

ceurs actuels et futurs au même niveau que précédemment et nous continuerons à mettre un accent renforcé sur les programmes technologiques et de soutien scientifique.

Pour mémoire, la contribution d'un pays aux activités de l'ESA consiste en une intervention dans les programmes obligatoires (calculée sur la base du Produit Intérieur Brut) et des participations aux programmes optionnels de l'Agence. Pour la période 2006-2010, et dans le cadre d'une enveloppe spatiale constante en volume (quelque 180 millions d'euros), la Belgique investira un montant d'environ 430 millions d'euros dans les nouveaux programmes qui ont été décidés à Berlin. Ce montant vient s'ajouter aux engagements déjà consentis dans le passé (lors de Conseils ministériels de l'ESA à Edinbourg, en 2001 et à Paris, en 2003).

Parmi les engagements importants pris par le Ministre Verwilghen à Berlin, il est à noter la contribution substantielle

additionnelle apportée aux programmes technologiques (GSTP et ARTES) et le programme PRODEX de soutien scientifique, des programmes particulièrement cruciaux pour permettre aux industriels et scientifiques belges de maintenir et développer une expertise de pointe dans le domaine spatial. Le programme d'exploration spatiale (AURORA) et la recherche en microgravité (ELIPS) sont aussi des thèmes qui tiennent à cœur notre pays. Pour ce dernier le Ministre Verwilghen s'est engagé pour un montant de 25,6 millions d'euros (ou 8%) classant ainsi la Belgique dans le top 3 des contributeurs ...

Kris Vanderhauwaert



www.bhrs.be/docum_fr.stm

Les neurosciences spatiales : l'électroencéphalographie dans la navigation virtuelle

par G. Cheron, A. Leroy, A. Bengoetxea, C. De Saedeleer, A. Cebolla, M. Lipshitz, J. McIntyre
Laboratoire de Neurophysiologie et de Biomécanique du Mouvement, Université Libre de Bruxelles

Une meilleure compréhension des mécanismes régissant l'équilibre passe par les études de l'homme en apesanteur

De retour sur terre après un séjour dans l'espace, les cosmonautes se trouvent confrontés à une sensation complexe de déséquilibre ou de vertige. Un faible mouvement de la tête entraîne une sensation de mouvement du corps exagérée, de telle sorte qu'une légère avancée de la tête produit une sensation de chute vers l'avant. De la même manière, une inclinaison faible de la tête d'un côté est perçue comme une déviation importante du corps. De ce fait, les activités journalières habituellement automatiques telles que la marche nécessitent durant cette période de réadaptation une concentration importante. Cet état fragile a été produit par la privation de la force de gravité lors du séjour dans l'espace et s'explique par une altération du système d'équilibre organisé à partir des récepteurs vestibulaires de l'oreille interne. Cet exemple nous montre en guise d'introduction combien notre système nerveux est à la fois sensible aux variations environnementales et robuste dans ses capacités adaptatives.

Des capteurs périphériques au cortex

Les signaux en provenance des canaux semi-circulaires, des yeux et de l'oreille interne sont intégrés au sein de groupes de neurones du cerveau appelés noyaux vestibulaires situés au niveau du tronc cérébral, prolongement de la moelle épinière qui sert de support aux deux hémisphères. A partir de ces noyaux l'information est notamment transmise vers le cervelet (la partie à l'arrière

du tronc cérébral et du cerveau) qui est impliquée dans la planification, la coordination ainsi que dans le contrôle de la posture. Différentes zones du cortex cérébral reçoivent également les signaux vestibulaires.

Référentiel spatial et image dynamique du corps

Les systèmes neuronaux contribuent à produire un référentiel spatial à notre corps. Ce référentiel est essentiel pour le maintien d'une image corporelle dynamique au sein des structures cérébrales. Cette image dynamique se rapporte au concept du schéma corporel mais elle sous-tend l'idée que plusieurs régions du cerveau sont simultanément actives pour assurer une représentation dynamique de la position du corps à partir de laquelle les prises de décision et les actions pourront être accomplies.

Dans ce contexte, l'information relative à la gravité est essentielle et une altération de ces processus neuronaux complexes peut induire des troubles de l'équilibre plus ou moins importants.

Ces troubles de l'équilibre représentent une partie importante des consultations ORL et augmentent avec l'âge du patient.

