

ARTICLE DE FOND

L'E-ELT, futur télescope géant européen, au sol,

Un nouvel outil pour caractériser les exo-planètes

Éric Pantin Professeur à l'Université Paris Diderot

Les programmes VLT (Very Large Telescope avec ses 4 télescopes de 8,2 m de diamètre) et VLTI avec son réseau interférométrique unique au monde ont été de grands succès. La communauté européenne astronomique prépare actuellement leur successeur, l'E-ELT (European Extremely Large Telescope). Ce télescope géant de 42 m de diamètre (ce qui donne la largeur d'un "petit" terrain de football !) est actuellement conçu sous la maîtrise d'œuvre de L'ESO¹. Il est composé de 906 segments de 1,45 m² pour former une surface collectrice de 1 300 m². Sa masse sera de l'ordre de 5 500 tonnes et son coût d'environ de 1 milliard d'euros.

Il est en effet impossible, contrairement au VLT, de réaliser son miroir primaire d'un seul tenant.

La fabrication d'un aussi grand miroir n'est pas réalisable sans parler de son transport. De plus, il se briserait sous son propre poids lors des mouvements du télescope.

Il sera à l'horizon 2018 le télescope optique le plus grand au monde (les projets américains GMT et TMT ne feront "que" 30 m de diamètre). Le site d'implantation (Chili, Argentine, ou Îles Canaries) ne sera déterminé qu'en 2010.

Observant depuis le proche ultraviolet jusqu'à l'infrarouge thermique (20 μm), il permettra d'observer l'Univers avec une précision jamais atteinte jusque là. En effet la taille d'un télescope influe directement sur deux critères de performance. Tout d'abord, un télescope plus grand offre une surface collectrice plus importante. Il lui est donc possible d'observer des objets plus faibles ou, à luminosité fixée, des objets plus lointains (critère de sensibilité). Deuxièmement, un diamètre plus grand de miroir primaire donne aux **instruments**

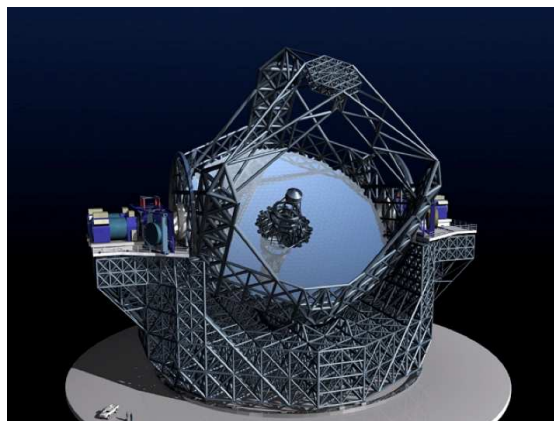


Fig.1 Dessin conceptuel de l'E-ELT. Les instruments seront installés aux foyers Nasmyth (1) situés au niveau des deux plateformes de part et d'autre du miroir primaire. L'échelle est indiquée par la voiture et les personnages situés en bas à gauche de l'image.

une **résolution angulaire** plus grande (voir article de C. Ferrari). Cette capacité est particulièrement cruciale pour être capable d'observer des objets faibles, proches d'un objet brillant (par exemple une exo-planète en orbite autour d'une étoile). L'E-ELT sera capable de distinguer, dans le domaine de l'infrarouge proche, des détails de l'ordre de 7 millisecondes d'arc, ce qui correspond à la taille angulaire d'une pièce de 1 euro vue à 500 km de distance ! Toutefois, ces performances ne peuvent être atteintes que grâce à l'usage intensif de techniques **d'optique adaptative** (voir article de C. Ferrari). L'un des challenges pour l'E-ELT réside très certainement dans le développement complexe de ce système d'optique adaptative qui requiert de nombreuses études.

En 2005, le groupe de travail ESO-OPTICON a défini les thèmes scientifiques astronomiques prioritaires avec les questions fondamentales associées qui (comme par exemple : "en quoi notre système solaire serait plutôt commun ou atypique ?") justifient la construction d'un télescope géant, sa

¹ L'ESO (European Southern Observatory) est un organisme européen regroupant 14 pays et en charge de concevoir, construire et exploiter les moyens d'observation au sol Européens.

(1) voir www2.iap.fr/vlt/public/telescope.html

taille étant définie par rapport à des objectifs bien précis. Parmi ces thèmes, on trouve l'étude de la formation des premières galaxies et la caractérisation des exo-planètes. C'est pourquoi, une majorité d'instruments est conçue autour de ces 2 thèmes.

