

Dossier pédagogique



Le ciel en profondeur



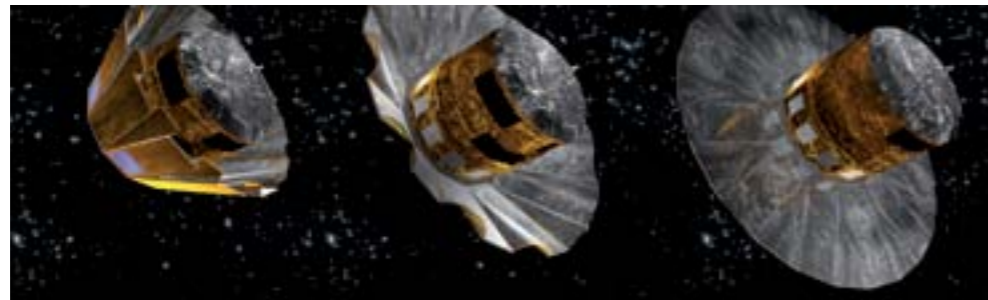
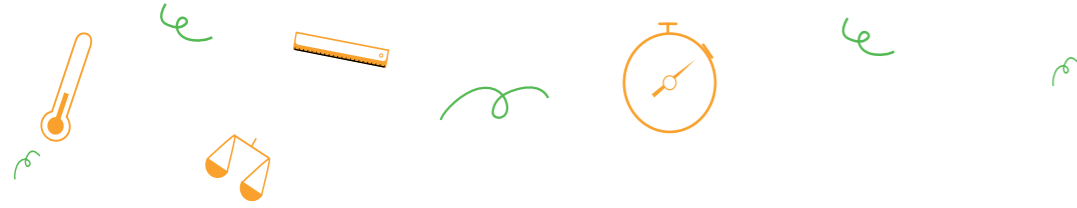
Ce dossier pédagogique a été conçu à partir de l'exposition
« *Le ciel en profondeur Gaia* » réalisée par la Direction de la communication
de l'Observatoire de Paris en août 2013 et mise à jour en avril 2018.
L'exposition est empruntable sur demande par courriel à :
expo-itinerante@obspm.fr

Toute une histoire... en trois dimensions. Quelle est l'histoire de notre galaxie, la Voie lactée, et du Système solaire ? Comment fonctionnent les étoiles ? Quelle est l'influence de la matière invisible sur les mouvements des étoiles et des galaxies ?

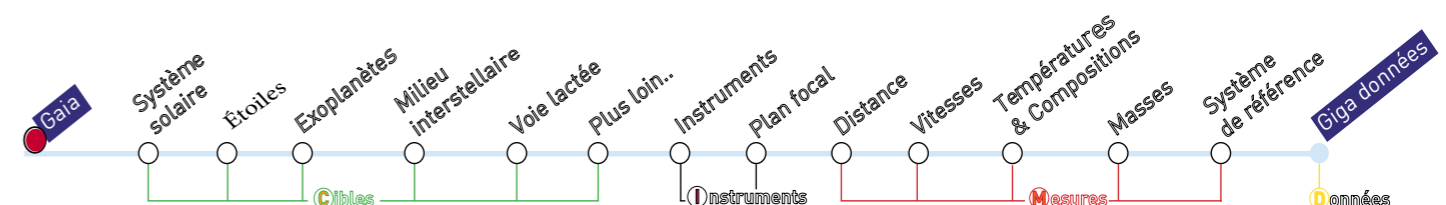
La mission Gaia a été conçue pour répondre à ces questions et à bien d'autres encore...

Gaia, une mission spatiale extra ordinaire

Des mesures qu'on ne saurait qualifier que... d'astronomiques !



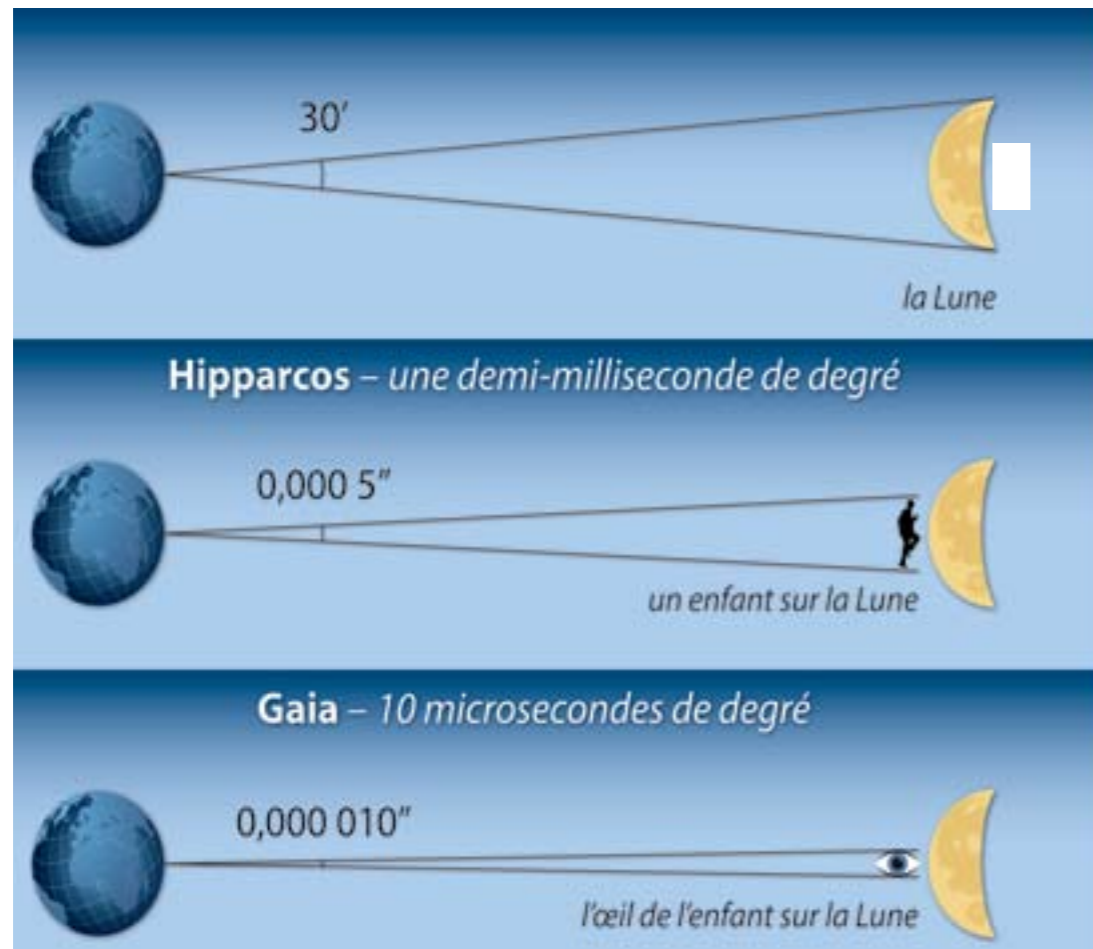
Mission d'astronomie de l'Agence spatiale européenne (ESA), Gaia a été imaginée dans les années 1990. Ce satellite de deux tonnes a été lancé par une fusée Soyouz-Fregat le 19 décembre 2013 depuis Kourou. Sa destination : un point de l'espace appelé L2, savamment choisi à 1,5 millions de kilomètres de la Terre, dans une direction opposée au Soleil. Gaia a été placé en orbite autour de ce point. Gaia a l'extrême ambition de réaliser la carte du ciel en trois dimensions la plus complète et la plus précise jamais obtenue. Tout au long de sa mission de 5 à 7 ans, il établit le portrait de plus d'un milliard d'objets célestes : étoiles de notre galaxie, astéroïdes de notre Système solaire, lointaines galaxies... Il participe à la chasse aux planètes autour des étoiles et mesure des effets infimes dus à la relativité.



De « simples » mesures d'angles pour révolutionner l'astrophysique

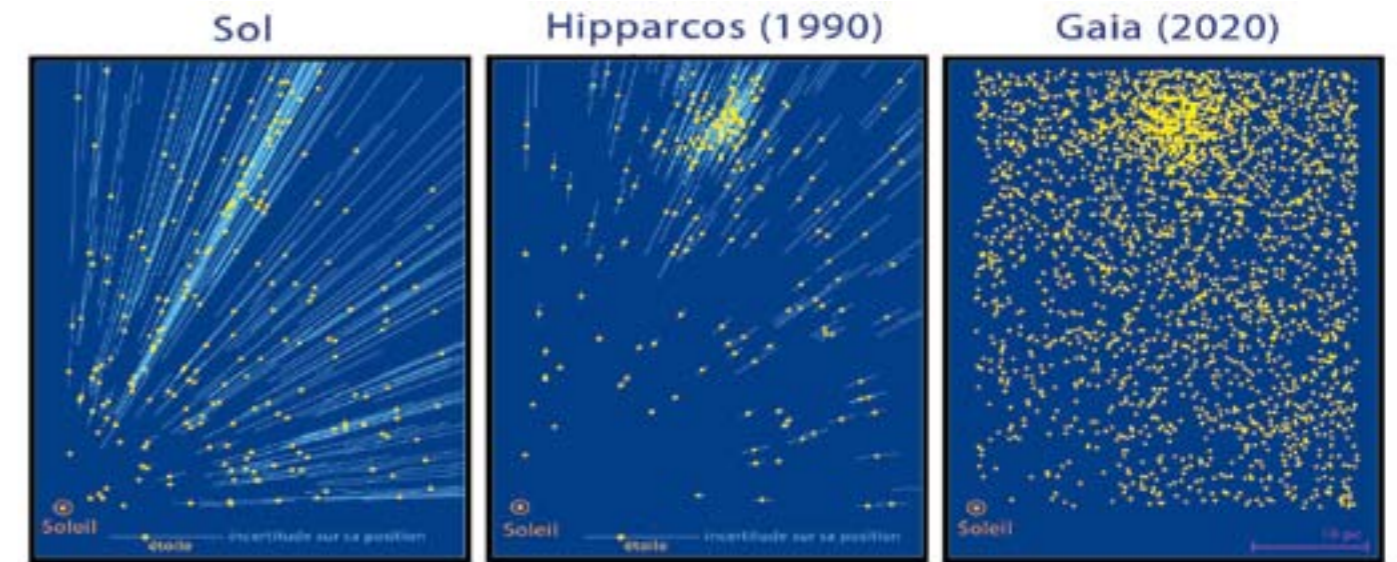
Gaia permet à l'**astrométrie**, cette science qui détermine les positions et les mouvements des astres, d'effectuer un grand bond en avant. Il mesure les angles séparant les étoiles sur la voûte céleste pour obtenir **le Graal des astronomes : leur distance !**

Les cibles : tous les objets **400 000 fois plus faibles** que ceux visibles à l'œil nu (magnitude 20). Les mesures d'angle par Gaia pour les objets les plus brillants sont si précises qu'elles sont comparables à l'épaisseur d'**un cheveu s'il pouvait être vu à une distance de 1 000 km !**

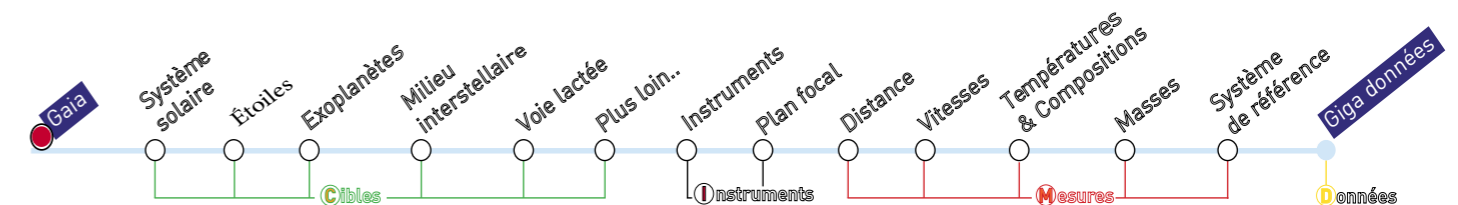


Ordres de grandeur

Gaia surpasse le premier satellite astrométrique Hipparcos (1989-1993) d'un facteur 10 000 en nombre d'objets observés et d'un facteur 50 en précision.



Précision sur les mesures de distance d'étoiles de l'amas des Hyades, avec les observations au sol et les satellites Hipparcos et Gaia. Les traits bleu ciel sont les incertitudes associées à chaque mesure : ils deviennent minuscules avec Gaia ! Grâce à Hipparcos, la structure à trois dimensions de l'amas a été décrite avec précision pour les étoiles relativement brillantes. Gaia en donne une description extrêmement détaillée, permettant de mieux comprendre sa formation et sa future évolution.



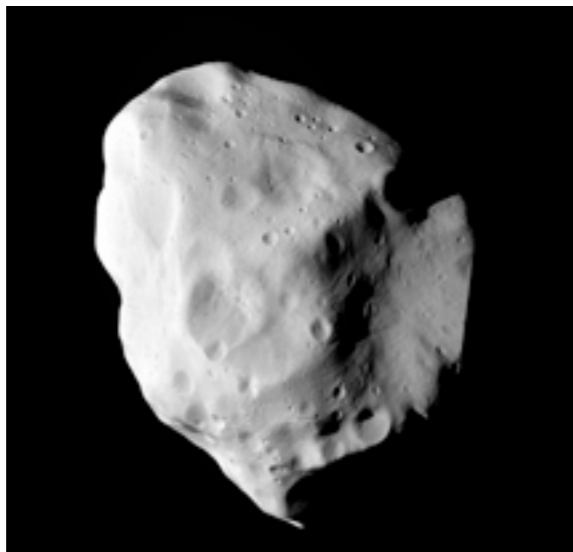
Une histoire vieille de 4,6 milliards d'années. Planètes, satellites, astéroïdes, comètes et autres petits corps orbitent autour du Soleil : **c'est notre Système solaire.** En mesurant le mouvement de près d'un demi-million de ces objets et d'autres de leurs propriétés, Gaia éclaire d'un jour nouveau comment s'est organisé cet ensemble à partir d'une masse de matériau tournant autour d'une étoile naissante.

Le Système solaire a voix au chapitre

Un manège de planètes et de cailloux autour du Soleil

Un regard éclectique

Le satellite scrute notre Système solaire des zones proches aux zones lointaines : depuis les astéroïdes **géocroiseurs** qui frôlent la Terre, les très nombreux **astéroïdes** de la « ceinture principale » entre Mars et Jupiter, des **satellites** de planètes, des **comètes**, jusqu'aux zones plus reculées, au-delà de Neptune. À la clef aussi la découverte d'objets nouveaux dont ceux, difficiles à observer depuis notre planète, qui voyagent à l'intérieur de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Pour éviter de les perdre de vue, ces objets seront rapidement suivis depuis le sol par un réseau de télescopes.



