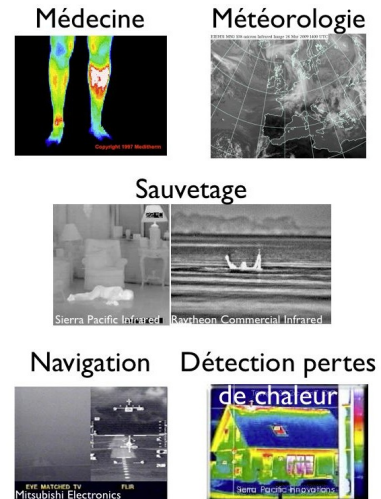


Figure 2: La Terre vue dans différents domaines de longueurs d'onde: (de gauche à droite et de haut en bas) gamma, ultraviolet, infrarouge, visible.

L'infrarouge, domaine de prédilection d'Herschel, ne nous est cependant pas inconnu. En effet, nous nous en servons quasiment quotidiennement, dans une variété de situation:

- en médecine, pour déceler des blessures musculaires ;

- en météorologie, pour suivre les mouvement des nuages ;
- dans le cadre de sauvetages, pour repérer les personnes en détresse la nuit ou dans la fumée d'un feu ;
- en navigation, notamment aérienne, pour discerner la piste d'atterrissage dans le brouillard ;
- dans le cadre d'un bilan énergétique, par exemple d'une maison, pour détecter les pertes de chaleur ;
- ...



Du côté astrophysique, les précédents observatoires infrarouges ont déjà dévoilé un visage complètement différent de régions bien connues telles que la constellation d'Orion (figure 3), ou bien ont révélé des aspects insoupçonnés, comme pour le cas du nuage sombre HH46 (figure 4).

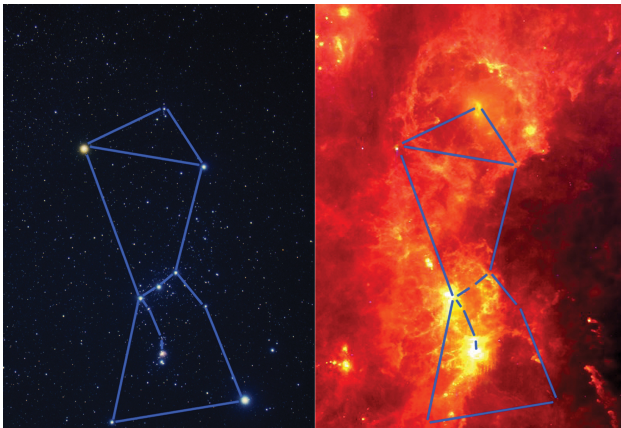


Figure 3: La constellation d'Orion dans le visible (à gauche, soulignée par les segments bleus) et dans l'infrarouge (à droite).

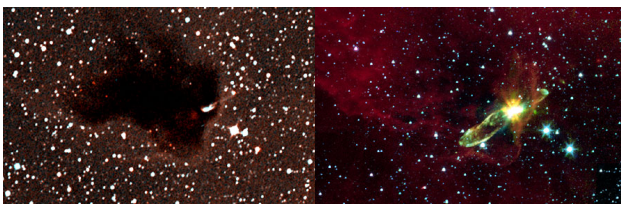


Figure 4: Le nuage sombre HH46 dans le visible (à gauche) et dans l'infrarouge (à droite) : la seconde image met à jour la proto-étoile enfouie et révèle la présence d'un jet de matière.

1.2 Le spatial

Un des grands avantages d'Herschel est que c'est un télescope spatial. Malgré les contraintes que cela implique (coût, durée de vie limitée, ...), le jeu en vaut la chandelle car le gain en précision et en opportunités d'observation est énorme. En effet, les performances des télescopes au sol sont principalement limitées par la présence de l'atmosphère qui d'une part brouille les images et d'autre part, absorbe les radiations sur de larges gammes de longueurs d'onde, comme on peut le voir sur la figure 5.