L'instrumentation de l'E-ELT

Afin de répondre au "cahier des charges" scientifique défini par les thèmes prioritaires précédemment cités, l'E-ELT doit être doté d'un ensemble d'instruments choisis pour leurs performances, le type d'objets astronomiques qu'ils permettent d'étudier, ainsi que pour leur complémentarité. Le plan actuel de l'E-ELT comprend 8 instruments, chacun ayant ses propres spécificités. La table 1 (*fin d'article*) décrit brièvement chacun des instruments de première génération et indique le champ d'application scientifique visé. Ces objectifs scientifiques ne sont qu'indicatifs ; comme très souvent en astronomie, il est possible qu'un instrument soit finalement "détourné" pour obtenir des observations autres que celles initialement prévues ! C'est aussi ce qui fait la richesse de l'observation astronomique.

Les 8 instruments décrits en table 1 (*fin d'article*) sont en cours de phase A (stade d'étude et d'évaluation). Courant 2010, l'ESO décidera lesquels rentreront en phase B, phase lors de laquelle la conception de l'instrument est finalisée. Ces instruments sont étudiés par des consortiums regroupant plusieurs instituts européens ou bien directement par l'ESO (EPICS et CODEX par exemple) avec l'appui de certains instituts.

L'E-ELT, un outil de choix pour l'étude des exo-planètes

De par son acuité extrême, l'E-ELT est particulièrement bien adapté à l'étude des exo-planètes. Plusieurs instruments tels que EPICS, METIS, ou HARMONI en font un thème scientifique prioritaire. D'ici 2018, date prévue de la mise en service il est probable que le nombre de planètes détectées dépassera le millier (373 à la date du 12/10/09). Il faut citer à ce sujet les projets SPHERE (VLT) ou GPI (Gemini Nord) qui sont basés sur des systèmes **d'optique adaptative** extrême dédiés à la recherche et à la caractérisation partielle d'exo-planètes. Dans ce contexte, les capacités de détection de nouvelles planètes ne seront plus tellement importantes. L'important sera la capacité à caractériser les exo-planètes déjà connues. En effet, si l'on sait aujourd'hui, grâce à la **méthode des vitesses radiales**, détecter des objets de masses relativement faibles y compris les

planètes telluriques les plus massives (par exemple GL 581, cf. [1]), leurs caractéristiques (taille, densité, présence d'atmosphère, composition, vitesse de rotation etc. ...) sont encore très mal connues. Les analyses partielles qui ont été possibles dans de rares cas (HD189733b, cf. [2]) ont montré des caractéristiques se démarquant nettement de celles que nous connaissons dans le système solaire.

Deux instruments appartenant au plan d'instrumentation de l'E-ELT (table 1) ont mis l'accent sur la caractérisation des planètes extra-solaires, EPICS et METIS. Leur **conception** a été soigneusement pensée pour permettre l'observation de ces objets très faibles autour d'étoiles beaucoup plus brillantes qu'eux.

L'instrument EPICS, observant à des longueurs d'ondes entre 0,8 et 1,8 μm , devra être capable d'observer des exo-planètes qui sont 10^9 à 10^{11} fois plus faibles que leur étoile (2).

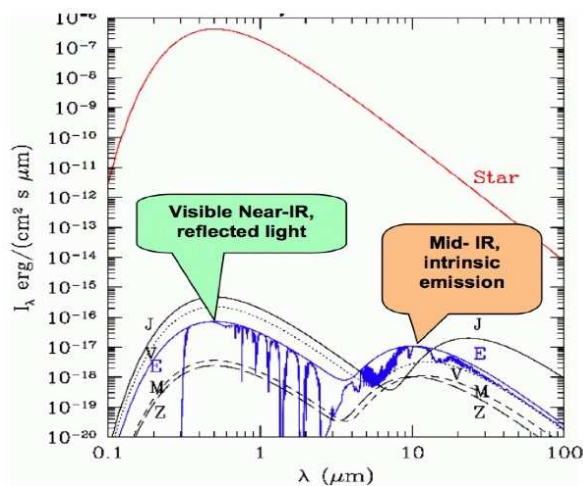


Fig. 2. Diagramme montrant, en fonction de la longueur d'onde, les intensités relatives d'une planète (J:Jupiter, V: Venus, E: Terre, M: Mars, Z: lumière zodiacale) par rapport à l'étoile centrale.