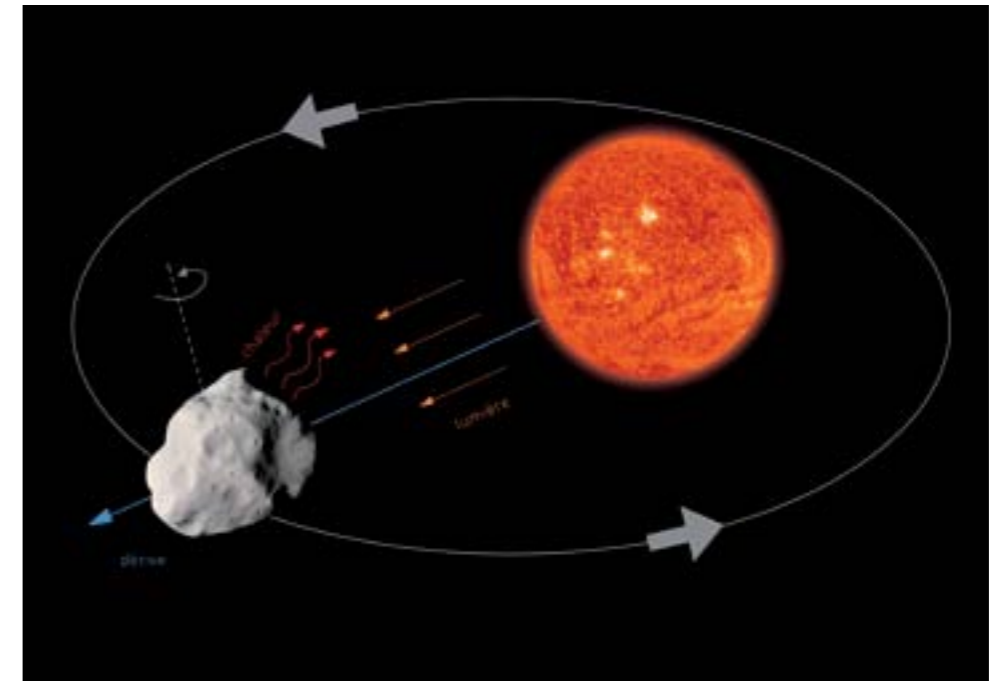
L'astéroïde Lutetia photographié par la sonde Rosetta

Gaia ne se rapproche pas des astéroïdes, satellites ou comètes pour les photographier. Cependant, ses différentes mesures de haute précision permettront d'établir les cartes d'identité d'une large population de petits corps.

Des portraits exhaustifs et précis en grand nombre

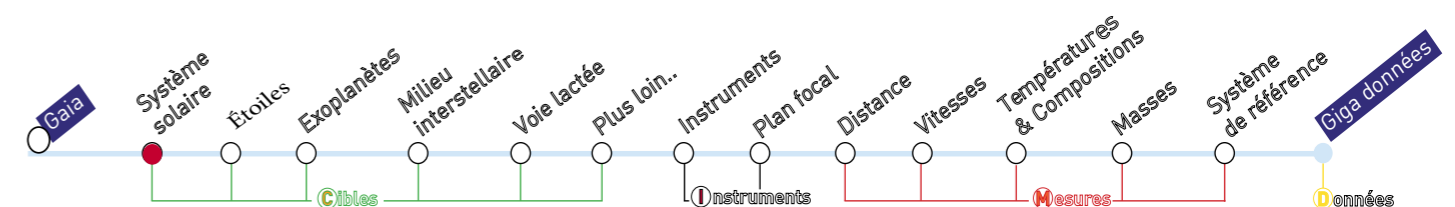
Les portraits de 300 000 astéroïdes et comètes sont dressés par Gaia, parfois aidée par d'autres télescopes, dévoilant ainsi leur forme, rotation, densité, structure interne, orbite... Tout cela sans approcher ces petits objets lointains : **le plus petit**, environ 1 km de diamètre ; **le plus distant**, jusqu'à 4,5 milliards de km de la Terre.

Les **orbites** seront si précises que Gaia pourra en dévoiler d'infimes variations. Cette mine de données donnera accès à la mesure des masses d'astéroïdes lors de rencontres proches, à des tests de la théorie de la relativité générale d'Einstein, à la détection de l'effet Yarkovsky...



L'effet Yarkovsky

Imaginé vers 1900, cet effet n'a été mis en évidence sur un astéroïde qu'au XXI^e siècle. Un objet éclairé par le Soleil ré-émet de la chaleur dans une certaine direction. La combinaison de sa rotation sur lui-même et de son inertie thermique le fait dévier de son orbite. Cette dérive infime et constante pourra être mesurée par Gaia.



La vraie luminosité des étoiles. Les 6 000 étoiles visibles à l'œil nu présentent une grande variété d'éclats. Pourquoi ? Sont-elles à des distances différentes ? Leurs luminosités intrinsèques diffèrent-elles ? Et bien, les deux ! Bien sûr, plus une étoile est lointaine, plus sa luminosité apparente (son éclat) est faible ; mais ses caractéristiques intrinsèques – sa masse, son âge – jouent aussi. **En mesurant l'éclat et la distance de millions d'étoiles, Gaia donne accès à leurs luminosités propres. Comment cette information va-t-elle donc améliorer notre connaissance des étoiles et même de notre galaxie ?**

Un milliard d'étoiles sous l'œil de Gaia

Comment brillent les étoiles?

Au cœur des étoiles

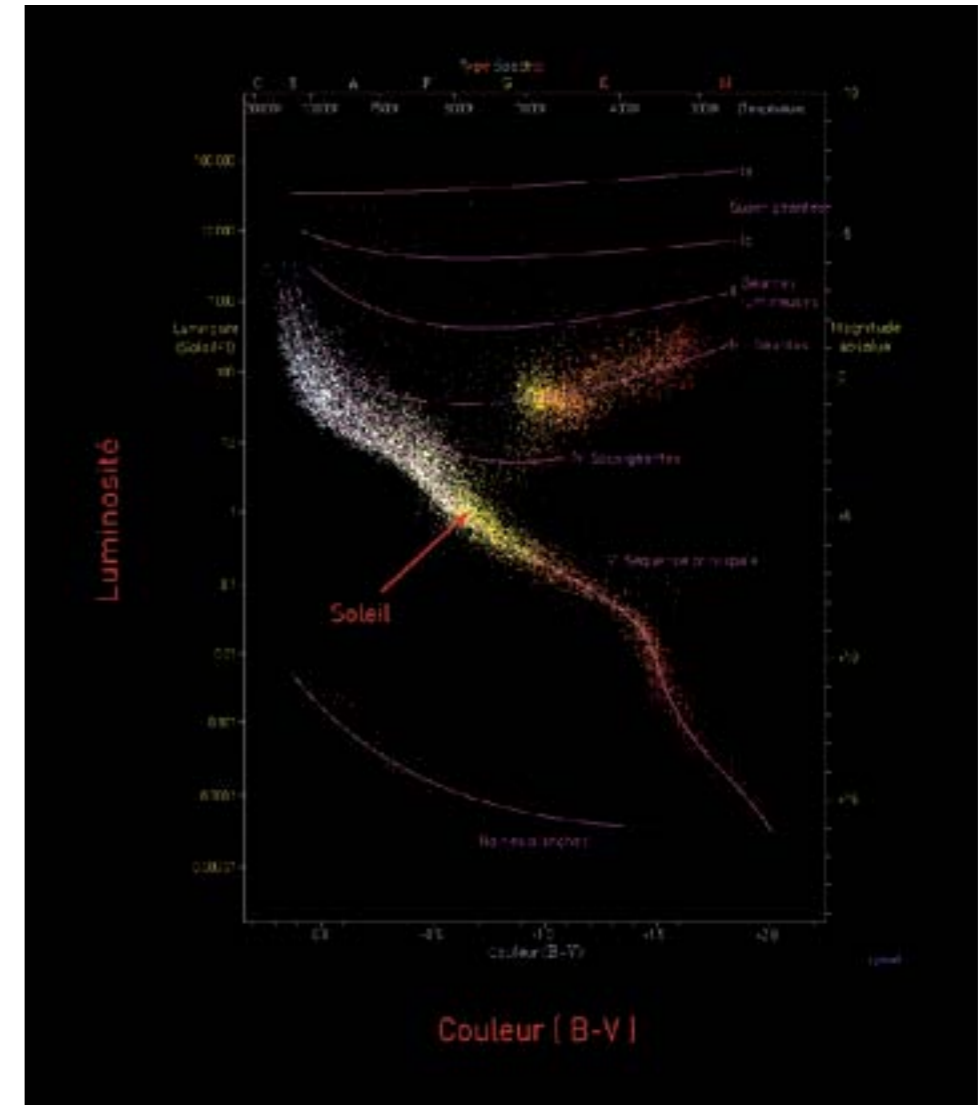
Le cœur des étoiles est le théâtre d'intenses **réactions nucléaires** : des atomes fusionnent pour former d'autres atomes plus lourds. L'énergie ainsi produite est rayonnée sous forme lumineuse et conditionne les **luminosités intrinsèques** des étoiles. En les déterminant grâce aux mesures de distances de Gaia, les astronomes peuvent remonter le fil de l'histoire et affiner notre compréhension des lois physiques qui gouvernent le fonctionnement des étoiles.



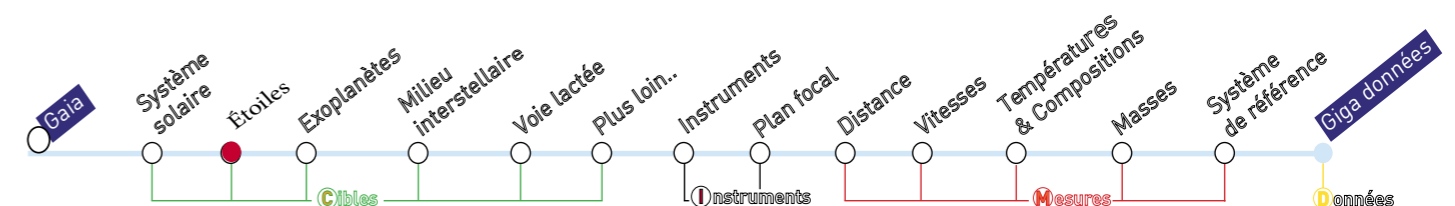
Vue d'artiste représentant les tailles relatives d'une naine rouge (0,1 fois le rayon du Soleil R), d'une naine jaune similaire à notre Soleil, d'une naine bleue (quelques R) et d'une supergéante bleue ou rouge (de 100 à 1 000 R).

De l'âge des étoiles à l'histoire de la Voie lactée

Les étoiles évoluent au cours de leur vie et, ce faisant, changent de couleur et de luminosité propre. Le Soleil par exemple, étoile naine jaune de « faible » luminosité, deviendra dans quelques milliards d'années une géante rouge très brillante. **Pour beaucoup d'étoiles, connaître leurs couleurs et leurs luminosités propres permet d'obtenir leurs âges.** Avec Gaia et ses centaines de millions d'étoiles observées, c'est une large fenêtre sur l'histoire de la Galaxie dans son ensemble qui va s'ouvrir.



Le diagramme de Hertzsprung-Russell montre clairement qu'il existe une relation entre la luminosité intrinsèque des étoiles et leur couleur (laquelle est une indication de leur température) : les étoiles sont groupées dans certaines régions du diagramme. Au cours de sa vie, une étoile passe d'une région à une autre ; par exemple, le Soleil passera dans la région des géantes puis finira sa vie comme naine blanche.



Les étoiles et leurs planètes. Tout comme le Soleil est entouré de ses planètes, de nombreuses étoiles possèdent un **cortège planétaire**. La première difficulté est de les découvrir, puis de déterminer leurs mouvements et leurs masses. Gaia détectera des milliers de planètes géantes comme Jupiter. Grâce à ce grand échantillon, il pourrait aider à comprendre comment des systèmes planétaires se forment et évoluent.

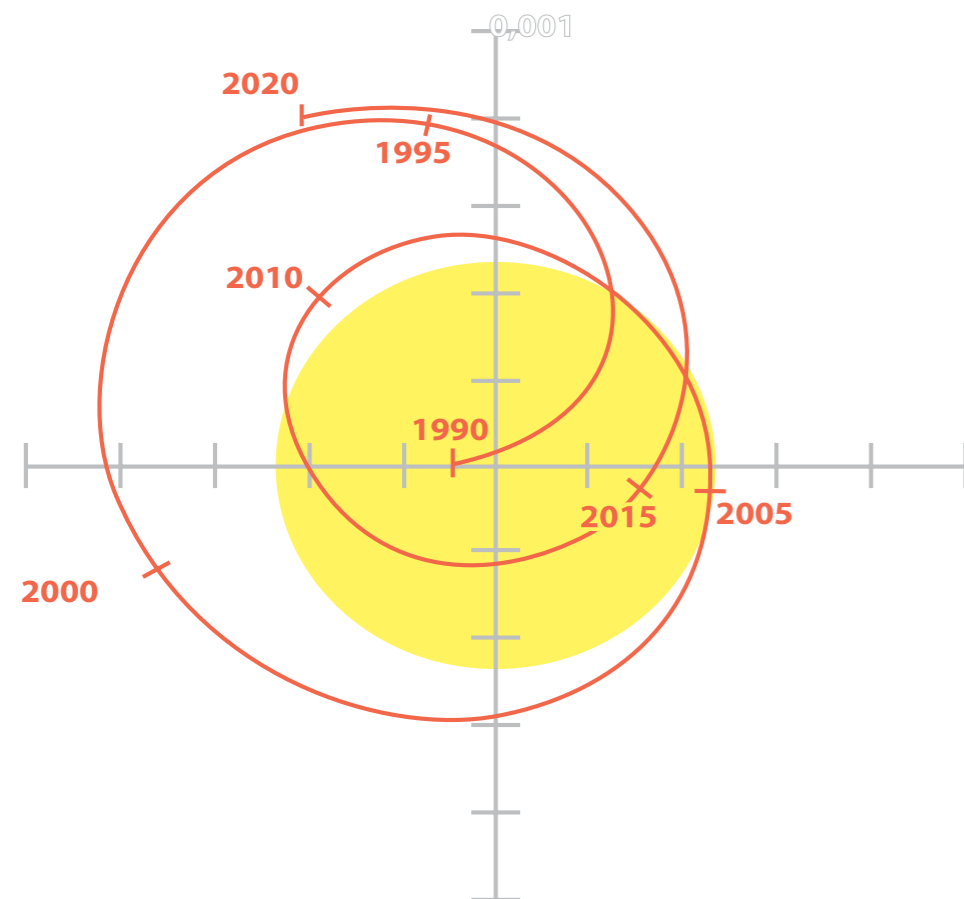
La découverte de nouveaux mondes

À la chasse aux planètes géantes !

Des planètes trahies par d'infimes déplacements

En 1845, François Arago, directeur de l'Observatoire de Paris, charge Urbain Le Verrier de trouver si une planète perturbe le mouvement d'Uranus. La découverte de Neptune fut un triomphe de la mécanique céleste, car Le Verrier avait «vu le nouvel astre au bout de sa plume».