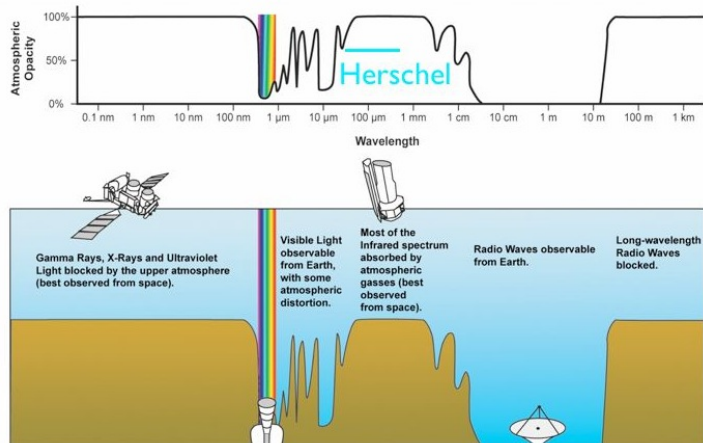


Figure 5: Opacité atmosphérique en fonction de la longueur d'onde : une opacité de 100% signifie que l'atmosphère empêche toute radiation d'atteindre le sol. Ce schéma montre donc qu'il est nécessaire d'utiliser un télescope spatial pour observer dans l'ultraviolet/gamma/X (moins de $400 \mu\text{m}$ environ), ainsi que dans une large portion du submillimétrique et de l'infrarouge ($1 \mu\text{m}$ - 1cm).

1.3 Herschel...

1.3.1 ... l'homme

William Herschel (1738-1822) était un astronome et musicien germano-britannique. Il a apporté d'importantes contributions à l'astronomie, en particulier des catalogues d'étoiles doubles et de nébuleuses, ainsi que la découverte d'Uranus en 1781. Mais ce sont ses travaux sur la diffraction de la lumière qui lui ont valu d'être choisi pour donner son nom au télescope car ses expériences ont mené à la découverte du rayonnement infrarouge en 1800.

1.3.2 ... le télescope

- Comparé aux autres télescopes spatiaux, Herschel est un géant dont le miroir primaire mesure $3,5 \text{ m}$ de diamètre (figure 6), dépassant largement les $2,4 \text{ m}$ de Hubble, qui possède le plus grand miroir après celui d'Herschel.

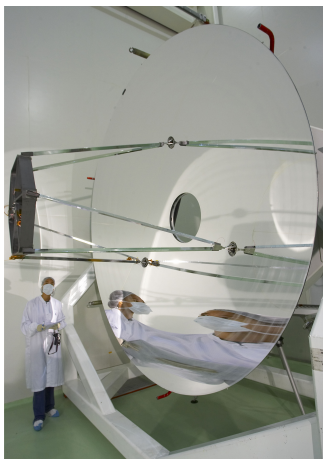


Figure 6: Le miroir d'Herschel.

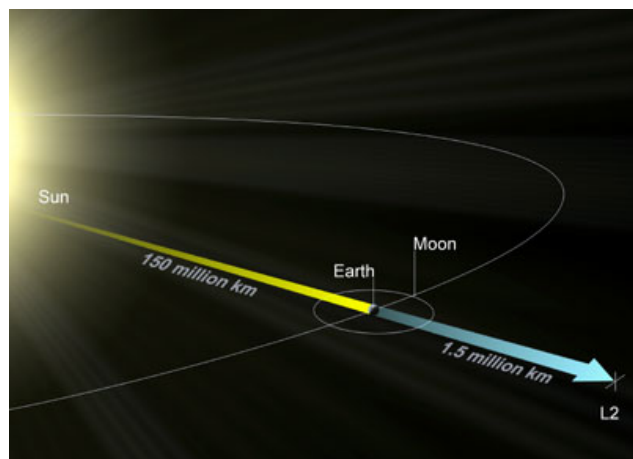


Figure 7: L'orbite d'Herschel (pas à l'échelle).

- L'orbite d'Herschel est située à $1,5 \text{ millions}$ de kilomètres de la Terre, dans une direction opposée à celle du Soleil (figure 7), minimisant ainsi les variations de température.

- Des instruments uniques:
 - PACS: caméra+spectromètre opérant entre 55 et 210 μm .
 - SPIRE: caméra+spectromètre opérant entre 194 et 672 μm .
 - HIFI: spectromètre très haute précision (jusqu'à 10 000 fois plus que PACS ou SPIRE) opérant entre 157 et 625 μm .
- Herschel, c'est aussi 2500 litres d'hélium liquide servant à refroidir les détecteur à -270°C , c'est-à-dire proche du zéro absolu. Ce refroidissement est nécessaire pour une meilleure sensibilité et ainsi détecter des objets très lointains ou très peu lumineux. La quantité d'hélium embarquée permettra à Herschel d'opérer pendant environ 3 ans.