Pour cela, cet instrument sera équipé d'un système d'optique adaptative extrême, système complexe dont les performances ont été poussées au maximum de ce que la technologie est capable de faire. Cet instrument utilise principalement un mode de détection à base de **spectroscopie intégrale de champ** ce qui permet d'obtenir des spectres d'exo-planètes grâce à une méthode de **déconvolution spectrale**.

Les spectres obtenus entre des longueurs d'onde de 0,95 et 1,8 μm permettent d'étudier l'atmosphère des planètes observées en analysant la lumière de l'étoile **réfléchi**e par la planète. De manière directe ou bien grâce à la comparaison avec des modèles physiques, il sera possible de déterminer masse, température, composition et structure atmo-

sphérique. Étant donné les performances d'EPICS, cet instrument caractérisera essentiellement des géantes gazeuses (des "Jupiter") et des géantes glacées (des "Neptune"). Dans le cas probablement rare de conditions très favorables (étoile proche et planète à la fois suffisamment massive et relativement éloignée de son étoile), EPICS pourra même détecter les planètes telluriques les plus grosses appelées "super-Terres" qui sont jusqu'à 2,2 fois plus grosses et 10 fois plus massives que la Terre.

L'instrument METIS observera entre les longueurs d'onde de 2,7 et 13,8 μm . Ce domaine est appelé infrarouge thermique car contrairement aux longueurs d'ondes plus courtes, on détecte la lumière propre émise par l'objet concerné (rayonnement thermique). À ces longueurs d'ondes, le contraste entre étoile et planète n'est "plus" que de l'ordre de 10^5 à 10^7 (figure 3). Les contraintes sur la conception et les choix technologiques d'un instrument sont donc assouplies.

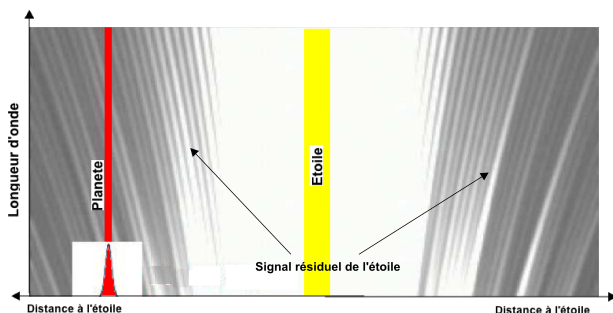


Fig. 3: Schéma illustrant le principe de la déconvolution spectrale. La lumière émise par l'étoile produit des lignes (tavelures) obliques en fonction de la longueur d'onde, la distance d'une tavelure à l'étoile étant proportionnelle à la longueur d'onde. Par contre une planète produira une ligne strictement verticale. Il est donc relativement facile de séparer les deux signaux avec ce mode d'observation.

Cependant, l'observation directe par imagerie reste impossible ; pour atteindre de tels contrastes il faut utiliser un dispositif spécifique. METIS sera équipé de deux dispositifs coronagraphiques qui permettent, un peu à la manière d'un cache, "d'éteindre" partiellement la lumière de l'étoile. Il est alors possible d'observer un objet faible dans son voisinage. Les dispositifs coronagraphiques équipant METIS sont novateurs car ils utilisent une technique de suppression de la lumière de l'étoile par interférences destructrices. Schématiquement, la lumière reçue de l'étoile est séparée en deux parties d'intensités égales. L'onde correspondant à l'une de ces deux composantes est déphasée d'une demi longueur d'onde grâce à un dispositif optique. Elle se recombine ensuite de manière destructive avec l'autre composante. L'avantage sur un simple masque circulaire qui cacherait l'étoile (corono-

graphe de Lyot) est la possibilité d'obtenir de l'information très près de l'étoile. Dans le cas précis de METIS, il sera possible d'observer une planète à une distance angulaire d'environ 0,1 seconde d'arc de son étoile, soit à distance de 1 UA de son étoile pour un système éloigné de 10 parsec. Les performances estimées montrent que METIS pourra observer plusieurs types de planètes :

