

FRANCIS BERNARDEAU (85)*directeur de l'Institut d'astrophysique de Paris***CATHERINE DOUGADOS (84)***directrice de recherche CNRS, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble***ANNE-MARIE LAGRANGE (82)***directrice de recherche CNRS, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, membre de l'Académie des sciences*

NOUVEAUX HORIZONS EN ASTROPHYSIQUE

LES AVANCÉES DE L'ASTROPHYSIQUE couvrent des domaines allant de l'Univers lointain, aux galaxies, aux étoiles, aux planètes du système solaire ou aux planètes extrasolaires, aux petits corps du système solaire et au milieu interstellaire.

L'APPORT ESSENTIEL DES TÉLESCOPES SPATIAUX

Les télescopes spatiaux, comme *Hubble* (NASA/ESA), *XMM-Newton* (ESA), *Planck* (ESA), *Herschel* (ESA), *Spitzer* (NASA) ont permis des observations dans des domaines de longueurs d'onde inaccessibles depuis le sol: X, UV, infrarouge. Ces instruments sondent entre autres l'Univers très lointain, l'Univers froid (milieu interstellaire), les étoiles très froides, etc. D'autres télescopes spatiaux effectuent des mesures bien plus précises que l'atmosphère ne le permet depuis le sol: *GAIA* (ESA) mesure en ce moment la position de milliards d'étoiles avec une précision de quelques microsecondes d'angle; grâce à la précision photométrique des satellites *Corot* (Cnes) et *Kepler* (NASA), on

« Mesurer la position de milliards d'étoiles avec une précision de quelques microsecondes d'angle »

a pu détecter des centaines de planètes extrasolaires, dont certaines très peu massives. Les missions vers les planètes et comètes du système solaire ont permis de sonder *in situ* le sol de Titan (*Cassini-Huygens*), de Mars (*Mars Express*, *ExoMars*), de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (*Rosetta*, ESA).

LES GRANDS TÉLESCOPES AU SOL NE SONT PAS EN RESTE

Les très grands télescopes optiques au sol (10 m de diamètre) se sont équipés d'instruments aux performances qui dépassent de plusieurs ordres de grandeur celles des générations précédentes. L'utilisation de l'optique adaptative extrême combinée à des coronographes

Science reposant beaucoup sur l'observation et la modélisation, l'astrophysique a connu d'énormes avancées ces dernières années, parfois même de véritables révolutions, essentiellement dues aux progrès techniques instrumentaux ou informatiques. Ces avancées ouvrent la voie à de nouvelles interrogations sur la structure de notre Univers, voire sur l'origine de la Vie.

REPÈRES

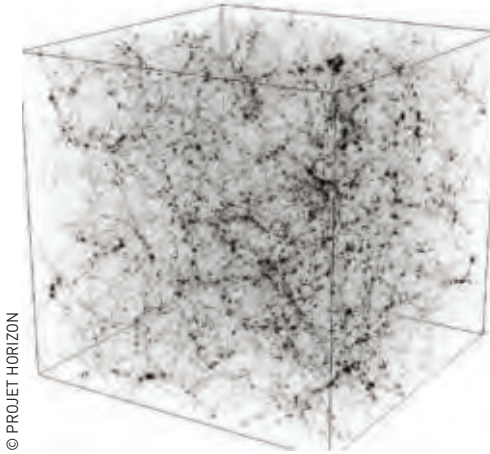
L'astrophysique doit largement son récent développement aux progrès de l'informatique: les nombreuses données collectées ne peuvent être analysées que grâce au formidable développement des moyens de calcul. Ces moyens accrus permettent aussi de réaliser les simulations numériques très lourdes indispensables pour tester des scénarios proposés sur la base des observations. Là encore, tous les domaines de l'astrophysique sont concernés: évolution de l'Univers, formation des grandes structures, effondrement des nuages moléculaires, formation des étoiles et des planètes, évolution stellaire, etc.