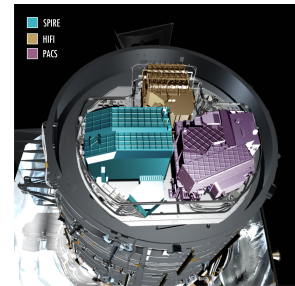


Figure 8: Vue d'artiste des instruments d'Herschel.

- Les plus par rapport à ses prédécesseurs du domaine infrarouge (du plus récent au plus ancien: Spitzer, AKARI, ISO, IRAS) et submillimétrique (SWAS, Odin):
 - une sensibilité accrue grâce à une surface collectrice au moins 20 fois supérieure.
 - l'accès à une nouvelle gamme de longueurs d'onde faisant le pont entre l'infrarouge et le submillimétrique.
 - l'incorporation de nouvelle technique instrumentale spécifiquement développée pour Herschel lui octroyant une très haute précision.

1.4 La spectroscopie: le couteau suisse de l'astronome

Les instruments à bord d'Herschel possèdent tous un mode spectrométrie (pour HIFI, c'est même le seul mode possible), mais en quoi cela consiste-t-il?

La spectrométrie ou spectroscopie est une technique permettant de mesurer l'intensité du rayonnement en fonction de la longueur. L'exemple le plus simple de spectromètre est le prisme, qui sépare une lumière blanche en ses différentes composantes de couleur (figure 9), chaque couleur correspondant à une longueur d'onde.



Figure 9: Spectre d'une lumière blanche, obtenu par diffraction avec un prisme.

Cependant, si on regarde plus en détails la lumière (blanche) venant du Soleil, on remarque la présence de zones sombres (figure 10) dues aux atomes et molécules présentes dans l'atmosphère solaire. Chaque espèce absorbant avec un schéma qui lui est propre, telle une empreinte digitale, on peut ainsi reconstituer la composition de l'atmosphère solaire (ou de tout autre objet astronomique étudié).

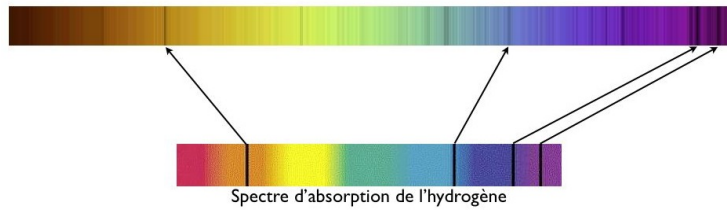


Figure 10: Le spectre visible du Soleil (en haut) montrant des absorptions (zones sombres) dues aux espèces présentes dans l'atmosphère de notre étoile. On reconnaît "l'empreinte" de l'hydrogène en comparant le spectre du Soleil avec celui de cet élément.

En plus d'information sur la composition chimique, la spectroscopie permet également de:

→ mesurer la température: comme on peut le voir sur la figure 12, la couleur dominante du spectre, ou encore la longueur d'onde à laquelle l'intensité est maximale, varie en fonction de la température.

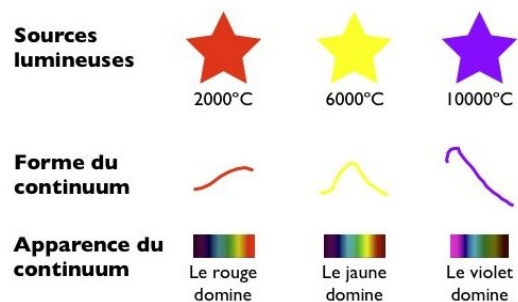


Figure 12: Spectroscopie et température.

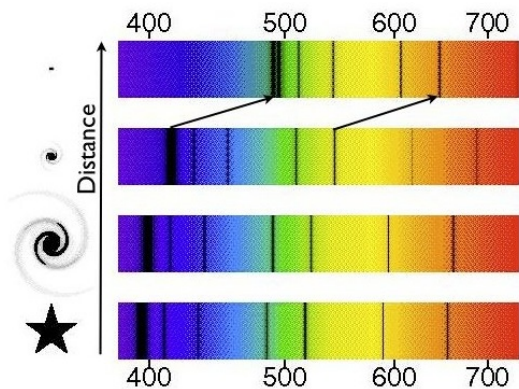


Figure 11: Décalage vers le rouge avec la distance.