L'équipe du Professeur Cheron. De gauche à droite: Caty De Saedeleer, Axelle Leroy, Guy Cheron, Ana Bengoetxea, Erwan Busoni, Ana Maria Cebolla, Jaap Spek et Marie-Aurélië Bruno. © P.D.

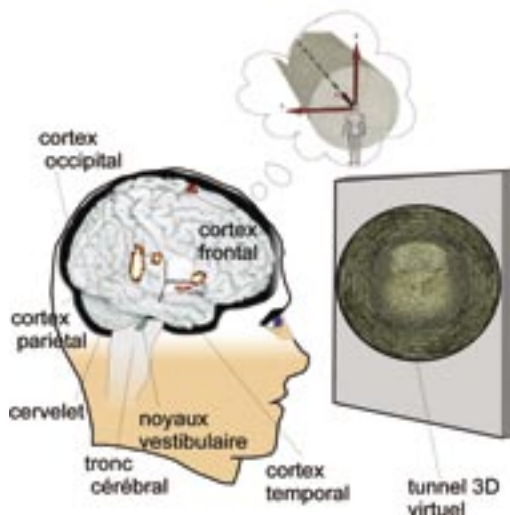


Pour mieux comprendre ces désordres, la Science doit pouvoir disposer d'un modèle expérimental où l'on perturbe de façon réversible le système de l'équilibre. A cet égard les expériences en apesanteur offrent un modèle idéal justifié à la fois par le syndrome de l'adaptation à l'espace rencontré par les cosmonautes et par les troubles divers de l'équilibre dont se plaignent de nombreux patients sur la terre. Des études entreprises dans le cadre de la mission Spacelab (STS-90) (1998) ont notamment permis de mettre en évidence chez les rats des processus de plasticité neuronale au niveau du cortex cérébelleux induit par l'absence de gravité. Cette plasticité neuronale qui permet aux cosmonautes de s'adapter à l'apesanteur se traduit par les modifications structurales des neurones du cervelet qui reçoivent les afférences sensorielles véhiculant les signaux relatifs à la gravité (Holstein et al., 2002). Les principaux neurones du cervelet ont présenté après 16 jours d'apesanteur des modifications structurales significatives ainsi que des signes de dégénérescences importantes.

Ces altérations cérébelleuses peuvent s'expliquer par une excitation trop forte des neurones qui conduit à des mécanismes en cascade pouvant induire des modifications cellulaires, la formation de nouvelles synapses et ou la dégénérescence d'embranchements dendritiques. La plupart de ces modifications sont réversibles et ne sont plus visibles quelques jours après le retour sur terre. Malgré cette réversibilité salutaire, ces altérations cérébelleuses soulèvent le problème des vols de très longue durée. Le cervelet étant de plus en plus considéré comme un organe de coordination majeur non seulement dans le domaine de la motricité mais aussi dans celui du traitement des informations sensorielles et dans la cognition en général.

Les exemples précédents nous montrent que notre équilibre est profondément perturbé lorsque le référentiel gravitaire est modifié et que cette perturbation est non seulement fonctionnelle mais qu'elle se traduit également par des modifications ultra-structurales faisant appel à la machinerie génétique des neurones concernés (Pompiano, 2002).

Illustration très schématisée du cerveau où sont représentées les différentes structures cérébrales impliquées dans l'équilibre et la navigation. L'image du cerveau résulte d'une analyse par résonance magnétique fonctionnelle (Indovina et al 2005) montrant les zones actives (surfaces colorées) lors d'une perception visuelle liée à la gravité. Un réseau complexe incluant différentes zones du cerveau (aire pariétale, temporale, préfrontale et frontale). Le tunnel virtuel utilisé lors des missions Neurocog est représenté en face du sujet évoquant chez celui-ci une sensation réelle de navigation.



De l'équilibre à la cognition : l'émergence des mémoires dynamiques

Si l'exemple de la perturbation du sens de l'équilibre peut paraître évident, on conçoit plus difficilement que l'information gravitationnelle puisse avoir des répercussions sur des fonctions cérébrales plus complexes impliquant des opérations cognitives.