(voir plus loin) de nouvelle génération permet désormais de faire l'image de planètes extrasolaires. Des spectrographes 3D de nouvelle génération combinant imagerie grand champ et spectroscopie sondent l'espace en trois dimensions (image dans le plan du ciel et distance) simultanément. La combinaison cohérente de la lumière de plusieurs télescopes optiques (interférométrie optique, ESO) nous donne des images de la surface de certaines étoiles. L'interféromètre radio (sub)millimétrique ALMA (ESO, NSF, Japon, Canada) composé de 66 antennes réparties sur 16 km dans le désert d'Atacama nous permet d'observer le ciel « froid » (nuages interstellaires, disques protoplanétaires, galaxies lointaines, univers jeunes) avec une résolution angulaire inégalée à ces longueurs d'onde.

COSMOLOGIE ET GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS

La question de la structuration de l'Univers commence quand, dans les années 1920, les astronomes identifient les « nébuleuses » comme autant d'îlots d'étoiles extérieurs à notre Voie lactée. Très vite, ces astronomes et, pour nommer le plus fameux d'entre eux, Edwin Hubble, mesurent les spectres de ces « galaxies » et se rendent compte qu'elles ont tendance à s'éloigner de nous. C'est une révolution dans notre conception de l'Univers: il n'est plus un champ d'étoiles immuable et statique, mais un fluide grumeleux en évolution dynamique. C'est à Georges Lemaître qu'on doit la mise en équation de cette expansion de l'Univers et d'avoir posé les premiers jalons d'un domaine de recherche qui nous occupe encore aujourd'hui: comment passer d'un Univers quasi homogène à un Univers présentant de grands contrastes de densité, ceux que l'on rencontre dans les amas de galaxies, les galaxies, les étoiles, etc.

Il s'agit en somme de réconcilier deux visions du monde; d'inscrire dans un même formalisme l'espace-temps homogène et isotrope des géomètres et celui des densités et des énergies extrêmes des astrophysiciens. La clé, le mécanisme d'instabilité gravitationnelle, s'appuie sur le jeu croisé de la



© PROJET HORIZON

Exemple de réalisation de simulation N-corps décrivant les structures de matière noire de l'Univers.

gravité et des interactions matière-rayonnement. Beaucoup d'éléments du scénario nous échappent encore, qu'ils concernent la physique fondamentale, la dynamique non-linéaire ou encore l'astrophysique des objets formés.

À LA RECHERCHE DU SCÉNARIO DES ORIGINES

Les investigations visant à explorer les propriétés des grandes structures de l'Univers s'inscrivent donc dans un vaste projet scientifique qui vise à établir le scénario de formation et d'évolution de ces structures, la manière dont la matière se répartit aux plus grandes échelles de l'Univers en galaxies, amas de galaxies, filaments, grands murs, etc.

Les éléments du modèle actuel se sont mis en place à partir des années 1980, avec l'identification du mécanisme d'instabilité gravitationnelle comme moteur de la formation des grandes structures et la construction théorique des modèles dits

d'inflation. Cette première idée a été validée à la fois par le développement des grands relevés cosmologiques (on pourra mentionner SDSS, BOSS) et le développement des simulations numériques. Une belle illustration en est l'observation de signatures du couplage gravitationnel dans un fluide de poussière autogravitant ou encore l'observation des oscillations dites acoustiques dans les fluctuations de densité dans les grands relevés cosmologiques.

De plus, les résultats récents obtenus avec le satellite *Planck* démontrent maintenant que les fluctuations de métrique vues sur la surface de dernière diffusion (c'est-à-dire la région où a été émis le rayonnement le plus ancien de l'Univers qui nous parvient aujourd'hui), à un moment où l'Univers était très jeune,

sont bien les précurseurs des grandes structures de l'Univers local.

Ces mesures offrent un autre résultat fascinant: ces fluctuations de métrique n'ont pas

pu être obtenues par un mécanisme causal. La seule explication aujourd'hui possible invoque un mécanisme dit d'inflation. Cela reste cependant plus un simple paradigme qu'une théorie et notre connaissance de cette époque primordiale est encore très parcellaire.

DE LA MATIÈRE NOIRE ET DE L'ÉNERGIE NOIRE

Le programme scientifique entrepris à la fin des années 1960 n'est donc pas achevé. Outre l'identification du mécanisme à l'origine de la phase inflationnaire, deux ingrédients indispensables au modèle, la « matière noire » et l'« énergie noire » –

« *L'Univers: un fluide grumeleux en évolution dynamique* »

LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

La découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson en 1965 a conduit à un projet scientifique de recherche et de caractérisation des anisotropies de température de ce fond micro-onde pour tester les modèles cosmologiques, qui se poursuit aujourd'hui tant du point de vue théorique qu'observationnel avec l'analyse des résultats du satellite *Planck* (voir figure p. 33).

responsable de l'accélération tardive de l'expansion de l'Univers – n'ont pas été identifiés dans le modèle standard de physique des hautes énergies.