← mesurer de très grandes distances: pour les objets s'éloignant de la Terre, les empreintes observées sont décalées vers le rouge, c'est-à-dire les plus grandes longueurs d'onde, ou encore les basses fréquences, telle le son d'une sirène de voiture de police paraissant plus grave lorsque le véhicule s'éloigne.

2 Objectifs scientifiques d'Herschel

Les objectifs scientifiques d'Herschel sont nombreux et ce télescope se penchera sur des phénomènes et objets astrophysiques très différents. Cependant, il existe des points communs entre ces domaines, à savoir deux "angles" d'attaque qui sont omniprésents:

- la poussière interstellaire: bien qu'elle obscurcisse notre vision (mais pas celle d'Herschel), c'est un composant essentiel du milieu interstellaire;
- les molécules (notamment l'eau): celles-ci jouent bien sûr un rôle clé dans la chimie des objets étudiés, mais ont également une grande influence sur la structure physique.

2.1 Etude des galaxies

Herschel cherchera à percer les mystères de la formation et l'évolution des galaxies, et à mieux caractériser les structures à grande échelle. En particulier, il nous aidera à savoir quand et comment se sont formées les galaxies et si/comment leur nature est fonction du temps.

Herschel sera ainsi une machine à voyager dans le temps: en effet, la lumière possédant une vitesse finie, celle qui nous parvient en provenance d'objets très éloignés les a quittés il y a plusieurs milliards d'années. Ainsi, observer l'Univers lointain revient à observer le jeune Univers, en particulier l'époque de formation des premières galaxies et des premières étoiles. Une des questions capitales est de savoir si les étoiles se sont formées en premier puis se sont agglomérées en galaxies, ou bien si de larges structures étaient d'abord présentes puis se sont fragmentées en étoiles.

Concernant la nature des galaxies, plusieurs types de galaxies sont connus à l'heure actuelle:

- les noyaux actifs de galaxies (NAG) : galaxies dont le cœur émet de grandes quantités d'énergie de source inconnue.
- les galaxies à trous noirs supermassifs : ces trous noirs seraient un composant courant des galaxies, mais qui est arrivé en premier, les trous noirs ou les galaxies au cœur desquelles ils résident? Dans cet autre analogue cosmique du paradoxe de l'œuf et de la poule, Herschel apportera des indices clés.

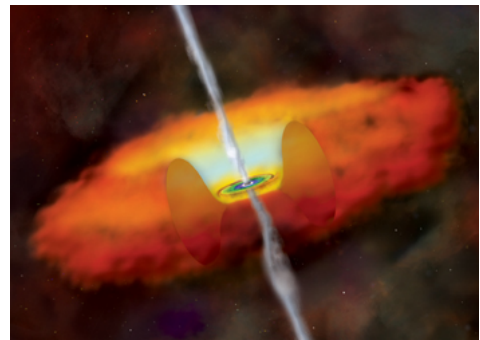


Figure 13: Vue d'artiste d'un NAG.

- collisions de galaxies : celles-ci étaient plus fréquentes dans le jeune Univers et l'étude de ces phénomènes nous aideraient à comprendre comment s'est façonné l'actuel "zoo" de galaxies.
- galaxies à sursaut de formation d'étoiles : dans ces galaxies, le taux de formation stellaire est 100 fois supérieur à celui d'une galaxies "normale" ; cet augmentation du taux est due à une réaction en chaîne suite à la compression d'énormes nuages de gaz et de poussières par une onde de choc.

Mais cela a-t-il toujours été le cas ou bien trouvait-on un nombre plus restreint de (voire un seul) type de galaxies dans le très jeune Univers? Certains types sont-ils les états évolutifs d'autres? Des questions sur lesquelles se penchera Herschel et dont les réponses nous aideront à déterminer l'histoire et le devenir de notre Galaxie.

2.2 Etude des étoiles

2.2.1 Démographie

L'étude des populations d'étoiles montre que la proportion diffère en fonction de la masse et que les étoiles massives ou au contraire très petites sont minoritaires. Deux scénarios sont en compétition en ce qui concerne l'origine de cette répartition de masse : celle-ci serait soit le résultat de la fragmentation du nuage moléculaire au sein duquel se forment les étoiles, soit la formation des étoiles plus massives serait due à la "fusion" d'étoiles plus petites.