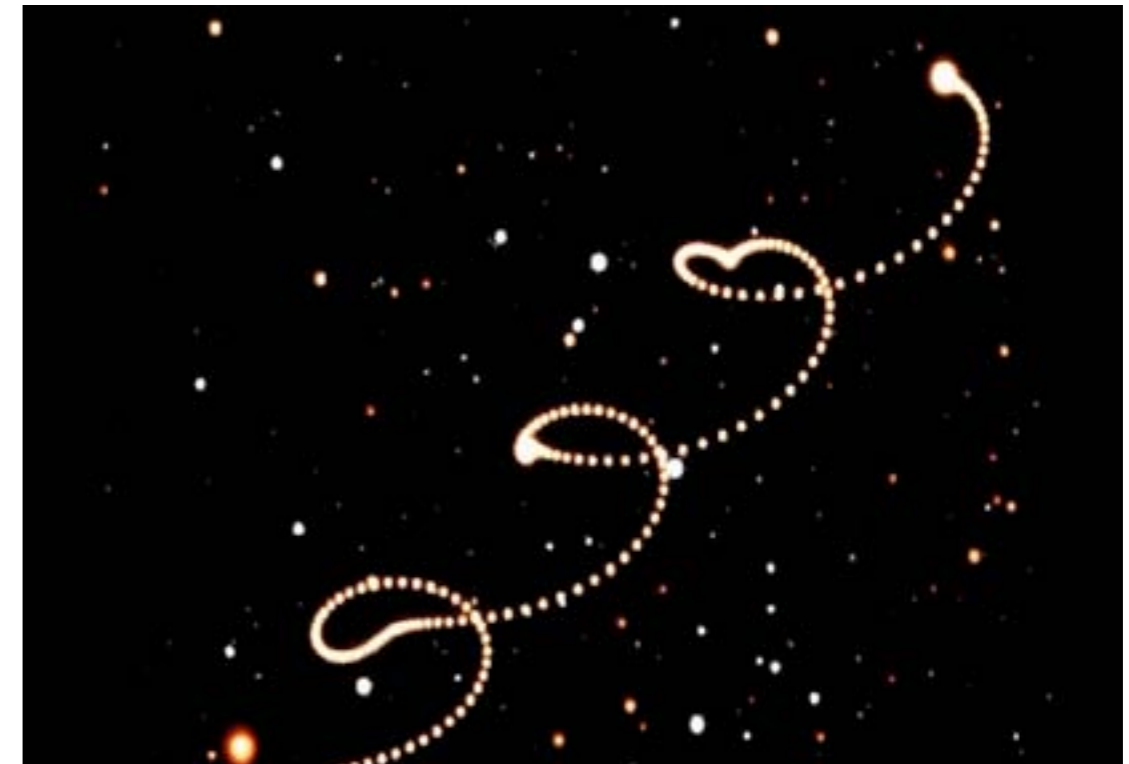
De la même manière, les planètes perturbent le mouvement de leur étoile mais ces perturbations, qui seront mesurées par Gaia pour détecter ces exoplanètes, sont ici **des millions de fois plus petites !**



Perturbation de la position du Soleil au cours des années : les planètes font bouger notre étoile d'une distance supérieure à son rayon ! De la même manière, si une étoile est accompagnée d'un «Jupiter», Gaia pourra espérer détecter les perturbations de sa position.

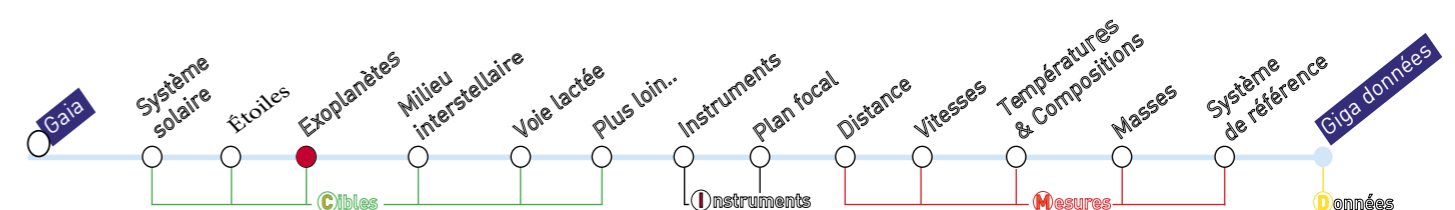
Combien de planètes dans notre galaxie ?

À vrai dire, on n'en sait rien, c'est une science jeune ! Il y a 20 ans, on ne connaissait que celles du Système solaire ; près de 4 000 d'exoplanètes sont maintenant connues. Certains prétendent qu'il pourrait exister plus de planètes que d'étoiles ! Ce qui est sûr, c'est qu'il est difficile de les détecter. Gaia en trouvera plusieurs milliers et apportera pour les autres des informations fondamentales sur les étoiles qui les hébergent.



Mouvement d'une étoile observée depuis la Terre

Si la Terre ne tournait pas autour du Soleil, l'étoile suivrait une ligne droite. Les 3 boucles sont dues au déplacement de la Terre pendant 3 ans (parallaxe) qui modifie notre angle de vue. Les déformations de chaque boucle révèlent que l'étoile est accompagnée par un objet 15 fois plus lourd que Jupiter.



Entre les étoiles. L'espace entre les étoiles, le *milieu interstellaire*, est composé de gaz, essentiellement de l'hydrogène, et de poussières. Les étoiles y naissent au sein de vastes nuages, y vivent et y meurent. La lumière qu'elles nous envoient traverse ce milieu, qui l'absorbe et la rougit, pour nous parvenir modifiée. Gaia, en détectant cette lumière et en la combinant à une détermination précise des distances des étoiles, permet de reconstituer la **structure en 3D** du milieu interstellaire et de savoir à quelles distances sont les nuages.

Il y a du gaz et de la poussière partout

De la 3D aussi pour le milieu interstellaire

Gaia et le cycle de la matière

À l'origine, les étoiles sont constituées essentiellement d'**hydrogène** et d'**hélium**. Au cours de leur vie, elles fabriquent des traces d'autres éléments chimiques. À la fin de leur vie, certaines d'entre elles dispersent ces éléments dans le milieu interstellaire. **De nouvelles étoiles** se forment à partir de cette matière, et leur atmosphère contient alors tous ces éléments.

L'analyse des compositions chimiques de millions d'étoiles donnera à Gaia des indices supplémentaires pour retracer l'**histoire de leur formation** mais aussi de celle de notre galaxie.



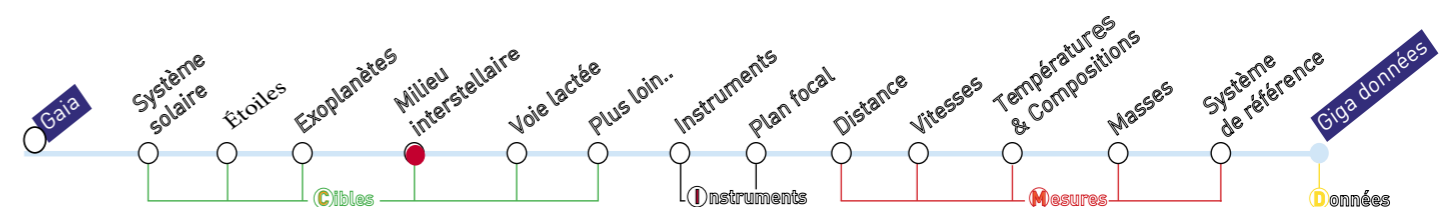
La partie centrale de la Voie lactée

Cette photographie montre la partie centrale de notre galaxie, vue par la tranche. Le plan galactique y apparaît sombre alors que c'est justement là que se trouvent la plupart des étoiles. Ceci illustre bien le fait que poussières et gaz sont concentrés dans le plan et absorbent la lumière des étoiles.



La nébuleuse de la Carène

Une nébuleuse est une région dense du milieu interstellaire, qui peut être brillante ou sombre. Sur cette photo, il s'agit de la région centrale de la nébuleuse de la Carène où un tourbillon d'étoiles naît, vit et meurt. Le Soleil est peut-être apparu à l'intérieur d'un tel nuage il y a 4,6 milliards d'années.



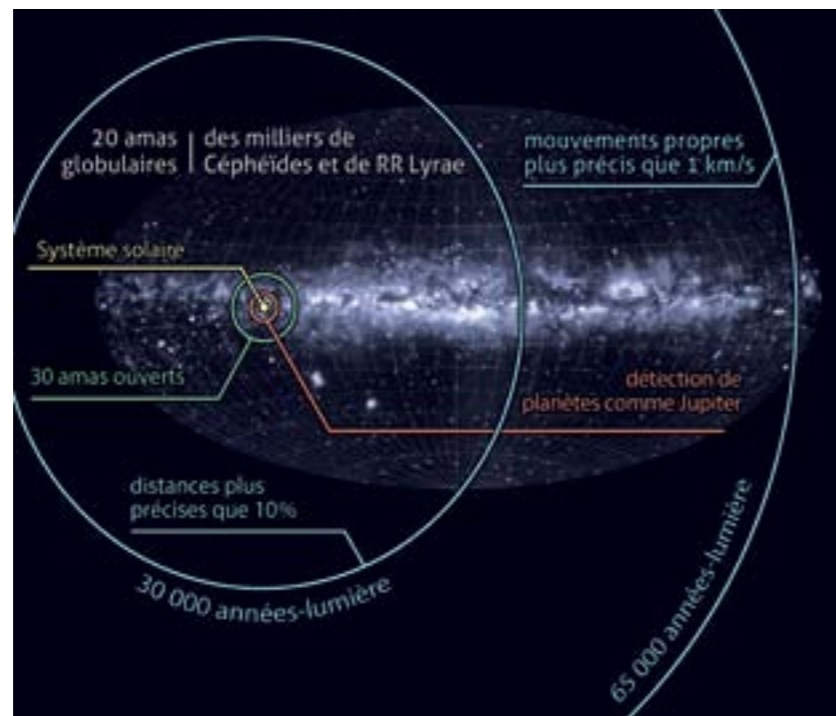
Recette pour une galaxie spirale. Pour préparer notre galaxie, prendre 100 milliards d'étoiles, verser du gaz, une grosse quantité de matière noire (composante invisible) et saupoudrer de poussière. **Gaia observe très précisément un milliard d'étoiles** : leurs distances au Soleil, leurs mouvements, leurs luminosités, la composition chimique de leurs atmosphères. À l'aide de toutes ces données, les astronomes vont pouvoir décrypter non seulement la structure des différentes composantes de la Galaxie, mais aussi «lire» les étapes successives qui, depuis près de 14 milliards d'années, ont forgé son état présent.

La Voie lactée décryptée

Quelle est la structure de notre galaxie ?
Quelle est son histoire ?

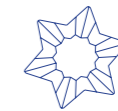
Les différentes populations d'étoiles de la Galaxie explorées par Gaia

Pendant 5 à 7 ans, Gaia va systématiquement observer un milliard d'étoiles, dans toutes les populations stellaires : le disque de la Voie lactée, son halo, son bulbe, ses amas d'étoiles. Plus aucune de ces étoiles ne pourra cacher sa position dans la Galaxie, l'orbite sur laquelle elle se déplace, la région dans laquelle elle a été formée. De ces données, on pourra déduire leur âge, masse, taille, variabilité et caractéristiques physiques, et les compagnons dont elles sont éventuellement entourées : étoiles ou exoplanètes géantes. **Autant d'observations qui vont permettre de préciser la succession des différentes générations d'étoiles.**



Gaia et l'histoire de la Galaxie

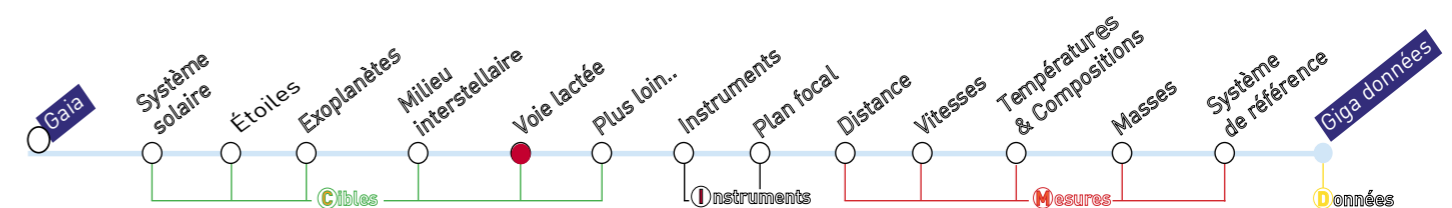
Gaia a été conçue très précisément dans ce but : **comprendre la structure, l'origine et les différentes étapes de la formation et de l'évolution de notre galaxie.** Le satellite observe systématiquement 1% des étoiles de la Voie lactée. 1% seulement ? Mais 1%, c'est un milliard d'étoiles différentes, qui vont chacune raconter leur histoire: de toutes jeunes étoiles du disque à peine sorties du cocon de gaz et de poussières où elles viennent de se former, des étoiles un peu plus anciennes dont certaines se sont fait éjecter du bulbe central de la Galaxie, ou bien de vieilles étoiles flottant dans le halo. Elles témoignent des étapes successives de la formation ou de l'évolution de notre galaxie. **C'est la somme de ces histoires individuelles qui permettra de retracer celle de la Voie lactée.**



1 année-lumière =
distance parcourue par
la lumière en un an, soit
environ 10 000 milliards de
kilomètres



M83, galaxie spirale similaire à la Voie lactée



Gaia observe-t-il des objets au-delà de notre Galaxie ? Notre Voie lactée fait partie du **Groupe Local**, un petit amas d'une quarantaine de galaxies de formes et de tailles différentes. Nombre des étoiles brillantes de ces galaxies voisines sont observées. Les mouvements relatifs de ces galaxies les unes par rapport aux autres sont déterminés avec précision, pour la première fois, grâce à Gaia. Ils vont révéler la quantité de **matière noire** cachée dans le Groupe Local et sa répartition spatiale. Beaucoup plus loin, quelques **500 000 quasars** - ces galaxies très énergétiques et si lointaines qu'on peut faire l'hypothèse que leurs mouvements ne sont pas mesurables même par Gaia - sont observés. Ils servent de références de position, c'est-à-dire de repères fixes dans l'espace.

Au-delà de la Galaxie

Un premier pas dans l'échelle cosmique

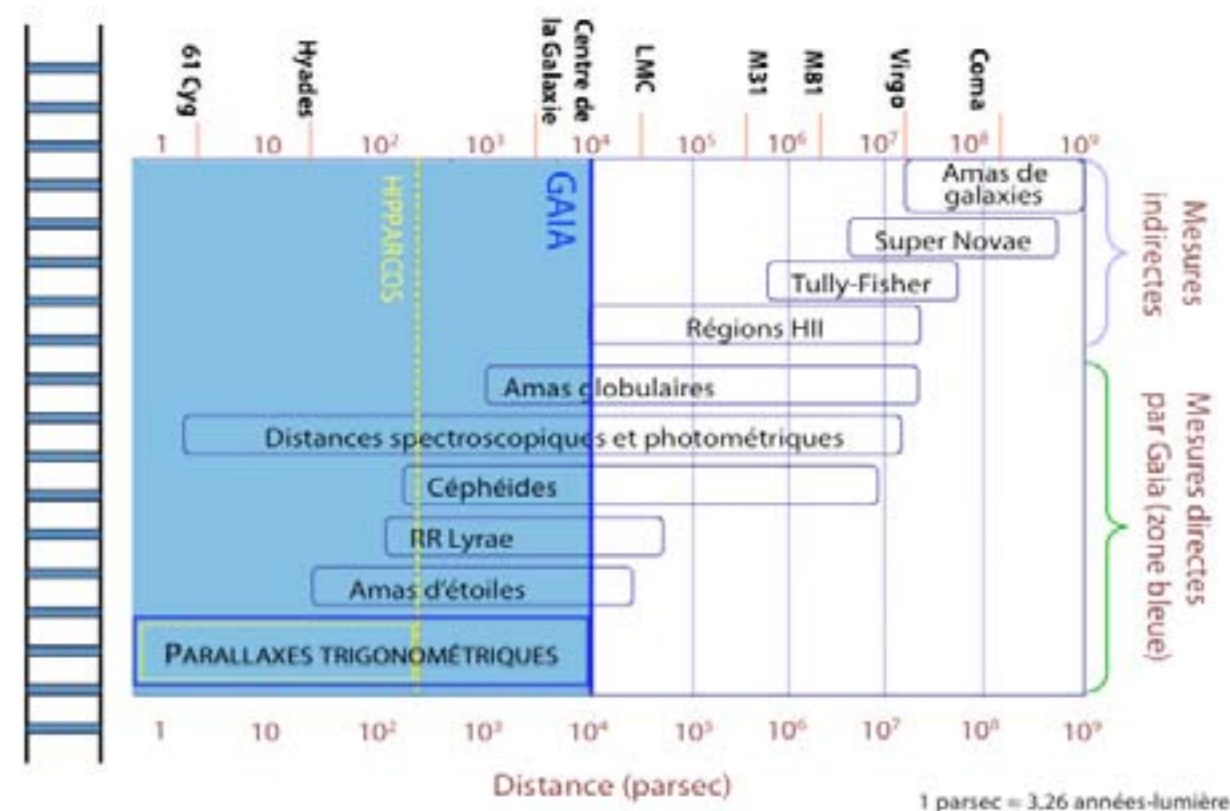
De très beaux nuages célestes dans l'hémisphère

Les plus proches voisines de la Voie lactée sont appelées « Nuages de Magellan » car à l'œil nu, depuis l'hémisphère sud, on se demande si ce sont des objets célestes ou des nuages. Gaia observe beaucoup d'étoiles devant et dans ces deux galaxies irrégulières. Cela permettra de comprendre si le Petit Nuage a été en partie détruit par le Grand et si ces deux Nuages vont un jour (lointain !!) tomber sur notre galaxie.