Le problème posé par l'existence d'une énergie noire est plus critique et suggère des modifications plus radicales du modèle : une nouvelle forme de la matière ? Une modification de la gravité ? Essayer d'en savoir davantage est l'enjeu de nombreux développements visant à utiliser les grandes structures de l'Univers comme laboratoire. C'est le volet le plus important du programme scientifique du satellite *Euclid* dont le lancement est prévu en 2020. Nous pourrions alors peut-être comprendre la phase d'inflation primordiale pendant laquelle sont nées les fluctuations de métrique. Le mécanisme proposé, et le seul aujourd'hui corroboré par les observations, met en œuvre la théorie quantique des champs et la relativité générale dans un régime inédit : l'ensemble des grandes structures de l'Univers serait né des fluctuations quantiques d'un champ scalaire primordial. La portée de cette idée est véritablement révolutionnaire et, si elle devait être confirmée par les observations futures, bouleverserait notre conception du monde physique.

DISQUES ET FORMATION DES PLANÈTES

Comprendre le processus de formation des étoiles et de leur cortège planétaire constitue l'un des grands enjeux de l'astrophysique. Une étoile telle que notre Soleil se forme par contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz interstellaire froid et dense. Lors de cet effondrement, par conservation du moment angulaire initial, une partie de la matière forme un disque en rotation képlérienne autour d'une condensation centrale, la protoétoile en formation. Dans ce disque, dit protoplanétaire, des grains de poussières microscopiques vont progressivement se coaguler pour former des planétésimaux (corps solides de taille kilo-

métrique, constituant les briques de base de la formation des planètes telluriques et des noyaux solides des planètes géantes) et éventuellement des cœurs planétaires.

Ces cœurs planétaires, lorsqu'ils sont assez massifs, peuvent attirer suffisamment de gaz pour former une planète géante. Bien que ce scénario ait été proposé dès la fin du XVIII^e siècle, entre

autres par Pierre-Simon de Laplace, pour la formation de notre propre système solaire, les différentes étapes de ce processus sont encore largement incomprises.

L'observation directe des disques protoplanétaires est cruciale pour progresser sur ces questions. Toutefois, ce n'est pas chose aisée. La raison en est leur très petite taille angulaire sur le ciel : typiquement moins

d'une seconde d'arc (= 1/3600 deg.) à la distance des régions les plus proches de formation d'étoiles.

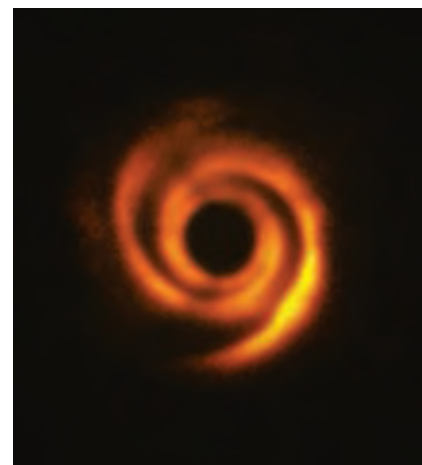
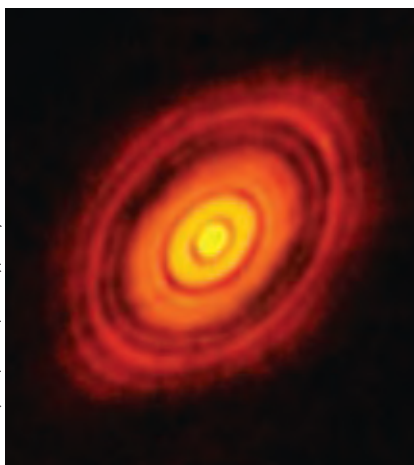
À LA CHASSE AUX PROTOPLANÈTES

Même avec le télescope spatial, les images obtenues restaient floues et ne fournissaient pas beaucoup de détails. Il a fallu attendre encore près de deux décennies pour lever enfin le voile sur les détails de la formation planétaire dans ces disques. Deux instruments sont en train de révolutionner ce domaine de recherche : le grand interféromètre millimétrique international ALMA et dans le domaine optique/infrarouge proche la caméra chasseuse de planètes SPHERE du Very Large Telescope (VLT), tous deux situés au nord du Chili dans le désert d'Atacama à l'observatoire de l'European Southern Observatory (ESO).