Pourtant, la plupart de nos actions journalières sont planifiées, organisées et contrôlées selon un cadre de référence où la gravité joue un rôle central. L'information gravitationnelle est permanente et elle s'intègre aux autres sources d'informations sensorielles telles que la vision, l'audition et la proprioception. Notre cerveau combine l'ensemble de ces sensations selon des modèles internes réalisés par un véritable encartage dynamique de l'interaction entre notre corps agissant et l'environnement. Grâce à ce système complexe notre cerveau est capable de prédire les événements futurs afin de pouvoir y réagir de façon optimale. Quoique dispersées dans de nombreuses aires neuronales, ces mémoires dynamiques sont en interrelation permanente avec les informations sensorielles. Il s'agit là d'une véritable communication à double sens, les ordres élaborés grâce aux modèles internes dictent à la fois la qualité perceptive nécessaire à l'action et l'action elle-même. Si le concept de modèle interne a été au début élaboré dans le cadre de l'étude de la motricité, il est aujourd'hui applicable à un cadre plus général du fonctionnement cérébral comprenant à la fois la cognition et l'affectivité.

La navigation spatiale en réalité virtuelle

Un des domaines particulièrement propice à l'étude des relations entre action motrice, intégration sensorielle et cognition est celui de la navigation spatiale du corps humain (Berthoz, 2002). Par exemple, lorsque nous nous déplaçons dans une ville inconnue nous pouvons utiliser différentes stratégies pour retrouver notre chemin. Il est possible d'utiliser à la fois des repères géographiques et architecturaux (stratégie de navigation selon les repères), ou utiliser l'information vestibulaire, le sens de position, retenir le nombre et la direction des tournants ou les distances parcourues. Il s'agit là, alors, d'une stratégie d'intégration des chemins.

L'hippocampe, un noyau du cerveau, joue un rôle prédominant dans cette habilité à utiliser ces différentes stratégies de navigation. Cette zone spécialisée du cerveau est également celle qui nous permet de consolider de nouveaux souvenirs (O'Keefe and Nackel, 1978).

Sans cette structure nous devenons incapables de mémoriser de nouveaux événements. Cette zone du cerveau contient des neurones qui ne s'activent que lorsqu'on se trouve dans un endroit bien spécifique (*place cells*). Ces neurones font donc partie d'une véritable carte mentale qui nous permet de naviguer dans notre environnement terrestre.

Un exemple tragique du rôle de l'hippocampe nous est donné chez les patients souffrant de la maladie d'Alzheimer et qui pré-

sentent des dommages importants au niveau du cortex hippocampique. On les voit ainsi souvent au début de la maladie sonner à la porte de leur voisin croyant avec certitude s'adresser à leur propre domicile. Les troubles majeurs de la mémoire spatiale font qu'il n'est pas rare de les voir accomplir des tâches automatisées en des endroits inappropriés (se raser à table lors du déjeuner, par exemple). D'autres types de neurones situés dans le thalamus et le cortex limbique interviennent également dans l'orientation spatiale, ce sont notamment les neurones codant la direction de la tête (Taube, 1998). Ces neurones présentent une préférence pour une orientation horizontale de la tête et joueraient de ce fait le rôle d'« orthogonalisateur » vis-à-vis des « place cells » de l'hippocampe.

L'électroencéphalographie lors de la navigation virtuelle

L'évaluation via l'imagerie fonctionnelle des structures impliquées dans l'adaptation du cerveau en condition d'apesanteur est difficilement envisageable à moyen terme, compte tenu de la masse et du volume que représente une installation d'imagerie fonctionnelle.

La seule voie possible que l'on peut raisonnablement entreprendre chez l'homme réside donc dans l'enregistrement de l'activité électroencéphalographique (EEG) multiple au cours de tâches de navigation virtuelle. C'est ce que nous avons entrepris depuis la mission *Odissea* du vol de Frank De Winne financé par la Politique scientifique fédérale et poursuivis au travers des missions *Cervantes*, *Increment 9*, *10* et *11*. De quoi s'agit-il exactement ? Pour aborder notre expérience, il nous faut d'abord comprendre qu'elle est l'origine de cette activité EEG.