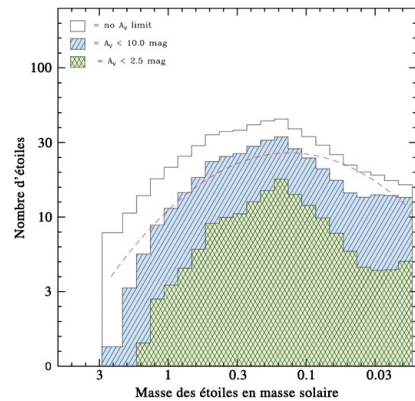


Figure 14: Nombre d'étoiles en fonction de leur masse.

2.2.2 Naissance stellaire

La formation d'une étoile peut être découpée en plusieurs étapes (figure 15):

- le cœur pré-stellaire, condensation dense et froide au sein d'un nuage moléculaire
- l'effondrement gravitationnel : suite à une instabilité (choc extérieur, changement dans le champ magnétique), le poids du cœur pré-stellaire n'est plus compensé, entraînant son effondrement et laissant apparaître en son centre un embryon stellaire: une proto-étoile.
- la proto-étoile : la matière en effondrement continue à s'accréter sur l'objet central autour duquel se développe un disque ; il y a également apparition de jets de matière.
- l'étoile T Tauri : il n'y a pratiquement plus d'enveloppe et le disque, bien développé, est appelé disque proto-planétaire.
- l'étoile pré-séquence principale : stade qui précède le début de la fusion d'atomes d'hydrogène (ce qui caractérise une étoile) et au cours duquel le disque proto-planétaire se fragmente en "planétisimaux", de gros cailloux qui deviendront des planètes et autres comètes, astéroïdes, etc.
- le jeune système stellaire.

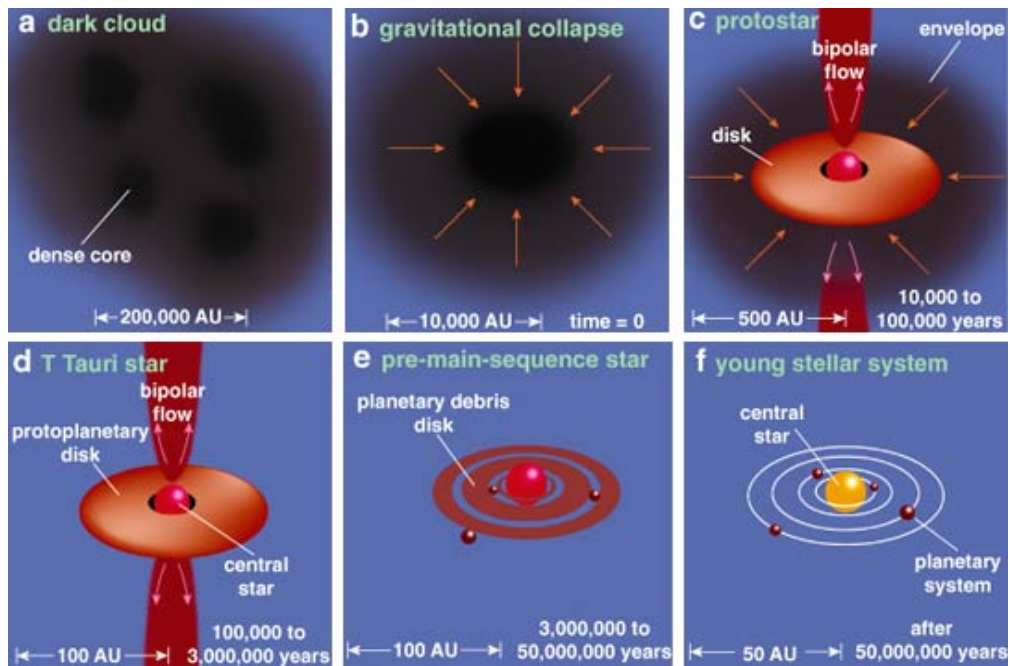


Figure 15: Les différentes étapes de la formation stellaire (Source : Green 2001).