« Notre connaissance de l'Univers primordial est encore très parcellaire »

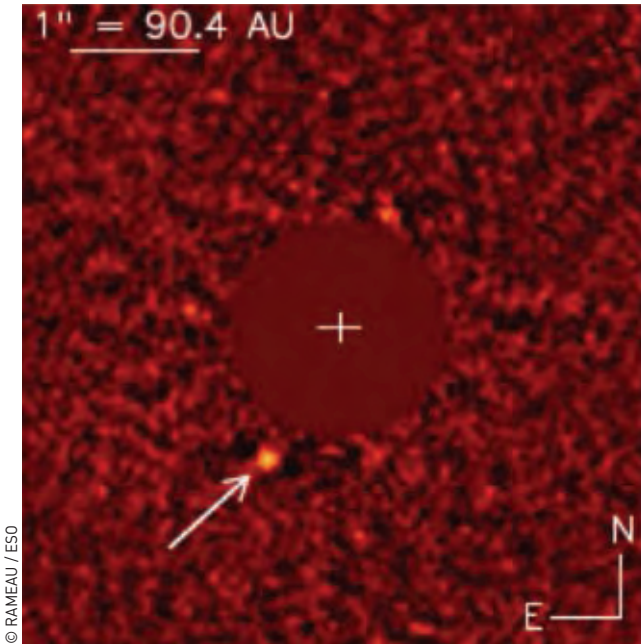
MATIÈRE NOIRE

On connaît déjà l'existence de matière noire sous forme de neutrinos – mais en nombre insuffisant pour rendre compte des observations – et la détection de nouvelles particules de matière noire est peut-être imminente, que ce soit par détection directe, indirecte ou auprès des accélérateurs de particules comme le LHC.



© ALMA (ESO / NAOJ / NRAO) / ESO, T. STOLKER ET AL.

Image de gauche : image à 1,3 mm obtenue avec l'interféromètre ALMA du disque autour de l'étoile HL Tauri située à environ 450 années-lumière dans la constellation du Taureau. La résolution de cette image est de 5 fois la distance Terre-Soleil (= 5 unités astronomiques ou ua). La taille du disque de HL Tau est de 3 fois la distance Neptune-Soleil. Image de droite : image obtenue avec SPHERE/VLT dans l'infrarouge proche du disque autour de l'étoile HD 135344B. La lumière de l'étoile centrale a été supprimée. Deux bras spiraux sont clairement détectés. L'extension radiale du disque est environ de 100 ua soit 3 fois la distance Neptune-Soleil.



© RAMEAU / ESO

Image d'une planète extrasolaire, HD 95098 b, obtenue dans le proche infrarouge, avec l'instrument NAOS sur le Very Large Telescope de l'ESO. La planète indiquée par une flèche fait environ 5 fois la masse de Jupiter et orbite à 60 unités astronomiques de son étoile. L'étoile située au centre de l'image (marqué d'une croix) est cachée.

UNE IMAGE DE LA FORMATION DE NOTRE SYSTÈME SOLAIRE ?

L'image spectaculaire du disque autour de l'étoile jeune HL Tauri (cf. p. 37, gauche) obtenue avec l'interféromètre ALMA en 2014 a dévoilé pour la première fois à quoi pouvait ressembler notre propre système solaire il y a plus de 4 milliards d'années, lors de sa formation. Cette image trace l'émission thermique des grains de poussière de taille millimétrique et révèle une série d'anneaux concentriques brillants séparés

« Une formation planétaire d'à peine 1 million d'années »

modèles actuels, pour former des planètes massives. Des systèmes d'anneaux et de sillons similaires ont maintenant été détectés dans une demi-douzaine de disques.

Les images SPHERE et ALMA ont également révélé une variété inattendue de structures, parmi lesquelles des bras spiraux et asymétries, qui sont aussi très probablement le résultat de la formation de corps planétaires. L'image obtenue par l'instrument SPHERE (cf. p. 37, droite) du disque autour de l'étoile HD 135344B dévoile la structure de ce disque avec une finesse de détails jamais atteinte jusque-là. Le disque de cette étoile montre une cavité centrale et deux bras spiraux qui peuvent s'expliquer par la présence d'une ou plusieurs protoplanètes massives, futures planètes géantes semblables à Jupiter.