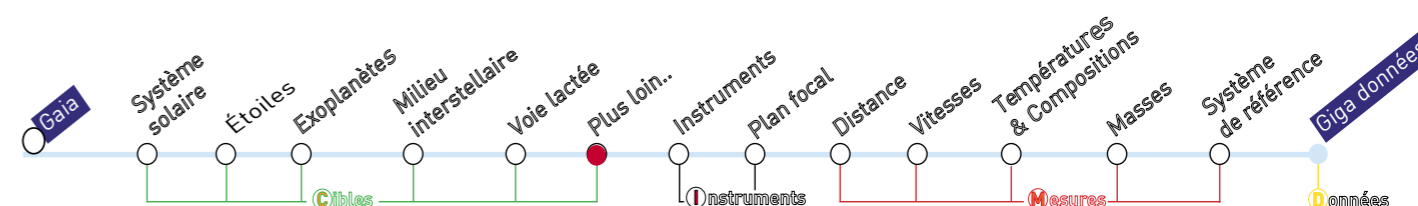
Le Grand Nuage de Magellan situé à environ 160 000 années-lumière. C'est une galaxie irrégulière dans laquelle Gaia va pouvoir observer de très nombreuses étoiles, dont beaucoup de Céphéides.

Étalonner les distances

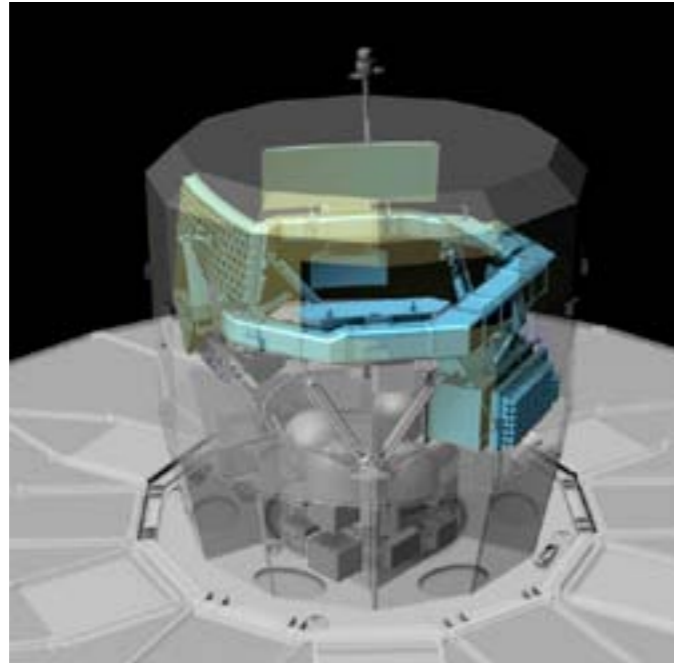


Les Céphéides sont des étoiles dont la luminosité varie de façon très régulière, avec une période d'autant plus longue qu'elles sont plus brillantes. Grâce à leur très forte luminosité, on peut les observer jusque dans des galaxies lointaines, trop lointaines pour que Gaia puisse mesurer leur distance. Mais là où Gaia a un impact considérable, c'est qu'il observe de très nombreuses Céphéides proches et permet d'étalonner la **relation entre leur période et leur luminosité**. Une fois cette relation précisément établie, il suffira de mesurer la période de Céphéides de galaxies lointaines pour connaître leurs luminosités intrinsèques, donc leurs distances.

La détermination des distances dans l'Univers est complexe. Les méthodes utilisées dépendent des distances à mesurer et la plupart d'entre elles sont indirectes. In fine, toutes ces méthodes sont étalonnées grâce aux parallaxes obtenues par l'astrométrie (Hipparcos, Gaia) pour lesquelles la limite indiquée ici correspond à une précision relative meilleure que 10% pour les étoiles les plus brillantes.



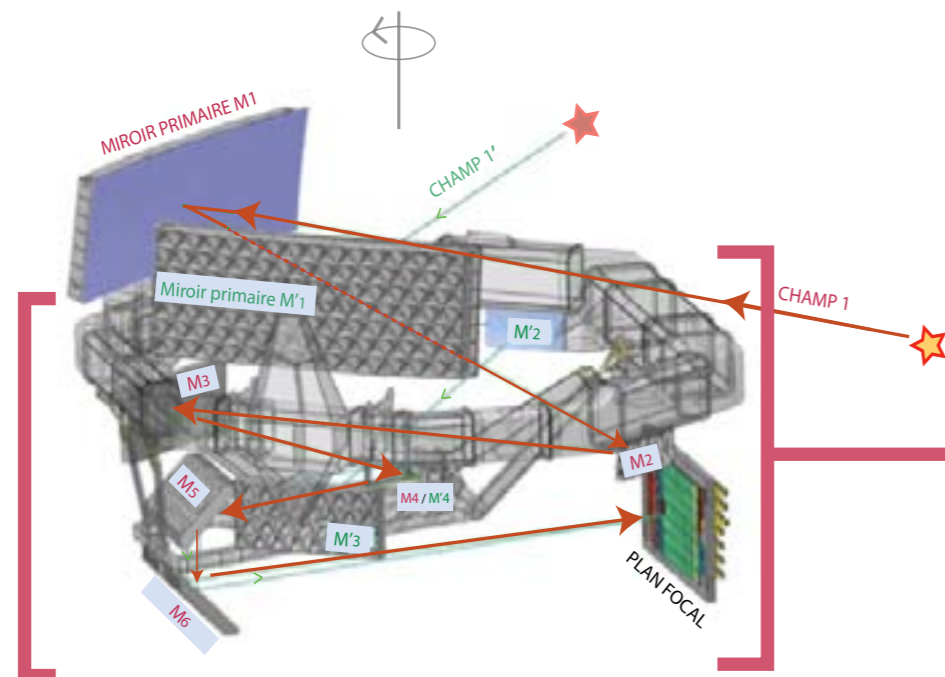
La partie scientifique du satellite Gaia est composée de **deux télescopes formés de plusieurs miroirs** (longueur focale totale : 35 m) et de **trois instruments** équipés d'un ensemble impressionnant de capteurs ultra-performants.



Deux télescopes pour trois instruments

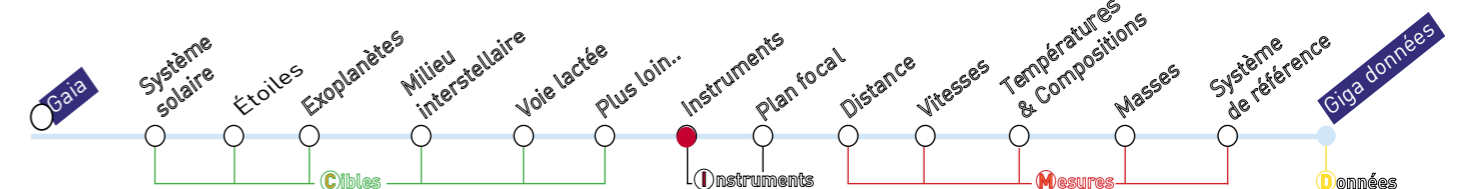
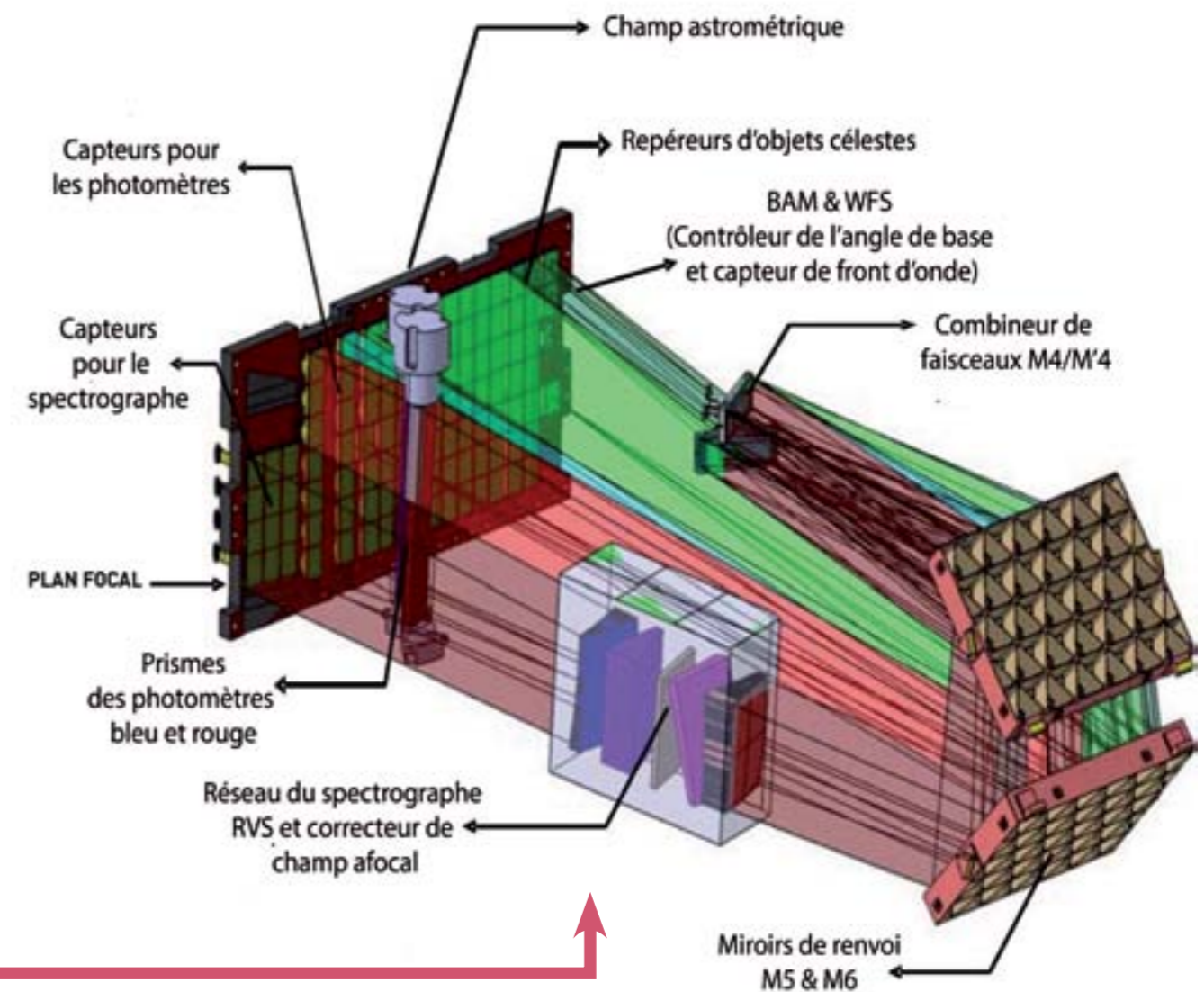
Comment mesurer les distances, mouvements et couleurs d'1 milliard d'objets ?

Les trois instruments



Les trois instruments bénéficient de l'ensemble des miroirs des télescopes et se partagent le même plan focal et ses CCDs, là où est collectée la lumière des astres :

- l'instrument astrométrique. Les positions des étoiles, astéroïdes et quasars y sont mesurées avec une extrême précision. Ce sont ces mesures qui permettent de calculer très précisément les distances et les mouvements sur le ciel de tous les objets observés ;
- le spectro-photomètre avec ses deux prismes, BP (bleu) et RP (rouge). Les mesures du spectro-photomètre permettent de décrire l'état physique des objets observés ;
- le spectrographe (RVS = Radial Velocity Spectrometer), avec son ensemble de lentilles et son réseau qui disperse la lumière. Le RVS mesure les vitesses de rapprochement ou d'éloignement des astres (vitesses radiales) et, pour les objets les plus brillants, la composition chimique de leurs atmosphères.



Le plan focal de Gaia est le plan sur lequel convergent les rayons lumineux provenant des astres. Il est constitué d'une très grande mosaïque de capteurs CCD. Ces CCDs, bien que plus sophistiqués, sont assez similaires à ceux que l'on trouve dans les appareils photos numériques. Mais Gaia, avec ses **106 CCDs**, contient près d'**un milliard de pixels** (1 gigapixel), bien plus que les quelques millions que l'on trouve couramment sur un appareil numérique.