- des planètes géantes gazeuses de masses comprises entre 2 et 13 masses de Jupiter autour d'étoiles relativement âgées et proches ($d < 20$ parsecs)
- des planètes géantes gazeuses de type Jupiter dans des systèmes relativement jeunes et proches (âge compris entre 10 et 100 millions d'années, $d < 80$ parsecs)
- des géantes gazeuses de 1 à 2 masses Jupiter "chaudes" ou "Pégasi tièdes", très proches de leur étoile (0,1 à 1 UA)

Qu'en est-il des planètes telluriques, probablement plus propices que les planètes géantes gazeuses à héberger la vie ? Même dans le cas des super-Terres les plus grosses, METIS ne sera généralement pas assez sensible pour être capable de les détecter. Cependant il existe une situation particulière où METIS pourrait observer celles-ci relativement facilement. Nous savons aujourd'hui que le système solaire est passé par une phase très chaotique alors qu'il était âgé de 700 à 800 millions d'années. Durant cette phase appelée "Bombardement Tardif Massif", des dizaines de milliers d'objets de taille kilométrique appartenant à la proto-ceinture de Kuiper ont été éjectés de leur orbite lorsque Jupiter et Saturne sont entrés en **résonance orbitale** ([3]). Toutes les planètes du jeune système solaire ont alors subi une véritable "pluie" de **planétésimaux** arrivant avec des vitesses relatives de plusieurs centaines de km/s. C'est notamment lors de cet épisode que les principaux cratères de la Lune ont été formés. À cette époque, la pluie de météores était telle que la croûte terrestre était quasiment en fusion. Si l'on suppose qu'un épisode identique est susceptible de se produire dans des systèmes exo-planétaires, de telles planètes telluriques chauffées au rouge seraient alors facilement détectables par METIS. La probabilité d'observer de tels objets dépendra de la durée du phénomène et du temps de refroidissement des planètes. Les modèles actuels montrent qu'une planète ayant une atmosphère relativement dense se refroidirait en quelques millions d'années ([4]). Dans ces conditions, les

astronomes estiment qu'une dizaine de planètes de ce type pourraient être observées.

Les quelques observations directes que nous avons d'exo-planètes géantes montrent que leurs caractéristiques peuvent être très différentes des planètes de notre système solaire, ce qui témoigne probablement de processus de formation et d'évolution très différents. Récemment, un processus de formation des anneaux de Saturne s'inscrivant lui aussi dans le cadre du "Bombardement Tardif Massif" a été proposé ([5]). Dans ce scénario, les anneaux de Saturne ont été formés lors d'une ou plusieurs collisions titanesques entre des objets provenant de la proto-ceinture de Kuiper et un satellite relativement massif en orbite autour de Saturne, un processus de diffusion visqueuse ayant ensuite étalé la matière sur plusieurs dizaines de milliers de kilomètres pour former les anneaux observés aujourd'hui. Il est permis d'imaginer qu'un tel processus se produise aussi dans le cas d'une super exo-Terre. Nous venons de montrer qu'un tel anneau serait stable sur des échelles de

temps de quelques milliards d'années. Étant donné la surface d'un anneau et les températures de ses particules de poussières plus élevées que celle de la surface planétaire, celui-ci serait aisément détectable en infrarouge thermique à l'aide de METIS.

Conclusions

L'E-ELT sera le plus grand télescope de sa génération. Il permettra sans nul doute à l'astronomie européenne d'accomplir de grandes avancées. Nous sommes encore à l'aube (la découverte de la première exo-planète ne date que de 1995 !) d'une ère où nous allons pouvoir étudier de nouveaux mondes situés au-delà de notre système solaire. Dans ce domaine, l'E-ELT sera un outil de choix. Les toutes premières observations que nous avons pu faire avec les moyens actuels nous ont montré une diversité que nous n'aurions jamais osé espérer. Nul doute que les exo-planètes nous réservent encore de grandes surprises !

Bibliographie

- [1] Udry, S., et al., 2007, "The HARPS search for southern extra-solar planets. XI. Super-Earths (5 and 8 M_T) in a 3-planet system", *Astronomy and Astrophysics*, 469, L43-L47
- [2] Tinetti, J., et al., 2007, "Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet", *Nature*, 448, 169-171
- [3] Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K. & Morbidelli, A., 2005, "Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets." *Nature* 435, 466-469.
- [4] Elkins-Tanton, L. T. , 2008, "Linked magma ocean solidification and atmospheric growth for Earth and Mars", *Earth and Planetary Science Letters*, 271, 181-191.
- [5] Charnoz, S., et al., 2009, "Did Saturn's rings form during the Late Heavy Bombardment?", *Icarus*, 199, 413-428

Lexique

Caractériser une exo-planète: étudier une exo-planète afin d'en obtenir des informations sur sa structure, composition, son mouvement orbital.