Cette dernière correspond à l'activité électrique du cerveau que l'on peut enregistrer à l'aide d'électrodes de surface placées sur le cuir chevelu. Le signal EEG qui en découle est considéré comme la somme de potentiels électriques produit au voisinage des neurones. Ces courants sont induits par l'activation synaptique des dendrites de nombreux neurones pyramidaux du cortex cérébral. Les neurones du cortex sont le siège d'une activité spontanée placée sous le contrôle de structures plus profondes dont le thalamus qui joue le rôle de véritable chef d'orchestre. Le premier rythme EEG décrit chez l'homme a été le rythme alpha (8-12 Hz) (Berger, 1929). Celui-ci prédomine dans les régions pariéto-occipitales et est surtout présent lorsque le sujet est au repos les yeux fermés. H. Berger fut le premier à montrer que l'ouverture des yeux à elle seule est capable de désynchroniser le rythme alpha. La désynchronisation est le nom donné à l'atténuation d'amplitude ou au blocage des composantes rythmiques de l'EEG. Ce rythme de repos est donc fortement influencé par les influx visuels.

Cette simple constatation a ouvert la porte à l'analyse des interactions entre activités corticales spontanées et activités induites par les fibres afférentes véhiculant vers le cortex des informations d'origines diverses.



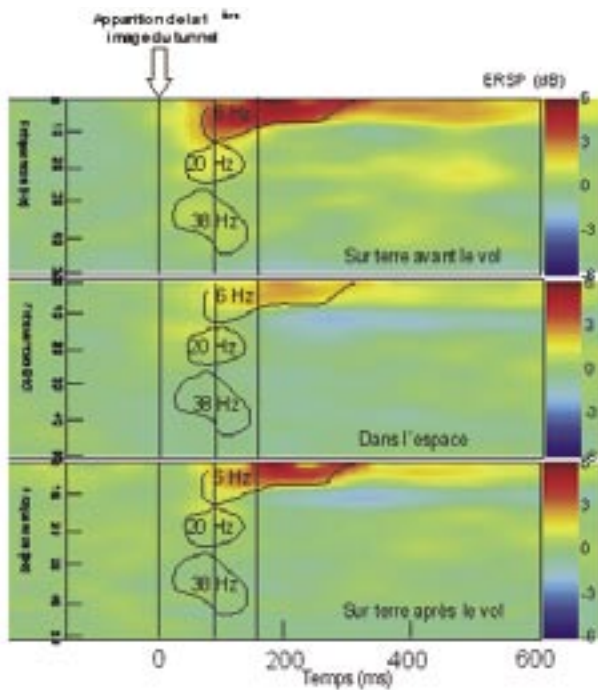
Cependant, le domaine de l'EEG quoique intensément utilisé en neurologie et en psychiatrie est resté longtemps en léthargie en ce qui concerne son utilisation dans les sciences cognitives et comportementales. Cela résultait du fait que les ondes aisément reconnaissables n'apparaissaient qu'au repos (onde alpha) ou durant le sommeil (onde delta) et que lors de l'éveil ces ondes faisaient place à une activité de faible amplitude et désynchronisée.

L'apparence d'une relation inverse entre une activité consciente ou cognitive et l'amplitude des rythmes cérébraux a été renforcée par la prédominance de certaines oscillations dans l'épilepsie et l'anesthésie, deux états associés à la perte de conscience (Stéride, 2001).

La résurgence récente de l'intérêt porté aux ondes EEG et aux oscillations cérébrales en général s'explique par le développement des connaissances fondamentales en neurosciences. Les ondes recueillies à la surface du cerveau sont non seulement décrites comme par le passé mais elles peuvent être aujourd'hui quantifiées et interprétées sur la base de l'enregistrement des différents types de populations neuronales sous-jacentes (Whittington and Traub, 2003). On a pu démontrer par exemple que les activités oscillantes des assemblées neuronales impliquées dans le sommeil pouvaient être dépendantes des expériences vécues durant l'état d'éveil (Wilson and Mc Naughton, 1994). L'activité synchrone de réseaux de neurones oscillants est aujourd'hui considérée comme une étape fondamentale reliant l'activité des neurones isolés au comportement global de l'individu. Le nouveau champ émergent des oscillations neuronales a véritablement créé une plateforme multidisciplinaire incluant la psychophysique, la psychologie cognitive, la biophysique, les neurosciences, la modélisation, la physique, les mathématiques et la philosophie (Buzaki and Draguhn, 2004).

L'élément clé des oscillations cérébrales réside dans le processus de synchronie. Les neurones en interaction par l'intermédiaire des connections synaptiques ajustent la fréquence de leur battements pour être en phase les uns avec les autres. Différents types de circuits neuronaux sont prédisposés pour générer une activité rythmique. Dans une tâche de navigation plusieurs types d'information doivent s'intégrer pour permettre une perception, une anticipation et une action optimale. Chaque étape dans le processus de navigation devrait en toute logique s'accompagner d'activités neuronales synchrones oscillant à des fréquences

Cette photo représente Frank De Winne réalisant la tâche de navigation virtuelle, il est en position de vol libre dans l'ISS et le cosmonaute russe Sergei Zalotine surveille le déroulement de l'expérience.