Le plan focal de Gaia où est collectée la lumière des astres

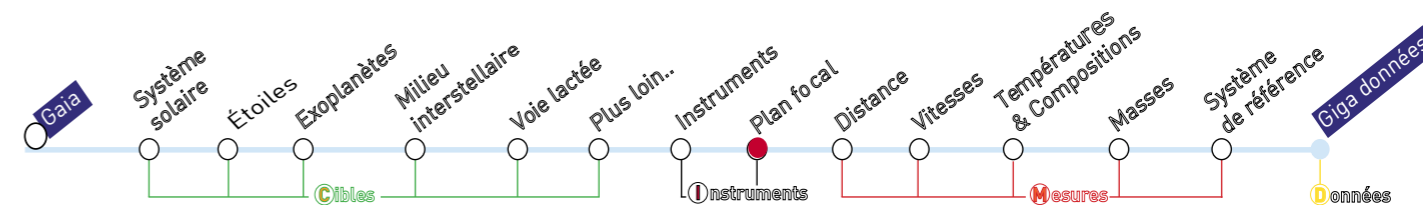
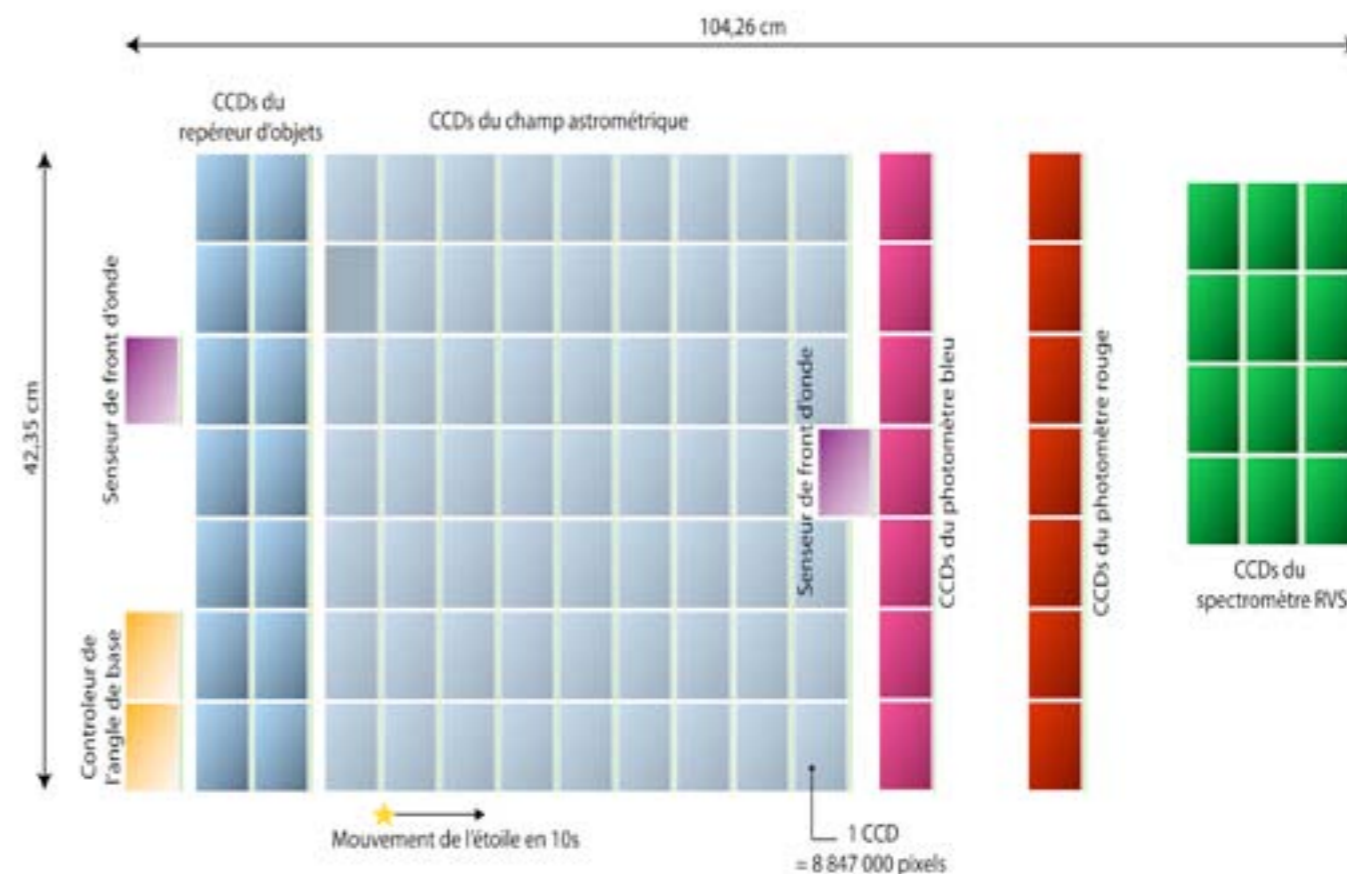
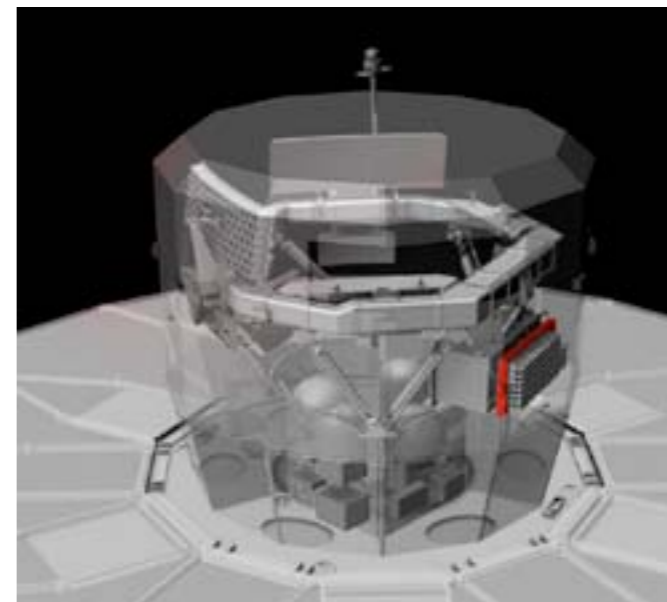
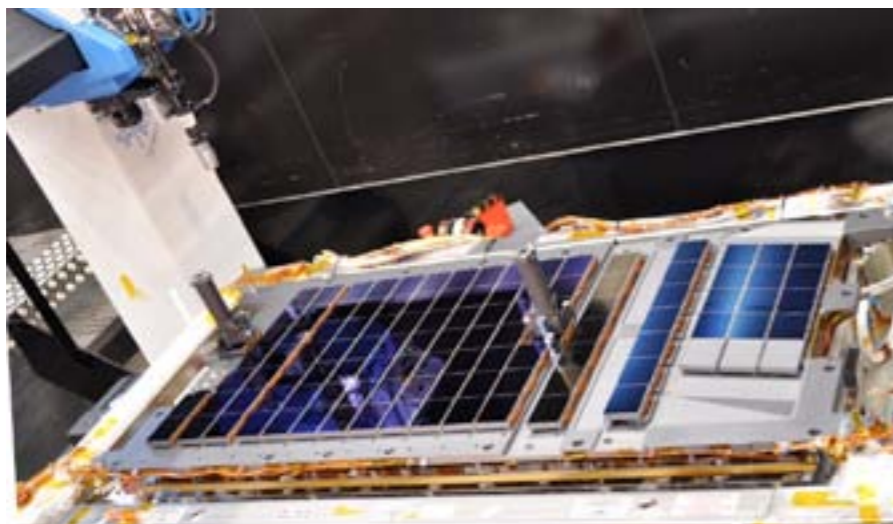
106 CCDs pour 938 millions de pixels



Chaque zone du plan focal a un rôle particulier :

- **détecter les objets** à observer pour les deux colonnes de gauche ;
- **mesurer leurs positions** très précisément pour la grande partie centrale (les 9 colonnes en bleu) ;
- **mesurer leurs couleurs** pour les deux colonnes mauve et rouge (spectrophotomètres bleu et rouge) ;
- **mesurer leurs vitesses radiales** (vitesses de rapprochement ou d'éloignement) et, pour les objets les plus brillants, **la composition chimique de leurs atmosphères**, pour le pavé vert sur la droite (spectrographe = Radial Velocity Spectrometer, RVS).

Les étoiles traversent le plan focal de la gauche vers la droite à cause du mouvement de rotation du satellite sur lui-même.



Dis-moi quelle est ta distance et je te dirai qui tu es !

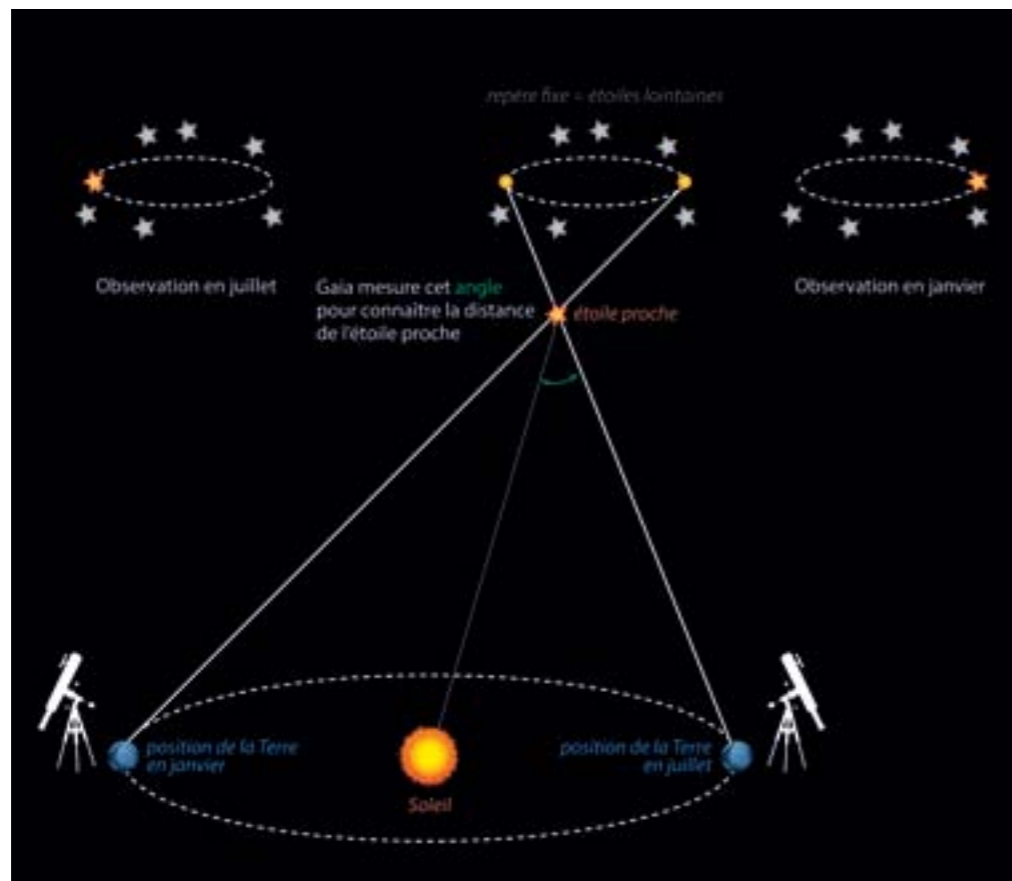
En observant le ciel étoilé, les étoiles semblent se déplacer sur une **toile fictive** : on est incapable d'en distinguer l'immense profondeur. Leur luminosité apparente est toute relative puisqu'elle dépend à la fois de leur éclat intrinsèque et de leur distance. Pour déterminer **les luminosités absolues et les mouvements en 3D des étoiles**, il faut mesurer très précisément leurs distances, domaine d'excellence de Gaia. Alors, on sait tout ou presque sur l'étoile : où elle se trouve dans la Galaxie, sa vitesse, sa masse, sa classification... et on peut en déduire son âge, où elle s'est formée, quelle est sa durée de vie et peut-être même où elle ira s'éteindre.

Mesurer la distance des étoiles

La distance des étoiles : un nombre... astronomique !

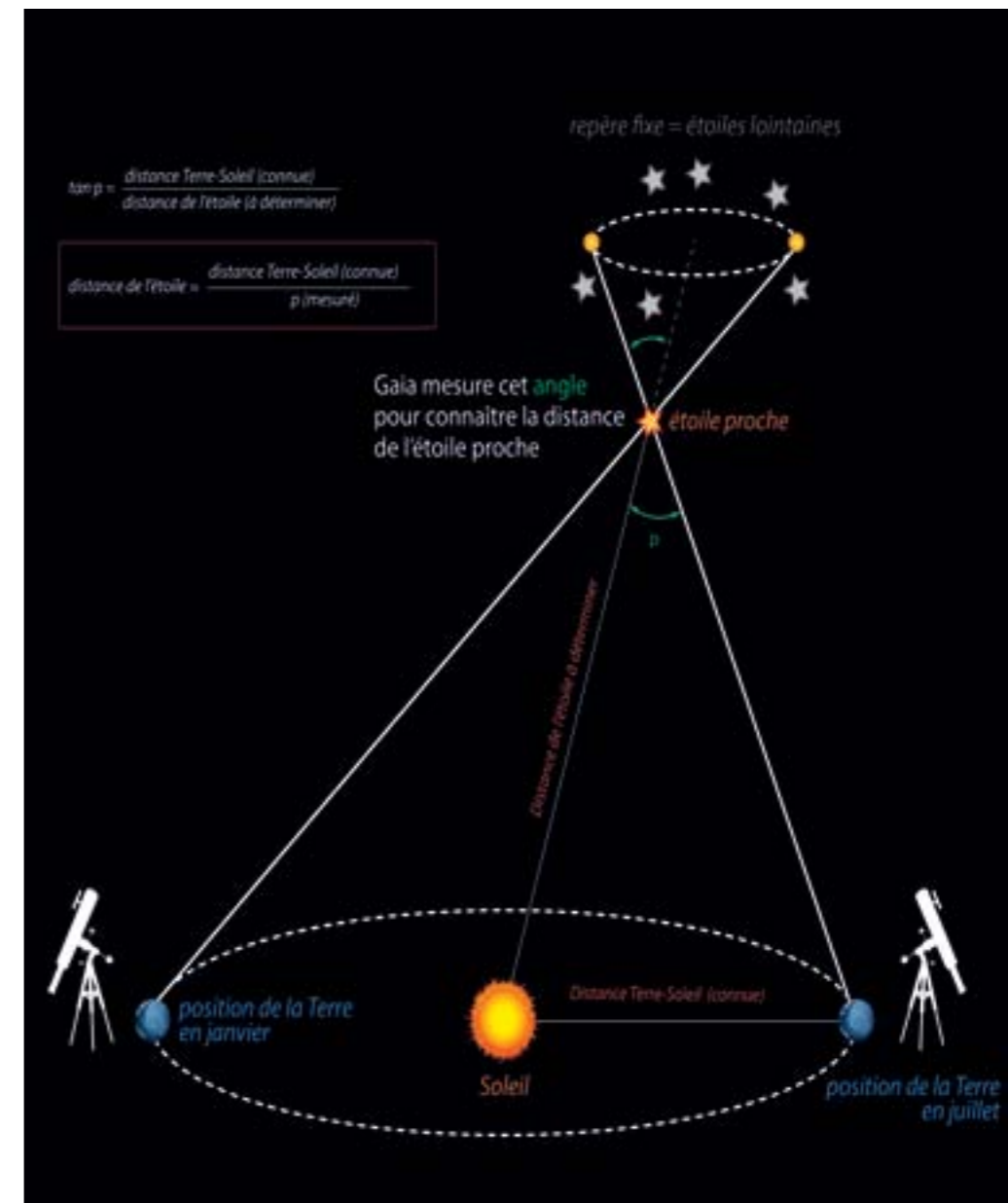
Mesurer les distances des astres avec Gaia

Dans son grand tour annuel autour du Soleil, la Terre nous emporte, modifiant légèrement notre **angle** de vue du ciel : si l'on prend pour repère des **étoiles lointaines** quasi immobiles, une **étoile proche**, observée à quelques mois d'intervalle, semble s'être déplacée

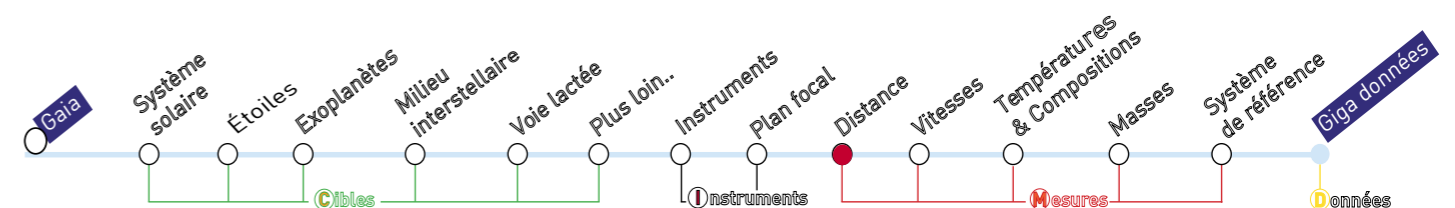


Ce déplacement apparent de l'**étoile** dans le ciel est mesuré par l'instrument astrométrique de Gaia. Il correspond à un **angle** appelé **parallaxe trigonométrique**. Plus l'étoile est lointaine plus l'angle est petit. La précision de Gaia donne accès à des distances précises jusqu'à plus de 30 000 années-lumière pour les étoiles les plus brillantes.

Par une simple relation de trigonométrie, on peut alors déterminer notre distance à l'étoile.



Gaia, programmée pour suivre le même mouvement que la Terre autour du Soleil, fait ces mesures d'angle avec une précision telle **qu'il pourrait mesurer ... celui sous lequel on verrait une fleur de marguerite sur la Lune.**



Des déplacements rapides, mais infimes sur la voûte céleste.

Dans le Système solaire, planètes, astéroïdes et comètes tournent (orbitent) autour du Soleil. De même, au sein de notre galaxie la Voie lactée, **les étoiles tournent autour du centre galactique**. Ainsi, le Soleil effectue un tour de la Galaxie en 230 millions d'années à une vitesse d'environ 220 km/s sur son orbite. Ce mouvement que l'on connaît pour notre étoile, Gaia le détermine **en 3D** pour des centaines de millions d'autres, ainsi que pour des centaines de milliers d'astéroïdes.