Champ de vue: portion du ciel délimitée par le détecteur d'un instrument.

Déconvolution spectrale: pour distinguer la lumière provenant d'une exo-planète "noyée" dans le signal de l'étoile, il est possible de jouer sur la "forme" du signal attendu lorsque l'on observe avec un spectromètre intégral de champ. Le signal dû à l'étoile a une forme oblique (car la distance à l'étoile du signal produit par l'étoile dépend de la longueur d'onde) alors que le signal d'une exo-planète se trouvera à une distance constante (voir figure 3).

Instrument : dispositif optique et électronique attaché à un télescope. On peut faire le parallèle entre un télescope et l'objectif d'un appareil photo ainsi qu'entre un instrument et le boîtier. L'instrument contient l'un des composants les plus importants, le détecteur, qui permet de convertir les photons en signal électrique.

Méthode des vitesses radiales: tout objet, même de relative faible masse, en orbite autour d'un autre objet plus massif provoque un "mouvement réflexe" du dernier (petits cercles ou ellipses). La méthode des vitesses radiales est basée sur la mesure du "mouvement réflexe" de l'étoile dû à une exo-planète, grâce à l'effet Doppler.

Pegasi (ou jupiters chauds) : planètes géantes gazeuses en orbite très proche de leur étoile. Ce nom provient de la première exo-planète découverte de ce type autour de 51 Peg.

Planétésimal: petits corps de tailles 10 à 100 km. Ce sont à la fois les premiers corps massifs à avoir été formés et en même temps les briques de base de la formation des planètes. La ceinture de Kuiper actuelle est un "réservoir fossile" de planétésimaux.

Résonance orbitale (de moyen mouvement): résonance mécanique entre deux corps (planètes) en orbite autour d'un troisième plus massif (une étoile par exemple). Cette résonance se produit lorsque les 3 corps concernés se retrouvent alignés périodiquement. En d'autres termes, pendant un temps donné, l'un des 2 corps accomplit n tours alors que le 2e en fait m (résonance n/m).

Rayonnement thermique : tout corps ayant une température supérieure au zéro absolu émet ce rayonnement. Son intensité et sa distribution spectrale se calculent par la loi de Planck. Un corps humain à 37°C émet la majeure partie de son rayonnement autour de 10 μm .

Spectroscopie intégrale de champ : En principe, un spectre à haute résolution ne peut s'obtenir qu'en plaçant une fente de largeur λ/D (λ longueur d'onde, D diamètre du télescope) ce qui pose un problème pour observer des objets plus étendus spatialement que cette fente. On peut alors balayer avec la fente l'objet mais au prix d'une perte d'efficacité. La spectroscopie intégrale de champ consiste à découper une image en tranches avant d'en disperser la lumière. On obtient alors un spectre de l'objet étendu en tout point du champ de vue.

Table 1 : description des différents instruments actuellement en phase-A d'étude pour l'E-ELT.

Instrument	Type d'instrument	Longueurs d'ondes	Applications scientifiques prioritaires
CODEX	Spectrographe haute résolution et haute stabilité	0,37-0,72 μm	Expansion de l'Univers Matière intergalactique
EAGLE	Spectrographe moyenne résolution, infrarouge proche grand champ	0,8-2,4 μm	Formation des premières galaxies
EPICS	Imageur et spectrographe pour la caractérisation d'exoplanètes	0,8-1,8 μm	Exo-planètes
HARMONI	Spectrographe moyenne résolution intégral de champ	0,8-2,4 μm	AGNs (<i>noyaux actifs de galaxies</i>) Cinématique des galaxies à haut redshift
METIS	Imageur et spectrographe infrarouge thermique	2,7-13,8 μm	Exo-planètes et leur formation Disques circumstellaires
MICADO	Imageur infrarouge proche	0,8-2,4 μm	Trou noir de la Voie Lactée Populations stellaires Formation d'étoiles galaxies proches
OPTIMOS	Spectromètre multi-objets	0,37-1,7 μm	Multi-usages
SIMPLE	Spectromètre haute résolution infrarouge proche	0,8-2,5 μm	Exo-planètes Nucléosynthèse primordiale Enrichissement chimique des galaxies lors de la ré-ionisation