Analyse spectrale de l'EEG

tion de rythme plus rapide de type *gamma* au niveau des régions frontales. Les oscillations EEG peuvent donc en fonction des événements augmenter ou diminuer leur puissance spectrale mais elles peuvent aussi se resynchroniser par rapport à ces mêmes événements.

L'originalité de notre approche de l'activité EEG en relation à la navigation virtuelle, qui a débuté par le vol de Frank De Winne, consiste à enregistrer ces ondes cérébrales durant différentes tâches de navigation. Le cosmonaute perçoit, au travers d'un masque cylindrique adapté à l'écran d'un ordinateur portable et fixé à sa tête, une série d'images animées mimant une navigation dans un tunnel tridimensionnel et décrivant des virages de différents angles allant vers le haut, le bas, la gauche et la droite.

A la fin de chaque navigation le sujet doit reconstruire le plus fidèlement possible sur une maquette le trajet parcouru. Une analyse psychophysique de la tâche de navigation mise au point au Collège de France à Paris (Professeur A. Berthoz) et à l'Académie des Sciences de Moscou (Dr M. Lipshitz) permet d'élaborer un score de reproductibilité du trajet tenant compte des erreurs de retranscription des angles de rotation perçus lors de la navigation virtuelle.

Une des premières analyses concerne l'étude de l'EEG à la présentation de la première image du tunnel. Les résultats abordés dans la figure 3 montrent une diminution nette de l'amplitude à certaines fréquences notamment au niveau des oscillations *théta* (3-7 Hz). Sur terre, dès la perception de l'image du tunnel virtuel, la puissance spectrale du rythme *théta* augmente pour atteindre sa valeur maximale autour de 100 à 170 ms. Par contre, en apesanteur cette augmentation est fortement diminuée, ce qui indique l'existence d'une perturbation cérébrale liée à la perception visuelle de l'environnement.

spécifiques. Nous pensons que cette véritable synchronie est influencée par la loi de gravitation devenue celle de la pesanteur. C'est en effet cette loi qui sur le plan macroscopique retient autour de la planète l'air que nous respirons. Elle s'insinue dans l'intimité de nos cellules et elle influence fort probablement le fonctionnement de notre cerveau.

Aborder cette problématique par l'analyse des oscillations cérébrales nous semble judicieux car ces ondes peuvent être influencées à la fois par les mécanismes neuronaux intrinsèques et par les mécanismes de réseaux eux-mêmes dépendants de la biochimie du cerveau.

Si chaque état cérébral s'accompagne d'activités oscillantes spécifiques, les événements particuliers tels qu'une stimulation visuelle, une tâche de mémorisation ou de navigation induisent des activités oscillantes transitoires.

La survenue de ces événements peut supprimer ou désynchroniser une activité oscillante de repos tel que le rythme *mu* enregistré sur le cortex sensori-moteur et déclencher l'appari-

Gaia devrait être lancé en 2011 par une fusée Soyuz Fregat, et tout au long de sa mission de 5 ans, observera une centaine de fois chacune parmi le milliard d'étoiles qu'il cartographiera. Il en résultera une estimation de la distance et du mouvement de l'étoile, ainsi que de son éclat. Il devrait permettre de découvrir des milliers de nouvelles exoplanètes et naines brunes.
© ESA, Medialab



Pour que l'homme puisse réaliser dans un futur proche des vols de longue durée comme vers la planète Mars, par exemple, il sera indispensable de mieux comprendre l'influence de l'apesanteur sur le cerveau en général et sur les fonctions cognitives en particulier. Comme nous venons de le voir, les neurosciences cognitives disposent aujourd'hui de nouveaux outils d'investigation et de bases théoriques fondamentales pour espérer

déchiffrer dans les oscillations cérébrales de l'EEG l'influence de la pesanteur sur les fonctions cognitives humaines.

L'absence de pesanteur représente donc un cas unique où l'on peut comprendre comment une force de contrainte fondamentale de la vie sur terre est intégrée dans l'ensemble du fonctionnement cérébral.