Le ciel en mouvement

Excès de vitesse dans la Galaxie ?



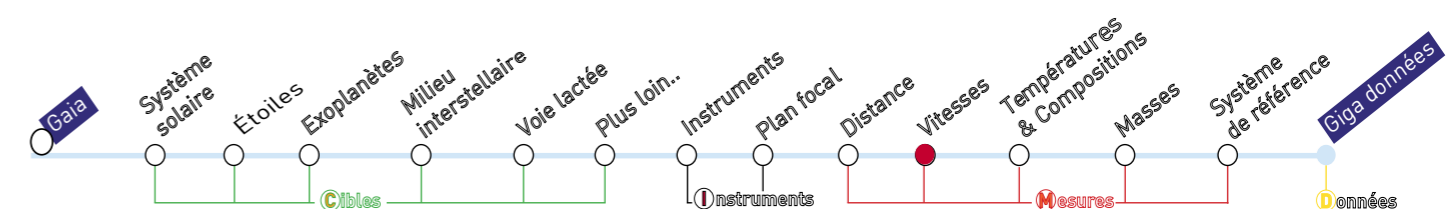
Mesurer les vitesses des astres en 3D : le principe

Pour calculer la vitesse d'une étoile en 3D, les astronomes procèdent en **deux temps** :

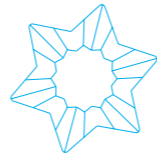
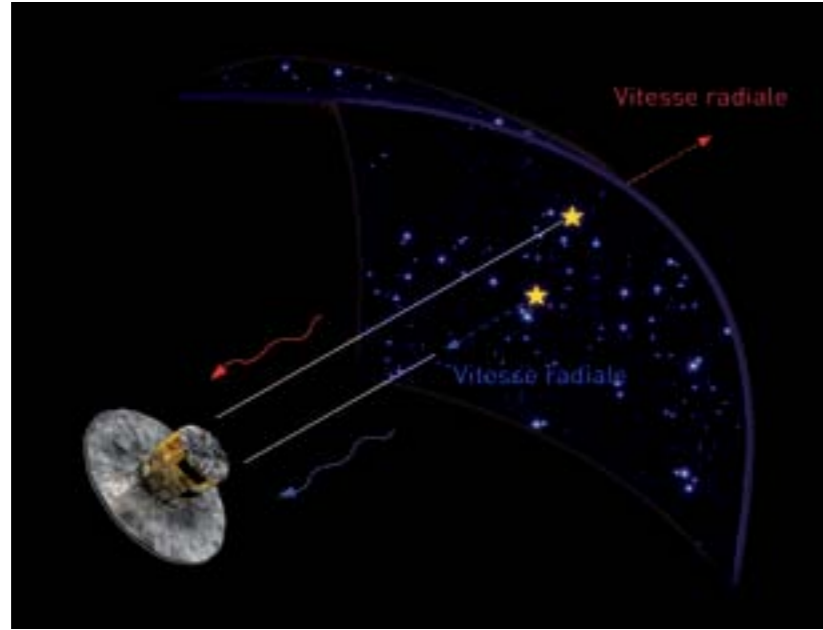
- Ils déterminent la **vitesse de l'étoile sur la voûte céleste**. Ils mesurent pour cela le déplacement de l'étoile sur le ciel (c'est un angle) dans un laps de temps donné. Pour convertir ces vitesses angulaires en kilomètres par seconde (et oui les étoiles vont très vite !), il faut connaître la distance de l'étoile très précisément. Et, justement, la mesure des distances est l'apport le plus important de Gaia.



- Ils déterminent indépendamment **la vitesse à laquelle l'étoile se rapproche ou s'éloigne de nous** (la vitesse «radiale» de l'étoile). Mais comment faire puisque ce mouvement ne change pas la position observée de l'astre dans le ciel ? Heureusement, quand une étoile se rapproche, sa lumière est observée sur Terre légèrement plus bleue qu'elle n'a été émise ; si elle s'éloigne, sa lumière est observée légèrement plus rouge : c'est l'**effet Doppler-Fizeau**. C'est grâce à lui que Gaia mesure les vitesses radiales des objets du ciel.



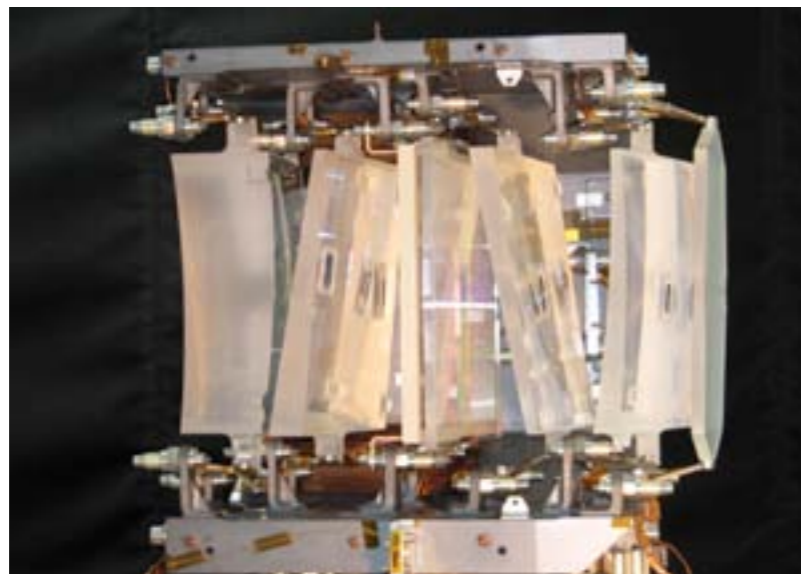
Une petite addition (vectorielle) des deux vitesses et on obtient alors la vitesse de l'étoile dans le ciel en 3D !



Mesurer les vitesses radiales avec Gaia

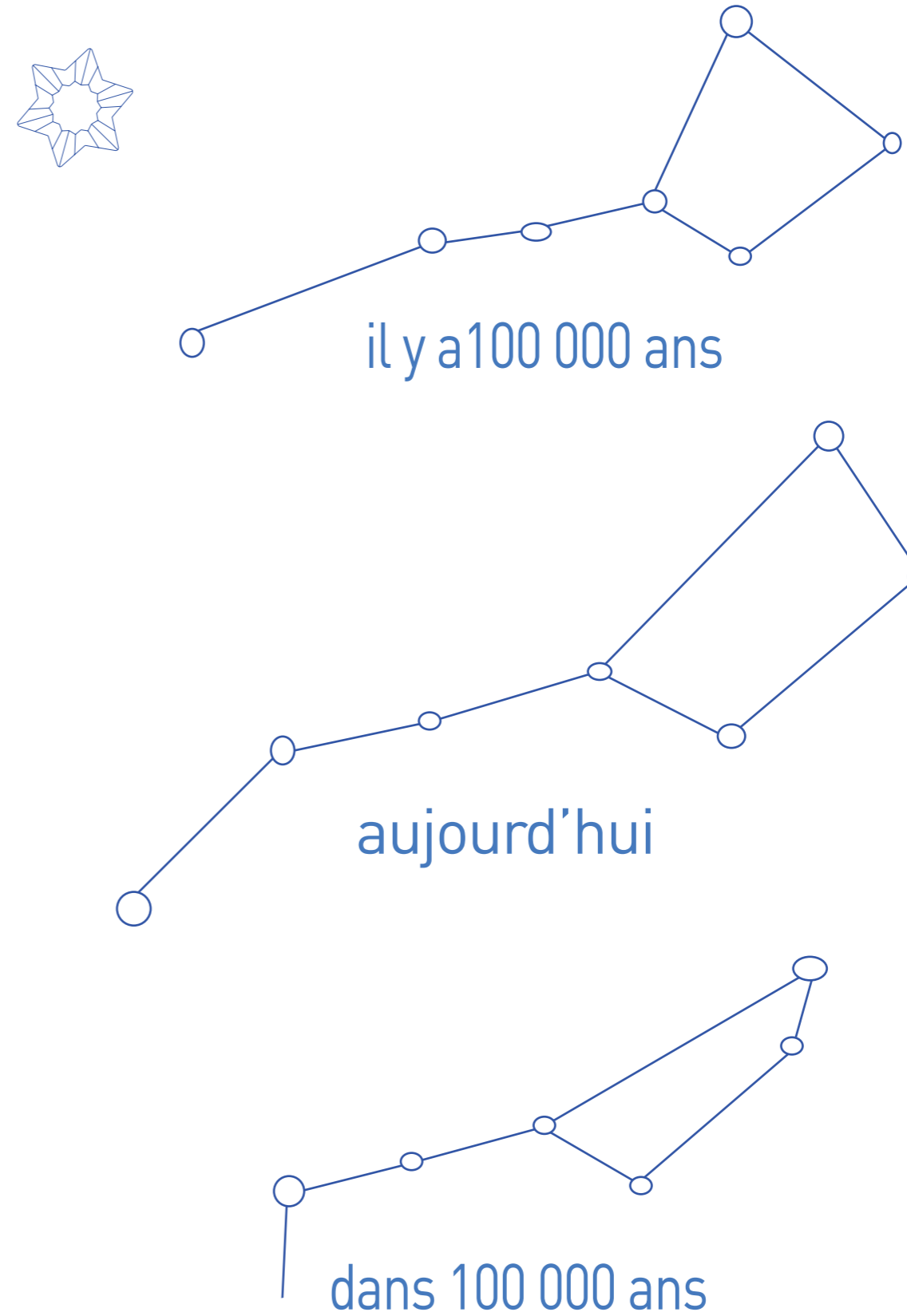
Pour les mesures de vitesses radiales grâce à l'effet Doppler-Fizeau, Gaia emporte un instrument spécifique : un **spectrographe** nommé Radial Velocity Spectrometer (RVS).

Le principe d'un spectrographe est de séparer les rayons lumineux reçus d'un astre en fonction de leurs couleurs (longueurs d'ondes). En comparant les observations du RVS à des modèles théoriques, il est possible de déterminer si la lumière observée est légèrement plus bleue ou plus rouge que celle qui a été émise par l'astre et donc d'en déduire sa vitesse de rapprochement ou d'éloignement.



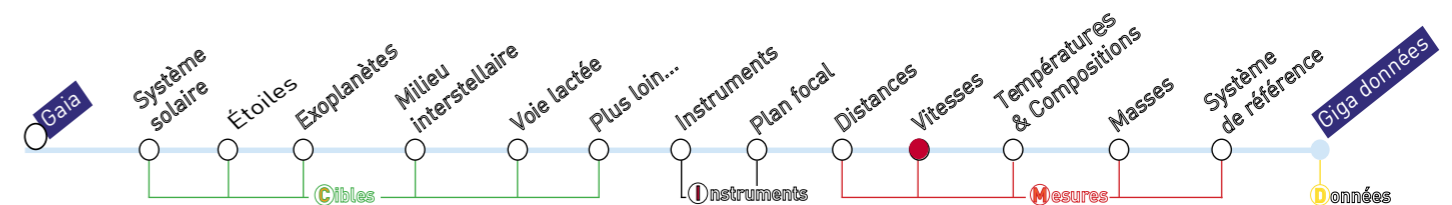
Le spectrographe Radial Velocity Spectrometer

Cet instrument permet, entre autres, de mesurer les vitesses radiales, vitesses de rapprochement ou d'éloignement des astres.



Évolution de la constellation de la Grande Ourse au cours du temps

Les étoiles se déplacent très lentement sur la voûte céleste, mais 5 ans suffiront à Gaia pour mesurer ces déplacements infimes.



Un thermomètre pour les étoiles. L'observation du ciel nocturne révèle des étoiles de couleurs variées. Antarès dans la constellation du Scorpion est une étoile rouge. Rigel dans la constellation d'Orion est une étoile bleue et notre Soleil est actuellement une étoile jaune. En premier lieu, ces couleurs nous informent sur la **température des étoiles**. De manière plus discrète, sur la **composition chimique** de leur atmosphère.

Des étoiles de toutes les couleurs

La lumière, messagère des étoiles

Que d'informations dans la couleur d'une étoile !

La température d'une étoile définit sa couleur intrinsèque. Des étoiles chaudes et bleues aux étoiles froides et rouges, c'est en mesurant finement la couleur des étoiles que **Gaia** **détermine leurs températures** avec une précision de l'ordre d'une centaine de degrés.



Si la température est la caractéristique qui influe le plus sur la couleur des étoiles, ce n'est pas la seule. L'atmosphère d'une étoile est constituée essentiellement d'hydrogène, d'un peu d'hélium et de traces de nombreux autres éléments chimiques, comme l'oxygène, le carbone, l'azote, le fer... Chaque élément chimique se signale **en absorbant ou en émettant** des rayons lumineux à des couleurs très précises. On appelle ces déficits ou ces excès de lumière, des raies stellaires.

À bord de Gaia

Que ce soit pour déterminer la température ou la composition chimique des étoiles, il faut pouvoir séparer et compter le nombre de grains de lumière (photons) reçus par intervalle de couleur (longueur d'onde).

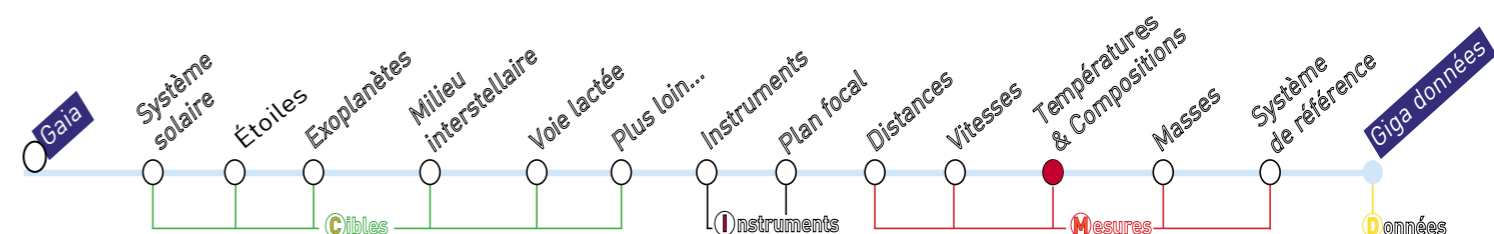
Pour ce faire, Gaia emporte deux instruments.