Les observations spectaculaires issues des instruments SPHERE et ALMA commencent à nous révéler la manière dont les planètes sculptent les disques

dans lesquels elles se forment. La détection directe de ces planètes en formation va constituer un enjeu important pour les années à venir.

LES PLANÈTES EXTRASOLAIRES : AUTRES MONDES ?

La découverte dans les années 1990 des premières planètes en orbite autour d'étoiles autres que le Soleil, les planètes extrasolaires, a suscité un profond intérêt dans la communauté scientifique et bien au-delà. L'existence d'autres « Mondes » avait été certes envisagée, imaginée depuis plusieurs siècles, mais ces planètes extrasolaires, ou exoplanètes, restaient hors de portée de nos moyens de détection.

Une fois prouvée l'existence de ces exoplanètes, on pouvait désormais les étudier afin d'explorer leur diversité éventuelle, de comprendre leurs mécanismes de formation et d'évolution, et l'on pouvait espérer chercher un jour des signes de vie sur certaines d'entre elles.

LES PLANÈTES DE PETITE TAILLE SERAIENT LES PLUS NOMBREUSES

Les premières planètes extrasolaires détectées étaient des planètes géantes gazeuses. Ces planètes massives et volumineuses sont en effet plus faciles à détecter que les planètes telluriques (rocheuses), bien moins massives et plus petites. Depuis, la sensibilité améliorée des instruments au sol et la mise en service de télescopes spatiaux comme *Corot* et *Kepler* ont permis de découvrir des planètes de masses de plus en plus faibles, et finalement, des planètes telluriques. Ces planètes de petite masse se révèlent bien plus fréquentes que les géantes. On estime aujourd'hui qu'environ 10 % des étoiles de type solaire abriteraient une planète géante, alors que 100 % pourraient abriter au moins une planète de type tellurique.

Les premières planètes détectées se trouvaient sur des orbites très proches de leur Soleil. 51 Pegase b, découverte en 1995, se situe à seulement 0,05 ua de son étoile, c'est-à-dire à un vingtième de la distance séparant la Terre du Soleil. Elle tourne donc en 4 jours seulement autour de son étoile,

DISQUES PROTOPLANÉTAIRES

Les premières images des disques protoplanétaires ont été obtenues à la fin des années 1990 avec le télescope spatial *Hubble* et les premières générations d'interféromètres millimétriques comme celui situé sur le plateau de Bure dans le Dévoluy.

à comparer aux 365 jours pour la Terre et 12 ans pour Jupiter autour du Soleil. 51 Pegase b est devenue le prototype d'une nouvelle classe d'exoplanètes, appelées les « Jupiters chauds » (la température de leur atmosphère excédant 1 000 degrés). Pour expliquer l'existence de tels monstres, on a proposé que ces géantes s'étaient, comme les géantes du système solaire, formées loin de leur étoile (à quelques unités astronomiques) et avaient migré vers l'étoile à la suite d'interactions avec le disque protoplanétaire dans lequel elles se sont formées.

« Des planètes sans équivalent dans notre système solaire »

D'autres observations ont révélé des classes de planètes sans équivalent dans le système solaire : des « super-Terres », planètes telluriques de masses plus grandes que la Terre, des « planètes océans ». Aussi, on a découvert des planètes évoluant sur des trajectoires inattendues : orbites inclinées par rapport à l'écliptique, orbites rétrogrades. Cela indique que les planètes, une fois formées, ont subi des interactions avec leur environnement (disque protoplanétaire, autres planètes) susceptibles de modifier grandement leur orbite.

Les techniques de détection indirectes souffrent toutefois d'une limitation importante : elles ne peuvent détecter que des planètes relativement proches de leur étoile, car les variations – périodiques – étudiées ont des périodes égales à la période de rotation de la planète. La période augmentant fortement avec la distance de la planète (loi de Kepler), il faudrait une ou plusieurs décennies pour détecter des planètes semblables à Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune.