Malgré tout, il reste un grand nombre d'incertitude sur les mécanismes précis qui gouvernent la formation stellaire, ce qui nous empêche de bien comprendre, par exemple, l'origine de la masse d'une planète et la taille de son orbite. Pour cela, une connaissance des conditions physiques (masse, densité, température) et chimiques (composition, abondances) est nécessaire. Or, au cours des trois premières étapes, la présence de l'épaisse enveloppe de poussière requiert des observatoires comme Herschel pour pouvoir la percer et déterminer les paramètres essentiels. Au final, Herschel nous apportera les informations qui nous permettront de mieux cerner la formation stellaire, et donc notamment de mieux comprendre l'histoire de notre propre Système Solaire.

2.2.3 Une fin qui n'est qu'un début

Outre les mystères qui entourent la formation stellaire, la fin de vie d'une étoile est également pleine d'incertitude. C'est pourtant une étape charnière dans le cycle de la matière (figure 16) puisque les éléments créés par les stades successifs de fusion sont dispersés dans le milieu interstellaire où ils seront incorporés dans la formation ultérieure d'autres étoiles, permettant ainsi l'enrichissement chimique des systèmes (proto-) stellaires.

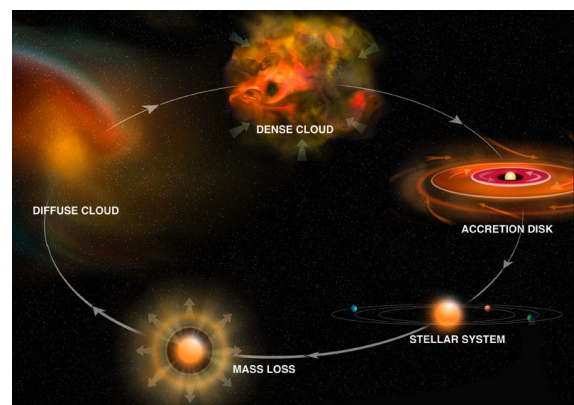


Figure 16: Le cycle de la matière.

2.3 Astrochimie

L'Univers est un laboratoire qui n'a pas fini de nous surprendre. Ainsi des réactions chimiques menant à des composés plus ou moins complexes se produisent dans une variété d'environnements extrêmes, notamment de très basses températures (inférieures à -250°C) et/ou de très faibles densités (inférieures à celles atteintes par les meilleurs vides terrestres). A ce jour, plus de 120 espèces ont été détectées dans le milieu interstellaire, la plus remarquable et énigmatique étant probablement l'eau, à laquelle Herschel sera particulièrement attentif.

L'astrochimie a pour but de caractériser l'interaction entre les différents composants du milieu interstellaire afin d'améliorer notre compréhension des processus physico-chimiques en jeu dans les différents domaines. Ces composants incluent:

- les poussières : grains composés de carbone ou de silicates, et parfois entourés d'une couche de glace qui agit comme catalyseur/support pour la formation de molécules ; l'étude des interactions des grains avec le gaz mais aussi avec les radiations sont des enjeux importants pour Herschel.
- les hydrocarbures : très répandus sur Terre, ils le sont également dans l'espace d'où la nécessité de mieux caractériser ces espèces, leurs abondances et leur rôle.
- les fullerènes, des agrégats de carbone tels que le graphite.
- les acides aminés, d'importance biologique et qu'on retrouve dans des météorites du Système Solaire.

L'astrochimie touche de nombreux phénomènes et domaines astrophysiques, non seulement au niveau chimique, mais également au niveau physique et dynamique, comme mentionné plus haut. Par exemple, au cours des premières phases de formation stellaire, l'effondrement produit de la chaleur qui doit être évacuée afin que le processus puisse continuer. Pour cela, il existe des "radiateurs cosmiques" qui sont certaines molécules (comme l'eau) et certains atomes (par exemple le carbone) et qui vont permettre à l'excès de chaleur de s'échapper sous forme de radiation. Ainsi, la chimie joue un rôle important dans l'évolution physique et dynamique de ces environnements. La chimie, en tant que telle, de ces phases sera également passée au crible par l'œil percant d'Herschel car des études au sol ont déjà montré l'existence de précurseurs des acides aminés autour des proto-étoiles. Herschel va donc être utilisé pour mieux comprendre les mécanismes de formation et d'évolution de ces précurseurs afin d'établir le lien éventuel entre eux et les acides aminés des météorites.