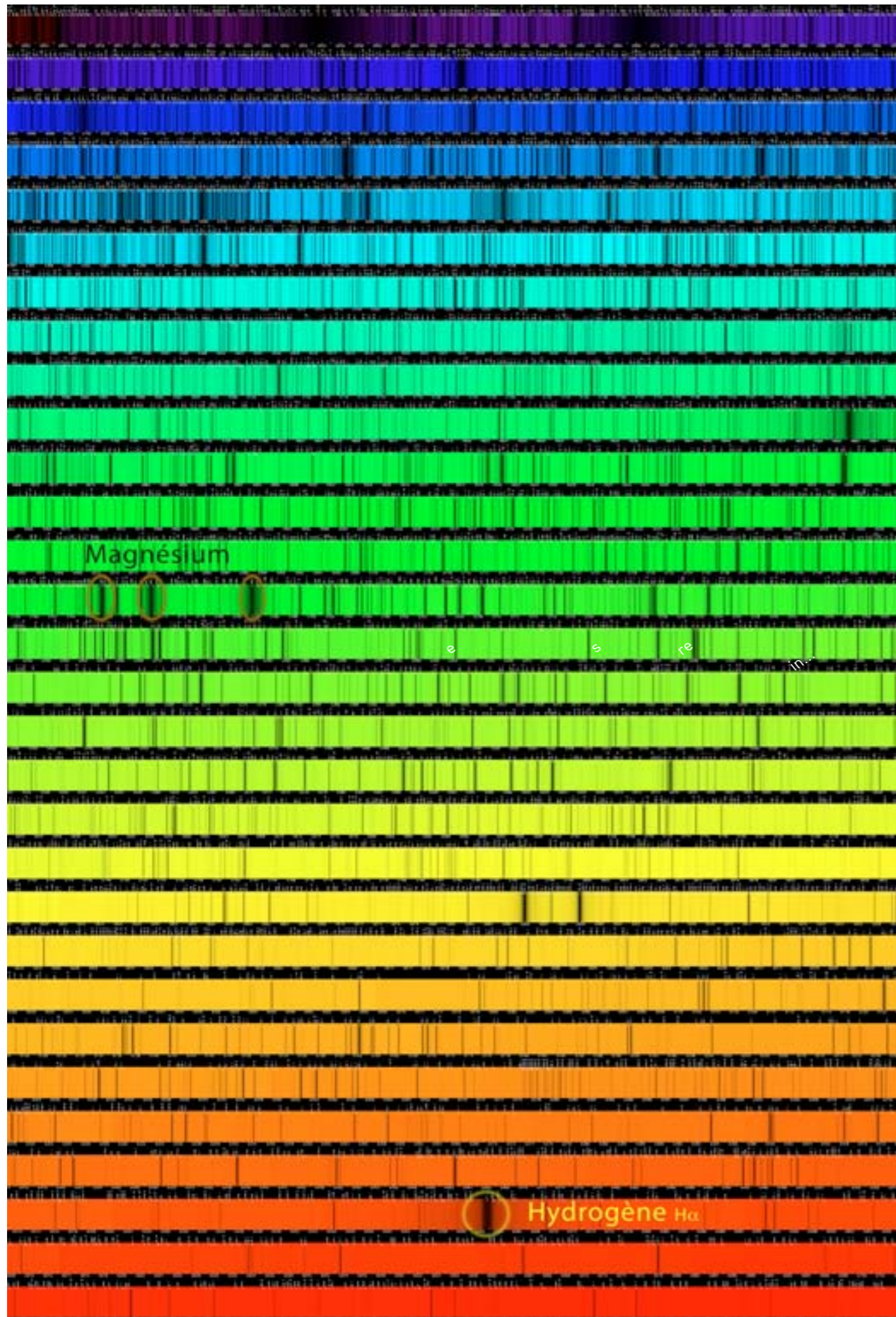
Le spectro-photomètre permet de déterminer la température et la composition chimique moyenne.

Le spectrographe Radial Velocity Spectrometer (RVS) en «zoomant» sur un petit domaine de longueurs d'onde dans le proche infrarouge (847 à 874 nm), révèle des raies stellaires dans plusieurs millions d'étoiles (les plus brillantes). Il apporte ainsi des mesures d'abondances d'éléments chimiques, tels que le magnésium, le silicium ou le fer.



L'amas d'étoiles NGC 2547 composé de jeunes étoiles bleues, entouré d'étoiles plus proches de différentes couleurs.

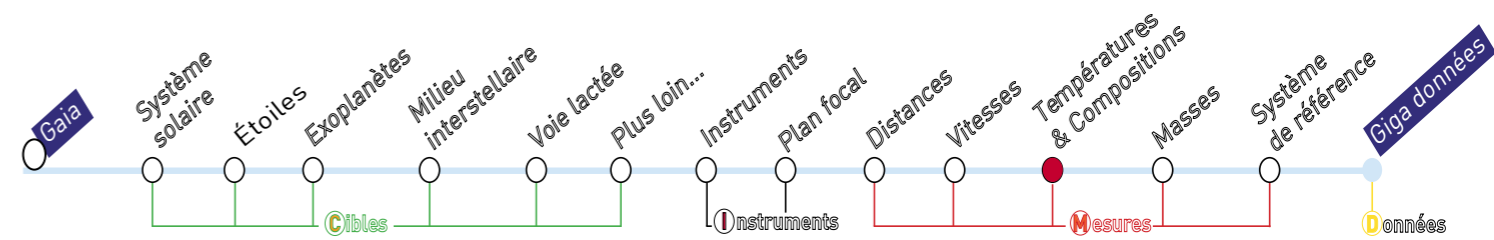




Spectre du Soleil

On peut, à l'aide d'un prisme ou d'un réseau, séparer les rayons lumineux reçus d'une étoile en fonction de leurs couleurs et ainsi obtenir un spectre (ici, celui du Soleil).
 À quoi correspondent ces traits sombres ? La lumière issue de notre étoile traverse son atmosphère avant de nous parvenir. Or, dans l'atmosphère de l'étoile, les éléments chimiques présents absorbent une partie de la lumière à des couleurs très précises (longueurs d'onde). Cela produit dans le spectre de très nombreux traits sombres appelés raies stellaires.

Ces raies sont donc la signature des éléments chimiques de l'atmosphère de l'étoile.



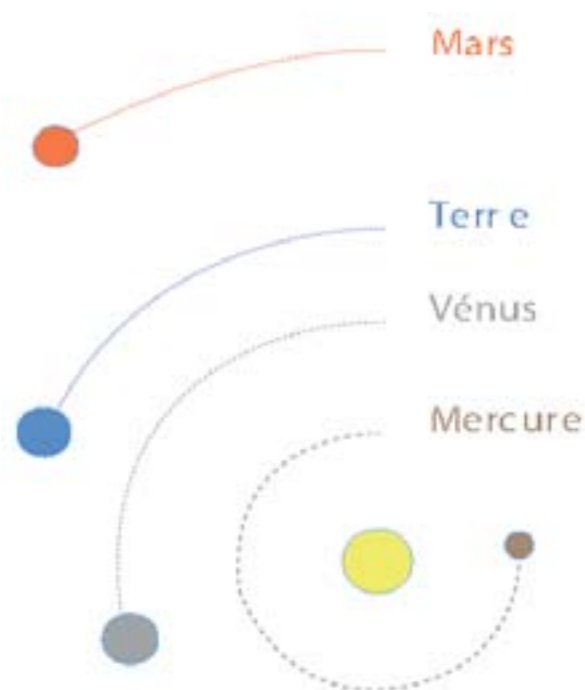
Pas de deux dans la Galaxie. Connaître la **masse des corps célestes** est essentiel pour comprendre leur constitution, la manière dont ils ont été formés et leur évolution possible : la durée de vie d'une étoile par exemple dépend de sa masse. Comment procéder ? Grâce à la loi universelle de la gravitation, il est possible de «peser» des corps célestes s'ils sont en interaction avec un compagnon. Cela s'applique aussi bien aux étoiles, qu'aux exoplanètes, satellites, astéroïdes...



La masse, un paramètre fondamental

Peser les astres : le principe

Une pomme (légendaire) qui tombe sur la tête de Newton, la Lune qui «tourne» autour de la Terre, des exoplanètes autour de leur étoile, des astéroïdes qui orbitent l'un autour de l'autre (dits «binaires») ou des étoiles binaires, voilà des manifestations de la loi de la gravitation. Si l'on sait comment peser ces astres binaires, c'est d'abord grâce à Johannes Kepler (1571-1630), qui a étudié les orbites des planètes autour du Soleil. Il a trouvé une relation très pratique (il s'agit de la troisième loi de Kepler) entre la période de l'orbite, la distance entre les corps célestes et leurs masses : si l'on mesure les deux premiers, on peut alors peser ces objets !



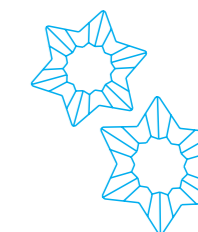
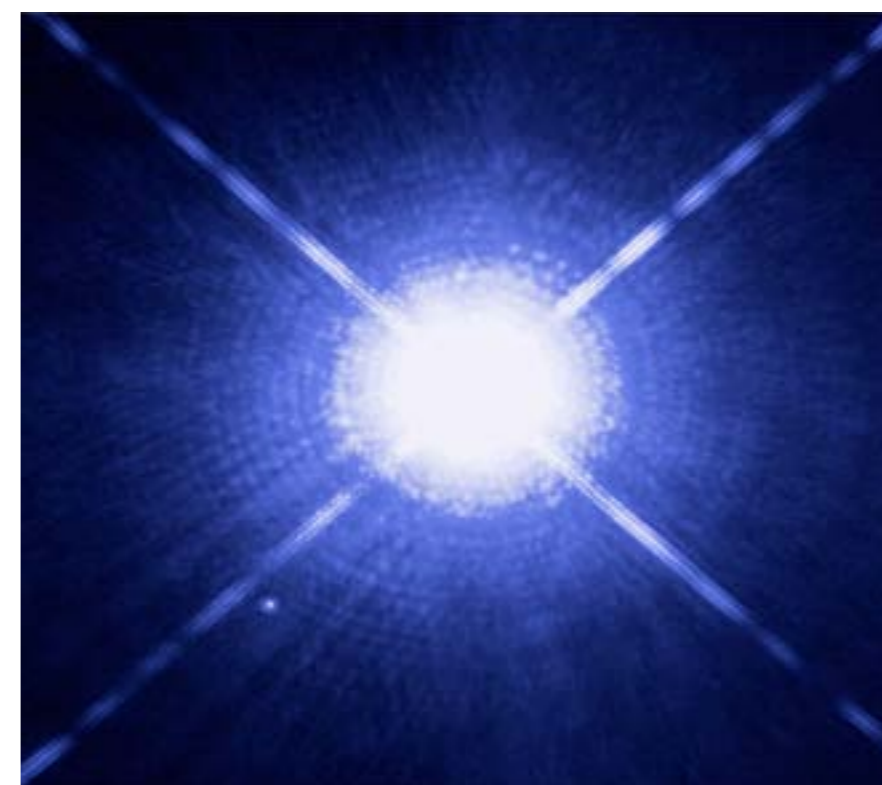
La troisième loi de Kepler : la période de révolution d'un corps autour de l'autre est d'autant plus rapide que les corps sont proches ; Mercure a presque fini sa révolution autour du Soleil quand Mars n'en a fait qu'une petite partie.

Pour les forts en maths :
 $a^3/P^2 = G(M_1 + M_2)/4\pi^2$ où a est la distance séparant les deux corps, P la période, M_i la masse du corps i , et G la constante universelle de gravitation. Si, par ailleurs, le rapport des distances au centre de gravité (égal au rapport des masses) est connu, chacune des masses peut être obtenue.



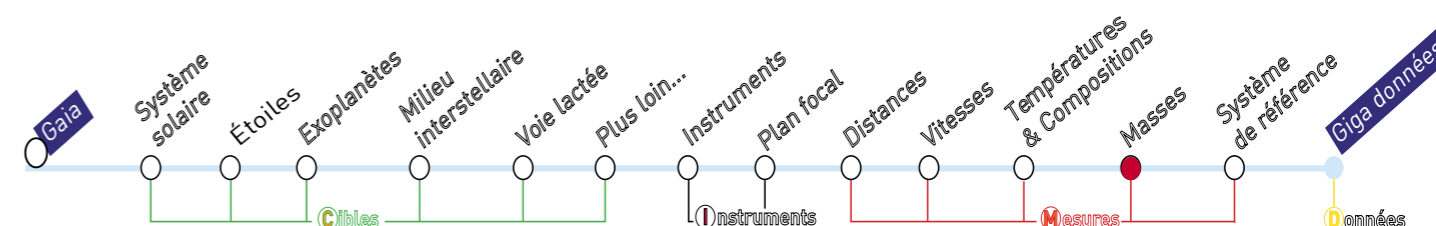
Gaia et la mesure des masses

Gaia mesure très précisément les orbites de nombreux corps. On s'attend ainsi à calculer la masse de centaines de milliers d'étoiles binaires et de milliers de nouvelles exoplanètes tournant autour de leur étoile. Du côté du Système solaire, plus d'une centaine d'astéroïdes vont être pesés soit qu'ils soient en couple (stable), soit qu'ils fassent une rencontre éphémère qui perturbe leurs orbites. On va également peser des «ménages à trois», mais ils sont plus rares, car moins stables.



Sirius et son compagnon (le petit point en bas à gauche)

Le mouvement sinueux de Sirius sur le ciel permit en 1844 à Friedrich Bessel de détecter son très faible compagnon, bien avant que l'on puisse l'observer directement. Gaia procèdera de la même manière mais sera capable de détecter des perturbations des milliers de fois plus petites (par exemple des exoplanètes) !



Une vision du ciel en 4 dimensions . Observer un milliard d'objets ne suffit pas à se positionner soi-même et, en conséquence, à repérer tous les objets les uns par rapport aux autres. Pour cela, Gaia doit dater exactement ses observations. Ainsi, en embarquant à bord une **horloge atomique**, le satellite est non seulement un géomètre mais également un chronomètre perfectionné, bases de l'exploration de l'**espace-temps d'Einstein** et de la construction de tout **repère** fondamental.

Gaia, chronomètre et géomètre de la Galaxie

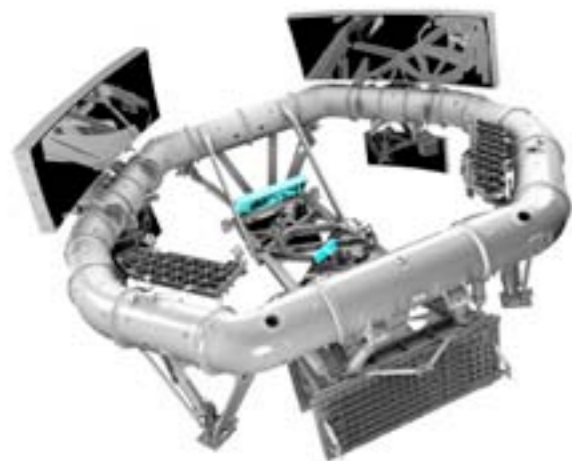
Un catalogue avec de bonnes références d'espace et de temps



Un système de référence astrométrique

Orienter la Terre dans l'espace, suivre une sonde, observer le détail du mouvement d'un astéroïde ? L'astronome a toujours besoin de se rapporter à un **repère de référence**, une grille absolue matérialisée par des objets célestes en arrière-plan.

Cette grille absolue est réalisée par quelques centaines de quasars, ces objets extra-galactiques très lointains, observés régulièrement par les radiotélescopes. Mais peu de chance pour l'astronome d'avoir un de ces quasars dans son champ d'observation... il doit donc utiliser d'autres repères pour s'y rapporter. Ceux-ci doivent être **denses, dans toutes les directions du ciel, précis et stables** : c'est justement ce qu'apporte Gaia, avec son milliard d'objets catalogués avec une précision unique. Ce repère de référence de l'avenir servira même à ré-analyser les plaques photographiques du passé, avec la précision de Gaia.