L'imagerie des planètes permet, en théorie, d'observer des planètes éloignées de leur étoile. Mais voir une planète juste à côté de son étoile, qui est des millions ou des milliards de fois plus brillante, est particulièrement difficile. Ce n'est que depuis 2004 que des exoplanètes ont été imagées, grâce à des techniques complexes utilisant d'une part la correction en temps réel des déformations des trajectoires des rayons lumineux

se produisant lors de traversée de l'atmosphère, et d'autre part des coronographes, dispositifs optiques occultant la lumière provenant d'un objet situé sur l'axe optique du système, de manière à voir l'environnement de cet objet. Les planètes imagées directement ont, elles aussi, révélé des propriétés inattendues : elles peuvent être très

massives, jusqu'à plus de dix fois la masse de Jupiter ; elles peuvent tourner très loin de leur étoile, à plusieurs centaines ou même milliers d'unités astronomiques. Cela a conduit à envisager l'existence de méca-

nismes physiques de formation des systèmes planétaires alternatifs au mécanisme qui a donné lieu, pense-t-on, au système solaire et sans doute à la plupart des systèmes détectés par les méthodes indirectes.

Ainsi, les observations au cours de ces dernières années de recherche ont révélé une diversité que nul astronome n'aurait soupçonnée. Diversité dans les architectures des systèmes planétaires extrasolaires, dans les propriétés des exoplanètes (propriétés orbitales, atmosphériques), et dans leurs mécanismes de formation et d'évolution. Nous sommes cependant encore loin sans doute d'en avoir exploré les limites, et les décennies à venir seront certainement aussi passionnantes et riches en surprises que les précédentes. À la clé, certainement une meilleure compréhension des origines des systèmes planétaires, et peut-être des indications sur l'existence de la vie sur une ou quelques très lointaines jumelles de la Terre. ■

Retrouvez les liens sur le site Internet de *La Jaune et la Rouge* : <http://www.lajauneetlarouge.com/>

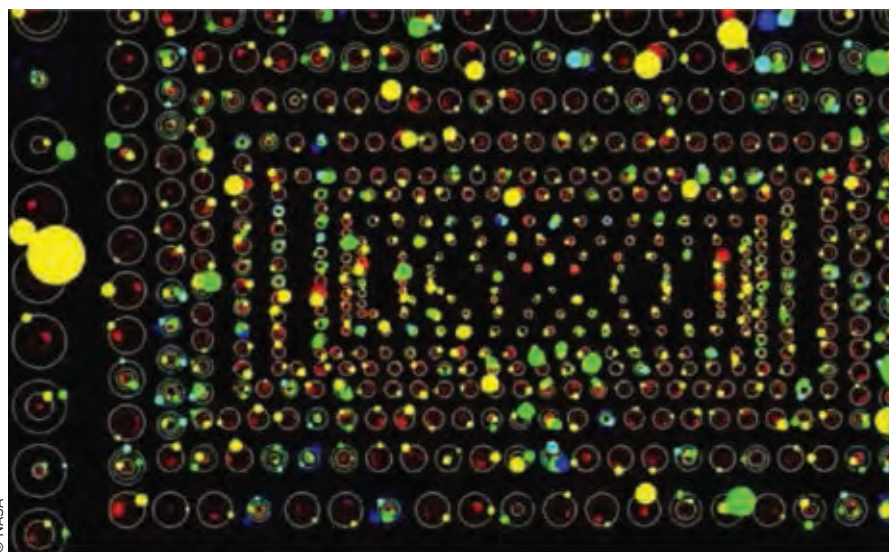


Illustration de la diversité des systèmes planétaires extrasolaires détectés par le satellite *Kepler*. Le satellite mesure la lumière en provenance de milliers d'étoiles et détecte des baisses de lumières stellaires dues à des occultations partielles par d'éventuelles planètes passant entre les étoiles et l'observateur.

DÉTECTION INDIRECTE

La plupart des 3 500 détections faites à ce jour reposent sur des méthodes indirectes, dans lesquelles l'exoplanète n'est pas vue, mais sa présence est inférée de l'étude de l'étoile autour de laquelle elle tourne. Il s'agit par exemple de l'étude des variations temporelles de la luminosité de l'étoile (phénomène d'éclipse quand la planète passe entre l'étoile et l'observateur), ou encore de l'étude des variations de la vitesse de l'étoile par rapport à un observateur terrestre.