L'astrométrie spatiale au service de l'exobiologie : le cas des exoplanètes

par A. Jorissen (ajoriss@ulb.ac.be) et D. Pourbaix (dpourbai@ulb.ac.be)
FNRS, Université Libre de Bruxelles

En science, les sentiers de la découverte sont rarement rectilignes. Mayor et Queloz, qui découvrirent la première exoplanète en octobre 1995, traquaient en fait les naines brunes. Bradley découvrit en 1729 l'aberration annuelle alors qu'il traquait les parallaxes stellaires annuelles. Le satellite Gaia, pierre angulaire du programme astronomique de l'Agence Spatiale Européenne (lancement prévu en 2011), traquera les mouvements stellaires dans la Galaxie, afin de mieux comprendre la dynamique qui anime celle-ci, mais Gaia récoltera vraisemblablement une imposante moisson d'exoplanètes. L'Institut d'Astronomie et d'Astrophysique de l'ULB (IAA-ULB) jouera un rôle essentiel dans la préparation de cette moisson, puisque D. Pourbaix se trouve à la tête de l'Unité de Coordination 4 du Consortium Gaia de traitement de données et d'analyse. Cette Unité est chargée de modéliser les observations astrométriques, photométriques et spectroscopiques de tout objet non simple, et en particulier de fournir les éléments orbitaux de systèmes binaires ou multiples.

Gaia offrira des potentialités inégalées en termes d'étude statistique des propriétés des exoplanètes : parmi les étoiles de type solaire à moins de 200 pc du Soleil, Gaia devrait détecter plus de 2000 exoplanètes de type Jupiter, avec des séparations orbitales comprises entre 0.1 et 10 unités astronomiques, et leur déterminer une orbite astrométrique fiable. Des planètes de la masse d'Uranus seront détectables à condition qu'elles orbitent entre 2 et une centaine d'unités astronomiques de leur étoile-hôte. Le recensement des exoplanètes autour des étoiles proches effectué par Gaia pavera de surcroît la route de la sélection des cibles pour la mission DARWIN, à la recherche de planètes telluriques présentant la signature spectrale de photosynthèse végétale à travers de bandes d'ozone. De telles exoplanètes devraient en effet être recherchées autour d'étoiles de type solaire possédant des planètes géantes orbitant à plus de 3 unités astronomiques, protégeant ainsi les planètes telluriques d'impacts cométaires déstabilisant l'évolution des espèces vivantes. La détection de systèmes à plusieurs planètes est également importante dans ce

contexte, puisqu'elle permet de se livrer à une analyse de la zone de stabilité des planètes telluriques dans de tels systèmes. En outre, les propriétés des systèmes multi-planétaires permettront de répondre à la très ancienne question de l'origine de la relation de Titius-Bode, qui met en évidence une régularité dans les rayons orbitaux des différentes planètes du système solaire : faut-il y voir le simple fait du hasard, ou cache-t-elle un processus physique sous-jacent?

Par ailleurs, les capacités photométriques de Gaia permettront de caractériser la métallicité des étoiles abritant des exoplanètes, et par conséquent de préciser la relation qui semble exister entre celle-ci et la probabilité de présence d'une exoplanète.

Les propriétés statistiques des orbites, et en particulier la distribution des masses des exoplanètes, pourront donc être analysées sur l'échantillon très vaste fourni par Gaia. Environ 170 exoplanètes sont connues à ce jour, avec des masses (minimales) de l'ordre de 0.05 à 10 fois la masse de Jupiter. Les propriétés de ces objets ont soulevé de nouvelles interrogations, puisque plusieurs de ces objets (les « Jupiters chauds », en orbite très rapprochée autour de l'étoile-hôte) ne cadrent pas dans les théories traditionnelles de



Mouvement apparent sur le ciel d'une étoile de la masse du Soleil située à 50 parsecs (soit environ 160 années-lumière), possédant un mouvement propre de 50 millièmes de secondes d'arc par an, et entourée d'une planète de 15 fois la masse de Jupiter séparée de son étoile par une distance de 0.6 unité astronomique. Le trait vert représente l'effet parallactique causé par le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil. Le trait rouge représente le mouvement apparent global, y compris l'effet de la perturbation planétaire, grossie 30 fois. La photographie du fond de ciel (Crédit: European Southern Observatory) n'est pas à la même échelle.