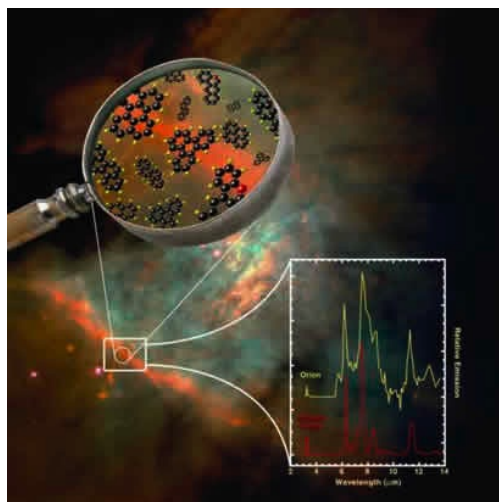


Figure 17: Spectre d'hydrocarbures détectés dans la nébuleuse d'Orion.

2.4 Système Solaire

2.4.1 Mars

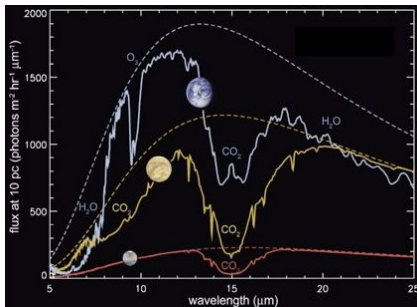
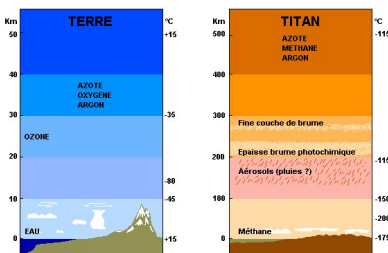


Figure 18: Spectres des atmosphères de la Terre, Vénus, et Mars (de haut en bas).

L'étude de l'atmosphère de notre voisine permettra de mieux caractériser son atmosphère, par exemple déterminer la variation des quantités d'eau et d'oxygène en fonction de l'altitude et des saisons. En se penchant également sur la composition de son atmosphère, et en la comparant à celle d'autres planètes rocheuses (figure 18), il sera possible d'établir des outils qui permettront d'étudier les atmosphères des planètes extra-solaires.

2.4.2 Planètes géantes et leurs satellites

Les systèmes planètes géantes + satellites peuvent être considérés comme des minis systèmes stellaires. Ainsi, leur étude peut nous aider à tester et mieux comprendre les scénarios de formation de notre Système Solaire.

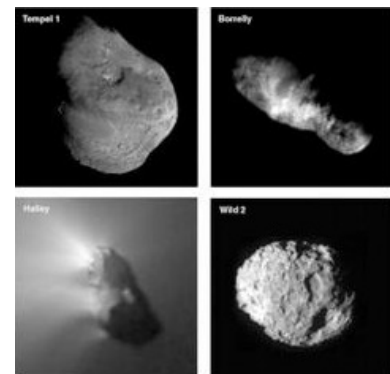


D'autre part, ces objets sont également fascinants en soi, de par la chimie et la dynamique de leurs atmosphères, notamment celle de Titan, un satellite de Saturne, et de Jupiter. Sans oublier la surface glacées d'Europe, satellite de Jupiter, sous laquelle se trouverait de l'eau à l'état liquide.

2.4.3 Ceinture de Kuiper

Herschel étudiera enfin les comètes, la composition de leur coma et de leur noyau. Ces "boules de glace sale" retiennent particulièrement l'attention pour plusieurs raisons:

- elles sont les témoins des conditions physico-chimiques de la nébuleuse primitive, milieu dans lequel se sont formées les planètes.
- elles sont les convoyeurs potentiels sur la Terre primitive de l'eau et de molécules menant à la vie.
- leurs contenus en eau lourde et composés prébiotiques sont donc des paramètres clés.



3 Liens utiles

Sites en français:

<http://herschel.cesr.fr>

<http://herschel cea.fr>

<http://smc.cnes.fr/HERSCHEL/Fr/>

Sites en anglais:

<http://www.esa.int/SPECIALS/Herschel/index.html>

<http://herschel.jpl.nasa.gov/index.shtml>