Partie scientifique du satellite avec ses 2 miroirs principaux réceptionnant la lumière des astres

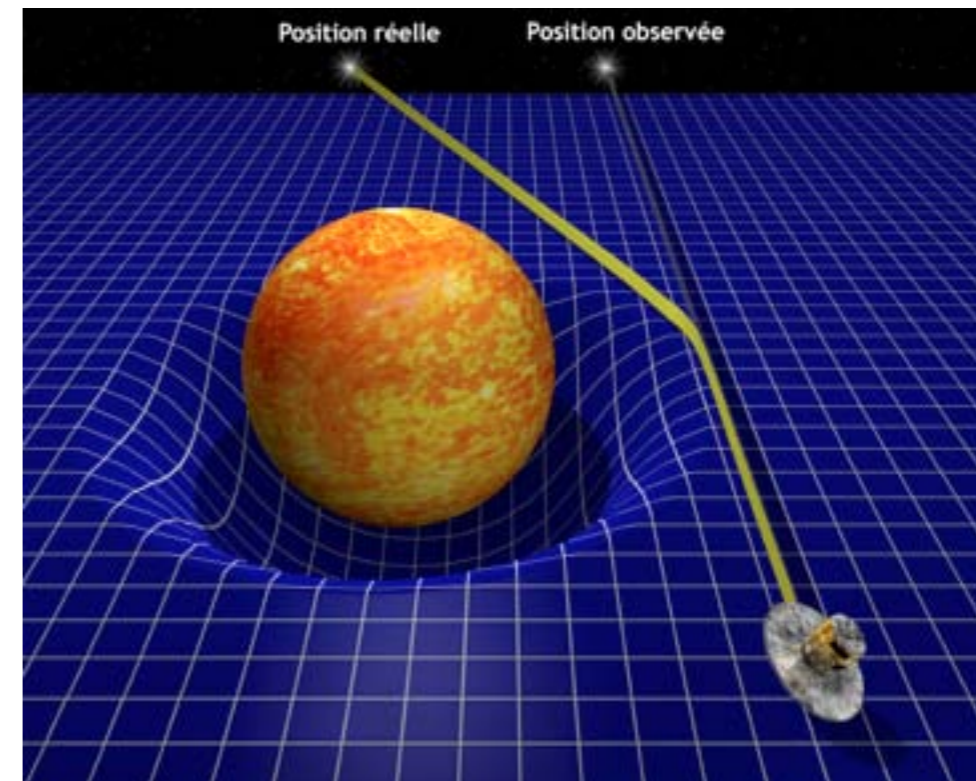
Gaia observe simultanément deux champs distincts du ciel. Par ailleurs, il tourne en quelques heures sur lui-même, ceci pour obtenir une couverture globale et complète du ciel, base de la construction du futur repère de référence.



Un laboratoire de tests de la relativité générale

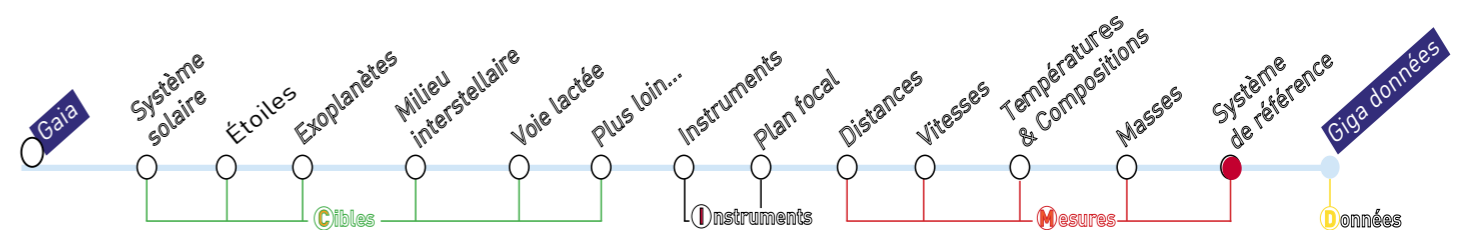
Newton imagina la gravitation comme une force attractive entre les masses. Einstein abandonne cette idée au profit d'un **espace-temps dynamique**, courbé par la présence de masses. Dès lors, le mouvement des corps célestes et de la lumière suit cette courbure. Ainsi la Terre n'est pas véritablement attirée par le Soleil mais va «au plus court».

Les mesures de Gaia sont si précises qu'elles permettent de détecter ces petits effets de courbure aussi bien sur la dynamique des objets du Système solaire que sur la direction apparente des étoiles. Avec ses dizaines de milliards d'observations, **Gaia réalise l'un des meilleurs tests** de la relativité générale.



Le ciel en trompe l'œil

À cause de la présence de masses sur son trajet, la lumière ne se propage pas en ligne droite : les étoiles jouent à cache-cache avec l'œil de Gaia !



Comment s'organiser pour traiter toutes ces données ? Depuis 2006, plus de **450 scientifiques et développeurs** ont créé un Consortium, le DPAC (Data Processing and Analysis Consortium), financé par 25 agences, pour traiter les données de Gaia. Le DPAC est essentiellement européen et la France en est le principal contributeur en termes de personnes impliquées. Plusieurs **millions de lignes de programmes informatiques** ont été écrites et ce n'est pas fini ! Le traitement des données est effectué dans 6 grands centres en Europe, dont l'agence spatiale française - le CNES - à Toulouse.



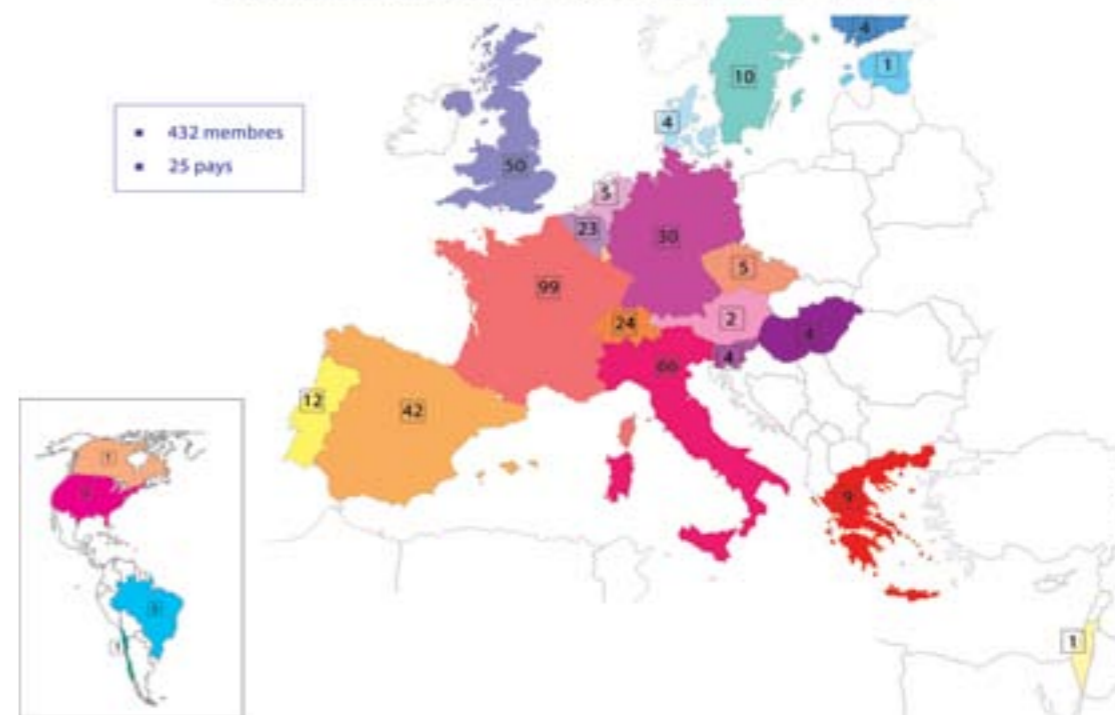
Sous les pixels, le ciel !

Des millions de lignes de code pour 1 000 000 000 000 000 octets de données

Un gigapixel pour un giga Catalogue !

Gaia fait une sorte de « photo numérique » du ciel au cours du temps. En partant du simple contenu de ces pixels, les scientifiques estiment de nombreux paramètres pour chaque étoile : position, vitesse, données physiques, etc. « Estiment » seulement, car plus les objets sont faibles plus les résultats sont imprécis. Quand le traitement des données de la mission nominale (les 5 premières années) sera terminé, vers 2022, le Catalogue Gaia sera mis gratuitement à la disposition des scientifiques du monde entier. Des Catalogues intermédiaires ont cependant été prévus: le premier, Gaia DR1, a été publié le 14 septembre 2016; le seconde, Gaia DR2, est attendu pour le 25 avril 2018; un troisième est prévu pour la fin 2020.

Consortium international d'analyse des données de Gaia (DPAC)



Qui veut gagner des milliards ?

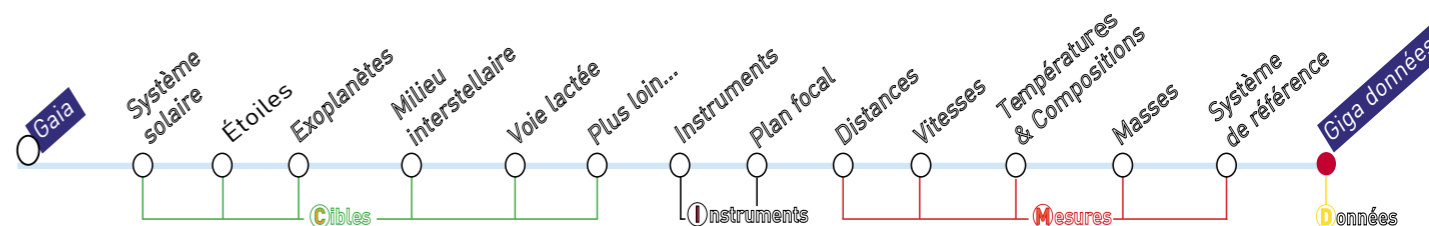
Les données à stocker sont complexes et nombreuses, sans doute plus de 1 000 000 000 000 octets de données au total !

- **700 milliards** d'observations astrométriques (positions) ;
- **150 milliards** d'observations photométriques (luminosités, couleurs) ;
- **15 milliards** d'observations spectroscopiques (énergie en fonction de la longueur d'onde).



10010001100
11100111001
01100011101
00011100001
01101010.....

Mais, ce qui est complexe, ce n'est pas tant le volume de données à traiter que les dizaines de milliards d'inconnues à calculer ! Il est en effet indispensable de déterminer le mouvement du satellite lui-même et de calibrer les instruments si l'on veut espérer trouver les paramètres des étoiles.



Le ciel en profondeur



La mission Gaia

GAIA est la sixième mission phare du programme scientifique de l'**Agence spatiale européenne** (ESA) qui en assure la maîtrise d'ouvrage et endosse la responsabilité du centre de contrôle et de mission. La France est fortement impliquée dans cette mission. Tout d'abord, la maîtrise d'œuvre industrielle est sous la responsabilité de **Astrium** (Toulouse). Le traitement des données scientifiques est confié à la communauté scientifique : les laboratoires, observatoires, universités et agences européennes regroupés au sein d'un consortium, le Gaia DPAC, dont la France représente environ le quart des forces. Enfin, le **Centre national d'études spatiales - CNES** s'est fortement engagé dans le DPAC pour l'architecture globale du système et comme centre de traitement.

Gaia et l'Observatoire de Paris

L'Observatoire de Paris a contribué à Gaia depuis les toutes premières études de justification scientifique jusqu'aux algorithmes de détection à bord et la définition de l'instrument

spectroscopique. Plusieurs de ses Départements scientifiques (GEPI, IMCCE, SYRTE, LERMA) participent très activement au DPAC, avec la responsabilité de deux des tâches principales :

simulation de la mission et traitement des données spectroscopiques, et avec des contributions

majeures à plusieurs autres : traitement des objets du système solaire, suivi sol du satellite,

relativité et systèmes de référence, traitement des étoiles multiples, modèles d'atmosphères

Partenaires de l'exposition

L'exposition *Le ciel en profondeur*, GAIA a reçu le soutien du **Conseil Scientifique de l'Observatoire de Paris**, et de ses Départements scientifiques : **Galaxies, Étoiles, Physique et Instrumentation - GEPI** (Observatoire de Paris, CNRS, Université Paris Diderot), **Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides - IMCCE** (Observatoire de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Université Lille 1), **Systèmes de Référence Temps Espace - SYRTE** (Observatoire de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie).

Cette exposition a été déclinée en une version itinérante avec le soutien de l'**Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS** ainsi que de son Action Spécifique Gaia.

Commissaires scientifiques

Catherine Turon, astronome émérite, GEPI

(Observatoire de Paris, CNRS, Université Paris Diderot)

Frédéric Arenou, ingénieur de recherche CNRS, GEPI

(Observatoire de Paris, CNRS, Université Paris Diderot)

David Katz, astronome-adjoint, GEPI

(Observatoire de Paris, CNRS, Université Paris Diderot)

Daniel Hestroffer, astronome, IMCCE

(Observatoire de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Université Lille 1)

Christophe Le Poncin-Lafite, astronome-adjoint, SYRTE

(Observatoire de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie)

Coordination, recherches iconographiques

Sabrina Thiéry, Direction de la communication, Observatoire de Paris

Remerciements

Yann Brunel, professeur au lycée Henry IV

Anne Corbex, professeur des écoles

Nicolas Rambaux, maître de conférence, UPMC, IMCCE

Noël Robichon, maître de conférence, Observatoire de Paris

William Thuillot, astronome, IMCCE

Communication

Frédérique Auffret, Direction de la communication, Observatoire de Paris

Vidéos

Louis Chabaud, Direction de la communication, Observatoire de Paris

Sabrina Thiéry, Direction de la communication, Observatoire de Paris

Scénographie

Agence BC-BG

Bruno Contensou, Scénographe

Bernard Giry, Producteur

Savannah Lemonnier, Graphiste

Crédits images

Déploiement du bouclier de Gaia : ©ESA, image by C.Carreau
Mesure de distances de l'amas des Hyades : ©M.A.C. Perryman
Satellite Gaia : ©EADS Astrium
Ordres de grandeur : C.Turon, Observatoire de Paris

Système solaire

Effet Yarkovsky : ©Savannah Lemonnier
Astéroïde Lutetia : ©ESA 2011 MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

Étoiles

Tailles relatives, vue d'artiste : ©ESO/M. Kornmesser
Diagramme HR : ©Richard Powell

Exoplanètes

Mouvement d'une étoile accompagnée par un objet sous-stellaire : ©ESA, M.A.C. Perryman
Mouvement du Soleil autour du barycentre du Système solaire : ©R.L. McNish, Calgary Centre of the RASC.

Milieu interstellaire

Région centrale de la Galaxie : ©ESO/S. Brunier/S. Guisard
Nébuleuse de la Carène : ©NASA, ESA, M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team (STScI)

La Voie lactée

Illustrations Yohann Gominet, IMCCE, Observatoire de Paris
Conception : L. Lindegren, C. Turon
Fond schéma Voie lactée : ©Lund Observatory
M83 : ©ESO

Plus loin...

Nuages de Magellan : ©ESO
Échelles de distance : adapté de F. Mignard et Rowan-Robinson par F. Arenou, C.Turon, S.Thiéry

Instruments

Charge utile : ©Astrium
Instruments : ©Astrium, 2010

Plan focal

Illustration plan focal : ©Alexander Short – ESA traduction Frédéric Arenou – Observatoire de Paris
Image plan focal : ©Astrium, 2011
Gaia en transparence : ©ESA/AOES Medialab

Illustrations : Yohann Gominet, IMCCE & Michel Magnan, Observatoire de Paris

Vitesses

Spectrographe Radial Velocity Spectrometer – RVS : ©EADS Astrium
Illustrations : Savannah Lemonnier

Températures et compositions

Amas d'étoiles NGC 2547 : ©ESO/Digitized Sky Survey 2
Remerciements : Davide De Martin
Spectre du Soleil : ©Jean-Marie Malherbe, Observatoire de Paris – LESIA
Couleur des étoiles : illustration Michel Magnan, Observatoire de Paris

Masses

Sirius et son compagnon : ©NASA, H.E. Bond and E. Nelan (Space Telescope Science Institute), M. Barstow and M. Burleigh (University of Leicester, U.K.) et J.B. Holberg (University of Arizona)
Schéma 3ème loi de Kepler : ©Savannah Lemonnier

Système de référence

Charge utile de Gaia : ©ESA
Déformation de l'espace-temps : ©Dave Jarvis

Giga données

Fond de carte du DPAC ©Daniel Dalet
Illustration Juliette Perdreau, Direction de la communication, Observatoire de Paris
Schéma octets : Frédéric Arenou, Observatoire de Paris

Image en fond de panneau : Amas des Pléiades : ©NASA, ESA, AURA/Caltech